

L'amélioration de l'alimentation hydrique par des techniques culturales liées à l'interaction eau/fertilisation azotée

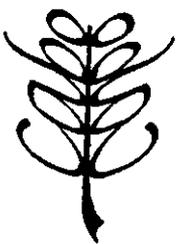
Rapport final

N° TS2-0010-NL(GDF)

CABO Rapport N° 117

N. van Duivenbooden¹⁾ & L. Cissé²⁾

Mai 1989



¹⁾ Centre de Recherches Agrobiologiques (CABO)

B.P. 14, 6700 AA Wageningen, les Pays-Bas

²⁾ Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA)

CNRA Bambey, B.P. 53, Bambey, Sénégal

7.11.272068

... ..

... ..

... ..

A. Présentation générale du projet

Le programme de recherche, réalisé dans le cadre du réseau R3S (programme fédérateur parcelle, thème II, intitulé: "Amélioration de l'alimentation hydrique et minérale par des techniques culturales en zone Soudano-sahélienne"), est l'émanation des propositions de plusieurs pays de l'Afrique de l'Ouest concernés par la sécheresse: le Sénégal, le Mali, le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire, le Tchad, ainsi que de plusieurs Universités ou organismes scientifiques européens qui se proposent de réaliser, en collaboration, ce programme. Il s'agit, pour les partenaires européens de la France (CIRAD, Montpellier; IMG, Grenoble), de l'Allemagne (Université de Hohenheim) et des Pays-Bas (CABO). Une coopération étroite entre la Communauté Européenne et plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest devrait donc voir le jour à travers ce réseau de recherche sur un thème précis.

Dans ce cadre un projet de recherche coopérative a été entamé par l'ISRA et le CABO, intitulé: "Amélioration de l'alimentation hydrique par des techniques culturales liées à l'interaction eau/fertilisation azotée" (No TS2-0010-NL(GDF)). Ce projet d'une durée d'une année a commencé en février 1988. Le programme de recherche développé a les objectifs suivants:

1. Quantifier d'une part l'effet de l'humidité du sol sur la disponibilité de l'azote et d'autre part les effets de ces deux facteurs sur la production végétale;
2. Etudier de façon approfondie les relations entre la disponibilité en eau et celle en azote du sol;
3. Développer et améliorer un modèle mathématique de simulation de la croissance du mil en fonction de la quantité d'eau et d'azote mobilisable par la culture.

Le document présent est le rapport final présentant les activités entreprises pendant la période du projet.

1870
1871
1872

1873
1874
1875
1876
1877
1878
1879
1880

1881
1882
1883
1884
1885
1886
1887
1888

1889
1890
1891
1892
1893
1894
1895
1896

1897
1898
1899
1900
1901
1902
1903
1904

1905
1906
1907
1908
1909
1910
1911
1912

B. Programme du projet

Le programme de recherche compose de deux types d'activités:

B.1. Développement d'un modèle mathématique de simulation.

Le modèle à développer devra décrire quantitativement la croissance de la culture de mil en relation avec la disponibilité d'eau et d'azote, et leurs interactions. Le développement du modèle a été fait presque entièrement au CABO (Pays-Bas). Le modèle de simulation a été installé sur deux micro-ordinateurs disponible (IBM-XT et Televideo) au CNRA de Bambey (Sénégal).

B.2. Calibrage et validation du modèle de simulation.

Le modèle de simulation sera calibré et validé à partir des mesures et observations faites au terrain. Les dispositifs expérimentaux sont mis en place à la station de Nioro du Rip (Sénégal) (Annexe II: Plan de Travail).

Le calendrier de travail est ci-dessous donné:

Février/Mars 1988	Phase préparatoire pour les expérimentations au terrain; développement du modèle de simulation;
Avril/Octobre 1988	Expérimentations au terrain; modifications et adaptations du modèle de simulation;
Novembre/Décembre 1988	Analyse des données expérimentales; test et adaptations du modèle de simulation;
Janvier 1989	Préparation du rapport final.

C. Situation d'exécution du projet

C.1. Personnel

Pour la réalisation de ce programme le CABO a engagé un chercheur pour une année: Niek van Duivenbooden. Il participera au développement du modèle de simulation, sous la supervision de H. van Keulen, H. Breman et N. de Ridder du CABO. Une assistance générale a été donnée par W. Stol et P.W.J. Uithol du CABO.

Pendant la période du 26 Avril au 7 Décembre Niek van Duivenbooden a séjourné à CNRA de Bambey (Sénégal) pour être associé, sous la supervision de L. Cissé, aux expérimentations à mener. Aussi il a participé à la mise en place des dispositifs expérimentaux, aux suivis des essais et au travail de laboratoire, notamment à l'analyse de l'azote minéral du sol.

Du côté de l'ISRA, en plus de L. Cissé responsable du projet, M. Moussa N'Doye, M. Goudiaby, M.K. Thiao et M. A. Cissokho, respectivement technicien supérieur, observateur et agent de maîtrise ont participé à la réalisation des travaux au champ et au laboratoire.

C.2. Développement du modèle de simulation

En Février et Mars 1988 un modèle préliminaire a été développé au CABO. Celui-ci est une adaptation du modèle développé par Van Kraalingen & Van Keulen (1988). En Décembre 1988 et Janvier 1989 le modèle de simulation a été adapté au CABO, il est maintenant possible de le tourner pour une estimation de la production potentielle et de la production limitée par l'eau. Malheureusement il reste encore du travail à faire pour l'établissement du bilan d'azote.

La conception de la structure de ce modèle repose sur le fait que l'environnement dans lequel la culture du mil se développe est pris en compte et décrit quantitativement. Cette description est faite à l'aide des données bibliographiques et des expérimentations au terrain.

Les processus de base du modèle sont organisés en sous-routines. La structure du modèle est présentée schématiquement au Tableau 4.1.

Le modèle de simulation est écrit en langue de programmation Standard-Fortran-77, aussi son utilisation sur des micro-ordinateurs différents est possible. Le compilateur Fortran utilisé est Microsoft-Fortran, version 4.01, 1987 (Microsoft, 1987).

C.3. Installation du modèle de simulation

Le modèle préliminaire a été installé sur l'IBM-XT et le Télévideo (IBM compatible) au CNRA de Bambey. Cependant l'installation du programme pour détecter les erreurs ("debugger") n'était pas possible.

C.4. Calibrage et validation du modèle

Une liste des données météorologiques, et des caractéristiques du sol et de la plante nécessaires pour le modèle est donnée au Tableau 4.2. Ces paramètres sont obtenus pendant la saison de pluies 1988 et/ou tirés de la bibliographie.

Les éléments d'un protocole expérimental qui doivent être connus à tous les dispositifs à installer dans les pays africains participant au réseau ont été discutés pendant la réunion de R3S au Montpellier en Février 1988, à laquelle L. Cissé et N. de Ridder ont participé. Le protocole expérimental définitif du projet ISRA-CABO a été établi lors d'une visite de N. de Ridder au CNRA de Bambey (Février 1988). Ce protocole est présenté dans le plan de travail (Annexe 2).

C.5. Missions de travail

En plus des missions prévues pendant le premier semestre (N. de Ridder en Février et H. Breman en Juin), une mission de travail a été effectuée par H. van Keulen, sous-chef du département de la Recherche des Systèmes Agricoles du CABO, à la fin de Juin, pour discuter entre autres des adaptations à faire sur le modèle de simulation.

Dans le deuxième semestre du projet une mission de F.N. Reyniers (IRAT/CIRAD, chef programme du R3S) a été effectuée au Sénégal. Une deuxième de L. Cissé a été effectuée à Wageningen (Février 1989) pour la rédaction du rapport final.

N. van Duivenbooden a participé à la réunion du R3S à Bouaké (Côte d'Ivoire) entre le 25 et 28 Avril 1989 pour présenter les résultats de l'année 1988 et discuter des programmes de travail pour l'année suivante.

D. Rapport scientifique

Introduction

L'agriculture dans les pays sahéliens rencontre de plus en plus de difficultés pour nourrir et assurer une existence satisfaisante aux populations de la zone. Beaucoup de travaux de recherche sont encore consacrés à l'intensification de l'agriculture pluviale. Dans cette optique la disponibilité des éléments nutritifs, en particulier l'azote et le phosphore, occupe une place importante. Ces éléments constituent souvent des facteurs limitants pour la production végétale. Les expériences nombreuses réalisées par l'IRAT, l'ICRISAT et les organismes de recherches nationaux ont mis en évidence cet aspect. En utilisant des modèles mathématiques de simulation, validés et vérifiés par des expériences au terrain, van Keulen (1975) et Penning de Vries & Djitèye (1982) sont arrivés à la même conclusion. Avec des modèles on peut estimer la production potentielle en se basant sur les données météorologiques, les caractéristiques des sols et des cultures. La production potentielle est définie comme la production possible en supposant que les éléments nutritifs et l'eau ne sont pas limitants. Les modèles, qui décrivent quantitativement la production réelle, sont moins développés (van Keulen *et al.*, 1986). La description quantitative de la dynamique des bilans d'azote et de phosphore est encore moins précise, parce que les processus en jeu sont moins bien compris et les interactions entre la disponibilité de l'eau et celle des éléments nutritifs ne sont pas bien établies. Par ailleurs il est très difficile d'interpréter de manière satisfaisante les données expérimentales disponibles sans la connaissance des mécanismes en jeu.

Le Centre de Recherches Agrobiologiques (CABO) de Wageningen (Pays-Bas) accorde ainsi une grande priorité pour ces recherches de base, aussi bien dans la zone tempérée qu'en zone semi-aride tropicale, ces travaux ont permis le développement de modèles de simulation de la croissance du mil (Jansen & Gosseye, 1986; van Kraalingen & van Keulen, 1988). L'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) (Sénégal) a également réalisé de nombreux travaux portant sur la connaissance de certains mécanismes et sur les facteurs prépondérants d'élaboration des rendements des cultures. Parmi ceux-ci on peut citer Feller *et al.* (1981a; 1981b); Feller & Ganry (1982); Cissé (1986; 1988) et Cissé & Vachaud (1987; 1988). Pour poursuivre et développer ces recherches l'ISRA et le CABO ont initié dans le cadre du Réseau de Recherche sur la Résistance à la Sécheresse financé par la CEE, un programme de recherches en 1988 ayant pour objectifs principaux:

1. De quantifier d'une part l'effet de l'humidité du sol sur la disponibilité de l'azote et d'autre part les effets de ces deux facteurs sur la production du mil;
2. D'étudier de façon approfondie les relations entre les disponibilités en eau et celles en azote du sol;
3. D'améliorer le modèle mathématique de simulation de la croissance du mil en fonction de la quantité d'azote et d'eau mobilisable par la culture.

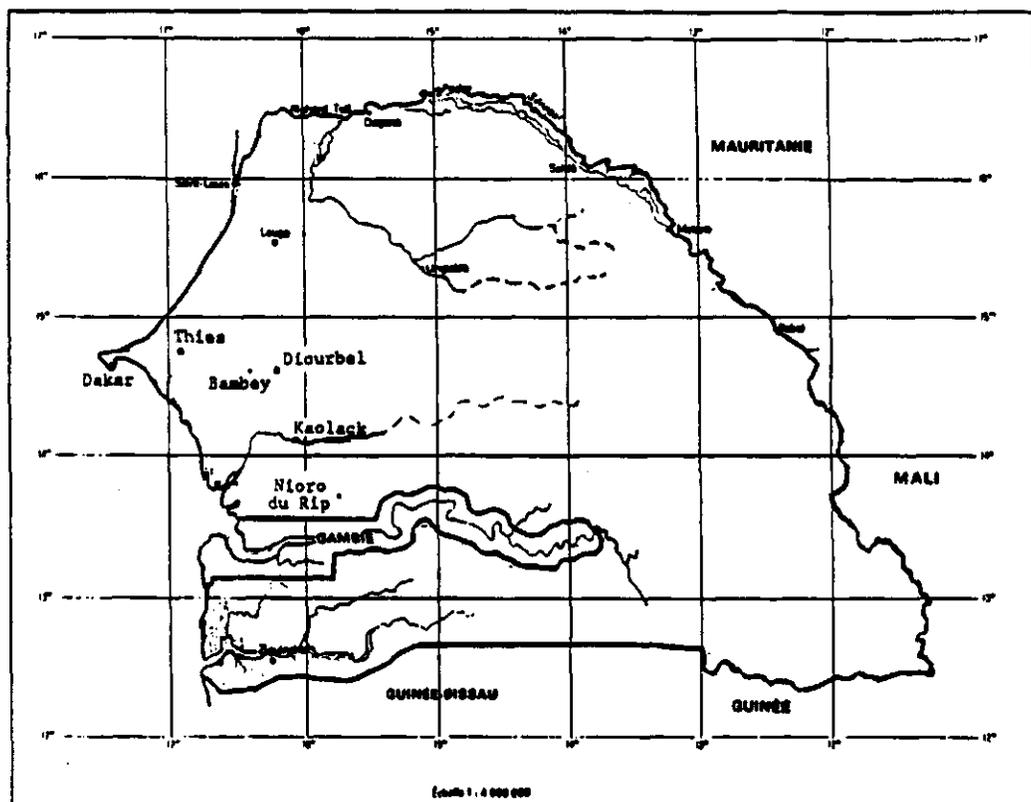


Figure 1. Implantation géographique du CNRA, Bambe et la station Nioro du Rip.

Ces recherches ont été conduites au CABO (Wageningen, Pays-Bas), au CNRA de Bambe et à la station expérimentale de Nioro du Rip (Sénégal; Figure 1).

Le climat du Sénégal, comme celui de toute la zone tropicale sèche ouest africaine, est caractérisé par une opposition tranchée entre une longue saison sèche pendant laquelle la pluviométrie est nulle, et une saison des pluies dont la durée varie entre 3 et 5 mois. La pluviométrie annuelle moyenne totale (1931-1975) passe de 300 à 1500 mm du Nord au Sud du pays (Figure 2), mais ces moyennes pluviométriques ont évolué vers la baisse au cours de ces dernières années. La saison des pluies commence généralement en Juin ou en Juillet. A l'intérieur d'une zone de même moyenne pluviométrique annuelle on enregistre une grande variabilité de pluviométrie. A titre d'exemple pour la zone à pluviométrie annuelle de 500 mm environ, les quantités d'eau tombées au mois d'Août peuvent varier de 40% et celles de Juillet et Octobre de 80 à 100% (Dancette, 1976). Pendant la saison des pluies, la demande évaporatoire d'origine climatique (évaporation bac) passe en moyenne de $3,5 \text{ mm j}^{-1}$ au Sud à $5,2 \text{ mm j}^{-1}$ au Nord (Dancette, 1976). Ces variations d'évaporation correspondent à une augmentation des conditions d'aridité vers le Nord.

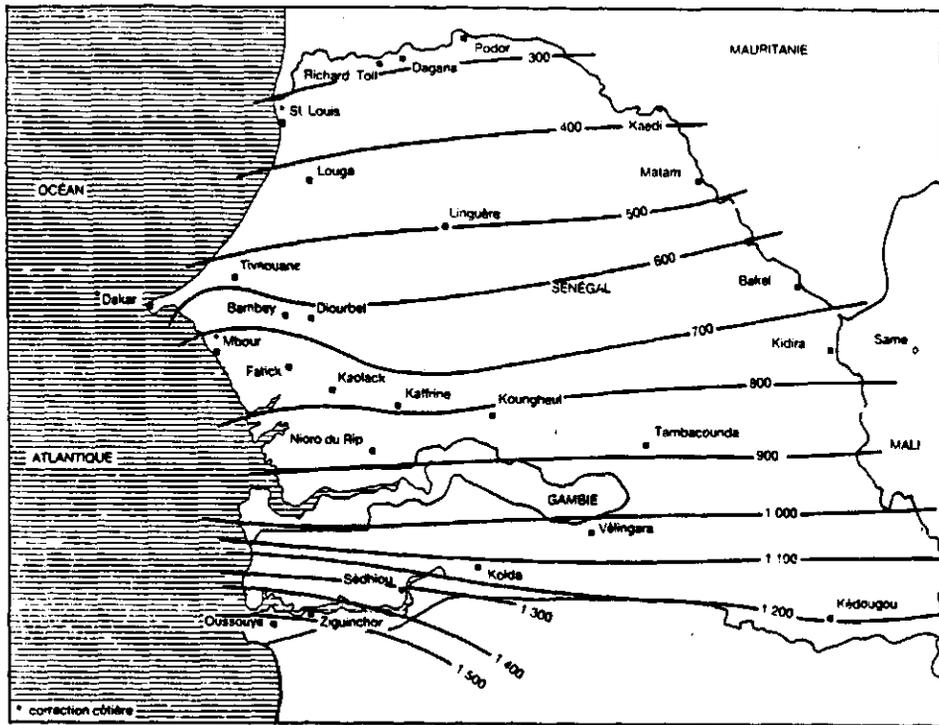


Figure 2. Pluviométrie (mm) de Juin à Octobre au Sénégal au cours de la période 1931-1975. Calculs effectués à partir des données brutes de la météorologie nationale (listing "hydrologie ORSTOM") (Dancette, 1983)

1. Présentation de l'expérimentation

1.1. Dispositif expérimental

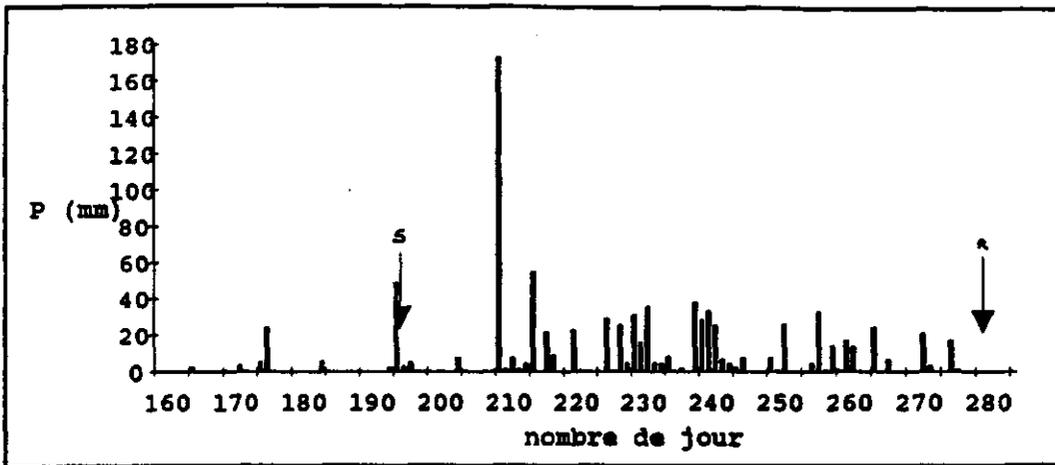
Le dispositif expérimental est mis en place à la station de Nioro du Rip (Figure 1). La pluviométrie à Nioro du Rip est en moyenne de 674 mm par an (1968-1988) (Tableau 1.1), mais cette année elle s'est élevée à 917 mm (Tableau 1.2; Figure 1.1).

Tableau 1.1. Nombre des jours de pluie (JDP) et pluviométrie totale (P, mm) à Nioro du Rip pendant deux périodes (ISRA, Service de Bioclimatologie).

	JDP	P		JDP	P
1968	46	494	1976	52	757
1969	67	1000	1977	36	515
1970	48	596	1978	53	702
1971	52	738	1979	52	822
1972	38	494	1980	38	520
1973	41	577	1981	54	778
1974	48	530	1982	50	542
1975	57	1016	1983	46	418
			1984	49	540
			1985	57	512
			1986	46	795
			1987	54	900
			1988	60	917
moyenne	50	681		50	671
s. d.	9	216		7	169

Tableau 1.2. Pluviométrie pentadaire à Nioro du Rip en 1988 (ISRA, Service de Bioclimatologie).

	1	2	3	4	5	6	Total
Mai	0	0	0	0	0	4,5	4,5
Juin	0	0	2,4	4,1	30,1	0	36,6
Juillet	5,5	0	64,5	0	8,0	185,2	263,2
Août	89,5	22,7	55,0	92,4	14,4	136,1	410,1
Septembre	10,3	34,5	52,7	32,0	30,5	24,1	184,1
Octobre	18,2	0,3	0	0	0	0	18,5
total							917,0



Figur 1.1. La distribution des pluies pendant la saison 1988; S = semis et R = récolte.

Le sol est de type ferrugineux tropical lessivé, jaune rouge colluvial sans tâches ni concrétions (Pieri, 1969) et présentant une cuirasse profonde mais qui par endroit peut se situer à 3 m environ. Les caractéristiques granulométriques du sol étudié sont présentées au Tableau 1.3. L'analyse de celles-ci montre:

- Un accroissement systématique de la texture selon la diagonale Sud-Ouest;
- Une variation très marquée de la texture dans la couche 0-0,8 m alors qu'au delà ce paramètre reste constant;
- Que la densité croît fortement en surface, mais reste remarquablement constante (et très peu variable spatialement) autour de 1,44 au-delà de 0,6 m (Tableau 5.2.1).

Tableau 1.3. Caractéristiques granulométriques du sol (en pourcentage de la masse totale sèche) de 4 horizons (m), taille en μ .

	taille	0,00-0,25	0,25-0,50	0,50-0,75	0,75-1,00
argile	(< 2)	5,0 ± 1,0	8,8 ± 1,5	12,4 ± 1,9	14,5 ± 2,1
limon	(2-20)	2,5 ± 0,5	4,4 ± 0,7	6,1 ± 0,9	7,0 ± 1,0
sable fin	(20-100)	8,7 ± 1,9	8,3 ± 2,0	8,3 ± 2,0	8,0 ± 1,7
sable moyen	(100-200)	49,9 ± 3,7	46,3 ± 3,6	41,9 ± 3,9	39,7 ± 3,4
sable grossier	(200-2000)	33,0 ± 4,7	31,7 ± 4,6	30,9 ± 4,5	30,7 ± 3,9

Le dispositif expérimental est constitué de deux séries cultivées en rotation mil-arachide de dimensions respectives 80 x 39 m. Ces séries sont séparées par une allée centrale de 7 m de large et de 80 m de long.

Sur ces deux séries des "cultures d'homogénéisation", de mil (avec une fertilisation de 150 kg ha⁻¹ de 14-7-7 et 100 kg ha⁻¹ de N-urée) et d'arachide ont été faites en 1987.

Quatre traitements constitués de bandes de 8 m de large et de 80 m de long (Figure 1.2) ont été mis en place dans chacune des deux séries en 1988. Ces traitements sont:

1. Témoin absolu (T0);
2. Labour + fertilisation minérale (T1);
3. Labour + matière organique (T2);
4. Labour + matière organique + fertilisation minérale (T3).

Le dispositif en bandes a été choisi suite à la caractérisation spatiale de certains paramètres du sol et des rendements des cultures qui ont été effectuées en 1987. Cette caractérisation a montré une structure spatiale du taux d'argile et limon et du stock hydrique du sol sur un mètre (Cissé & Vachaud, 1989). L'existence de cette structure spatiale exige, pour avoir des mesures indépendantes du stock hydrique du sol d'installer des sites de mesures de la teneur en eau du sol distants au moins de 20 mètres dans le sens Ouest-Est.

Malheureusement le T0 a été labouré par une erreur des travailleurs de la station de Nioro du Rip.

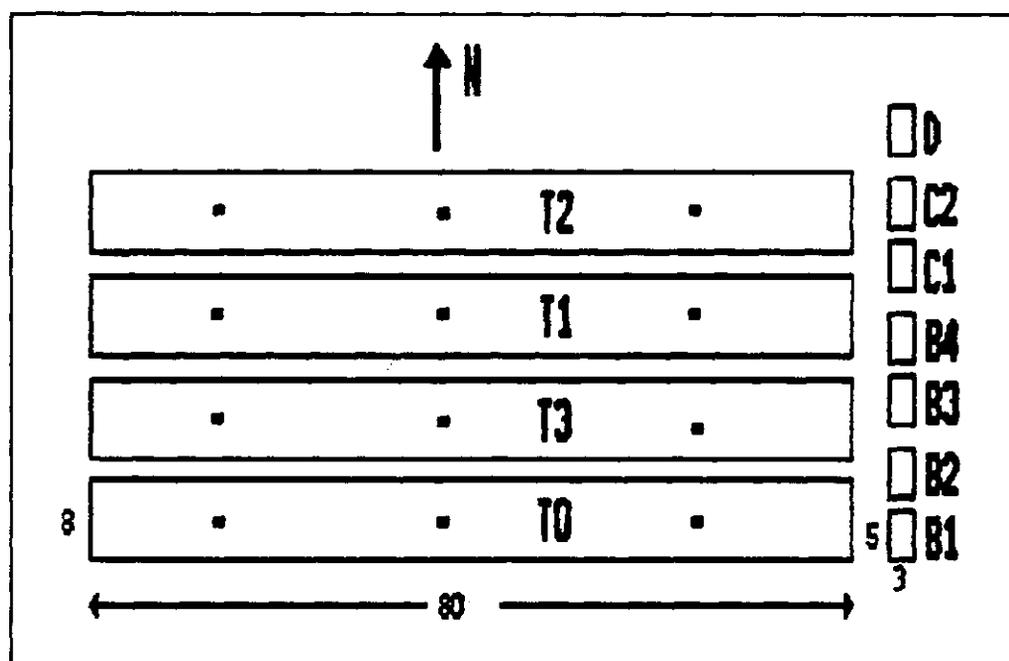


Figure 1.2. Le dispositif des expérimentations (Nioro du Rip, 1988). T0: témoin absolu; T1: labour + fumier; T2: labour + fumure minérale; T3: labour + fumure minérale + fumier; B1: paille sans irrigation; B2: fumier sans irrigation; B3: paille avec irrigation; B4: fumier avec irrigation; C1: labour; C2: labour + fumure minérale + fumier; D: absorption potentielle de N et de P; • = tube neutronique.

Chacun des traitements est instrumenté en tubes d'accès pour humidimètre à neutrons installés à 15 m, 40 m et 70 m dans le sens Ouest-Est (Figure 1.2). Pour la série cultivée en mil et pour les traitements T0, T2 et T3, sont installés autour de chacun des tubes d'accès pour l'humidimètre à neutrons:

- Deux tensiomètres à mercure aux côtes $Z = 170$ et $Z = 190$ cm pour encadrer la côte 180 cm prise comme côte de référence pour le calcul des pertes hydriques et minérales par transfert au-delà de la zone d'activité racinaire du mil;
- Deux cellules de prélèvement de solution du sol à la côte $Z = 180$ cm.

A côté de ce dispositif principal sept parcelles de dimensions 3 x 5 m sont mises en place (ils ont été labourées le 5 Juin) (Figure 1.2) pour:

- suivre et étudier la décomposition et la minéralisation de la matière organique enfouie dans le sol (parcelles B1-B4);
- faire des mesures et des observations additionnelles sur le mil sous les deux traitements: témoin absolu (C1) et labour + matière organique + fertilisation minérale (C2);
- mesurer les disponibilités potentielles en azote et en phosphore pendant la saison des pluies (parcelle D).

Comme forme de matière organique on a utilisé du fumier en provenance de l'étable de la station de Nioro. Les caractéristiques chimiques du fumier et les quantités apportées au champ sont présentées respectivement aux Tableaux 1.4 et 1.5.

Tableau 1.4. Caractéristiques chimiques de la matière organique apportée aux champs en 1988 (Ce-tot = cendres totales, Ce-ins = cendres insolubles).

C	N	C/N	P	K	Ca	Mg	Ce-tot	Ce-ins
33,5	1,88	18	0,323	1,775	1,600	0,672	44,28	25,51

Tableau 1.5. Formules et doses d'engrais et de fumier sur les parcelles à Nioro du Rip en 1988.

formule	dose (kg ha ⁻¹)	T-parcelles (kg)	C2-parcelle (kg)
NPK (10-21-21)	150	9,6	0,225
urée (démariage)	50	3,2	0,075
urée (45 JAL)	50	3,2	0,075
fumier	5000	320,0	7,5

1.2. Méthodes d'analyses et de mesures

1.2.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est faite sur des échantillons de 20 g de sol tamisé à 2 mm. Par traitement à chaud à l'eau oxygénée, la matière organique est détruite. Avec du pyrophosphate de sodium les agrégats sont détruits par dispersion.

Les fractions argile et limon sont séparées par sédimentation et les sables fins, moyens et grossiers sont obtenus par tamisage sur des tamis normalisés.

1.2.2. Mesure de la densité du sol

Elle est réalisée à l'aide d'une sonde gammadensimétrique de profondeur (CPN 501B). Un étalonnage in situ a été fait sur les types d'accès utilisés avec détermination de la densité par utilisation d'un cylindre de mesure de volume égal à 250 cm³.

1.2.3. Mesures de la teneur en eau du sol et de la pression d'eau

La teneur en eau et la pression d'eau sont déterminées de manière indépendante. La teneur en eau du sol est mesurée à l'aide d'un humidimètre neutronique (type Troxter 3212) avec des tubes d'accès en aluminium. L'étalonnage de l'humidimètre a été fait in situ par l'établissement d'une corrélation entre teneurs en eau obtenues par gravimétrie et comptages ratio effectués aux mêmes côtes. Compte tenu de l'hétérogénéité du milieu et en particulier celle de la texture, plusieurs sites ont été choisis pour effectuer l'étalonnage de l'humidimètre à neutrons; les données obtenues ont pu être regroupées sur la base du taux d'argile + limon qui varie essentiellement dans la couche 0-0,80 m du sol.

Les mesures hydriques sont effectuées par pas de 0,10 m depuis la surface jusqu'à la dernière côte de mesure (en général à 3,70 m).

Les mesures tensiométriques sont réalisées à l'aide de tensiomètres à mercure, le niveau du mercure se trouvant à 0,25 m de la surface du sol. Les tensiomètres ont été mis en place lorsque le sol a été humidifié jusqu'à un mètre environ.

1.2.4. Analyses chimiques du sol, de la plante et des matières organiques utilisées

1.2.4.1. Analyses du sol

Le pH est mesuré avec un rapport sol/solution du sol de 1/2,5; le carbone organique est dosé par la méthode de Wakley-Black modifiée (oxydation par le bichromate de K et dosage volumétrique du bichromates en excès). L'azote total est déterminé par la méthode au phenate alcalin.

Le phosphore total est dosé par colométrie du phosphomolybdate d'ammonium après une attaque fluoroperchlorique; pour le phosphore assimilable la méthode de Olsen modifiée par DABIN.

1.2.4.2. Analyses de plante et de matière organique

Pour l'analyse chimique de plante ou de matière organique (fumier ou de paille du mil), la prise d'échantillon est préalablement très finement broyée et séchée à 80 °C. Une minéralisation par voie humide est ensuite effectuée par oxydation à l'aide d'acide sulfurique

et d'eau oxygénée en présence de sulfate de Na utilisé comme catalyseur. L'azote et le phosphore sont dosés par colorimétrie automatique, le potassium par émission de flamme, le calcium et le magnésium par absorption atomique.

1.3. Présentation descriptive de la culture étudiée

1.3.1. Description générale

Le mil pénicillaire (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke) est une graminée céréalière annuelle, d'origine africaine (probablement d'Afrique de l'Est) et cultivée depuis très longtemps en Afrique de l'Ouest. C'est une plante de haute taille et à fort tallage. L'épi est en forme de chandelle, les grains sont de très faibles dimensions (Chopart, 1980). En culture traditionnelle, le mil est cultivé en rotation avec une légumineuse telle que le niébé ou l'arachide. Dans ces conditions son rendement est plus élevé que celui obtenu en monoculture de mil (Spencer & Sivakumar, 1987). Les synonymes de *P.americanum* Leeke le plus souvent rencontrés sont:

- *Pennisetum typhoides* (Burm) Stapf et Hubbard;
- *Pennisetum typhoidum* Richard;
- *Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.;
- *Pennisetum spicatum* (L.) Koern (Gosseye, 1989).

La variété utilisée dans les essais est le 'Souna III', variété sélectionnée au Sénégal. Le mil Souna est largement cultivé au Sénégal et au Mali (Gosseye, 1989). Sa zone de culture se situe au sud de l'isohyète 200-250 mm (Kassam, 1976) et au nord de celui de 1000 mm.

La plante a une taille de 2-3 mètres, un tallage abondant mais dont seulement une partie est productive (Chopart, 1980; Siband, 1981; CILSS, 1982; Lambert, 1983a; Jansen & Gosseye, 1986). Le nombre de talles productives par plante est d'environ 2,8 pour le Souna III (CILSS, 1982).

La production moyenne à l'hectare en mil-grains est relativement faible au Sénégal en milieu paysan, 700 kg ha⁻¹ (ICRISAT, 1987), mais l'application de techniques culturales appropriées peut donner des rendements de l'ordre de 2600 kg ha⁻¹ pour un Souna local non amélioré (IRAT, 1970) et 3000 kg ha⁻¹ pour le Souna III (Lambert, 1983c).

1.3.2. Croissance et développement de la culture

Le développement phénologique de la plante est caractérisé par l'ordre et la vitesse d'émission des organes végétatifs et reproductifs (van Keulen & Seligman, 1987). Dans le modèle de simulation la répartition des assimilats du CO₂ et des autres paramètres est fonction du stade du développement de la plante. C'est pourquoi la vitesse de développement de la plante avant et après la floraison est importante. Les principaux stades du développement phénologique sont: l'émergence, le tallage, la formation de l'épi, l'initiation des fleurs, la floraison (anthèse), le début et la fin de la formation des grains. Par définition le stade émergence est 0, le stade floraison 1 et le stade maturité (récolte) 2 (e.g. van Heemst, 1986). La vitesse de développement du mil Souna III diffère très fortement selon les auteurs.

L'émergence se produit après 1-2 jours après le semis (Chopart, 1980) ou 2-3 jours après selon Gosseye (1989).

Le tallage commence au stade 4-5 feuilles pour l'ensemble des variétés observées par Lambert (1983a), 15 jours après la levée (JAL) (Chopart, 1981). Mais en général pour le Souna III, il démarre 7 jours après le démarrage qui est effectué à 10ème JAL). Le nombre de talles atteint un optimum environ à 37ème JAL environ (Siband, 1981) mais il est fonction des techniques culturales (semis sec ou en humidité, nombre de pieds après démarrage) (Lambert, 1983b).

L'initiation de l'épi se produit à 35ème JAL selon Chopart (1980) et à 45 selon Siband (1981). Cissé (1986) a observé un début d'épiaison à 38ème JAL pour un mil se développant avec un apport de matière organique au sol et à 43ème JAL pour le témoin sans matière organique. D'autres travaux, Siband (1981), Gosseye (1986) et CILSS (1982) ont reporté des périodes se situant respectivement à 59ème, 45ème et entre 55-76ème JAL.

D'après divers travaux, la floraison se situe à 52ème JAL (Gosseye, 1989), 54-57ème (Chopart, 1980; CILSS, 1982) et 64-67ème JAL (Siband, 1981). Cissé (1986) a observé en présence de matière organique apportée au sol un début de floraison à 45ème JAL tandis que sans matière organique celui-ci était à 51ème JAL.

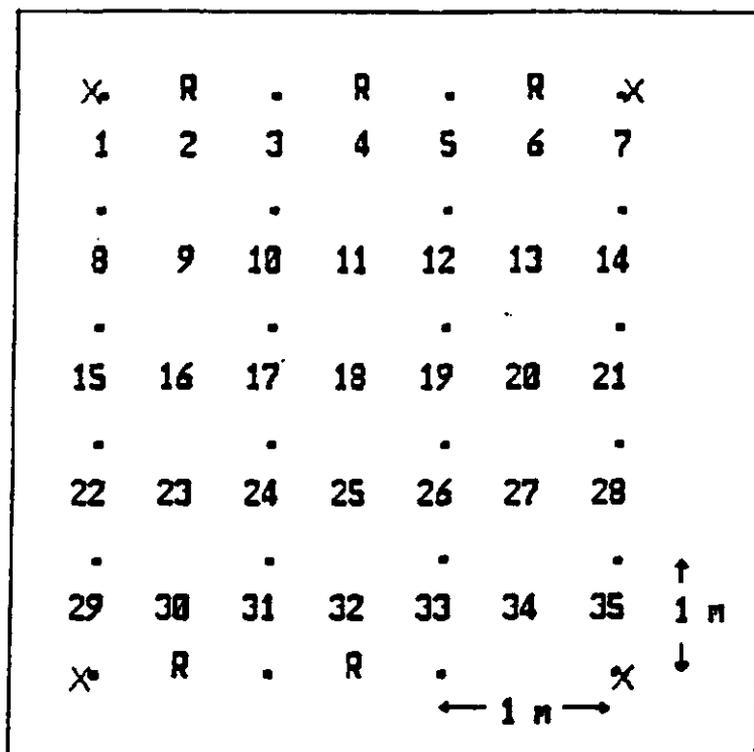
La vitesse de développement entre 0 et 1 est fonction du cumul de la température moyenne journalière.

La période entre floraison et maturité n'est pas sensible à la longueur du jour. Dans l'environnement sahélien celle-ci est en moyenne de 30 jours (Jansen & Gosseye, 1986). Cependant si la température est inférieure à 35 °C, le processus de la maturation se ralentit (van Kraalingen & van Keulen, 1988).

1.3.3. Caractéristiques du système racinaire

On a observé au Sénégal, sur sol sableux (sol Dior) que trois jours après la levée, la racine séminale avait une longueur de 10 cm environ et un diamètre d'un mm (Chopart, 1980). L'initiation des racines adventives commence vers le 10ème jour après la levée tandis que celle des racines secondaires démarre vers le 15ème JAL et leur formation continue

jusqu'au 60ème JAL Chopart (1980). Binh (1982) a observé que l'activité racinaire se concentre surtout à l'intérieur d'une zone d'un mètre autour du pied et au-delà de 1,5 m elle devient négligeable. Après floraison, comme en général pour les autres céréales, la croissance des racines s'arrête (ODA, 1987a; Penning de Vries *et al.*, 1988; Squire *et al.*, 1987). A la récolte, chaque pied compte en moyenne entre 200 et 300 racines soit environ 26 racines par talle (Chopart, 1980).



Figur 2.1. Emplacement des sacs pour l'étude de la décomposition de la matière organique. (X: piquet; a: poquet de mil; N^o: sac; R: sac de réserve.)

Tableau 2.1. Caractéristiques chimiques (X) de la matière organique dans les sacs enfouis dans le sol à Nioro du Rip en 1988.

	fumier 0-300	fumier 300-800	paille du mil
C	21,8	25,3	39,8
N	1,00	1,24	0,86
C/N	21,8	20,4	45,9
P	0,136	0,190	0,145
K	0,978	1,300	2,394
Ca	0,670	0,927	0,304
Mg	0,326	0,429	0,352
Cendre-totale	65,4	48,8	6,7
Cendre-insolubles*	42,1	25,5	2,5

(* estimé à partir du Tableau 1.4.)

2. Etude de la décomposition et de l'évolution des taux de carbone, d'azote et de phosphore de la matière organique apportée au sol

2.1. Matériel et méthodes d'étude

Deux types de matière organique (paille de mil et fumier en provenance de l'étable de Nioro) sont suivis dans le temps sous deux conditions:

A. Pluvial strict

B. Pluvial avec apports d'eau complémentaire en cas de besoin (période sèche).

La matière organique apportée est mise dans des sacs en polyéthylène (Monodur MON PE 300 N) de maille de 300 et de dimensions de 0,20 * 0,20 m. Après avoir effectué un labour, la matière organique a été enfouie à 0,15 m de profondeur. Les parcelles ont été semées en mil pour réaliser l'étude sous sol cultivé. Les sacs sont placés à 0,50 m des pieds de mil et juste après le semis (15 Juillet). Le dispositif de cette expérimentation est représenté à la Figure 1.1 (parcelles B1-B4) et l'emplacement des sacs à la Figure 2.1.

Dans les sacs en polyéthylène le poids matière sèche de la matière organique est de 23,5 g pour la paille de mil et 45,9 g pour le fumier. Les poids ont été fixés en tenant compte de la dimension des matériaux utilisés, de la nécessité d'avoir un bon contact sol-matière organique et de disposer des échantillons de quantité suffisante pour les différentes mesures et analyses prévues.

La paille de mil a été découpée en morceaux de longueur entre 3 et 5 cm.

Le fumier utilisé étant composé de particules relativement fines on a déterminé sa répartition en fractions inférieure et supérieure à 300 μ , pour tenir compte éventuellement des pertes par entraînement de particules très fines à travers les mailles des sacs. Les deux fractions représentent en poids matière sèche 30,6 et 69,4% respectivement et la fraction supérieure à 300 est composée de particules de taille comprise entre 300 et 800 μ .

Ces deux fractions ont été analysées séparément (teneurs en N, C, P, K, Ca, Mg et % cendre insoluble) pour apprécier leurs qualités respectives. Les principales caractéristiques chimiques des deux types de matière organique sont présentées au Tableau 2.1.

A chacune des dates de prélèvements retenues (12^{ème}, 19^{ème}, 34^{ème}, 41^{ème}, 50^{ème}, 62^{ème}, 89^{ème} et 136^{ème} jours après enfouissement), 5 sacs sont prélevés, séchés, pesés et les analyses des taux de C, N et P de la matière organique sont effectuées. Pour tenir compte d'un éventuel hétérogénéité du champ on a effectué des prélèvements au hasard et les sacs prélevés par date sont donnés ci-dessous:

1e date: no 1, 9,17,25,33	5e date: no 5,13,21,22,30
2e date: no 2,10,18,26,34	6e date: no 6,14,15,23,31
3e date: no 3,11,19,27,35	7e date: no 7, 8,16,24,32
4e date: no 4,12,20,28,29	8e date: les sacs de réserve

2.2. Résultats et interprétations

Compte tenu de la pluviométrie enregistrée entre le semis (14/7) et la récolte (13/10) et de sa répartition dans le temps (Tableau 1.2) on n'a pas effectué d'apport d'eau complémentaire sur les deux parcelles (paille et fumier) prévues à cet effet. Les conditions hydriques qui ont prévalu n'ont pas permis d'étudier des effets éventuels de périodes de sécheresse plus ou moins longues sur la décomposition de la matière organique apportée au sol au début de saison des cultures et la minéralisation. Pour l'analyse et l'interprétation des données obtenues on a donc combiné les sacs initialement mis en place pour deux conditions différentes.

Les conditions pour la décomposition ont été relativement favorables (température entre 30 et 35 °C en moyenne à 0,10-0,15 m dans le sol (Tableau 2.2) et l'humidité volumétrique du sol à 0,10 m entre 7,7 et 25% (Partie 5.2.1.4); soit 3 à 10 fois l'humidité correspondant au point de flétrissement permanent).

Tableau 2.2. Température décadaire dans le sol à 4 profondeurs à 12 h à la station météorologique de Nioro du Rip en 1988 (ISRA, Service de Bioclimatologie).

profondeur (m)		-0,1	-0,2	-0,5	-1,0
mois	décade				
Juin	1	37,9	34,4	36,3	35,5
	2	37,6	34,3	36,0	35,5
	3	34,7	32,4	34,7	34,9
Juillet	1	36,3	33,1	34,9	33,8
	2	34,5	31,5	33,6	34,4
	3	34,2	31,4	33,2	33,8
Août	1	31,5	28,3	30,9	32,3
	2	32,1	29,7	31,3	32,3
	3	30,9	28,8	30,5	31,5
Septembre	1	32,4	29,3	30,9	
	2	32,1	29,5	31,1	
	3	34,2	31,5	32,2	
Octobre	1	33,6	31,2	32,3	
	2	36,4	32,7	34,2	
	3	36,8	32,8	34,5	
Novembre	1	33,6	31,1	33,6	
	2	33,8	30,4	32,9	
	3	31,0	27,3	31,1	
moyenne		34,1	31,1	33,0	

2.2.1. Evolution quantitative de la matière organique apportée au sol.

A la Figure 2.2 sont représentées les pertes cumulées en matière sèche en pourcentage des poids initial de la paille de mil et du fumier en fonction du temps. On notera sur cette figure la similitude totale d'évolution des deux types de matière organique. On y distingue également deux phases importantes: une première couvrant les 30 premiers jours après enfouissement (JAE) et une deuxième de ce moment jusqu'à la fin de l'expérimentation (136 JAE).

La première phase se caractérise par une vitesse relative de décomposition plus élevée pour les deux types de matière organique et qui est de l'ordre de $0,008 \text{ g g}^{-1} \text{ j}^{-1}$. La vitesse de décomposition pour le fumier et la paille de mil est $0,38$ et $0,20 \text{ g j}^{-1}$, respectivement. Au terme de cette phase sont déjà décomposés 50% de la quantité totale de matière organique décomposée au cours de l'expérimentation.

Dans la deuxième phase, la vitesse relative de décomposition de la matière organique est plus lente et s'élève environ à $0,003 \text{ g g}^{-1} \text{ j}^{-1}$ et la vitesse de décomposition pour le fumier et la paille de mil est $0,11$ et $0,06 \text{ g j}^{-1}$, respectivement. A la fin de l'expérimentation, environ 50% de la matière organique apportée sous forme de paille de mil ou de fumier sont décomposés.

Une telle caractéristique de la vitesse de décomposition est observée souvent, par exemple par Berendse *et al.* (1989); Whitford *et al.* (1988) et Steinberger & Whitford (1988).

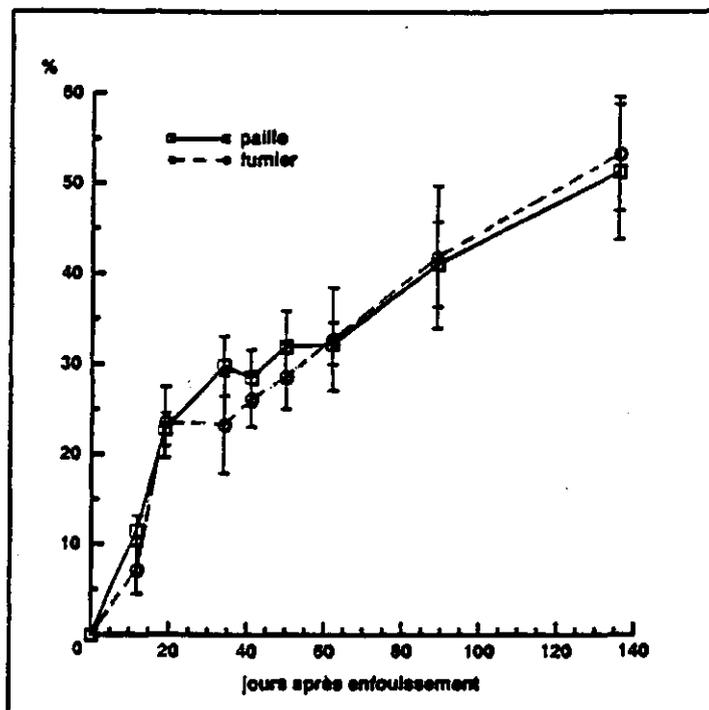


Figure 2.2. Pertes cumulées de matière sèche résultant de la décomposition (exprimées en pour cent du poids initial).

2.2.2. Estimation des quantités de N et de P résultant de la décomposition de la matière organique apportée

Les Figures 2.3A-2.3C présentent, exprimées en pourcentage des poids initiaux, les quantités de N, de P et de C disparues de la matière organique pendant la décomposition de la paille de mil ou du fumier apportées. On notera qu'à la fin de l'expérimentation les proportions d'azote, de phosphore et de carbone disparues sont identiques pour les deux types de matière organique et sont respectivement de 30, 70 et 50%. Au début de la décomposition, au cours d'une période de 20 jours environ, les fractions disparues de N et de P sont, à l'opposé de l'espérance, un peu plus élevées pour la paille de mil comparativement au fumier. Par

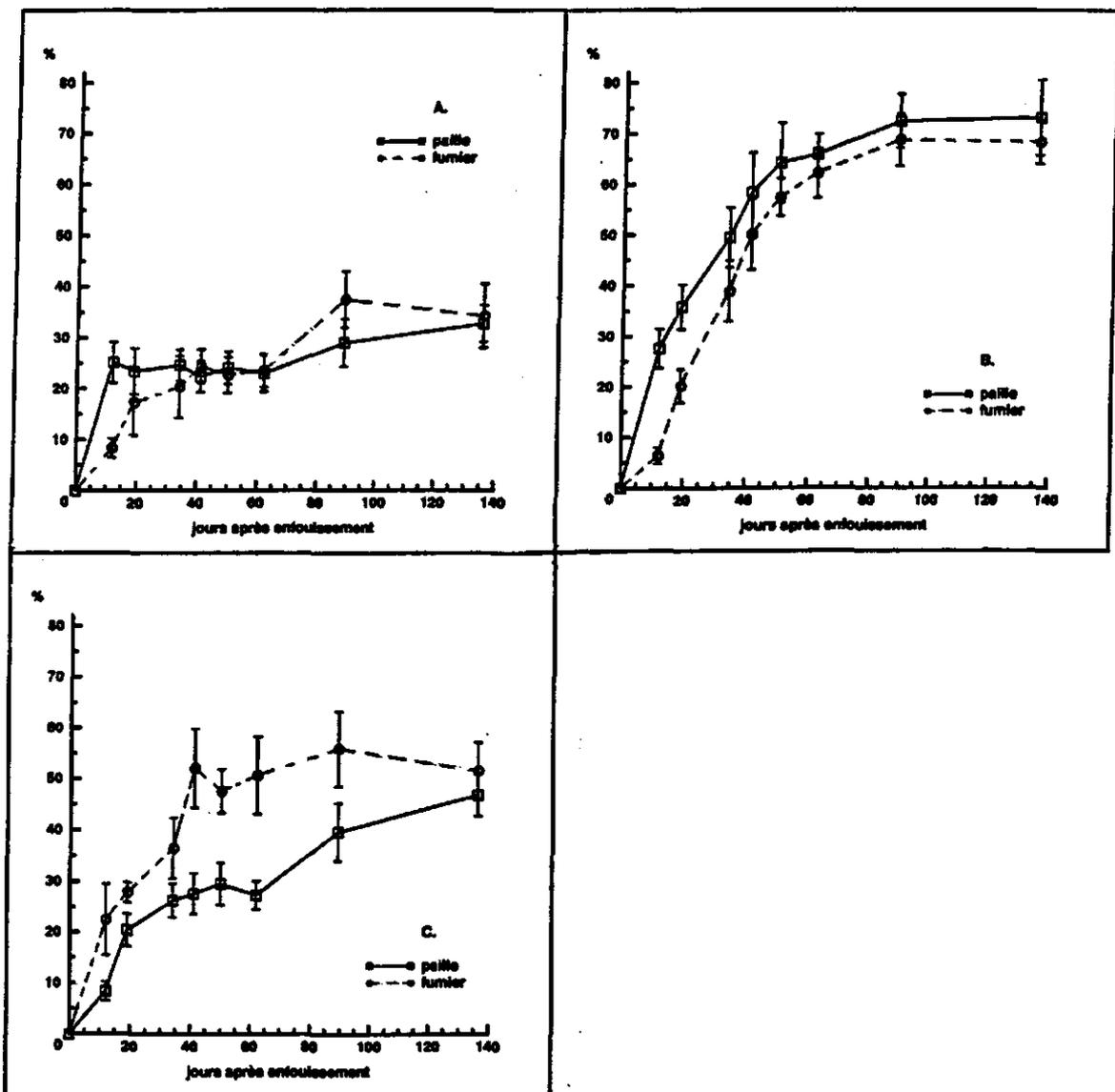


Figure 2.3. Pertes cumulées des quantités d'azote (A), de phosphore (B) et de carbone (C), résultant de la décomposition (exprimées en pour cent du poids initial).

contre celle de C est un peu plus élevée pour le fumier (Figure 2.3C). En outre, en examinant ces figures, on peut constater que au 20 JAE pour le paille du mil 25% de l'azote et 20% du carbone sont disparues. C'est-à-dire, le rapport C/N de la matière organique décomposée a été plus bas que le moyen. Pour le fumier ces valeurs sont 17 et 27%, respectivement et donc un rapport C/N de la matière organique décomposée plus haut que le moyen. Pour le moment le mécanisme qui explique cette phénomène n'est pas encore connu.

A partir des observations et mesures effectuées il est difficile d'avancer de façon certaine que l'azote et le phosphore, provenant de la décomposition de la matière organique au cours de l'expérimentation, sont sous formes mobilisables par la culture.

Si on rapporte à l'hectare les quantités de paille ou de fumier apportées (des sacs), soit respectivement 627 et 1224 kg ha⁻¹, respectivement, on peut calculer à l'hectare les quantités de N et de P initialement contenues dans la matière organique et celles provenant de la décomposition. Les valeurs obtenues sont présentées au Tableau 2.3.

Tableau 2.3. Quantités d'azote et de phosphore initiales et provenant de la décomposition (kg ha⁻¹) des deux types de matière organique apportées (kg ha⁻¹).

	apport	N		P	
		initial	minéralisé	initial	minéralisée
fumier*	1224	23,0	7,9	3,95	2,70
paille	627	5,4	1,8	0,91	0,67

(* fumier avec les deux fractions)

En considérant les Figures 2.3A et 2.3B on peut calculer les quantités de N et de P en kg ha⁻¹j⁻¹ produites pendant la décomposition des deux types de matière organique pendant des périodes caractéristiques. Les valeurs obtenues sont présentées au Tableau 2.4. Ces vitesses sont en général beaucoup plus élevées pour le fumier que pour la paille de mil; pour l'azote 2,5 fois (0-30 JAE) et 3 à 4 fois plus élevées pour le phosphore. Ces différences pourraient résulter du meilleur qualité, surtout le rapport C/N, du fumier aussi bien au départ (C/N égale à 20 et 45 respectivement pour le fumier et la paille de mil) qu'à la fin (C/N = 15 pour le fumier et C/N = 35 pour la paille) (Figure 2.4).

Si on considère l'apport du fumier effectué sur le dispositif principal de 5000 kg ha⁻¹ (traitement T2 et T3), la décomposition du fumier aurait fourni respectivement 32 et 11 kg ha⁻¹ de N et de P (Tableau 2.5). On a supposé que le fumier entier se conduit comme le fumier dans les sacs, et en conséquence, pour les conditions initiales on a utilisé les teneurs du fumier entier (Tableau 1.4). Par rapport aux quantités de N et de P apportées sous forme d'engrais minéraux, la décomposition du fumier apporté fournirait des quantités respectivement égales à 50 et 35%. En correspondance à l'espérance, les quantité de N et de P disparues par la décomposition du fumier sont deux fois plus élevées que ceux de la paille de mil (Tableau 2.5).

Tableau 2.4. Vitesse de minéralisation de l'azote et du phosphore ($\text{kg ha}^{-1} \text{j}^{-1}$) en différentes périodes au cours de l'expérimentation (jours après enfouissement).

période	vitesse de N		période	vitesse de P	
	fumier	paille		fumier	paille
0 - 30	0,114	0,045	0 - 10	0,011	0,019
30 - 90	0,012	0,010	10 - 20	0,032	0,014
90 - 136	0,012	0,000	20 - 30	0,028	0,007
			30 - 40	0,025	0,009
			40 - 50	0,021	0,008
			50 - 60	0,013	0,003
			60 - 90	0,005	0,002
			90 - 136	0,000	0,000

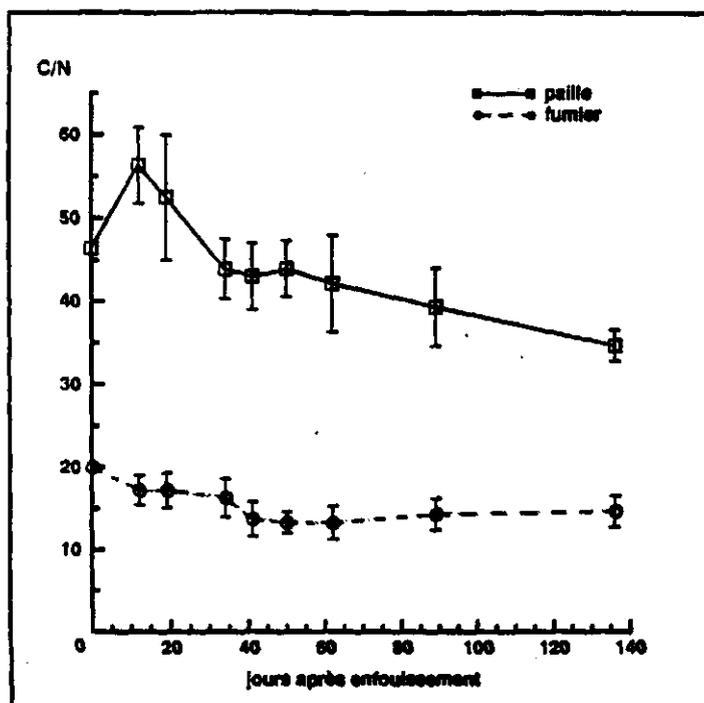


Figure 2.4. Rapport carbone-azote des deux types de matière organique au cours de la décomposition.

Tableau 2.5. Quantités d'azote et de phosphore initiales et provenant de la décomposition (kg ha^{-1}) des deux types de matière organique apportées (kg ha^{-1}).

		N		P	
		initial	minéralisé	initial	minéralisée
fumier*	apport 5000	94,0	32,2	16,0	10,9
paille	5000	43,0	14,2	7,0	5,1

(* fumier entier)

Enfin on peut signaler sur le plan méthodologique que le nombre de 10 sacs prélevés par date est apparu comme un nombre minimal. L'écart-type est quelque fois très grand, notamment pour l'analyse de N, P et C du fumier (Figures 2.2 et 2.5). Aussi les prélèvements ne sont pas faites au hasard, théoriquement un gradient diagonale peut exister. C'est pourquoi on propose un enfouissement des sacs dans le sol sur le même endroit (entre deux pieds de mil) avec un nombre de répétitions égal à le nombre des dates de prélèvements.

Par ailleurs les différences de poids initial auraient pu, selon certains auteurs (...?), influencer la vitesse de décomposition des deux types de matière organique: le fumier devrait avoir une vitesse de décomposition plus élevée. On n'a pas observé, au cours de cette expérimentation, une telle influence.

En outre, les racines trouvées parfois dans le sac pourraient avoir un certain effet sur les poids et les taux des éléments minéraux de la matière organique. Cet effet peut expliquer l'augmentation des taux entre la 7ème et la 8ème date de prélèvement.

2.3. Conclusion

La vitesse relative de décomposition de la matière organique pendant les 30 premiers jours après enfouissement a une valeur 2,5 fois plus élevée que celle-ci de la phase qui suit cette période. Malgré la différence de qualité, la vitesse relative de décomposition mesurée est dans la même ordre de grandeur pour le fumier et la paille de mil.

Les proportions d'azote et de phosphore libérées sont identiques pour la paille de mil et le fumier. Considérant la quantité et la qualité des types de matière organique apportés, les quantités de N et de P fournies par le fumier sont 2 fois plus élevées.

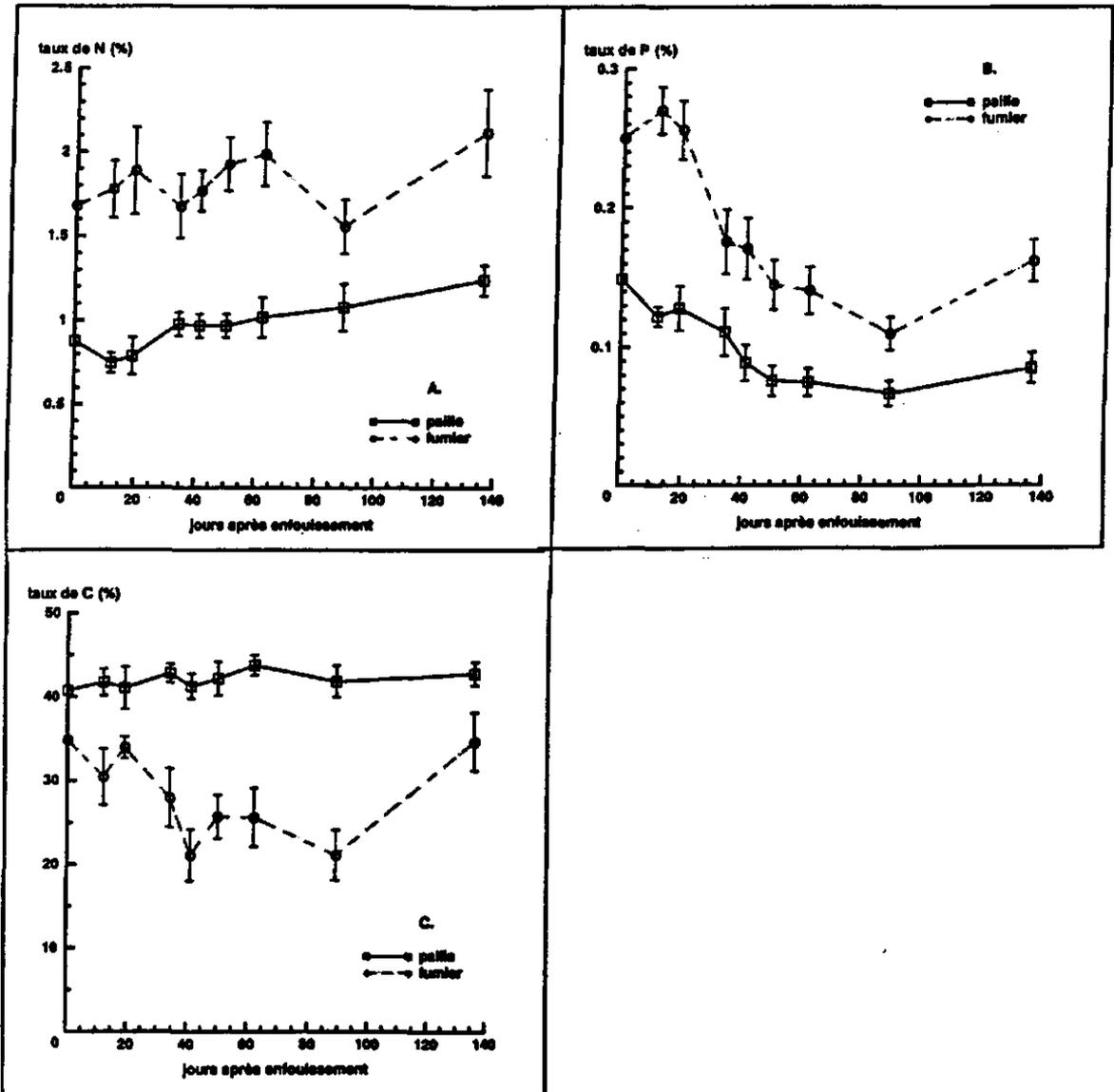


Figure 2.5. Taux d'azote (A), de phosphore (B) et du carbone (C) des deux types de matière organique au cours de la décomposition.

3. L'absorption potentielle d'azote et de phosphore par les plantes pendant la saison de croissance

3.1. Matériel et méthode d'étude

Un terrain de 15 m² (parcelle D, Figure 2.2) a été semé de façon très dense, avec un mélange de mil et d'une graminée fourragère (*Schoenefeldia gracilis* p.ex.), avant l'arrivée de la première pluie. Pour une saison des pluies favorable à Nioro du Rip, le longeur du cycle de *S.gracilis* est impropre (trop court). Ainsi, une autre espèce de graminée avec une période de croissance plus longue (*Pennisetum pedicellatum*) a été introduite dans le mélange mil-*S.gracilis*. La densité de semis a été de 20,0 g de mil (environ 2600 grains); 2,50 g de *S.gracilis* (environ 12500 grains) et 0,27 g de *Pennisetum pedicellatum* (670 grains) par m².

Les plantes ont été récoltées chaque fois qu'elles mourraient par suite d'une forte sécheresse (au début de l'essai) et les parcelles récoltées ont été ressemées. A la fin de la saison des pluies, au moment des récoltes de l'essai principal, les plantes de cette expérimentation additionnelle ont été récoltées, séparées par espèce, séchées et pesées. Un échantillon moyen de chaque espèce a été prélevé pour déterminer leurs teneurs en N et P.

Avant la mise en place de cette expérimentation, les teneurs en C, N, P-ass et P-tot du sol ont été déterminées sur des échantillons prélevés des horizons 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,8 et 0,8-2,0 m, en 4 répétitions par couche. On a également mesuré le pH (eau et KCl) des échantillons.

3.2. Résultats et interprétation

Les caractéristiques chimiques du sol de cette sous-parcelle (Tableau 3.1) sont presque identiques à celles de la parcelle principale (Tableau 5.4).

La contribution du mil dans la quantité de matière sèche produite, et l'azote et le phosphore absorbés à chaque date de prélèvement était la plus élevée (Tableau 3.2). Après la récolte de la culture principale (13/10) les taux de N et de P diminuent (Tableau 3.3). Le rôle de *P.pedicellatum* est presque négligeable probablement du à le faible nombre de grains semés. Par ailleurs on observe que la contribution des autres espèces (non semées; Tableau 3.4) est relativement forte. Le poids total de matière sèche (4700 kg ha⁻¹) maximal est du même ordre de grandeur que celui trouvé par ailleurs sous des conditions comparables par Breman & Krul (1982) (Figure 3.1A).

La quantité d'azote mobilisée par les plantes à la fin de la saison des pluies est de 34 kg ha⁻¹. Cette valeur est légèrement plus élevée que celle obtenue au Mali par Breman & Krul (1982) (Figure 3.1B). Mais elle est beaucoup plus faible que celle mobilisée par le mil se développant sur le traitement T0 du dispositif principal (115 kg ha⁻¹) et rapportée à la partie 5.2.2.2 (mais on a la conclue qu'une telle absorption sans fertilisation est impossible).

La quantité de phosphore mobilisée et estimée à 12 kg ha⁻¹ est plus élevée que celle obtenue au Mali par Breman & Krul (1982; Figure 3.1C), mais elle est presque équivalente à celle du mil sur le traitement T0 qui est de 15 kg ha⁻¹ et présentée à la partie 5.2.2.2.

Tableau 3.1. Principales caractéristiques chimiques des 5 horizons (m) à Nioro du Rip avant la mise en place de l'expérimentation (7-6-1988; parcelle D), moyenne de 4 répétitions.

	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,4	0,4-0,8	0,8-2,0
C (‰)	3,51 ±0,12	3,36 ±0,30	3,28 ±0,44	2,74 ±0,78	2,58 ±0,91
N (‰)	0,33 ±0,03	0,30 ±0,03	0,30 ±0,03	0,24 ±0,04	0,21 ±0,03
C/N	10,8 ±0,5	11,0 ±0,8	11,0 ±0,8	10,3 ±1,0	10,0 ±0,8
Ptot (‰)	0,246±0,005	0,299±0,005	0,297±0,002	0,269±0,053	0,267±0,005
Pass (ppm)	30,3 ±9,7	13,6 ±6,5	11,3 ±5,2	5,6 ±1,3	6,2 ±0,8
pH-eau	6,64 ±0,19	6,12 ±0,09	6,25 ±0,05	6,29 ±0,27	6,44 ±0,40
pH-KCl	5,51 ±0,25	4,77 ±0,11	4,97 ±0,05	5,15 ±0,07	5,08 ±0,18

Tableau 3.2. Rendements des plantes (moyenne de n sous-parcelles) en poids matière sèche, quantité d'azote et quantité de phosphore et la contribution des espèces en pourcentage du total. (Mil (*Pennisetum americanum*), S.g. = *Schoenefeldia gracilis*, P.p. = *Pennisetum pedicellatum* et autres: voir Tableau 3.4.)

date n	6-7 3*	14-10 3*	14-10 5	27-10 3	2-11 4
poids MS	15,3±1,6	289,1±42,4	467,5±36,1	442,1±65,6	415,8±41,4
% mil		77,5±14,3	87,9± 3,5	86,9± 3,6	85,3± 5,8
% S.g.		12,3± 6,8	7,7± 2,2	8,1± 3,2	8,1± 4,1
% P.p.		0,6± 0,4	1,1± 0,7	0,7± 0,6	1,5± 1,2
% autres		9,6± 7,2	3,3± 1,0	4,3± 0,2	5,1± 2,5
N (g m ⁻²)	0,422	2,402	3,444	3,384	2,997
% mil		68,7	89,6	82,1	79,2
% S.g.		15,6	1,8	6,5	6,5
% P.p.		0,9	1,5	0,7	1,5
% autres		14,8	7,1	10,7	12,8
P (g m ⁻²)	0,038	0,805	1,214	1,032	0,822
% mil		67,7	84,0	84,5	78,3
% S.g.		15,8	10,0	9,0	9,1
% P.p.		1,1	1,7	1,2	2,7
% autres		15,4	4,3	5,3	9,9

(* les mêmes sous-parcelles)

Tableau 3.3. Evolution des taux d'azote (X) et du phosphore (X) des espèces.
(S = *Schoenefeldia gracilis*, P = *Pennisetum pedicellatum* et A = autres espèces.)

date	n	mil-N	mil-P	S-N	S-P	P-N	P-P	A-N	A-P
6-7	3*								
14-10	3*	0,75	0,248	1,00	0,337	1,31	0,515	1,19	0,416
14-10	5	0,75	0,248	0,72	0,337	1,11	0,434	1,58	0,337
27-10	3	0,72	0,226	0,64	0,270	0,75	0,375	1,94	0,294
2-11	4	0,67	0,181	0,58	0,226	0,72	0,381	1,81	0,388

Tableau 3.4. Espèces non-semées relevées sur la parcelle (classées "autres" dans le Tableau 3.2).

<u>Graminées</u>	<u>Dicotylédones</u>
<i>Dactyloctenium aegyptium</i>	<i>Azadirachta indica</i>
<i>Eragrostis ciliaris</i>	<i>Commelina Forskalaei</i>
<i>Eragrostis tremula</i>	<i>Corchorus tridens</i>
	<i>Digitaria velutina</i>
	<i>Hibiscus Sabdarifla</i>
<u>Cypéracées</u>	<i>Indigofera astragalina</i>
<i>Cenchrus biflorus</i>	<i>Merremia pinnata</i>
<i>Cyperus rotundus</i>	<i>Mitracarpus villosus</i>
<i>Fimbristylis spidula</i>	<i>Sida alba</i>
<i>Kyllinga squamulata</i>	<i>Zornia glochidiata</i>

Le rapport P/N de la biomasse aérienne est une indication utile pour se prononcer du déficit éventuel des éléments nutritifs. Penning de Vries & van Keulen (1982) ont trouvé que la valeur de ce rapport se trouve entre 0,04 et 0,15 pour les graminées. Le rapport P/N au début de l'expérimentation (6/7) est 0,09, augmente juste au 0,34-0,35 (14/10) et diminue après ce moment à 0,30 (27/10) - 0,27 (2/11). Ces valeurs sont donc plus élevées que comme on pouvait s'y attendre. Le mécanisme n'est pas encore connu, mais le temps disponible n'a pas permis d'élaborer ce point, ceci reste à faire.

3.3. Conclusion

La méthode d'étude utilisée permet une estimation de la fourniture potentielle d'azote et de phosphore par le sol aux plantes.

On peut avancer la fourniture potentielle d'azote et de phosphore du sol au mil est d'environ 35 kg ha⁻¹ et 12-15 kg ha⁻¹, respectivement.

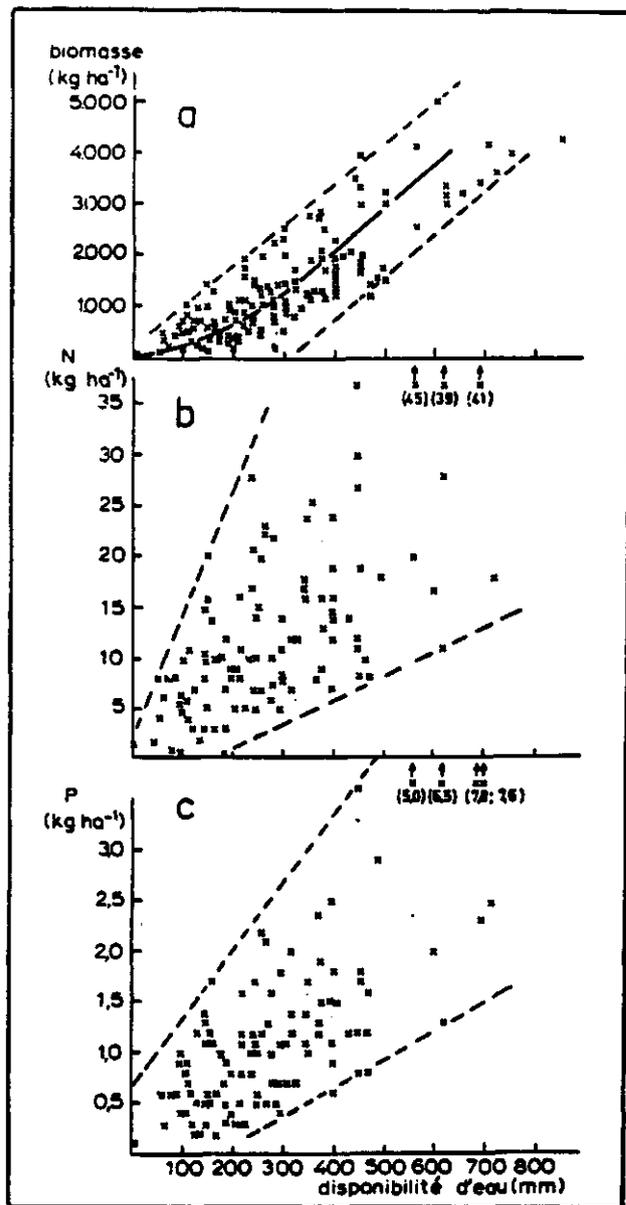


Figure 3.1. Rapports entre la biomasse produite (A) et son contenu en N (B) et en P (C) avec la disponibilité en eau infiltrée au cours de la période 1976-1979 au Mali (Breman & Krul, 1982).

4. Présentation du modèle de simulation

4.1. Introduction

Les résultats d'expérimentation sont souvent, voire toujours, difficilement extrapolables sur une grande échelle. Ainsi, établir des recommandations nécessite un grand nombre d'expérimentations qui n'est pas toujours possible de faire. Ces considérations montrent tout l'intérêt que l'on peut tirer de la mise au point d'un modèle de simulation qui:

1. permet une meilleure compréhension des interactions complexes entre les facteurs importants pour la production végétale.
2. facilite l'extrapolation des résultats de la recherche sans avoir à réaliser un très grand nombre d'essais dans plusieurs localités afin de prendre en compte la variabilité de certains paramètres.
3. peut permettre de prévoir les conséquences d'une décision ou d'un choix opéré sur les autres composantes d'un système qui sont en étroite interaction.

Dans ce chapitre le modèle de simulation étudié est présenté. Ce modèle de simulation décrit la disponibilité en eau et en azote, la croissance d'une culture (ici celle du mil) et la distribution de la matière sèche et de l'azote entre les organes de la culture.

4.2. Description du modèle de simulation

4.2.1. Structure générale

La conception de la structure du modèle repose sur le fait que l'environnement dans lequel les cultures se développent est pris en compte et décrit. Cette description est faite à l'aide de paramètres et de caractéristiques mesurées au champ. Les processus de base du modèle sont organisés en sous-routines.

Le modèle de simulation appliqué est une adaptation de celui développé par van Kraalingen & van Keulen (1988). Le schéma de la structure du modèle et une liste des données pour l'alimenter sont présentés aux Tableaux 4.1 et 4.2, respectivement. Les données nécessaires pour faire tourner le modèle et mesurées sont détaillées au Chapitre 5. On expliquera ici que quelques sous-routines; pour plus d'information et de détail on peut se référer à van Kraalingen & Rappoldt (1989); van Kraalingen & van Keulen (1988) et Groot (1987). Les sous-routines RERROR et EXPERT ne sont pas données au Tableau 4.1, parce qu'elles ne font pas partie de la structure du modèle; cependant la première est appelée si une valeur (la température par exemple) dépasse les limites prédéterminées et, la seconde, s'il y a une condition qui ne peut être décrite quantitativement.

Le modèle de simulation est écrit en langage de programmation STANDARD-FORTRAN-77, pour faciliter son utilisation sur un PC. Le compilateur FORTRAN utilisé est Microsoft-FORTRAN, version 4.01, 1987 (Microsoft, 1987).

Tableau 4.1. Structure générale du modèle de simulation décrivant l'interaction entre le mil, l'eau et l'azote.

```

PROGRAMME FORCROS
DO (si les conditions aux limites ne sont pas atteintes)
  CALL FOPEN ouvre les fichiers nécessaires.
  CALL INITIM donne des valeurs initiales aux variables.
  CALL WEATHR lit les données météorologiques journalières du fichier
    WSTAT.DAT.
  CALL RAINFL lit les données de la pluviométrie journalière du fichier
    RSTAT.DAT.
  CALL ASTRO calcule la longueur du jour astronomique et la durée de la
    photopériode.
  CALL RADIAT calcule l'intensité du rayonnement direct et du rayonnement
    diffus.
  CALL PENMAN calcule l'évaporation potentielle d'un sol nu et d'une
    couverture végétale.
  CALL WATER1 calcule le bilan hydrique du sol, s'il n'y a pas un manque
    d'eau dans le sol, ou
    WATER2 calcule le bilan hydrique du sol, sous des conditions
    naturelles.
  CALL WATOU écrit les données du bilan hydrique du sol dans le fichier
    WATOU.DAT.
  CALL SOILRP lit les données physiques du sol du fichier NOMnoSP.DAT.
  CALL EVSOIL calcule l'évaporation réelle du sol.
  CALL SOLTMP calcule les températures du sol.
  CALL NITBAL calcule le bilan azoté du sol.
  CALL SOILRN lit les données de base pour le calcul du bilan d'azote du
    sol du fichier NOMnoSN.DAT.
  CALL NITOUT écrit les données du bilan d'azote du sol dans le fichier
    NITOUT.DAT.
  CALL MIL88 calcule la croissance du mil et la distribution de l'azote
    dans les organes de la culture et la transpiration réelle et
    potentielle de la culture.
  CALL ASSIM calcule la vitesse d'assimilation brute.
  CALL CRPOUT écrit l'état du mil dans le fichier CRPOUT.DAT.
  CALL TIMER révisé le temps avec le pas du temps de l'intégration.
ENDDO

```

Tableau 4.2. Liste des données alimentant le modèle de simulation.

A. Données météorologiques

- Pluviométrie;
- Température journalière minimale et maximale;
- Rayonnement global journalier;
- Vitesse du vent;
- Humidité de l'air.

B. Caractéristiques du sol

B1. Caractéristiques physiques pour le bilan d'eau

- Nombre de couches caractérisées par la texture du sol;
- Courbes caractéristiques de rétention hydrique des couches du sol;
- Nombre, profondeur et densité volumétrique des couches du sol à considérer;
- Facteur caractéristique d'extinction de l'évaporation du sol par couche.

B2. Caractéristiques pour le bilan d'azote

- Profondeur de la couche du sol labourée;
- Teneur en matière organique stable (humus) dans la couche du sol labourée;
- Vitesse de décomposition spécifique de la matière organique du sol;
- Quantité, taux de C et de N et vitesse de décomposition du fumier apporté;
- Quantité, taux de C et de N et vitesse de décomposition des résidus de la récolte;
- Teneur en N des pluies;
- Teneur en N-inorganique initial des couches du sol.

C. Données de la culture

- Quantité de semences, date, et profondeur du semis;
 - Caractéristiques de la germination et de l'installation;
 - Le taux d'azote maximal des organes de la culture en fonction du stade de développement de la culture;
 - Vitesse de développement de la culture en fonction de la température;
 - Vitesse relative de la surface des feuilles en fonction de la température en stade juvénile;
 - Poids matière sèche spécifique des feuilles;
 - Profondeur maximal d'enracinement;
 - Vitesse de croissance spécifique des racines;
 - Quantité et date d'apport des engrais.
-

4.2.1.1. Programme principal FORCROS

Le programme principal décrit l'environnement dans lequel se développe la culture: type du sol; termes des bilans hydrique et azoté et les caractéristiques de la météorologie (pluviométrie, rayonnement global, températures, vitesse du vent etc.). En outre des informations relatives à la date de semis, au niveau de production (potentielle, limitée par l'alimentation azotée, ou par l'alimentation hydrique et azotée) sont demandées et prises en compte.

4.2.1.2. La subroutine du bilan hydrique (WATER)

Cette subroutine décrit le bilan hydrique du sol. La dynamique de l'eau dans le sol peut être simulée d'une manière très simplifiée ou intégrant plus ou moins l'ensemble des processus et paramètres en jeu. Dans la subroutine présentée ici, seules des données qui peuvent être obtenues au champ sont considérées. Pour décrire les processus dans le sol, celui-ci est divisé en un certain nombre de couches homogènes, mais pas nécessairement d'épaisseur égal ni de propriétés physiques identiques.

La dynamique hydrique de chaque couche est décrit par:

$$dW_i = I_i - D_i - E_i - T_i \quad (4.1)$$

où

- dW_i = Evolution du flux d'eau (mm j^{-1});
- I_i = Flux d'eau entrant dans la couche i (mm j^{-1});
- D_i = Flux d'eau sortant de l'horizon inférieur (mm j^{-1});
- E_i = Contribution de la couche i à l'évaporation de la surface du sol (mm j^{-1});
- T_i = Contribution de la couche i à la transpiration de la culture (mm j^{-1}).

Une description plus détaillée de cette subroutine est donnée par van Keulen (1975). Les flux d'entrée et de sortie d'eau ont seulement lieu s'il pleut ou s'il y a irrigation; on suppose dans ces cas que les couches du sol se remplissent de haut en bas jusqu'à la capacité de champ et que le surplus de l'eau éventuellement est drainé en-dessous de la zone d'enracinement potentielle. Le flux entre les couches qui résulterait de gradients potentiels est négligé (van Keulen, 1985; van Keulen 1975).

Deux subroutines (WATER1 et WATER2) sont présentées parce que dans la première on suppose des conditions hydriques optimales et dans la deuxième des conditions naturelles. Pour une description plus détaillée, on peut se référer à van Kraalingen & van Keulen (1988).

Adaptations dans la subroutine

La valeur minimale de WCMAX qui est de 0,3 dans le modèle dans sa version initiale (van Kraalingen & van Keulen, 1988) a été fixée dans le cas étudié à 0,25 [WATER2, Ligne 800] par suite des données obtenues en établissement les courbes de pF et qui sont présentées à la partie 5.2.1.1.

Pour comparer les résultats donnés par la simulation à ceux obtenus au champ, on a changé dans le liste des données simulées le WCREL en WCACT [WATER2, Ligne 1900].

4.2.1.3. La subroutine du bilan d'azote (NITBAL)

Pour décrire le bilan d'azote, quatre pools d'azote sont considérés (Groot, 1987; van Keulen & Seligman, 1987; Seligman & van Keulen, 1981):

1. *Le pool azote minéral*, dans lequel aucune distinction n'est faite entre les différentes formes d'azote inorganique; étant supposé qu'elles sont considérées comme également utilisées dans tous les processus du bilan d'azote.

2. *L'azote dans la matière organique stable (humus)*, qui a subi au moins une fois une conversion microbienne, décroît par décomposition et augmente par addition de composés stables provenant de la décomposition de la matière organique récente [NITBAL, Ligne 3600]. Ce processus est décrit par:

$$dN_{si} = A_{si} - n_s * D_{si} \quad (4.2)$$

où

dN_{si} = Vitesse de changement du contenu de l'azote de la matière organique stable ($kg\ ha^{-1}\ j^{-1}$);

A_{si} = Vitesse d'accroissement de N de la matière organique stable ($kg\ ha^{-1}\ j^{-1}$);

n_s = Teneur en azote de la matière organique stable (-);

D_{si} = Vitesse de décomposition de la matière organique stable ($kg\ ha^{-1}\ j^{-1}$).

La vitesse de décomposition est définie par une vitesse spécifique sous des conditions optimales et est affectée par l'humidité et la température du sol.

3. *L'azote dans la matière organique récente*, constituant: des résidus de la culture et des racines de l'année précédente et de la matière organique apportée au sol (fumier) [NITBAL, Ligne 3510]. Celle-ci est caractérisée par sa composition en protéines/sucres, cellulose/hemicellulose et lignine. Cette caractérisation est basée sur la résistance à la décomposition microbienne de chacune de ces composantes, en suivant un ordre croissant de résistance. La vitesse spécifique de la décomposition, qui dépend des composantes et de l'influence de l'humidité et de la température du sol, est introduite de la même façon que pour la matière organique stable. Le rapport C/N de la matière organique est également pris en compte. L'évolution de la quantité d'azote dans la matière organique récente par couche est donnée par:

$$dN_{fi} = (-n_{Rf} * DR_{fi}) + (-n_{Ff} * DF_{fi}) \quad (4.3)$$

où

dN_{fi} = Vitesse d'évolution de la quantité d'azote de la matière organique récente ($kg\ ha^{-1}\ j^{-1}$);

n_{Rf} = Taux de N des résidus de la culture et des racines de l'année précédente ($kg\ kg^{-1}$ de MS);

DR_{fi} = Vitesse de décomposition des résidus de la culture et des racines de l'année précédente ($kg\ ha\ j^{-1}$);

n_{Ff} = Taux de N de la matière organique apportée ($kg\ kg^{-1}$ de MS);

DF_{fi} = Vitesse de décomposition du fumier ($kg\ ha^{-1}\ j^{-1}$).

4. *L'azote microbien*. Une partie (ou la totalité) de l'azote qui est minéralisé pendant la décomposition de la matière organique est immobilisée temporairement dans la biomasse microbienne [NITBAL, Lignes 3510 - 3530]. L'évolution de cette biomasse est calculée par:

$$dN_{mi} = (N_{mxi} - N_{mai}) / TC \quad (4.4)$$

où

- dN_{mi} = Vitesse d'évolution de la quantité d'azote dans la biomasse microbienne ($\text{kg ha}^{-1} \text{j}^{-1}$);
 N_{mxi} = Taille maximale de la population microbienne déterminée par la disponibilité en carbone ou en azote (kg ha^{-1});
 N_{mai} = Taille réelle de la population microbienne (kg ha^{-1});
 TC = Constante de temps pour l'adaptation de la population microbienne (j).

Enfin, la quantité d'azote minéral disponible par couche (N_i) s'équilibre de la façon suivante:

$$N_i = dN_{si} + dN_{fi} - dN_{mi} + I_{ni} - D_{ni} - U_{ni} \quad (4.5)$$

où

- I_{ni} = Flux d'azote minéral entrant à travers la couche supérieure ($\text{kg ha}^{-1} \text{j}^{-1}$);
 D_{ni} = Flux d'azote minéral sortant à travers la couche inférieure ($\text{kg ha}^{-1} \text{j}^{-1}$);
 U_{ni} = Contribution de la couche i à l'absorption de l'azote par le couvert végétal ($\text{kg ha}^{-1} \text{j}^{-1}$).

Les valeurs de I_{ni} et de D_{ni} sont calculées toutes les deux à partir du flux d'eau à chaque limite de la couche et la teneur en azote minéral dans la couche. Le flux sortant d'azote [NITBAL, Ligne 4110] est défini par:

$$D_{ni} = (N_i + I_{ni} * dT) / (W_i + I_i * dT) * D_i \quad (4.6)$$

où

- N_i = Quantité d'azote dans la couche i au début de l'intervalle dT (kg ha^{-1});
 dT = Intervalle de temps représentant le pas d'intégration (j);
 W_i = Quantité d'eau dans la couche i au début de l'intervalle dT (mm);
 D_i = Flux d'eau sortant à travers la couche inférieure (mm j^{-1});
 I_i = Flux d'eau entrant à travers la couche supérieure (mm j^{-1}).

Ainsi, pour calculer la teneur en azote dans l'eau qui sort d'une couche on utilise la somme de l'azote présent et entrant en supposant qu'il y a une mixture parfait dans la solution du sol dans la couche [NITBAL, Lignes 4100]

Pour calculer l'absorption de N par le couvert végétal [NITBAL, Ligne 6100], deux processus sont distingués:

1. L'azote qui est transporté par le courant de transpiration dans le couvert végétal aussi longtemps que la demande existe. Si la teneur en azote des tissus égale ou excède la valeur maximum, l'azote est activement exclu par les racines [NITBAL, Lignes 4000 - 4200].
2. L'azote qui est apporté par diffusion vers les racines, si la demande totale n'est pas satisfaite par le transport en masse et à condition que d'azote minéral soit disponible en quantité suffisante dans la solution de sol autour des racines. La fraction de l'azote total apporté par diffusion, absorbée par couche, est proportionnelle à la quantité relative présente dans chaque couche [NITBAL, Lignes 4000 - 4200].

4.2.1.4. La subroutine de la culture (MIL88)

La production de matière organique dans la culture verte résulte du processus d'assimilation du CO₂. La réaction globale est un premier pas pour évaluer la quantité de glucose produite par un couvert végétal au champ. A cet effet, deux composantes principales du système sont importantes: la distribution de l'énergie lumineuse aux différentes composantes chlorophylliennes de la culture et la réponse en terme d'assimilation du CO₂ de ces éléments face à une augmentation de l'énergie disponible. Cette dernière relation est caractérisée par l'efficacité initiale d'utilisation de la lumière et la vitesse maximale d'assimilation (partie 5.5.3). Une partie du carbone contenue dans la culture est utilisée pour la respiration. La respiration est considérée comme la somme de l'énergie nécessaire pour l'entretien des tissus existants et des autres fonctions biologiques comme la transformation des produits primaires de la photosynthèse en matériel végétal de structure et les coûts de transport des assimilats vers les organes en croissance. Ensuite les assimilats restants sont répartis entre les différents puits de la culture (feuilles, tiges, racines, inflorescences, grains et réserves de glucoses mobilisables) en croissance en fonction du stade de développement. Après la répartition des assimilats vers les puits individuels, les assimilats sont convertis en matière végétale de structure. Pour chacun des organes, cette conversion s'accomplit avec une efficacité de conversion qui est fonction de la teneur en azote du matériel formé. On trouvera pour la description de cette subroutine des informations complémentaires et/ou plus détaillées dans van Kraalingen & van Keulen (1988); van Keulen & Wolf (1986) et van Keulen (1985).

Adaptations dans le modèle

A. La croissance au début

Au début de la croissance de la culture (stade de développement inférieur à 0,45), la croissance des feuilles de la surface et donc la vitesse de la photosynthèse, est limitée par la vitesse relative d'extension des feuilles. Cette vitesse relative est fonction linéaire de la température [MIL88, Ligne 6140]. Donc:

$$GLA = LAI * (EXP(LVAGR * EAIRTP * DELT) - 1) \quad (4.7)$$

$$LAI = INTGRL (GLA, LAI) \quad (4.8)$$

où

GLA = Vitesse d'extension des feuilles (ha ha⁻¹ j⁻¹);

LAI = Index de surface foliaire (ha ha⁻¹);

LVAGR = Vitesse d'extension relative des feuilles (°C⁻¹ j⁻¹);

EAIRTP = Température de l'air pendant la journée (°C).

Après ce stade de développement, l'index de surface foliaire est décrit par:

$$LAI = WLW * LVSLVA \quad (4.9)$$

où

WLW = Poids de matière sèche des feuilles (kg ha⁻¹);

LVSLVA = Surface foliaire spécifique (ha kg⁻¹).

Dans le cas où le semis d'une culture est fait au volet, l'index de surface foliaire est calculé par le modèle de simulation en divisant la surface foliaire par unité de surface du sol. Pour le mil semé en poquets distants de 1x1 m, la couverture du sol par la culture est très faible entre la levée et le 32ème JAL (Figures 4.1A et 4.1B). On peut parler des "feuilles groupées" durant cette période. En conséquence, le calcul de la surface foliaire doit donc être corrigé et adapté, parce que celle calculée par le modèle dans sa version initiale est plus élevée que la surface absorbant réellement le rayonnement. En même temps il faut noter qu'au début de la période de croissance une grande partie du rayonnement n'est pas interceptée par la culture, mais atteint le sol nu. Dans ces conditions et pour plus de facilité on a transformé la subroutine ASSIM (cas d'une couverture du sol totale par la culture) feuilles groupées en subroutine ASSIMC. L'index de surface foliaire [ASSIMC, Ligne 650], nécessaire pour le calcul de la photosynthèse, est alors obtenu par:

$$LAICL = LAI * 1 / SSHADE \quad (4.10)$$



Figure 4.1. Le mil à Nioro du Rip. A: à 4/8 (18ème JAL) et B: 19/8 (33ème JAL).

où

LAICL = Index de surface foliaire groupé (ha ha^{-1});

SSHADÉ = Surface du sol effectivement ombragée (ha);

LAI = Index de surface foliaire pour une couverture totale du sol (ha ha^{-1}).

(note: la valeur 1 a la dimension ha)

La surface du sol effectivement ombragée est calculée, selon la formule donnée par Goudriaan (1977, pp 54-66) [ASSIMC, Ligne 650]:

$$\text{SSHADÉ} = \text{CROPS} * (1 + \text{CROPH} * \text{COSB}/\text{SINB}) \quad (4.11)$$

où

CROPS = Projection de la surface des plantules (ha);

CROPH = Hauteur de la tige de la culture (m);

COSB = Cosinus de l'altitude du soleil (-);

SINB = Sinus de l'altitude du soleil (-).

Ce calcul a été effectué pour toute la période où le développement de la culture est à un stade inférieur à 0,8 (correspondant à 32ème JAL environ) et où l'index de surface foliaire est inférieur à 0,8 ha ha^{-1} [MIL88, Ligne 6240].

Par ailleurs, on a inclus l'activité photosynthétique des gaines des feuilles à partir du 10ème JAL. D'abord la longueur des gaines a été calculée d'après la formule [MIL88, Ligne 6150]:

$$\text{STLTOT} = \text{CROPH} * \text{NOTIL} * \text{SOWPOC} \quad (4.12)$$

où

STLTOT = Longueur totale des gaines (m ha^{-1});

NOTIL = Nombre de talles primaires par poquet (-);

SOWPOC = Nombre de poquets (ha^{-1}).

En suite, 'l'index de surface foliaire équivalent des gaines' est calculé par:

$$\text{LSAI} = \text{LSAIRF} * \text{STC} * \text{STLTOT} / 1.E4 \quad (4.13)$$

où

LSAI = 'L'index de surface foliaire équivalent des gaines' (ha ha^{-1});

LSAIRF = Facteur de réduction tenant compte de l'activité de photosynthèse des gaines en rapport de celle-ci des feuilles (-);

STC = Circonférence de talle (m).

(note: 1.E4 est sans dimension et est inclus de transformer $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ en ha ha^{-1})

Juste avant d'appeler la subroutine ASSIM (ou ASSIMC) [MIL88, Ligne 6240], l'index de surface foliaire et 'l'index de surface foliaire équivalent des gaines' sont additionnés.

B. Vitesse de développement

Le développement phénologique du mil Souna III n'est pas sensible à la longueur du jour. En conséquence, la vitesse de développement avant la floraison est fonction de la température moyenne journalière avec une température de base de 10 °C (van Heemst, 1988) [MIL88, Ligne 2200]. Après la floraison la vitesse de développement est fixée, dans le modèle, à 1/(40 jours) [MIL88, Ligne 2210].

4.3. Effets des contraintes

Dans ce cadre ce n'est pas le but de décrire en grand détail tous les effets des différentes contraintes sur le fonctionnement de la culture. On se restreint à indiquer les processus affectés dans le modèle de simulation.

4.3.1. Effets de la température

4.3.1.1. Température aérienne

La température aérienne influence:

- la vitesse maximale de la photosynthèse;
- l'efficacité initiale d'utilisation de la lumière;
- la vitesse relative de surface des feuilles;
- la vitesse de transpiration potentielle (pas encore inclus);
- la vitesse de la respiration d'entretien de la culture;
- la vitesse de développement avant et après la floraison;
- la vitesse potentielle de croissance des grains;
- la vitesse potentielle d'accumulation de l'azote dans les grains;
- la vitesse relative de croissance de la surface des feuilles au stade juvénile.

4.3.1.2. Température du sol

- l'activité des racines (vitesse de transpiration);
- la vitesse de germination;
- la vitesse de décomposition de la matière organique.

4.3.2. Effets de déficit de l'eau

Les effets de déficit de l'eau (déficit de transpiration ou déficit de teneur en eau du sol) influence

- l'activité des racines (vitesse de transpiration);
- la vitesse de mortalité;
- la croissance des racines;
- la vitesse de germination.

4.3.3. Effets de carence en azote

Une carence en azote influence:

- la vitesse de mortalité;
- la vitesse de la respiration d'entretien de la culture;
- la vitesse de la photosynthèse.

5. Calibration et validation du modèle de simulation

Le modèle de simulation, décrit au Chapitre 4, est calibré et validé à partir des mesures et observations faites (partie 5A) et des données bibliographiques (partie 5B). Dans ce chapitre on présentera et discutera les paramètres météorologiques, du sol et de la plante nécessaires pour le modèle de simulation.

5A. Paramètres mesurés

5.1. Les mesures et analyses

5.1.1. Les mesures et analyses de sol

5.1.1.1. Rétention hydrique

Les mesures sont effectuées sur des échantillons non remaniés prélevés, à l'aide d'un dispositif approprié, aux profondeurs suivantes: 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3; 0,3-0,5; 0,5-0,7; 0,7-0,9; 0,9-1,1; 1,1-1,3; 1,3-1,5; 1,5-1,9 et 1,9-2,1 m. Les valeurs de pF déterminées sont: pF2,0; pF2,2; pF2,5; pF2,8; pF3,0; pF3,3; pF3,6 et pF4,2. On a regroupé les couches du sol qui présentent à peu près les mêmes courbes pF-teneur en eau sous les deux traitements T0 et T3.

En outre, la capacité de champ est déterminée au champs. Celle-ci s'effectue en principe après 24 heures de ressuyage pour les sols sableux, mais la valeur est plus stabilisée après 48 heures. Cette valeur de l'humidité a été retenue comme correspondant à la capacité de champ (Charreau, 1961). Cette expérience est exécutée en double pour les couches de 0-0,1 et 0,1-0,2 m de profondeur, avec 3 répétitions.

5.1.1.2. Résistance du sol

La résistance du sol est déterminée sur les parcelles C1 et C2 dans le but de pouvoir expliquer éventuellement les différences de longueur moyenne des racines des plantules. On a utilisé un pénétromètre avec un poids de 10 kg, avec 10 répétitions par parcelle.

5.1.1.3. Caractéristiques chimiques

Les éléments, C, N, P-ass, P-tot et pH (eau et KCl), sont analysés sur des échantillons du sol des couches de 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,8 et 0,8-2,0 m, avec 5 répétitions par couche. Les prélèvements ont été faits au début (avant semis, mais après l'application d'engrais (T3)) et à la fin de la saison sous les deux traitements (T0 et T3).

5.1.1.4. Evolution de la teneur en N-minéral

A six dates de prélèvement (semis, 10ème, 17ème, 31ème jours après levée, à la floraison et à la récolte) des échantillons sont prélevés sur T0 aux profondeurs: 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,4;

0,4-0,8 et 0,8-2,0 m, avec 5 répétitions par couche. Pour le traitement T3 il y a eu trois dates de prélèvement: semis, 10ème jours après levée et à la floraison.

5.1.1.5. Evolution de la teneur en eau

La teneur en eau du sol est mesurée à un rythme hebdomadaire à l'aide d'un humidimètre neutronique. Elle a été complétée avec des mesures tensiométriques.

5.1.2. Les mesures et analyses de culture

5.1.2.1. Rendements du mil

Le poids matière sèche totale est déterminé sur les deux traitements (T0/C1 & T3/C2). Les plantes prélevées sont séparées, selon le stade de développement, en feuilles, tiges + gaines, chandelles et grains et le poids des organes est déterminé également. Les prélèvements ont été faits à la levée, aux 10ème, 17ème, 32ème, 39ème jours après levée, à la floraison et à la récolte. Au moins 5 pieds par traitement sont prélevés chaque date. A la récolte les rendements du mil par traitement sont déterminés sur 5 sous-parcelles de 24 m².

A la levée, aux 10ème, 17ème JAL et à la floraison une estimation des poids racinaires a été faite.

On peut calculer, en utilisant les mesures effectuées les paramètres suivants nécessaires pour le modèle de simulation:

Distribution d'assimilation nette

A partir de l'évolution des poids de matière sèche des différents organes de la culture et les facteurs de conversion (produits photosynthétiques en matière sèche) (van Heemst, 1988), la distribution des produits d'assimilation nette peut être calculée en fonction du stade de développement.

Facteur de réduction du démariage

Dix jours après la levée un démariage à trois plantes par poquet a été effectué. Le démariage est inclus dans le modèle de simulation par un facteur de réduction affectant toutes les variables d'états de la culture [MIL88, Ligne 4300]. Ce facteur est le rapport des poids matière sèche juste avant et juste après le démariage.

5.1.2.2. Taux d'azote et de phosphore

A chaque date de prélèvement, un échantillon moyen est pris, selon le stade de développement, des feuilles, tiges + gaines, chandelles, grains, matière morte et racines pour déterminer le taux de N et de P. En outre, à la récolte les gaines ont été séparées des tiges pour être analysées.

5.1.2.3. Paramètres racinaires

Les paramètres du système racinaire considérés sont :

Profondeur d'enracinement

Trois techniques ont été utilisées pour déterminer et suivre la profondeur d'enracinement du mil.

Au début de cycle (levée, 10^{ème} et 17^{ème} JAL) la plante entière a été prélevée (tige, feuilles et racines). A la floraison des prélèvements par couche de sol ont été effectués à partir d'un monolithe de surface de base d'un mètre carré dont le pied de mil occupe le centre.

Aux 32^{ème} et 39^{ème} JAL une méthode isotopique a été utilisée. Le principe de cette méthode est de placer du ³²P dans le sol à des profondeurs fixées (0,8; 1,0; 1,3 et 1,6 m p.ex.) et de prendre au bout d'une ou de deux semaines des échantillons de feuilles sur le pied de mil. On détermine ensuite si elles sont radioactives, c'est-à-dire si les racines du mil ont absorbé du ³²P à la profondeur où celui-ci a été placé. Une présentation détaillée de cette méthode est donnée par Binh (1982; 1980).

Vitesse d'avancement du front racinaire

La vitesse d'avancement du front racinaire est la vitesse de croissance du bout de la racine la plus profonde.

Densité par couche du sol

La densité racinaire est déterminée soit par kg racine par m sol soit par m de racine par m de sol traversé.

Longueur spécifique

La longueur spécifique est définie comme la longueur par unité de matière sèche.

5.1.2.4. Mesures additionnelles

Pour améliorer la description de la croissance de la culture des mesures additionnelles suivantes sont effectuées:

- Surface foliaire spécifique. La surface foliaire spécifique est déterminée à partir des mesures au milieu de la feuille (surface par unité de poids matière sèche) en 3 ou 5 répétitions.
- Nombre et circonférence des talles primaires et hauteur du mil. La hauteur de toutes les talles des pieds de mil utilisés dans l'expérience avec le ³²P a été mesurée. En outre, à chaque date de prélèvement la circonférence des talles a été déterminée.
- Nombre des grains par chandelle et le poids matière sèche d'un grain individuel
- Longueur de la chandelle
- Caractéristiques du semis
- Taux de germination et conversion grain - plantule

5.2. Résultats et interprétation

5.2.1. Expérimentations du sol

5.2.1.1. Rétention hydrique

A partir des données de la densité du sol (Tableau 5.1), les humidités pondérales ont été transformées en humidités volumiques (Tableau 5.2). On a distingué 3 couches du sol: 0-0,2; 0,2-0,5 et 0,5-2,0 m de profondeur. Les courbes obtenues sont présentées à la Figure 5.1. Ces valeurs sont utilisées dans le modèle de simulation [Fichier NIORO1SP.DAT].

Tableau 5.1. Densité du sol ($g\ cm^{-3}$) à Nioro du Rip (moyenne de 9 points) avec une sonde gammadensimètre (Cissé & Vachaud, 1989) pour 8 couches (m).

couche	densité	couche	densité
0,0 - 0,1	1,63 ± 0,02	0,4 - 0,8	1,44 ± 0,02
0,1 - 0,2	1,55 ± 0,02	0,8 - 1,0	1,43 ± 0,02
0,2 - 0,3	1,48 ± 0,02	1,0 - 1,8	1,44 ± 0,02
0,3 - 0,4	1,45 ± 0,02	1,8 - 2,0	1,45 ± 0,02

Tableau 5.2. Valeurs moyennes de l'humidité volumétrique ($cm^3\ cm^{-3}$) à différents pF sous les deux traitements T0 et T3.

pF	couche		
	0-0,2 m	0,2-0,5 m	0,5-2,0 m
0,0	0,274	0,290*	0,311*
2,0	0,168	0,177	0,222
2,2	0,108	0,138	0,177
2,5	0,068	0,104	0,149
2,8	0,046	0,081	0,128
3,0	0,039	0,069	0,116
3,3	0,033	0,058	0,108
3,6	0,027	0,055	0,103
4,2	0,023	0,050	0,098
5,0	0,016*	0,043*	0,092*

(* valeur estimée à partir de la Figure 5.1.)

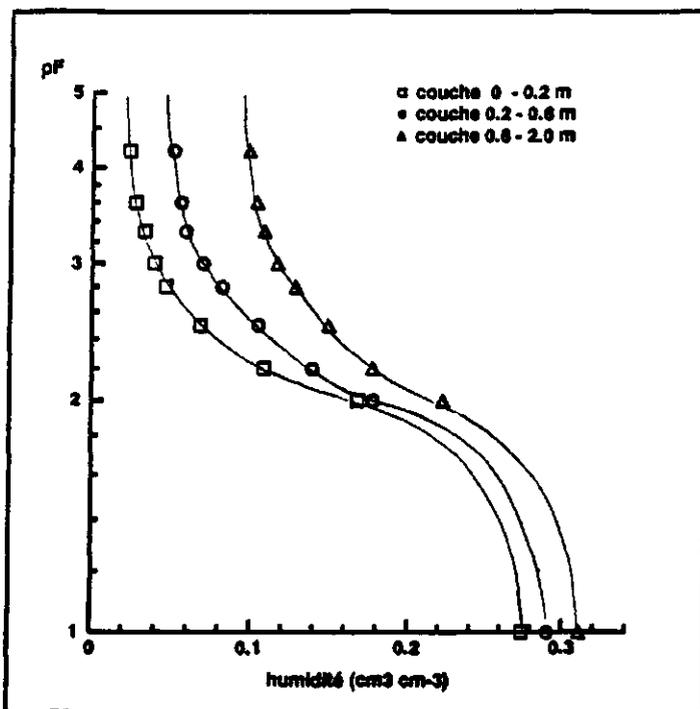


Figure 5.1. Courbes caractéristiques pF-teneurs en eau des trois couches du sol à Nioro du Rip.

En outre, les humidités du sol correspondant au capacité de champ déterminées au champ sont pour le couche de 0-0,1 et 0,1-0,2 m de profondeur, 0,1155 et 0,1130 g g⁻¹, respectivement. En utilisant la densité du sol moyenne (Tableau 5.1), l'humidité volumétrique a une valeur de 18,2 cm³ cm⁻³. Cette valeur correspond à une valeur de pF de 2,0. Cette observation est au moins remarquable, parce que Charreau (1961) a observé pour la même expérience sur un sol Dior et sol Dek une valeur de pF de 2,6. Il a conclu que 48 heures n'était pas suffisant pour atteindre un équilibre, mais on peut prévoir que dans un sol sableux la vitesse de transport de l'eau sera presque zéro après cette période de ressuyage. Apparemment, les caractéristiques hydrauliques du sol sont différentes.

5.2.1.2. Résistance du sol

Les résultats des mesures sont présentés au Tableau 5.3. La différence entre les parcelles C1 et C2 est remarquable, notamment dans les deux premières couches (0-0,05 et 0,05-0,10 m de profondeur).

5.2.1.3. Caractéristiques chimiques

Les résultats des analyses chimiques du sol des parcelles T0 et T3 au début (8/7 et 12/7 respectivement) et à la fin (12/10) de la saison de croissance sont présentés au Tableau 5.4. Les taux de N et de P diminuent légèrement dans les trois premières couches (0-0,4 m) pendant la saison de croissance (T0 et T3). L'augmentation des taux de N, de P et de C du sol du traitement T3 résultant des apports par la fertilisation et le fumier (12/7) est faible pour le N, mais plus prononcée pour le P. On rappelle que cette fertilisation a été comme suivante: au

Tableau 5.3. Résistance du sol ($N\ m^{-1}$ traversé) mesurée sur les parcelles C1 (labour) et C2 (labour + fumier + fumure minérale) à différentes profondeurs (PROF, m), moyenne de 10 répétitions.

profondeur	C1	C2
0,00 - 0,05	662 ± 102	1482 ± 251
0,05 - 0,10	905 ± 154	1713 ± 433
0,10 - 0,15	1424 ± 273	1886 ± 543
0,15 - 0,20	1602 ± 272	1851 ± 533
0,20 - 0,25	1246 ± 210	1549 ± 345
0,25 - 0,30	1045 ± 281	1123 ± 333
0,30 - 0,35	929 ± 195	1049 ± 263

semis du mil, 150 kg ha⁻¹ d'engrais (NPK, 10-21-21) ont été apportés sur les parcelles T3, T1 et C2. Au démarrage (10ème JAL) et au 41ème JAL 50 kg ha⁻¹ (urée) ont été appliqués sur les mêmes parcelles. Les apports d'azote s'élèvent donc respectivement à 15, 23 et 23 kg ha⁻¹, et qui ont été employés dans le modèle de simulation [NIORO1SN.DAT].

5.2.1.4. Evolution de la teneur en azote minéral

Evolution des teneurs en N-minéral du sol

Les résultats de base sont présentés au Tableau 5.5. Les quantités de N-minéral exprimées en kg ha⁻¹ 0,1 m⁻¹ et calculées pour les couches du sol considérées sont rapportées au Tableau 5.6 et représentées aux Figures 5.2 et 5.3.

Les teneurs en N-NH₄ sont très faibles comparativement à celles trouvés par De Bruin *et al.* (1989) pour un sol du Mali, en conditions contrôlées: 18 ppm 2 jours après humidification du sol. Krul *et al.* (1982) ont observé des valeurs de teneur en N-NH₄ en fin de saison des pluies au Mali de 5 à 10 ppm pour la couche 0-0,2 m et 3 à 4 ppm pour la couche 0,2-1,0 m de profondeur. Pichot *et al.* (1974) ont trouvé au Niger des valeurs entre 3 et 6 ppm pour une couche de sol de 0-0,4m de profondeur

En outre, il faut noter qu'il y a du temps entre les prélèvements et le moment d'analyse. Apparemment, les résultats obtenus sont sujet à caution.

Evolution quantitative de l'azote minéral

Les quantités totales de N-minéral mesurées dans le profil (0-2,0 m) au cours du temps sont présentées à la Figure 5.4.

On note des différences importantes de teneur en azote minéral entre les deux traitements au cours de 20 premiers jours suivant l'installation de la saison des pluies. Pendant cette période les teneurs sous T3 sont environ deux fois plus élevées que celles mesurées sous T0. A la fin de cette période les teneurs en azote minéral diminuent très fortement et tendent, sous les deux traitements, vers des valeurs identiques, de l'ordre de 10 ppm. Cette diminution très rapide implique, si on veut bien analyser et caractériser les différentes formes d'azote du sol d'avoir les pas de temps de mesure très rapprochés au début de la saison des pluies (de l'ordre de 2 à 3 jours). La variabilité relevée par les analyses de sol entraîne également qu'il

Tableau 5.4. Principales caractéristiques chimiques des 5 horizons (m) à Nioro du Rip sous les deux traitements, avant la mise en place de l'expérimentation et à la récolte en 1988, moyenne de 5 répétitions.

(T0: témoin absolu; T3: labour + fumier + fumure minérale.)

	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,4	0,4-0,8	0,8-2,0
T0 à 8/7					
C (‰)	2,97 ± 0,29	2,82 ± 0,34	2,55 ± 0,39	2,39 ± 0,20	1,99 ± 0,16
N (‰)	0,23 ± 0,04	0,20 ± 0,02	0,18 ± 0,01	0,19 ± 0,03	0,19 ± 0,02
C/N	12,2 ± 0,8	14,2 ± 1,4	13,3 ± 1,9	12,2 ± 1,1	10,6 ± 0,9
Ptot (‰)	0,252 ± 0,009	0,285 ± 0,027	0,266 ± 0,021	0,298 ± 0,027	0,293 ± 0,016
Pass (ppm)	49,68 ± 2,40	35,42 ± 15,42	22,43 ± 8,72	10,90 ± 3,42	5,70 ± 2,12
pH-eau	6,26 ± 0,48	6,39 ± 0,66	5,85 ± 0,32	6,23 ± 0,24	6,46 ± 0,10
pH-KCl	5,07 ± 0,35	5,22 ± 0,69	4,60 ± 0,32	4,92 ± 0,06	5,24 ± 0,12
T0 à 12/10					
C (‰)	2,53 ± 0,13	2,46 ± 0,18	2,50 ± 0,10	2,04 ± 0,12	1,88 ± 0,08
N (‰)	0,21 ± 0,04	0,21 ± 0,01	0,21 ± 0,02	0,19 ± 0,03	0,20 ± 0,02
C/N	12,7 ± 1,2	11,6 ± 1,4	11,8 ± 1,0	11,2 ± 1,5	9,6 ± 0,8
Ptot (‰)	0,263 ± 0,023	0,299 ± 0,023	0,294 ± 0,018	0,282 ± 0,026	0,287 ± 0,017
Pass (ppm)	52,72 ± 6,84	62,65 ± 17,02	21,25 ± 4,45	14,81 ± 5,44	12,05 ± 3,16
pH-eau	5,91 ± 0,27	5,85 ± 0,16	5,69 ± 0,30	6,28 ± 0,19	6,30 ± 0,11
pH-KCl	4,68 ± 0,27	4,51 ± 0,19	4,46 ± 0,10	4,90 ± 0,08	5,08 ± 0,09
T3 à 12/7					
C (‰)	3,19 ± 0,19	2,88 ± 0,15	2,69 ± 0,62	2,61 ± 0,62	1,89 ± 0,27
N (‰)	0,25 ± 0,03	0,24 ± 0,04	0,22 ± 0,02	0,22 ± 0,02	0,18 ± 0,02
C/N	13,0 ± 1,6	13,7 ± 2,6	11,7 ± 1,7	11,1 ± 2,1	10,5 ± 0,6
Ptot (‰)	0,361 ± 0,052	0,293 ± 0,048	0,315 ± 0,060	0,312 ± 0,043	0,279 ± 0,021
Pass (ppm)	109,0 ± 16,0	85,0 ± 28,6	47,6 ± 22,7	11,8 ± 4,2	7,5 ± 3,3
pH-eau	-	6,29 ± -	-	6,47 ± 0,17	6,53 ± 0,37
pH-KCl	-	5,14 ± -	-	5,07 ± 0,04	5,24 ± 0,23
T3 à 12/10					
C (‰)	2,73 ± 0,32	2,97 ± 0,28	2,63 ± 0,29	2,43 ± 0,36	1,87 ± 0,16
N (‰)	0,22 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,21 ± 0,01	0,21 ± 0,02	0,19 ± 0,01
C/N	12,6 ± 1,8	12,9 ± 1,1	12,5 ± 1,1	11,0 ± 0,3	9,8 ± 0,7
Ptot (‰)	0,290 ± 0,024	0,309 ± 0,025	0,296 ± 0,027	0,291 ± 0,030	0,282 ± 0,025
Pass (ppm)	78,0 ± 19,9	72,7 ± 17,5	31,5 ± 11,6	9,8 ± 3,4	6,0 ± 2,1
pH-eau	6,05 ± 0,47	5,75 ± 0,30	6,14 ± 0,56	6,77 ± 0,58	6,81 ± 0,52
pH-KCl	4,85 ± 0,42	4,48 ± 0,20	4,74 ± 0,35	4,32 ± 0,29	5,45 ± 0,35

faut prélever un nombre relativement élevé d'échantillons par date et par horizon pour avoir une bonne estimation des teneurs et des formes d'azote du sol.

En conclusion on peut dire que les résultats obtenus cette année nécessitent d'être confirmés ou infirmés l'année prochaine en prenant en compte les remarques faites ci-dessus.

Tableau 5.5. Evolution des taux d'azote minéral sous forme de NH_4^+ et de NO_3^- (ppm) mesurés dans différents horizons (m) et sous les traitements T0 et T3.

	<u>0 - 0.1</u>	<u>0.1 - 0.2</u>	<u>0.2 - 0.4</u>	<u>0.4 - 0.8</u>	<u>0.8 - 2.0</u>
	NH_4^+ NO_3^-				
date					
T0					
8/7	2,90 1,84	4,27 3,15	2,30 2,06	1,76 1,34	2,46 2,94
27/7	0,22 1,79	0,14 2,94	0,14 2,29	0,00 2,31	0,00 1,46
3/8	0,21 1,26	0,00 0,56	0,00 0,84	0,00 2,58	0,17 0,45
18/8	1,12 2,52	0,45 0,37	1,23 0,90	1,34 0,34	1,34 0,93
2/9	0,00 1,46	0,00 1,51	0,00 0,84	0,00 0,54	0,11 0,45
12/10	0,22 0,56	0,34 0,62	0,00 0,28	0,22 1,01	0,00 0,06
T3					
12/7	4,41 6,26	12,96 5,24	7,99 5,02	5,43 3,78	2,92 2,34
27/7	0,00 8,51	0,00 1,26	0,00 8,96	0,00 0,21	0,00 0,28
2/9	0,00 1,26	0,00 1,54	0,00 0,73	0,00 0,45	0,00 0,45

Tableau 5.6. Evolution des quantités d'azote minérale sous forme de NH_4^+ et de NO_3^- (kg ha^{-1} $0,1 \text{ m}^{-1}$).

	<u>0 - 0.1</u>	<u>0.1 - 0.2</u>	<u>0.2 - 0.4</u>	<u>0.4 - 0.8</u>	<u>0.8 - 2.0</u>
	NH_4^+ NO_3^-				
date					
T0					
8/7	4,73 3,00	6,62 4,88	1,68 1,51	0,63 0,48	0,30 0,35
27/7	0,36 2,92	0,22 4,56	0,10 1,68	0,00 0,83	0,00 0,18
3/8	0,34 2,05	0,00 0,87	0,00 0,62	0,00 0,93	0,02 0,05
18/8	1,83 4,11	0,70 0,57	0,90 0,66	0,48 0,12	0,16 0,11
2/9	0,00 2,38	0,00 2,34	0,00 0,62	0,00 0,19	0,01 0,05
12/10	0,36 0,91	0,53 0,96	0,00 0,21	0,08 0,36	0,00 0,01
T3					
8/7	7,19 10,20	20,09 8,12	5,85 3,68	1,95 1,36	0,35 0,28
27/7	0,00 13,87	0,00 1,95	0,00 6,56	0,00 0,08	0,00 0,03
2/9	0,00 2,05	0,00 2,39	0,00 0,53	0,00 0,16	0,00 0,05

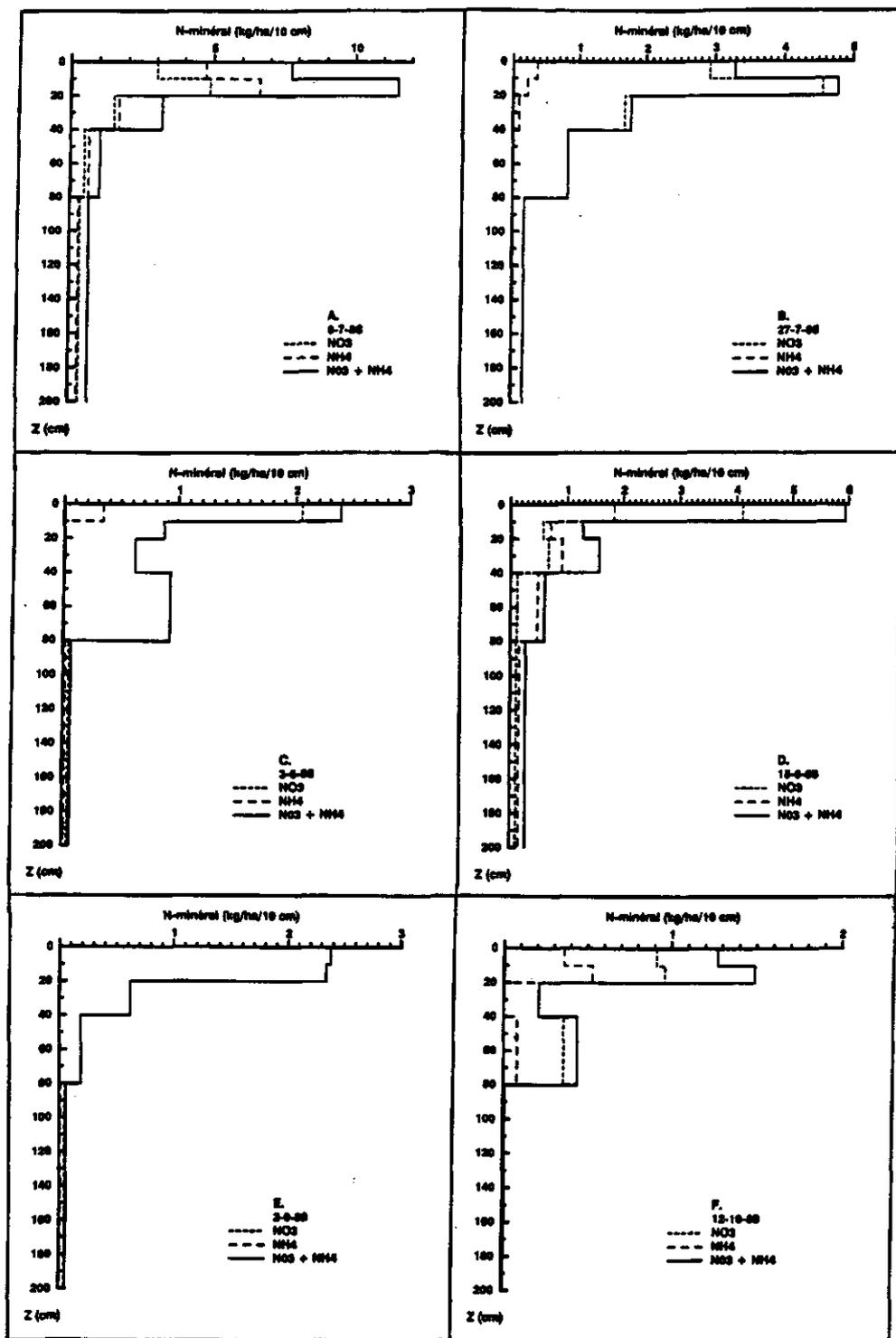


Figure 5.2. Distribution de l'azote minéral dans le profil du sol sous le traitement T0 à Nioro du Rip à 6 dates de prélèvements.

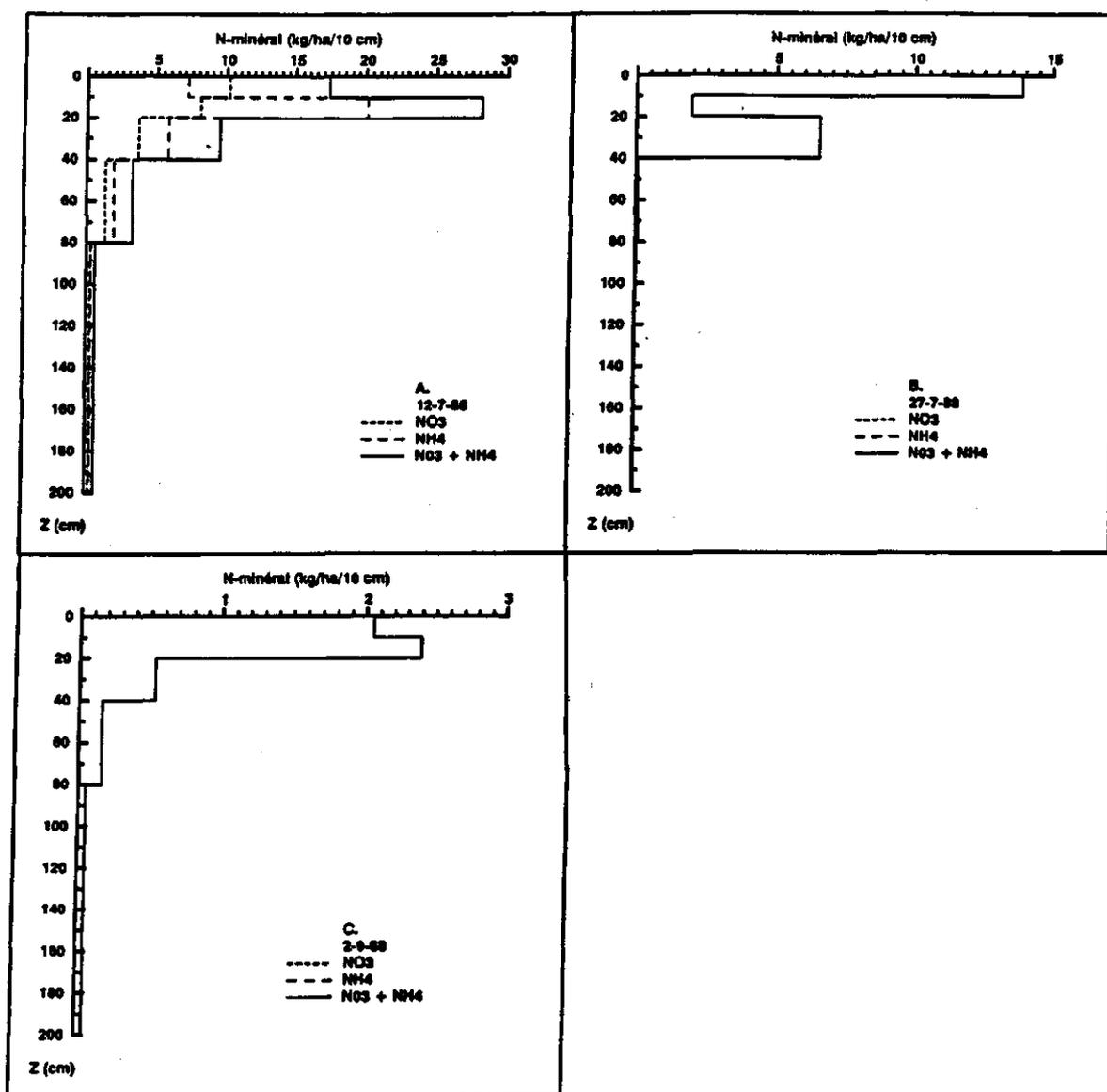


Figure 5.3. Distribution de l'azote minéral dans le profil du sol sous le traitement T3 à Nioro du Rip à 3 dates de prélèvements.

5.2.1.5. Evolution de la teneur en eau

La saison des pluies de cette année se caractérise par l'installation des pluies un peu tardive, un cumul pluviométrique élevé (917 mm; Tableau 1.2) et supérieur à la moyenne des dix dernières années (671 mm; Tableau 1.1).

La pluviométrie utile (semis - récolte) s'élève à 870 mm; soit environ deux fois les besoins en eau des variétés cultivées (450 mm; Cissé, 1986).

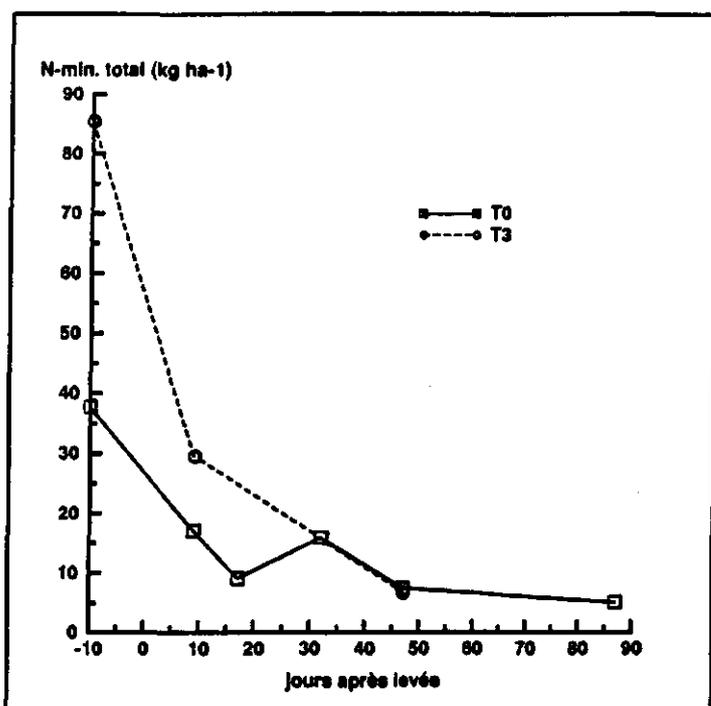


Figure 5.4. Evolution des quantités d'azote minéral total dans le profil (0-2,0 m) du sol au cours du temps et sous les traitements T0 et T3.

L'examen de la répartition temporelle de la pluviométrie révèle une très forte pluie (173 mm) tombée le 28 Juillet, environ deux semaines après le semis. Cette pluie a induit un ruissellement assez important et une avancée rapide du front d'humectation qui se situait fin Juillet à 1,3 m, alors qu'avec la pluie de semis (60 mm) le sol a été seulement humidifié jusqu'à 60 cm de profondeur.

Evolution des teneurs en eau du sol

Quinze profils hydriques ont été mesurés sur chaque tube d'accès entre le 6 Juin et le 13 Octobre. On trouvera aux Figures 5.5A et 5.5B des profils moyens relevés sur les traitements T0 et T3 à quatre dates caractéristiques: en sec, avant la saison des pluies (6-6-88), au semis (15-7-88), à mi-cycle de développement végétatif de la culture (3-9-88) et à la récolte (13-10-88). Les mesures hydriques effectuées montrent qu'à partir du 18-8-88 le sol a été humidifié jusqu'au-delà de la profondeur de mesure la plus grande ($Z = 3,7$ m). Cette évolution très rapide du front d'humectation est due aux fortes pluies enregistrées et aux fréquences des pluies à partir de la fin Juillet (Figure 1.2). Cette situation rend impossible le calcul de tous les termes du bilan hydrique, entre le semis et la récolte, par utilisation de la méthode dite de la "variation des stocks". Connaissance de la relation entre la teneur en eau des couches du sol et la conductivité hydrique (K) se situant au-delà d'un mètre de profondeur est nécessaire pour effectuer le calcul des termes du bilan par la méthode de Darcy.

Les Figures 5.6A à 5.6E présentent les profils hydriques moyens entre 0 et 3,7 m sur les deux traitements T0 et T3 à différentes dates, avant l'installation de la saison des pluies (6-6-88)

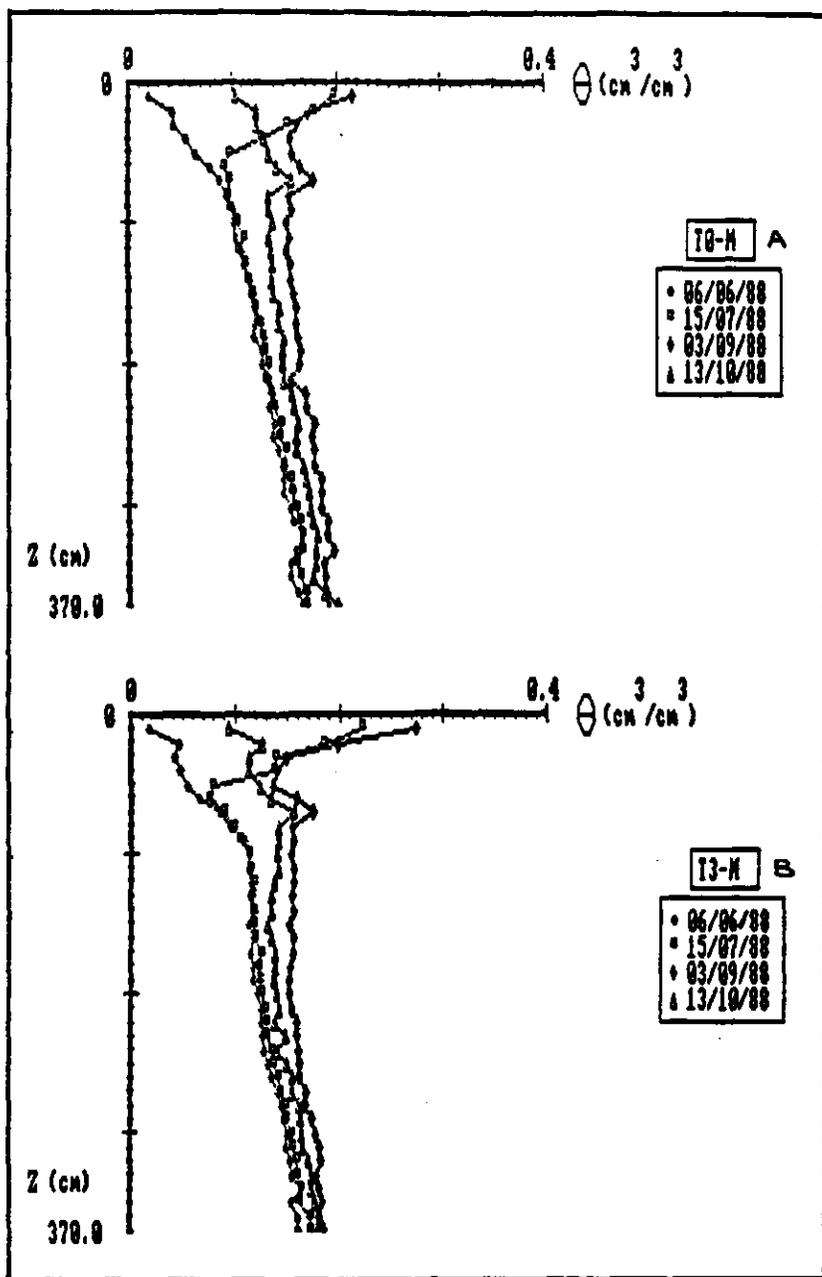


Figure 5.5. Profils hydriques mesurés à 4 dates sous les deux traitements: A: T0 et B: T3.

et au cours de la saison de croissance du mil. On peut noter, en examinant ces figures, l'évolution presque identique de la teneur en eau du sol aux différentes profondeurs sous les deux traitements. Pour mieux comprendre cette évolution on a effectué une analyse systématique côte par côte. Cette analyse ne montre que des différences relativement faibles au couches superficielles (entre 0 et 0,5 m), illustrées aux Figures 5.7A et 5.7B. En profondeur (Figures 5.7C à 5.7E) les teneurs sont identiques ou très faiblement différentes (Figure 5.7E).

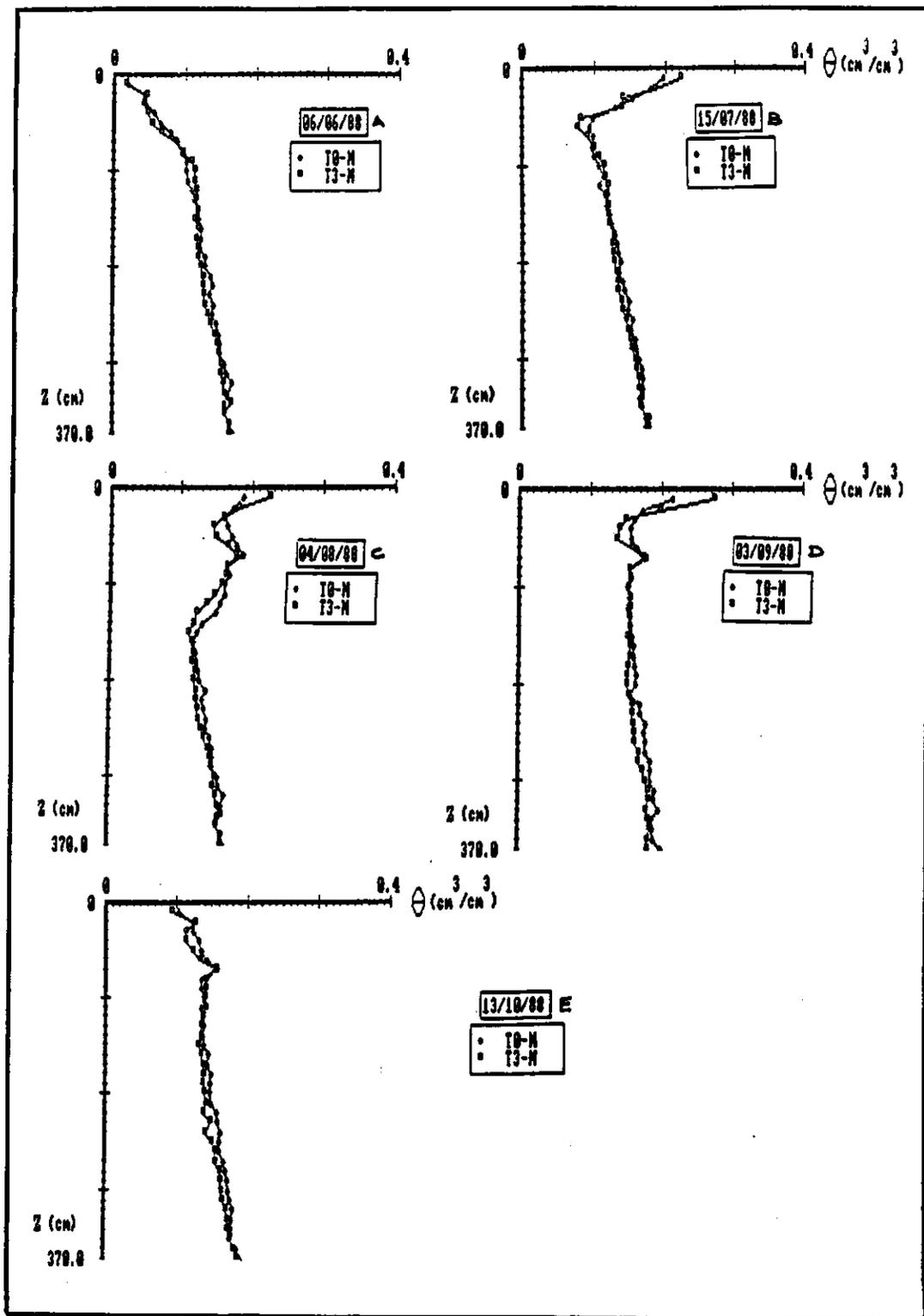


Figure 5.6. Comparaison de profils hydriques mesurés à 5 dates (A-E) sous les deux traitements (T0 et T3).

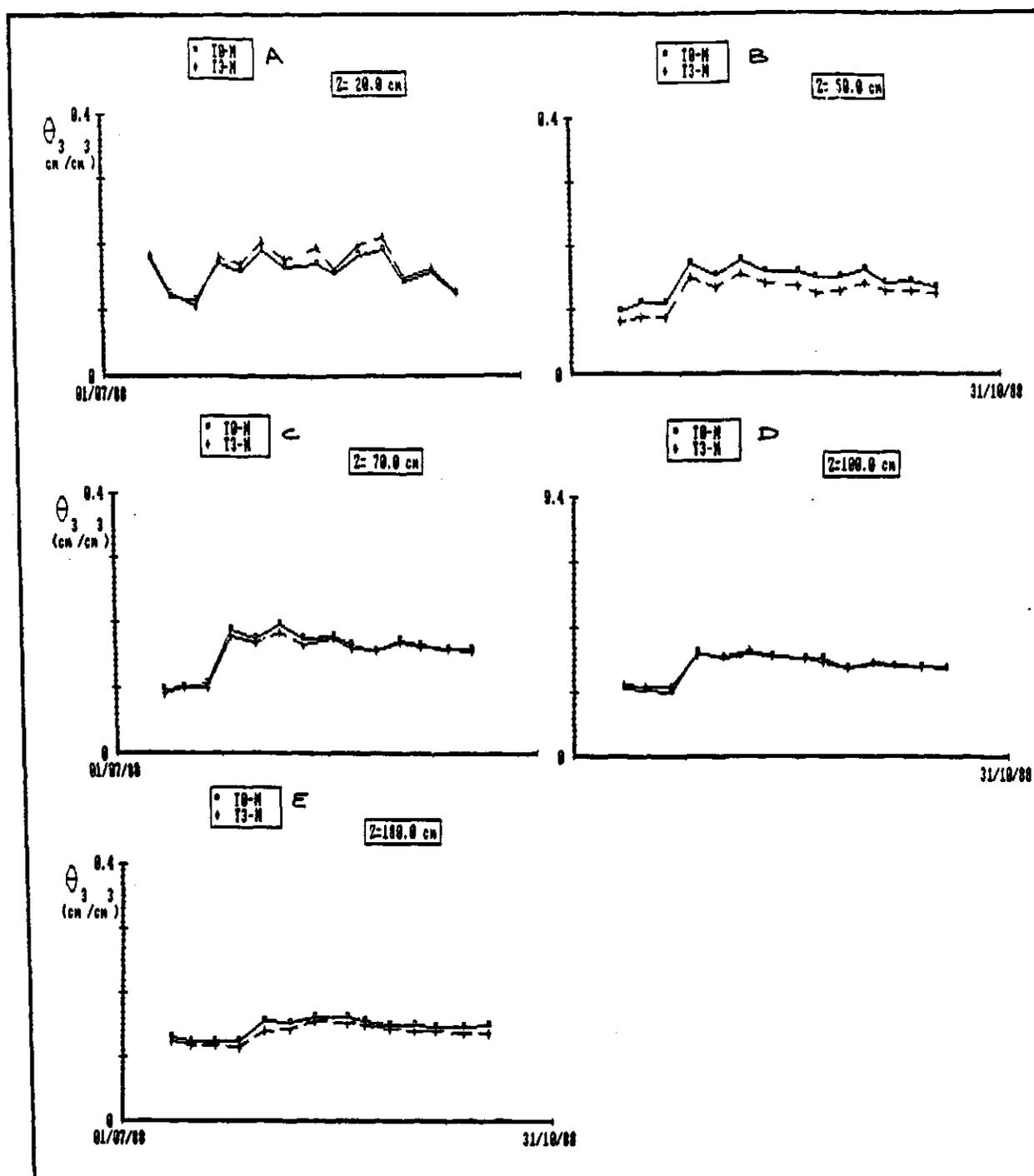


Figure 5.7. Evolution de l'humidité du sol à différentes profondeurs (A-E) sous les traitements (T0 et T3).

Evolution des stocks hydriques

L'évolution des stocks d'eau au cours du temps entre la surface et la profondeur atteinte par le front racinaire (0-2,3 m) ou entre la surface et la profondeur mesurée (0-3,7 m) ne montre aucune différence entre les deux traitements (Figures 5.8A et 5.8B). A la mi-cycle de développement végétatif le stock hydrique total de la couche du sol où sont présents des racines s'élève pour les deux traitements à environ 350 mm.

Malheureusement la quantité de percolation ne peut pas déterminée cette année. On a supposé que la quantité de percolation a été la même pour les deux traitements étudiés.

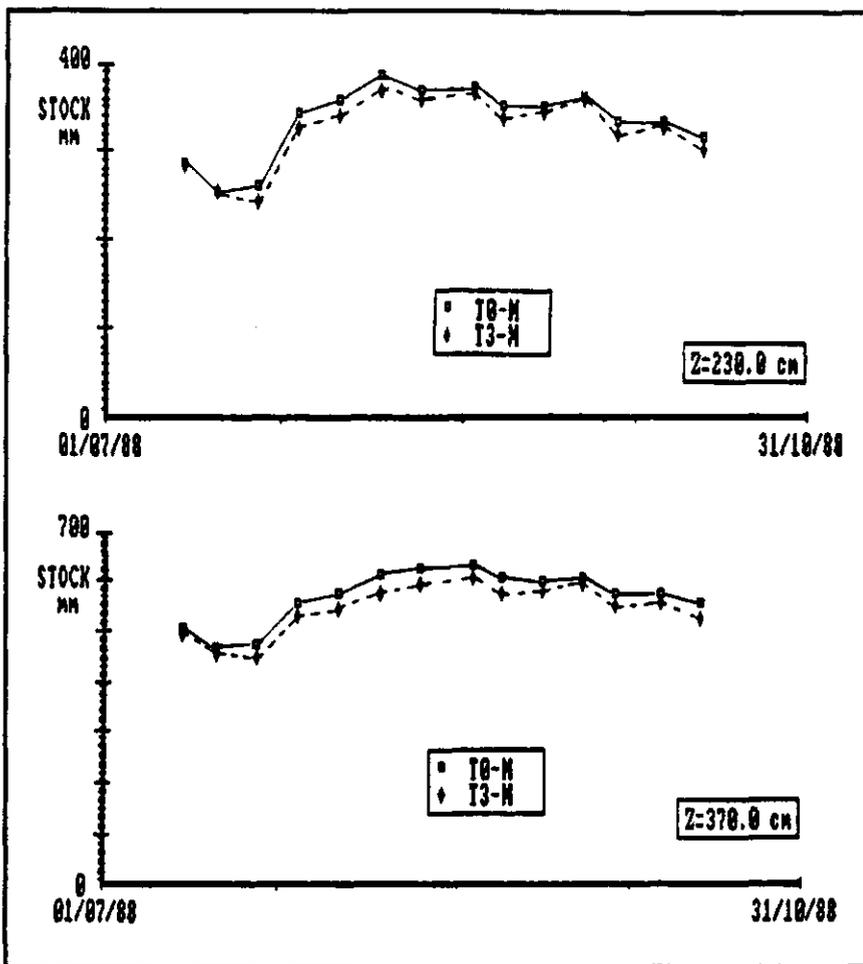


Figure 5.8. Stock hydrique dans le profil de 0-2,3 m (A) et de 0-3,7 m (B) de profondeur, sous les deux traitements (T0 et T3).

En conclusion on peut dire que les conditions d'alimentation hydrique de la culture ont été très bonnes tout au long de leur cycle de croissance. Le calcul des lames d'eau évapotranspirées par les cultures se développant sur les deux traitements mis en comparaison permettra de préciser cette observation; ce calcul sera fait dès que la caractérisation hydrodynamique du sol sera terminée.

5.2.2. Expérimentations de la culture

5.2.2.1. Rendements du mil

Les résultats en kg de matière sèche par hectare obtenus à partir des prélèvements de 5 plantes individuelles pendant la saison de croissance sont présentés au Tableau 5.7 et à la Figure 5.9 et celles fournies par 5 sous-parcelles de 24 m² sont présentées au Tableau 5.8. La différence entre les rendements des C- et T-parcelles peut être expliquée par l'effet de labour causé par la différence de date de labour (5/6 et 6/7, respectivement). La composition d'une chandelle est observée en plus de détail et les résultats sont présentés au Tableau 5.10. Le

Tableau 5.7. Poids matière sèche des différents organes du mil Souma III (kg ha⁻¹) à Nioro du Rip en 1988 à différents stades de développement (10a: juste après démarrage).
 (WLV: feuilles, WLVD: tiges du chandelle, WCOFL: reste des tiges mortes, WCOST: paille, WGR: graines, WSHT: total partie fleurs, WPAIL: racines, WNTA: racines aériennes, MSE: sérienne, WKT: plantes entière (moyenne de N poquets ayant n semences, WTOT: plantes entière (moyenne de N poquets ayant n plantes par poquet) sous deux traitements (TR): T0/C1: témoin absolu et T3/C2: labour + fumier + fumure minérale.)

TR	JAL	N	n	WLV	WLVD	WST	WSTD	WRTA	WCOST	WCOFL	WPAIL	WGR	WSH	WRT	WSE	WTOT	WLV:WST	WSH:WRT
C1	0	10	35	0,35±0,09	0,0	0,35±0,05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,70±0,12	0,0	0,70±0,12	0,32±0,04	0,87	1,89±0,11	50:50	37:63
C1	10	6	20	7,4±1,6	0,0	1,9±0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	9,3±2,0	0,0	9,3±2,0	1,56±0,40	0,0	10,9±2,2	79:21	86:14
C1	10a	5	3	2,5±0,5	0,0	0,6±0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1±0,1	0,0	3,1±0,1	0,34±0,08	0,0	3,44±0,6	81:19	90:10
T0	12	4	3	4,7±1,6	0,0	1,3±0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0±2,0	0,0	6,0±2,0	-	-	-	79:21	-
C1	17	4	3	8,3±3,1	0,03±0,06	2,6±1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,9±4,0	0,0	10,9±4,0	2,5±0,7	0,0	13,3±4,4	77:23	81:19
T0	17	5	3	9,9±2,7	0,06±0,09	2,6±0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	12,6±2,7	0,0	12,6±2,7	2,0±0,6	0,0	14,6±3,2	79:21	86:14
T0	32	5	3	205±138	0,6±0,3	97±82	0,15±0,24	0,0	0,0	0,0	303±220	0,0	303±220	-	-	-	70:30	-
T0	39	5	3	464±179	2,9±1,5	324±182	1,7±0,9	0,0	2,2±2,3	0,0	795±362	0,0	795±362	-	-	-	61:39	-
T0	47	5	3	657±220	9,4±4,4	856±405	2,6±1,4	33±23	34±56	0,0	1592±666	0,0	1592±666	xxxxxxx	0,0	qqqqqqqq	45:55	-
T0	60	5	3	-	-	-	-	-	1028±154	-	-	103±107	-	-	-	-	-	-
T0	72	5	3	987±117	141±24	2857±335	61±23	36±25	505±89	769±126	5356±645	1990±342	7346±894	-	-	-	25:75	-
T0	87	4	3	569±92	371±220	2804±992	181±112	25±20	524±107	952±174	5426±1583	2673±514	8099±2086	-	-	-	17:83	-
C2	0	12	40	-	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,96±0,06	0,0	0,96±0,06	0,40±0,10	1,20	2,56±0,10	-	37:63
C2	10	6	23	10,3±1,6	0,0	2,7±0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	13,0±2,0	0,0	13,0±2,0	1,8±0,4	0,0	14,8±1,9	79:21	88:12
C2	10a	6	3	2,6±0,7	0,0	0,7±0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3±0,9	0,0	3,3±0,9	0,37±0,06	0,0	3,67±0,85	78:20	90:10
T3	12	5	3	7,7±2,5	0,0	2,0±0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	9,7±3,3	0,0	9,7±3,3	-	-	-	80:20	-
C2	17	3	3	16,4±7,1	0,0	5,0±2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	21,4±9,3	0,0	21,4±9,3	2,0±0,4	0,0	23,4±9,6	77:23	91:9
T3	17	5	3	32,8±9,3	0,0	10,5±3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	43,3±13,0	0,0	43,3±13,0	4,4±1,4	0,0	47,7±14,3	76:24	91:9
T3	32	5	3	604±186	1,3±0,2	410±206	0,39±0,36	0,0	0,0	0,0	1016±390	0,0	1016±390	-	-	-	61:39	-
T3	39	4	3	776±548	6,1±3,7	623±268	2,8±1,7	0,0	3,9±1,7	0,0	1412±404	0,0	1412±404	-	-	-	57:43	-
T3	47	5	3	1394±356	24,3±17,7	3026±912	12,2±12,2	142±42	265±157	0,0	4864±1430	0,0	4864±1430	yyyyyyyy	0,0	zzzzzzzz	32:68	-
T3	60	5	3	-	-	-	-	-	1392±235	-	-	451±383	-	-	-	-	-	-
T3	72	4	3	1229±119	232±90	4279±302	101±27	97±40	647±36	1015±77	7600±528	2981±601	10581±801	-	-	-	23:77	-
T3	87	5	3	847±352	541±97	4556±1366	189±51	69±45	659±110	1110±85	7971±1890	3675±286	11646±2083	-	-	-	15:85	-

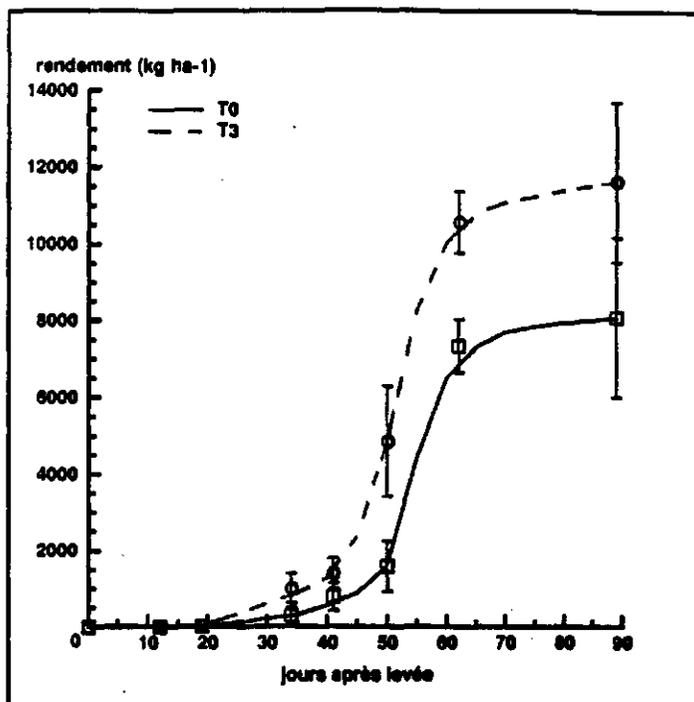


Figure 5.9. Production pondérale du mil sous les 2 traitements (T0 et T3) en fonction du temps.

Tableau 5.8. Nombre d'épis et poids matière sèche (kg ha^{-1}) du mil Souna III à Nioro du Rip en 1988. (A: sous 4 traitements (TR) à 81 JAL (moyenne de cinq souspar-celles de 24 m^2); T0: témoin absolu; T1: labour + fertilisation minérale; T2: labour + fumier; et T3: labour + fumier + fumure minérale et B: à 87 JAL avec de la matière organique enfouie dans le sol: B13 sacs avec du paille et B24 sacs avec du fumier (moyenne de 5 poquets), RE: Reste des épis.)

TR	nombre	paille	RE	grains	total
A)					
T0	49896 ± 1936	4354 ± 363	980 ± 97	2310 ± 23	7644 ± 370
T1	60729 ± 7066	5521 ± 848	949 ± 122	2438 ± 325	8908 ± 1172
T2	47917 ± 3333	4534 ± 402	789 ± 142	2029 ± 364	7352 ± 893
T3	51667 ± 2917	6067 ± 285	993 ± 47	2717 ± 245	9777 ± 527
B)					
B13	56875 ± 4419	5325 ± 813	983 ± 50	2509 ± 249	8817 ± 1112
B24	57708 ± 2652	5632 ± 404	1002 ± 1	2450 ± 201	9084 ± 204

Tableau 5.9. Nombre d'épis et poids matière sèche (kg ha^{-1}) du mil Souna III à Nioro du Rip en 1987, moyennes de 32 parcelles de 25 m^2 avec un fertilisation de 150 kg ha^{-1} de fumure minérale (14-7-7) et 100 kg ha^{-1} d'urée (P: 900 mm) (Cissé, non-publié).

Nombre d'épis	pailles	reste des épis	grains	total
74563 ± 9201	9713 ± 774	1368 ± 119	2631 ± 224	13711 ± 939

Tableau 5.10. Composition d'un épi de mil (Souna III) par rapport au poids matière sèche des grains d'épi (PGR).

A: à 81 JAL sous les 2 traitements (TR), avec 5 répétitions (R) d'un échantillon de 10 épis; T0: témoin absolu et T3: labour + fumier + fumure minérale et B: à 87 JAL sous les deux traitements (TR) avec de la matière organique contenue dans les sacs et enfouie dans le sol: B1 & B3: paille et B2 & B4: fumier, R: nombre d'épis, M: moyen.

TR	R	PGR	tige/PGR	fleur/PGR	reste d'épi/PGR
A)					
T0	5	39,223	0,091	0,313	0,404
	5	46,874	0,091	0,316	0,407
	5	52,634	0,093	0,303	0,396
	5	49,668	0,094	0,299	0,393
	5	32,470	0,106	0,387	0,419
	M	44,174±8,224	0,095±0,006	0,324±0,036	0,419±0,042
T3	5	58,248	0,086	0,263	0,349
	5	58,119	0,080	0,277	0,357
	5	51,251	0,077	0,254	0,331
	5	57,348	0,094	0,299	0,393
	5	40,909	0,093	0,316	0,408
	M	53,175±7,446	0,086±0,008	0,282±0,026	0,368±0,032
B)					
B1	22	49,428	0,093	0,286	0,379
B3	18	53,946	0,099	0,307	0,406
	M	51,687±3,195	0,096±0,004	0,297±0,015	0,393 ± 0,019
B2	19	48,609	0,097	0,289	0,386
B4	15	40,816	0,109	0,325	0,434
	M	44,713±5,510	0,103±0,008	0,307±0,025	0,410 ± 0,034

rapport (en pour-cent) du poids des gaines à celui de la matière sèche des tiges s'élève à la récolte respectivement sous les traitements T0 et T3 à $17,4 \pm 3,4$ et $14,4 \pm 1,4\%$; la moyenne générale étant égale à $15,6 \pm 2,9\%$.

Pendant la période entre le 39ème et le 47ème JAL sous le traitement T3 la croissance de mil était très élevée, qui, exprimée en poids de matière sèche, est de valeur de $430 \text{ kg ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$ (Tableau 5.7). Une telle croissance a été observée sur le maïs sous irrigation avec fertilisation par Yanuka et al. (1982).

Le résultat sur le rendement des grains sous traitement T3 obtenu cette année est du même ordre de grandeur que celui de l'année précédente (Tableau 5.9). Cependant le poids matière sèche de tige est 62% environ de la valeur obtenue en 1988. La différence peut être expliquée par la disponibilité de phosphore du sol après plusieurs années sous culture d'arachide. L'effet diminue après la première année.

La croissance du mil étant fonction du rayonnement absorbé par la plante. On trouve en général un rapport linéaire entre la production de matière sèche et la quantité totale du rayonnement absorbé par des feuilles (Monteith, 1977). La Figure 5.10 illustre que la relation n'est pas linéaire au cours de la saison. Au-delà d'une absorption de 700 MJ m^{-2} , le rapport augmente fortement. L'efficacité de production par unité de la radiation passe de $2,98$ à $12,83 \text{ kg MJ}^{-1}$. La valeur de $2,98$ correspond à la valeur moyenne de $2,8$ des données (rangée $2,1$ à $3,8$) citées par Kiniry *et al.* (1989). Potentiellement, la culture a une possibilité d'augmenter sa efficacité très fortement. Une explication pour ce phénomène peut être l'augmentation de la capacité de photosynthèse causée par un 'pouvoir de puits' fort (sink-strength), c'est-à-dire quand la demande pour les produits photosynthétiques est très grande (par exemple pendant

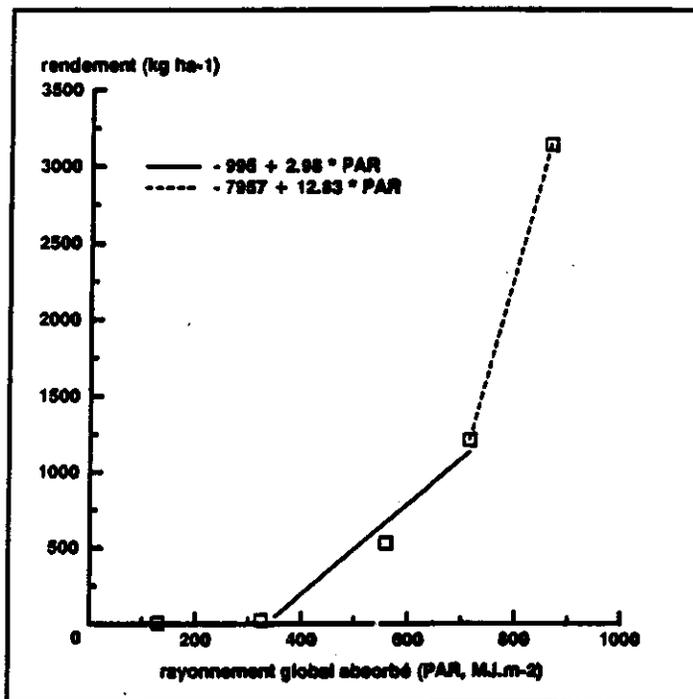


Figure 5.10. Estimation de la production de matière sèche du mil sous le traitement T3 en fonction du rayonnement absorbé par la plante.

le stade de développement de tallage), la photosynthèse sera stimulée. Cette augmentation potentielle est pris en compte dans le modèle de simulation par un facteur de stimulation (valeur de $1/CVSS$) [MIL88, Ligne 6220]. Celui-ci est fonction de la distribution des produits photosynthétiques et est illustré à la Figure 5.11 [MIL88, Ligne 2200].

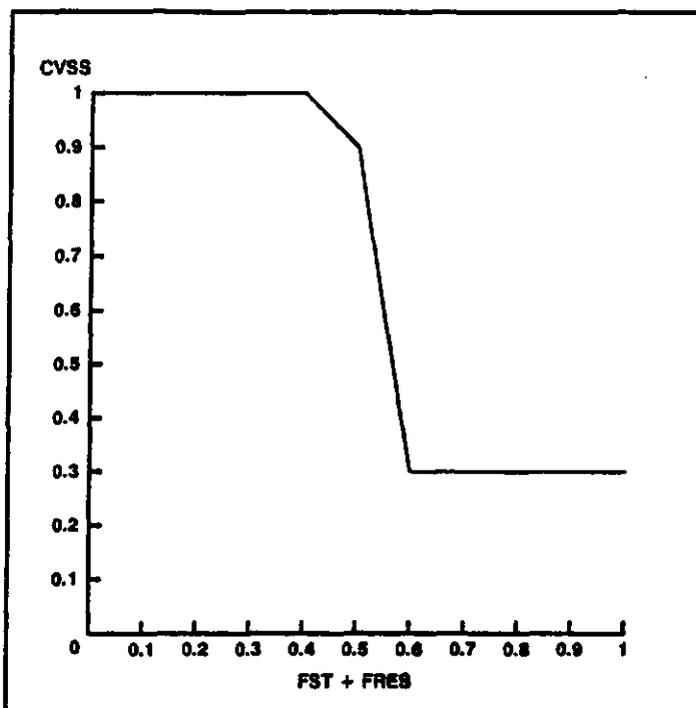


Figure 5.11. Facteur de stimulation de la vitesse d'assimilation en fonction de la distribution des produits d'assimilation nette dans les tiges et réserves.

Distribution des produits d'assimilation nette

La distribution des produits d'assimilation nette, utilisée dans le modèle de simulation, est présentée à la Figure 5.12 [MIL88, Ligne 2090-2150]. Il faut noter que on n'a pas déterminé le poids matière sèche de réserves, donc la distribution concernant cette partie est une estimation. La distribution vers les racines est aussi une estimation parce que les résultats des matières sèches ne sont pas encore disponibles.

Facteur de réduction du démarrage

La valeur de ce facteur est spécifique pour chaque organe et dans l'expérience on a obtenu des valeurs de 0,25; 0,26; et 0,21 pour les feuilles, les tiges et les racines, respectivement [MIL88, Ligne 2190].

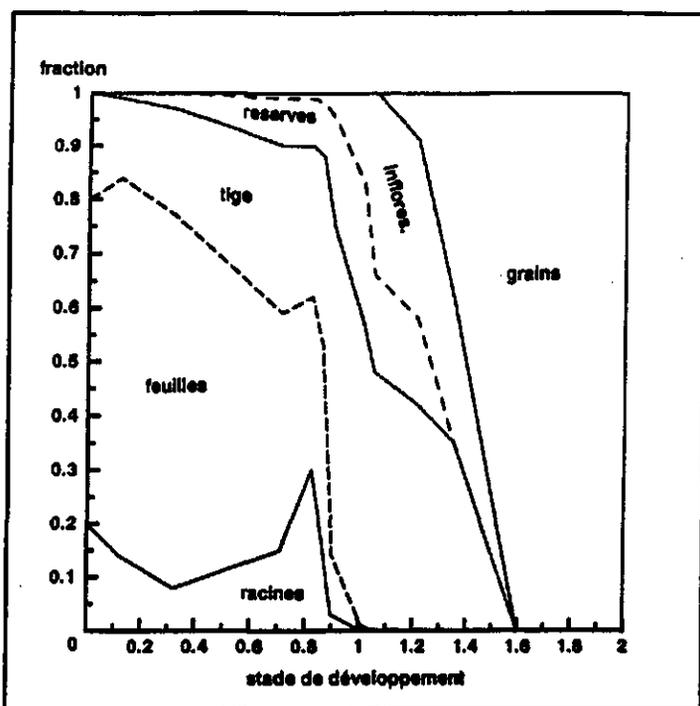


Figure 5.12. La distribution des produits d'assimilation nette parmi les organes de la culture.

5.2.2.2. Taux et absorption de l'azote et de phosphore

Les résultats des analyses de N et de P sont présentés aux Tableaux 5.11 et 5.12, respectivement. Les résultats des analyses des tiges et des gaines faites à la récolte sont présentés au Tableau 5.13. En utilisant les poids de matière sèche (Tableau 5.7) on a calculé les absorptions de N et de P par la culture pour la production aérienne (Figures 5.13A et 5.13B, respectivement).

Azote

Tableau 5.11 montre que les taux de N des feuilles diminuent au cours de la saison de croissance, comme on l'observe en général. La différence entre les deux traitements est négligeable. A la récolte le taux de N des gaines est pratiquement le même pour le T0 et le T3 (Tableau 5.13). Le taux d'azote moyen de la paille sur le T0 et le T3 à la récolte a une valeur de 0,96 et 1,07%, pour la biomasse aérienne totale les valeurs sont identiques (1,42%). Sous des conditions non-fertilisées à la récolte Penning de Vries & van Keulen (1982) ont trouvé une rangée de 0,6 à 1,0% pour la biomasse aérienne totale des graminées. Le Mémento de l'Agronomie (MdlC, 1977) donne une valeur de 0,6% pour la paille de mil. Le taux d'azote sur le T0 semble donc très élevé.

Une telle valeur est possible théoriquement, si un autre élément nutritif est limitant. L'élément le plus vraisemblable est le phosphore (Penning de Vries & Djitéye, 1982). Le rapport P/N de la biomasse aérienne donne une indication utile pour se prononcer du déficit relative éventuel des éléments nutritifs. Les valeurs du rapport P/N de la biomasse aérienne

Tableau 5.11. Taux d'azote (X) des différents organes du mil (Souma III) à Nioro du Rip en 1988.

(A: à différents stades de développement, LV: feuilles, LVD: feuilles mortes, ST: tiges, STD: tiges mortes, COST: tiges de la chandelle, COFL: reste des fleurs, GR: grains, RT: racines et RTA: racines aériennes. T0/C1: témoin absolu; T3/C2: labour + fumier + fumure minérale, et B: à 87 JAL sous les 2 traitements (TR) avec de la matière organique contenue dans les sacs et enfouie dans le sol: B13: paille et B24: fumier.)

TR	JAL	LV	LVD	ST	STD	RTA	COST	COFL	GR	RT
A)										
C1	0	5,93	-	-	-	-	-	-	-	-
C1	10	5,17	-	3,93	-	-	-	-	-	1,72
T0	12	4,76	-	4,32	-	-	-	-	-	-
C1	17	3,88	-	3,05	-	-	-	-	-	-
T0	17	3,11	-	1,90	-	-	-	-	-	1,55
T0	32	3,61	-	2,48	-	-	-	-	-	-
T0	47	3,40	1,39	1,61	1,06	1,34	1,97	-	-	X,XX
T0	60	-	-	-	-	-	-	-	2,83	-
T0	72	2,65	1,67	0,71	1,36	1,25	0,89	1,00	2,44	-
T0	81	-	-	-	-	-	0,74	0,97	2,33	-
T0	87	2,14	1,53	0,66	1,17	1,22	-	-	-	-
C2										
C2	0	4,54	-	-	-	-	-	-	-	2,3
C2	10	5,64	-	3,97	-	-	-	-	-	1,79
T3	12	4,76	-	4,20	-	-	-	-	-	-
C2	17	5,23	-	3,51	-	-	-	-	-	1,84
T3	17	4,29	-	2,99	-	-	-	-	-	1,55
T3	32	3,39	-	2,24	-	-	-	-	-	-
T3	47	3,26	1,54	2,12	1,27	1,48	2,18	-	-	X,XX
T3	60	-	-	-	-	-	-	-	3,00	-
T3	72	2,64	1,79	0,88	1,25	1,04	0,83	1,06	2,12	-
T3	81	-	-	-	-	-	0,84	1,00	2,33	-
T3	87	2,43	1,67	0,79	0,97	1,35	-	-	-	-
B)										
B13	87	-	-	-	-	-	-	-	2,08	-
B24	87	-	-	-	-	-	-	-	2,11	-

du T0 et du T3 de 0,13 et 0,14, respectivement, sont à niveau dans le même ordre de grandeur, et elles se trouvent près de la limite maximale de 0,15 (De Ridder *et al.*, 1982) si le taux de P a été bien déterminé (voir ci-après). Ceci indiquerait un déficit relatif de N en comparaison avec P. Il n'est pas question d'un déficit absolu de ces éléments cependant, car dans ce cas on aurait trouvé un taux de N et de P minimal à la récolte de 0,5 et de 0,05%, respectivement. (De Ridder *et al.*, 1982). La paille seule a cependant déjà un taux de N d'à peu près 1% pour T0 et T3 (voir ci-dessus), son taux de P est de 0,14 et 0,15%, respectivement (voir ci-dessus). En autre mots, il a été question d'une consommation de luxe des deux éléments sous les deux

Tableau 5.12. Taux de phosphore (%) des différents organes du mil (Souna III) à Nioro du Rip en 1988.

(A: à différents stades de développement, LV: feuilles, LVD: feuilles mortes, ST: tiges, STD: tiges mortes, COST: tiges de la chandelle, COFL: reste des fleurs, GR: grains, RT: racines et RTA: racines aériennes. T0/C1: témoin absolu; T3/C2: labour + fumier + fumure minérale, et B: à 87 JAL sous les deux traitements (TR) avec de la matière organique contenue dans les sacs et enfouie dans le sol: B13: paille et B24: fumier.)

TR	JAL	LV	LVD	ST	STD	RTA	COST	COFL	GR	RT
A)										
C1	0	-	-	0,637	-	-	-	-	-	0,390
C1	10	0,309	-	0,315	-	-	-	-	-	0,180
T0	12	0,559	-	0,450	-	-	-	-	-	-
C1	17	0,377	-	-	-	-	-	-	-	0,210
T0	17	0,395	-	0,392	-	-	-	-	-	0,170
T0	32	0,320	0,167	0,303	-	-	-	-	-	-
T0	47	0,310	0,092	0,249	0,113	0,174	0,512	-	-	X,XX
T0	60	-	-	-	-	-	-	-	0,424	-
T0	72	0,224	0,113	0,147	0,135	0,113	0,088	0,149	0,321	-
T0	81	-	-	-	-	-	0,125	0,149	0,292	-
T0	87	0,263	0,129	0,123	0,118	0,218	-	-	-	-
C2										
C2	0	-	-	0,637	-	-	-	-	-	0,390
C2	10	0,328	-	0,300	-	-	-	-	-	0,180
T3	12	0,559	-	0,460	-	-	-	-	-	-
C2	17	0,420	-	0,364	-	-	-	-	-	0,210
T3	17	0,429	-	0,392	-	-	-	-	-	0,170
T3	32	0,412	0,113	0,349	-	-	-	-	-	-
T3	47	0,401	0,118	0,399	0,105	0,202	0,609	-	-	X,XX
T3	60	-	-	-	-	-	-	-	0,395	-
T3	72	0,251	0,122	0,105	0,105	0,122	0,110	0,150	0,318	-
T3	81	-	-	-	-	-	0,118	0,150	0,303	-
T3	87	0,260	0,134	0,137	0,118	0,196	-	-	-	-
B)										
B13	87	-	-	-	-	-	-	-	0,274	-
B24	87	-	-	-	-	-	-	-	0,270	-

Tableau 5.13. Taux d'azote (N, %) et de phosphore (P, %) des tiges et des gaines du mil Souna III à 87 JAL à Nioro du Rip en 1988 sous deux traitements.

(T0: témoin absolu et T3: labour + fumier + fumure minérale.)

	N/T0	N/T3	P/T0	P/T3
tiges	0,58	0,74	0,092	0,124
gaines	1,06	1,11	0,274	0,216
tiges + gaines	0,66	0,79	0,123	0,137

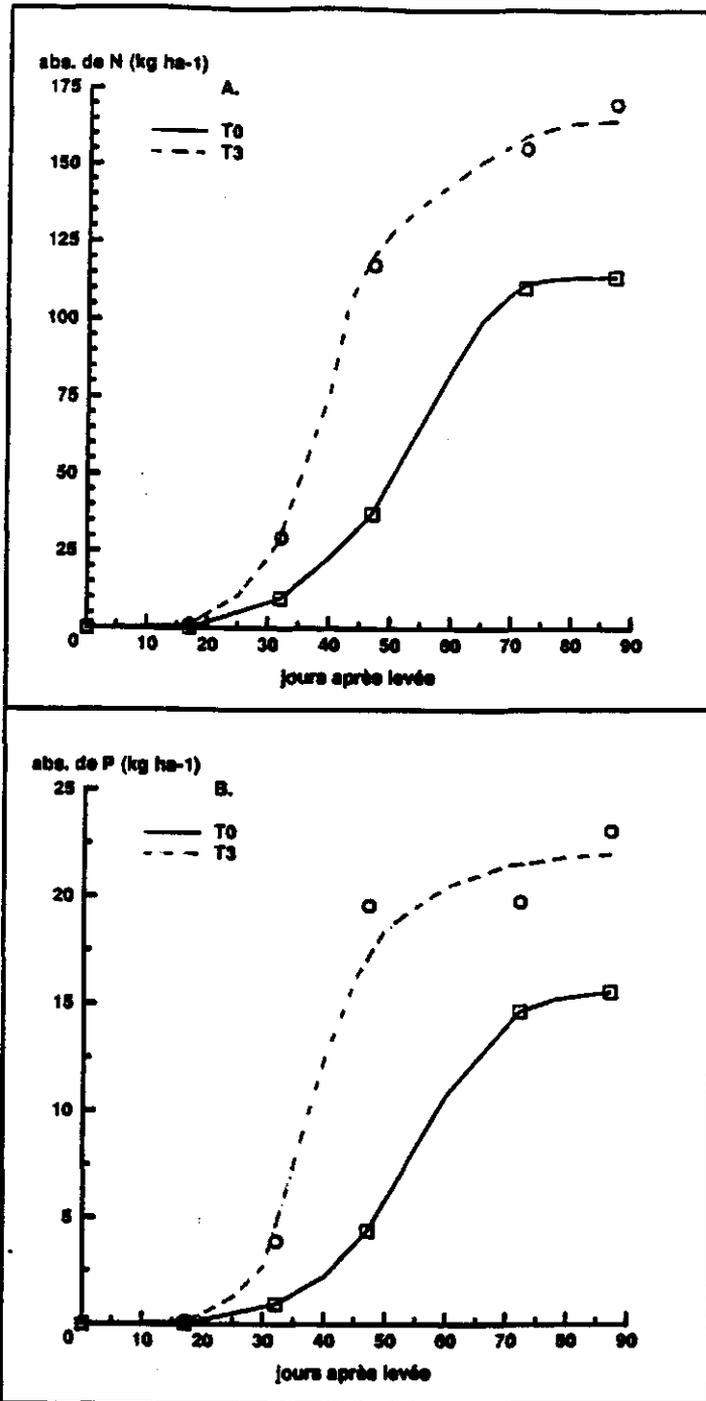


Figure 5.13. Evolution des quantités d'azote (A) et de phosphore (B) mobilisées par le mil sous les deux traitements (T0 et T3) à Nioro du Rip en 1988.

traitements, une consommation qui a été relativement la plus élevée pour le P. Il faut ainsi conclure que la disponibilité de N et de P du T0 est beaucoup plus élevée que l'on s'attendrait pour un témoin sur les sols de la région.

Ceci est confirmé par l'absorption totale d'azote pour la biomasse aérienne, qui a été 115 kg ha⁻¹ sur le T0 au lieu de quelques dizaines de kg trouvées normalement (Roswall, 1980). La quantité élevée absorbée n'est pas en concordance avec la quantité d'azote minéral mesurée dans le profil (0-2 m; Figure 5.4), ce qui indiquerait que les valeurs obtenues lors de la détermination de l'azote minéral du sol risquent d'être sous estimées. Donc, si ni l'azote ni le phosphore est un élément nutritif limitant sur le T0 et le T3, tandis qu'on a également conclu que la disponibilité d'eau n'a pas été limitative (partie 5.2.1.5) il faut conclure qu'un autre élément ou facteur a été plus limitatif que N et P vers la fin de la croissance.

L'apport de N sur le traitement T3 a été de 65 kg ha⁻¹ par la fumure minérale (Tableau 1.5) et 32 kg ha⁻¹ par le fumier (Tableau 2.5). Si on suppose que le mil se développant sur T3 a mobilisé du sol la même quantité que le mil sur le T0 alors, sur T3, le mil aurait consommé (165-115 =) 50 kg ha⁻¹ provenant de l'engrais minéral et de la décomposition du fumier, soit 52% des quantités de N fournies par ces deux sources. Sous conditions sahéliens l'utilisation d'engrais est fonction de la disponibilité d'azote du sol, de la pluviométrie et de la forme d'engrais (urée, NPK, etc.). Ce pourcentage, étant relativement élevé, pourrait suggérer qu'il a été question d'une situation avec relativement peu de pertes, tandis que la disponibilité de N du sol non-fertilisé est basse (Penning de Vries & Djitéye, 1982, p.208). Ceci est en contradiction avec la récolte élevée de N sur T0.

Après ces considérations, on doit conclure que le traitement T0 ne se comporte pas comme un témoin non-fertilisé. Ceci est confirmé par l'absorption totale de 34 kg ha⁻¹ de N par le mélange des graminées et du mil sur le sol non-fertilisé (partie 3.2); le T0 en donne plus de 80 kg ha⁻¹ de N de plus! Nous avons pensé d'abord à la grande pluie du 28 juillet qui aurait pu causé une contamination par ruissellement de T0 à partir de T3, et même de T1 et T2. Mais les récoltes élevées sur T1 et T2 (Tableau 5.8) sont déjà difficilement à expliquer sans des pertes du fumier et de l'engrais, et si on suppose seulement une perte de T3 pour expliquer le rendement élevé de la matière sèche et de l'azote sur le T0, le recouvrement d'azote sur le T3 dépasserait 100%.

On est obligé de conclure que l'histoire de la fertilisation et des cultures de notre parcelle semble de perturber nos analyses. Seulement dans la mesure qu'elles se basent sur des analyses chimiques de la matière sèche récoltée, elles pourront être vérifiées. Quelques échantillons ont été analysés déjà au Sénégal de même qu'aux Pays-Bas. Les résultats en ce qui concerne les taux d'azote et de carbone sont semblables, mais le taux de P trouvé aux Pays-Bas est presque 2 fois (1,83) plus basse qu'au Sénégal. Des vérifications additionnelles sont en cours.

Ces considérations et les problèmes déjà signalés pour la détermination de l'azote minérale (partie 5.1) impliquent qu'il est devenu impossible de quantifier les différentes sources de l'azote mobilisé (sol, engrais minéral, fumier, etc.) à partir des essais de 1988.

Pour le modèle de simulation on a besoin de la vitesse d'absorption d'azote potentielle. En utilisant Figure 5.13A, on a obtenu une valeur de 6,1 kg j⁻¹, qui correspond à celle du blé (van Keulen & Seligman, 1987).

Phosphore

Les données ci-dessous sont à utiliser avec précaution, car c'est possible que les taux de P ont été surestimés. Ceci est plus vraisemblable qu'une sous-estimation du taux de P dans les échantillons analysés aux Pays-Bas, vu les niveaux élevés des taux de P observés, et vu le rapport P/N de 0,35 trouvé pour le mélange de mil et des graminées sur sol non-fertilisé (partie 3.2).

Tableau 5.14. Longueur moyenne des racines par plante (RTLTOT, cm) et longueur spécifique des racines (RTSL, $10+3 \text{ m kg}^{-1}$) du mil Souna III à différents stades de développement à Nioro du Rip en 1988 (10a: juste après démariage).
(Moyenne de n poquets sous les 2 traitements (TR) T0/C1: labour et T3/C2: labour + fumier + fumure minérale.)

JAL	TR	RTLTOT	RTSL	n	TR	RTLTOT	RTSL	n
0	C1	5,7 ± 1,0	62,3 ± 11,7	10	C2	4,6 ± 1,3	45,4 ± 10,6	10
10	C1	28,5 ± 5,1	37,0 ± 4,6	6	C2	29,3 ± 9,4	37,1 ± 3,6	6
10a	C1	33,0 ± 3,4	29,7 ± 5,1	5	C2	33,7 ± 6,1	27,9 ± 4,7	6
17	C1	171,6 ± 24,8	22,1 ± 6,0	4	C2	131,6 ± 8,8	20,2 ± 3,7	3
17	T0	125,6 ± 28,1	20,7 ± 9,3	5	T3	246,6 ± 91,7	16,9 ± 1,7	5
47	T0							

Tableau 5.15. Poids matière sèche (g m^{-2}) et des racines et en rapport au poids total (%) à différentes profondeurs (m) et récoltés à la floraison sous les deux traitements à Nioro du Rip en 1988.
(Moyenne de 3 observations.)

Couche	T0		T3	
	MS	%	MS	%
0,00 - 0,10	4,543	52,9	9,754	52,6
0,10 - 0,20	0,836	9,7	3,235	17,4
0,20 - 0,30	0,258	3,0	0,702	3,8
0,30 - 0,40	0,266	3,1	0,258	1,4
0,40 - 0,50	0,226	2,6	0,283	1,5
0,50 - 0,60	0,218	2,5	0,225	1,2
0,60 - 0,70	0,191	2,2	0,243	1,3
0,70 - 0,90	0,405	4,8	0,455	2,5
0,90 - 1,10	0,270	3,1	0,500	2,7
1,10 - 1,30	0,261	3,0	0,531	2,9
1,30 - 1,50	0,409	4,9	0,989	5,3
0,50 - 1,70	0,352	4,1	0,575	3,1
0,70 - 1,90	0,217	2,5	0,527	2,8
0,90 - 2,10	0,108	1,3	0,260	1,4
2,10 - 2,30	0,023	0,3	0,018	0,1
Total	8,583	100	18,555	100

Le taux de P des organes à la floraison sous le traitement T3 est plus élevé (environ 33%) que celui-ci sous le traitement T0 (Tableau 5.12), mais après ce date la différence diminue rapidement. A la récolte le taux de P de la paille sur le T0 et le T3 a une valeur de 0,14 et 0,15%, respectivement et pour le biomasse aérienne totale le taux de P est égale sous les deux traitements à 0,19%.

L'apport de P sur le traitement T3 est de $31,5 \text{ kg ha}^{-1}$ par la fumure minérale (Tableau 1.5) et 16 kg ha^{-1} (non-corrigé) par la décomposition du fumier (Tableau 2.5). On observe une différence de l'absorption de P entre les deux traitements (T0 et T3) d'environ $7,5 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figure 5.13B). En général le recouvrement de P est beaucoup moins élevé que celui de N. La valeur de $7,5/47,5 = 0,16$ est environ 55% de celle de triple super phosphate (van Keulen, comm. pers.). La quantité absolue de P absorbée sous le T0 (15 kg ha^{-1}) est à peine 3 kg ha^{-1} plus élevée que par le mélange de mil et des graminées (partie 3.2). En pourcentage il s'agit moins de 25%, tandis qu'en cas d'azote le rendement est 240% de plus (voir ci-dessus). L'histoire de fertilisation et de culture qui perturbe notre expérience vraisemblablement a influencé donc notamment la disponibilité en azote. Il faut donc conclure que sur les 4 traitements la disponibilité en N et en P a été élevée, et que les effets de la fertilisation seront minimale.

La vitesse d'absorption de phosphore potentielle, en utilisant Figure 5.13B, s'élève à $0,9 \text{ kg j}^{-1}$ qui est 50% de plus qu'on a prévu. Si il n'y existe pas une carence d'azote ni de phosphore, le rapport P/N sera 10 (Penning de Vries & Djitéye, 1982).

Les Figures 5.13A et 5.13B montrent aussi que les mobilisations de N et du P atteignent leurs valeurs maximales après la floraison. Cette observation est différente de celles faites par Penning de Vries & van Keulen (1982) au Mali pour une végétation naturelle et pour le mil par Siband (1980) et Cissé (1986) sur un sol sableux du Centre-Nord du Sénégal.

5.2.2.3. Enracinement de la culture

Profondeur d'enracinement

Les résultats des prélèvements des racines sont présentés au Tableau 5.14. Les résultats du poids de matière sèche des racines sous le deux traitements, présentés au Tableau 5.15, sont très faibles. On a attendu un poids de matière sèche d'un grandeur 8 à 10 fois que celui obtenu.

On peut noter, au Tableau 5.14, une différence de longueur des racines des plantules entre 0 et 17 JAL sur les deux traitements (C1 et C2). Spécialement à 17 JAL les différences entre C1 - C2, et T0 - T3 sont très fortes. Cette différence ne résulte pas des effets des traitements, mais des caractéristiques physiques du sol, et notamment de la résistance à la pénétration comme on l'a souligné autérieurement (Tableau 5.3). Chopart (1983) a aussi observé des effets des caractéristiques physiques du sol (résultat du labour) sur le développement des racines (Tableau 5.16).

Les résultats des mesures de la longueur des racines à la floraison ne sont pas encore disponibles. On peut cependant s'attendre comme l'a montré Binh (1980); résultats rapportés au Tableau 5.17) à des couches du sol sur un même traitement et éventuellement entre les deux traitements étudiés.

Les résultats de la méthode isotopique seront présentés par ailleurs par Binh, dans un rapport séparé.

Tableau 5.16. Effet du labour sur la densité racinaire du mil dans le profil du sol (en % par rapport au témoin, Chopart, 1983).

	34 JAS	50 JAS	65 - 90 JAS
profondeur (cm)			
0 - 30	+ 126	+ 103	+ 35
30 - 60	+ 172	+ 40	+ 10
60 - 100		+ 56	- 10
100 - 180		+ 38	+ 42

Tableau 5.17. Longueur spécifique des racines (RTSL, $10+3 \text{ m kg}^{-1}$) du mil (Souna III) en différentes profondeurs à la récolte à Bambey en 1980 (Binh, 1980).

	5	15	25	35	45	55	65
profondeur (cm)							
RTSL	45,1	63,3	26,6	78,3	78,6	75,0	62,0

Dans notre expérience menée (partie 5.1), on a observé une profondeur maximum égale à 2,3 m sous le traitement avec fumier et fumure minérale (T3). Les travaux menés dans plusieurs cas ont montré que la profondeur maximum d'enracinement du mil est très variable. Certains auteurs ont observé une profondeur maximum entre 1,2 et 3,6 m (Kanitkar; Begg *et al.* en Inde, cités par Chopart, 1980; 1983) et à 1,6 m (Wetselaar & Norman en Australie, cités par Chopart, 1980; 1983). Au Mali, Jansen & Gosseye (1986) ont mesuré une profondeur de 1,0 m. Au Niger, ODA (1987a) a mesuré une profondeur maximum de 2,0 m environ; mais la profondeur des racines principales ne dépassait pas à 1,2 m. Squire *et al.* (1987) ont trouvé une valeur comprise entre 1,0 et 1,5 m. Au Sénégal, Chopart (1980) a trouvé une profondeur maximum moyenne d'enracinement du Souna III égale à 1,8 m (entre 1,6 et 2,0 m dans un sol Dior sableux). Cissé (1986) a trouvé un effet de l'apport de matière organique sur la profondeur maximum d'enracinement du mil (Souna III). Cette profondeur se situait à 1,40 et 1,70 m avec et sans apport de matière organique, respectivement.

Considérant les données bibliographiques et les résultats obtenus on a fixé dans le modèle de simulation la profondeur maximum à 2,3 m [MIL88, Ligne 2100].

Vitesse d'avancement du front

On ne peut calculer la vitesse d'avancement du front que pour les premiers trois jours, parce que la profondeur maximum a été déterminée seulement à la floraison. Les valeurs de 2,3 et 2,8 cm j^{-1} obtenues sont comparables à celle trouvée par Binh (1980) et qui est de 3 cm j^{-1} .

Chopart (1983, 1980) a observé une vitesse d'avancement du front de 1,5 - 2,0 cm j⁻¹ entre le 1^{er} et le 15^{ème} jour après la germination, de 3,5 cm j⁻¹ entre le 15^{ème} et le 45^{ème} jour et de 1,2 cm j⁻¹ entre le 45^{ème} et le 90^{ème} jours après la germination. Selon Chopart (1983) le labour ne paraît pas d'influencer cette valeur.

Au Mali, Gosseye (1989) a obtenu une vitesse d'avancement du front de 2,2 cm j⁻¹ durant la période 1-9^{ème} jour après la germination de 3,3 cm j⁻¹ entre le 9^{ème} et le 18^{ème} jour; 1,7 cm j⁻¹ entre le 18^{ème} et le 30^{ème} jours; 1,1 cm j⁻¹ entre le 30^{ème} et le 38^{ème} jour et 2,2 cm j⁻¹ entre le 38^{ème} et le 47^{ème} jour après la germination. Jansen & Gosseye (1986) ont obtenu une valeur moyenne de 2 à 4 cm j⁻¹ et au Niger, ODA (1987a) a obtenu une valeur moyenne de 4,5 cm j⁻¹. Squire *et al.* (1987) ont trouvé une vitesse de l'ordre de 4,5 cm j⁻¹ pendant les premiers 30 jours de la croissance dans un sol sableux et une vitesse maximum de 7 cm j⁻¹. La vitesse d'avancement du front est donc fonction du stade phénologique de la culture, de l'humidité du sol (van Keulen, 1975), de la densité et de la porosité du sol (Nicou & Chopart, cités par Fussel *et al.*, 1987).

Dans le modèle de simulation une vitesse moyenne potentielle de 5 cm j⁻¹ a été fixée [MIL88, Ligne 2100].

Densité racinaire par couche du sol

Les données des masses racinaires mesurées à la floraison (Tableau 5.15) sont trop faibles de tirer des conclusions. Cissé (1986) rapporte qu'environ 80% du poids totale des racines du mil se trouvent dans la couche du sol 0-0,6 m. D'après Chopart la vitesse de croissance en matière sèche des racines dans une couche de sol donnée est plus élevée dans un sol labouré que sans labour (Chopart, 1983; Chopart & Nicou, 1976). L'action du labour a été illustrée au Tableau 5.16 et des techniques culturales, comme l'apport de matière organique, peuvent également stimuler la densité racinaire par couche du sol (Cissé, 1986).

Longueur spécifique

Le Tableau 5.14 montre que la longueur spécifique varie en fonction du temps. Elle varie également avec la profondeur du sol (Squire *et al.*, 1987; Binh, 1980; Tableau 5.17). Les mesures faites au 17^{ème} jour après la levée ne montrent pas des différences importantes entre les deux traitements. Avec les données obtenues à mi-cycle de développement végétatif ce paramètre sera calculé pour chaque couche du sol des deux traitements T0 et T3.

5.2.2.4. Mesures additionnelles

Surface foliaire spécifique

Les résultats obtenus à Nioro du Rip sont présentés au Tableau 5.18 et à titre de comparaison ceux obtenus à Bambey à la même année sont donnés dans ce même tableau. Les valeurs sont à peu près égales pour les différents traitements, les différents lieux et la différence du date de semis (14/7 à Nioro du Rip contre 4/8 à Bambey).

En utilisant ces valeurs et le poids de matière sèche des feuilles (Tableau 5.7), l'évolution de l'index de la surface foliaire (LAI) a été calculée et est présentée à Figure 5.14. Entre le 20^{ème} et le 60^{ème} JAL, l'index de surface foliaire est nettement plus élevé pour le traitement T3.

En outre, on a calculé la surface foliaire spécifique des nouvelles feuilles (Figure 5.15). Ces résultats montrent que la surface foliaire spécifique diminue au cours de la saison de

Tableau 5.18. Surface spécifique des feuilles développées ($m^2 kg^{-1}$) du mil Souna III à différents stades de développement (JAL) à Nioro du Rip en 1988 (moyennes de n observations) sous 3 traitements.

(T0: témoin et T3: labour + fumier + fumure minérale à Nioro du Rip et LFB: labour + fumure minérale à Bambey.)

	T0	n	T3	n	LFB	n	moyenne	n
JAL								
0	87,0 ± 6,2	3					87,0 ± 6,2	3
10	61,6 ± 9,7	5	58,4 ± 9,4	5			60,0 ± 9,2	10
17	46,7 ± 2,7	3	40,5 ± 5,0	3			43,6 ± 4,9	6
32	34,3 ± 0,7	3	34,0 ± 0,8	3	30,7 ± 1,2	5	32,4 ± 2,1	11
39					22,9 ± 0,9	5	22,9 ± 0,9	5
47	28,6 ± 1,7	3	25,2 ± 3,1	3	23,0 ± 0,7	5	25,1 ± 2,9	11
60					18,2 ± 0,4	5	18,2 ± 0,4	5
72	16,9 ± 1,9	5	17,6 ± 1,8	5			17,3 ± 1,8	10
87	15,9 ± 1,5	5	16,4 ± 1,7	5			16,2 ± 1,5	10

Tableau 5.19. Nombre de talles primaires par poquet et hauteur (cm) du mil Souna III à différents stades de développement (JAL) à Nioro du Rip en 1988 (moyenne de n répétitions) sous deux traitements.

(T0: labour et T3: labour + fumier + fumure minérale.)

		nombre		hauteur	
		T0	T3	T0	T3
JAL n					
18	10	5,7 ± 2,5	10,0 ± 2,3	-	-
40	72	5,3 ± 1,2	7,6 ± 1,9	98,2 ± 15,3	147,3 ± 20,0
47	24	5,9 ± 1,4	7,3 ± 1,8	134,1 ± 37,8	201,7 ± 23,8
49	72	7,0 ± 1,7	7,9 ± 1,9	145,8 ± 24,7	216,4 ± 20,5
54	72	6,6 ± 1,4	8,1 ± 1,9	169,4 ± 23,4	230,1 ± 22,2
74	5	7,6 ± 1,1	8,2 ± 1,3	-	-
87	35	5,9 ± 1,9	7,0 ± 2,3	226,2 ± 20,2	260,7 ± 15,2

croissance, c'est-à-dire, les feuilles les plus jeunes sont les plus grosses. La ligne désignée a été utilisée dans le modèle de simulation [MIL88, Ligne 2160].

Nombre et circonférence des talles primaires et l'hauteur du mil

L'évolution du nombre de talles primaires et de la hauteur du mil est présentée au Tableau 5.19. A la Figure 5.16 on a tracé les courbes d'évolution de la hauteur du mil. Le nombre et l'hauteur sous le traitement T3 sont plus élevés que ceux-ci sous le traitement T0.

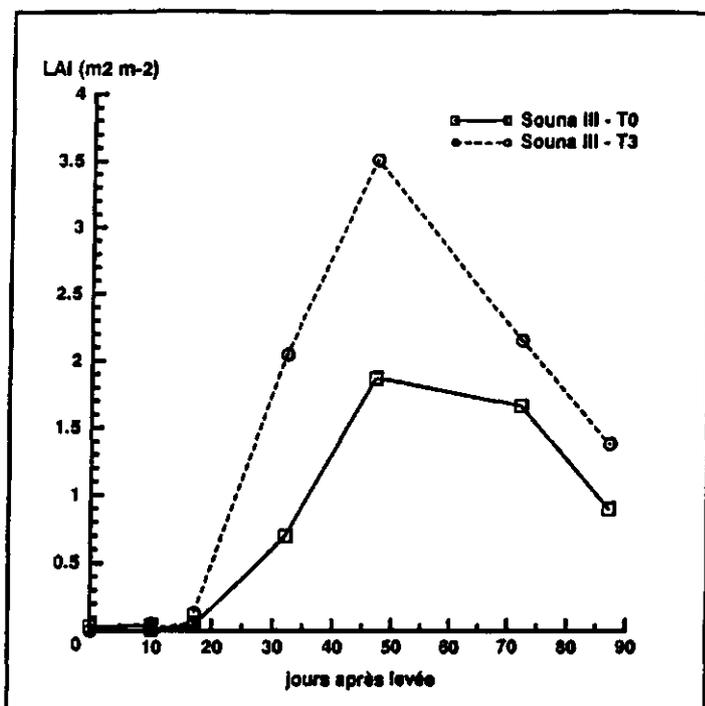


Figure 5.14. Index de surface foliaire du mil sous les deux traitements (T0 et T3) à Nioro du Rip en 1988.

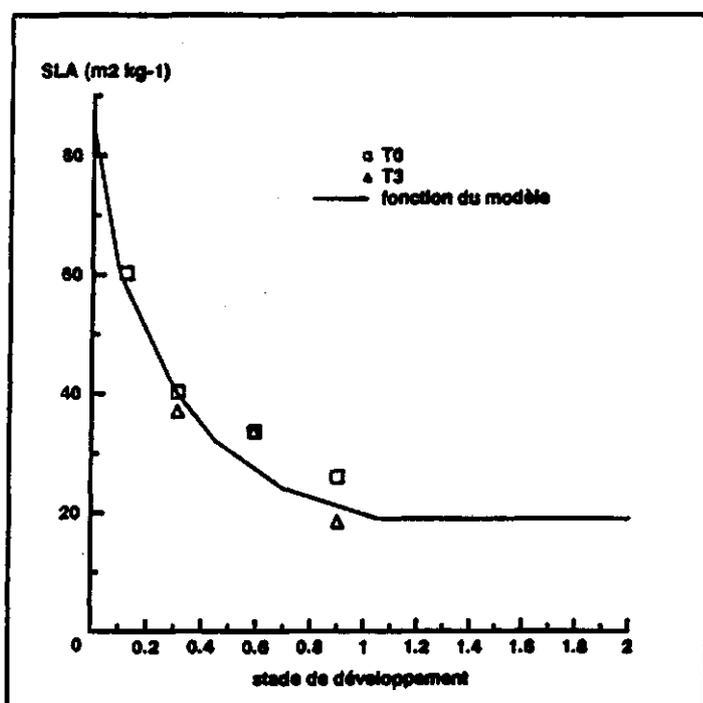


Figure 5.15. Surface foliaire spécifique des nouvelles feuilles.

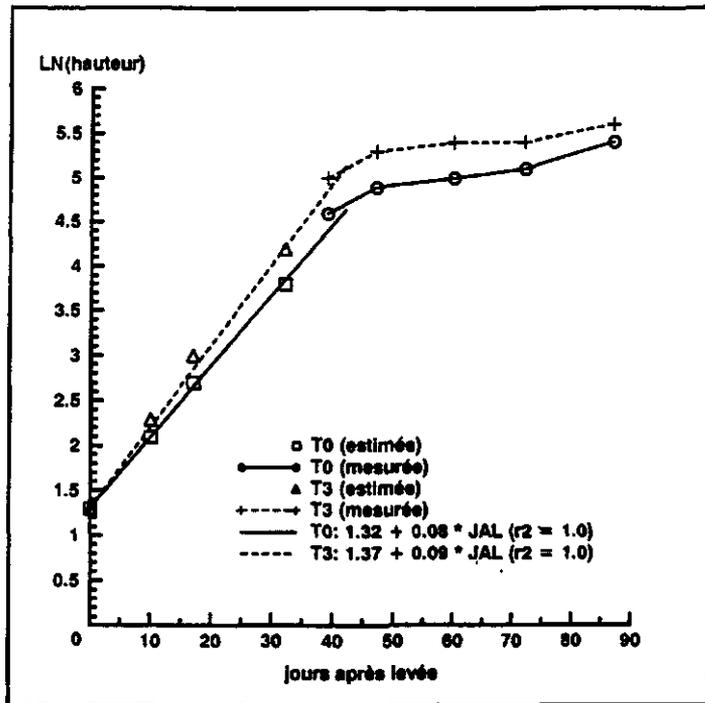


Figure 5.16. Evolution de l'hauteur du mil (logarithme) en fonction du stade de développement sous les deux traitements (T0 et T3) à Nioro du Rip en 1988.

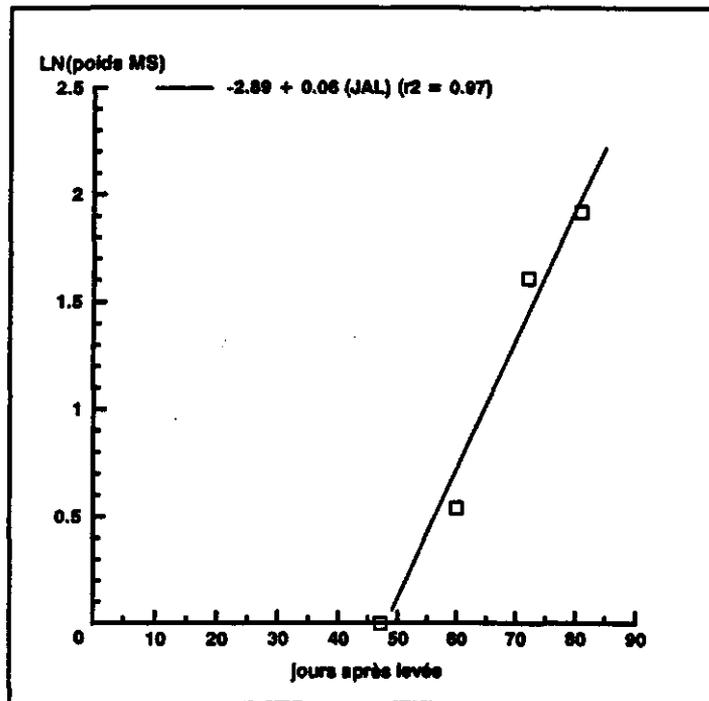


Figure 5.17. Poids matière sèche (logarithme) d'un grain de mil en fonction du stade de développement sous le traitement T3 à Nioro du Rip en 1988.

La circonférence des talles n'a été mesurée qu'aux deux dernières dates de prélèvements. Pour les autres dates une estimation a été faite. Ces valeurs sont fonction du traitement [MIL88, Ligne 2170].

Nombre de grains par chandelle et poids matière sèche d'un grain individuel

Les résultats des mesures effectuées, présentés au Tableau 5.20, montrent que ni la vitesse de croissance d'un grain, ni le nombre des grains par chandelle ne sont constants au cours de la saison de croissance. La Figure 5.17 montre que la courbe de croissance est de type exponentiel. Gosseye (1989) a rapporté que la température et la quantité de fumure influencent le nombre des panicules et des grains. En général l'intensité du flux des assimilates de la talle vers l'épi est liée au nombre de grains à remplir (van Keulen & Seligman, 1988). Pour le modèle de simulation la connaissance du nombre de grains potentiels est donc très importante. Le nombre des grains est fonction du poids de matière sèche à la floraison (Spiertz & van Keulen, 1980). La ligne de régression a été calculée en utilisant les données des Tableaux 5.7 et 5.19:

$$\text{NUMGR} = 2,58 \text{ E}8 + 59400 * \text{WSHTOA} \quad (5.1)$$

où
 NUMGR = Nombre des grains (ha^{-1})
 WSHTOA = Poids matière sèche aérienne de la culture au floraison (kg ha^{-1}) [MIL88, Ligne 6440].

Tableau 5.20. Poids matière sèche par grain de mil Souna III (SPGRW, mg; moyenne de 1000), nombre de grains par chandelle (NoGR) et poids total des grains par chandelle (TG, g).

(A: à différents stades de développement (JAL) à Nioro du Rip en 1988 sous 4 traitements A); T01: témoin absolu; T3: labour + fumier + fumure minérale, et B: à 87 JAL sous les deux traitements (TR) avec de la matière organique contenue dans les sacs et enfouie dans le sol: B13: paille et B24: fumier.)

JAL	SPGRW	NoGR	TG	SPGRW	NoGR	TG
A)		T0		T3		
47	0,00			0,00		
60	1,54±0,32	1350±1340	2,11±2,19	1,72±0,37	3570±2150	6,75±5,37
72	5,41±0,78	6280±1060	34,10±8,93	4,99±0,38	8180± 720	40,95±6,45
81	6,90±1,01	6880± 680	46,92±2,28	6,83±0,90	7780± 640	52,95±7,35
87				6,10	8740	53,33
B)		B13		B24		
87	7,03±0,62	7130±1260	55,23±19,39	7,22±0,89	6250± 960	44,80±6,83

Le poids matière sèche par grain de mil (Souna III) varie fortement en fonction des conditions pendant la croissance (Tableaux 5.20 et 5.21). En considérant les mesures effectuées et les données bibliographiques on a finalement estimé ce paramètre à $7,1 \cdot 10^{-6}$ kg; cette valeur sera introduite dans le modèle de simulation [Mil88, Ligne 2020].

Longueur de la chandelle

Au Tableau 5.22 on remarquera que les traitements n'induisent pas de différence importante sur la longueur de la tige et/ou sur la longueur de l'épi.

Tableau 5.21. Poids matière sèche par grain du mil Souna III (SPGRW, mg), nombre de grains par chandelle (NoGR) et poids total des grains par chandelle (TG, g).

Traitement	SPGRW	NoGR	TG	Référence
culture normale	7,75			Siband, 1980
culture normale	7,06	3430	24,2	Siband, 1981
culture sans azote	6,96	3391	23,6	Siband, 1981
démariage à 7 plantes	6,95	2771	19,3	Siband, 1981
avec labour	7,05	5560	39,2	Siband, 1981
sans labour	7,59	4743	36,0	Siband, 1981
culture normale	8,45			Siband, 1981
culture normale	6,92			Siband, 1981
1 pied (1978)			31,0	Lambert, 1983a
1 pied (1979)			40,0	Lambert, 1983a
moyenne	7,34	3979	30,5	

Tableau 5.22. Longueur de la tige de la chandelle, longueur de l'épi et la longueur totale (cm, moyenne de n répétitions) du mil Souna III.

(A: à la récolte à Nioro du Rip en 1988 sous 4 traitements; T01: témoin absolu; T3: labour + fumier + fumure minérale, et B: à 87 JAL sous les deux traitements (TR) avec de la matière organique contenue dans les sacs et enfouie dans le sol: B13: paille et B24: fumier.)

TR	n	tige	n	épi	n	chandelle
T0	25	37,6 ± 9,8	50	53,8 ± 10,3		91,4
T3	24	40,7 ± 4,1	50	56,1 ± 6,7		96,8
B13	40	37,0 ± 6,5	40	53,8 ± 7,4	40	90,8 ± 10,2
B24	34	40,0 ± 5,5	34	55,6 ± 8,5	34	95,6 ± 10,4

Caractéristiques du semis

La densité de semis dans les expériences est généralement d'un poquet par mètre carré, soit 10000 par hectare [MIL88, Ligne 2020]. Celle-ci peut différer avec la densité généralement observée chez les paysans (au Sénégal et au Mali) qui est d'un poquet par 0,9 x 0,9 m, soit 12346 poquets par hectare (Jansen & Gosseye, 1986; Gosseye, 1989).

Le semis est en général réalisé à une profondeur de 3 à 5 cm. La profondeur maximum du semis a été fixée dans le modèle à 10 cm [MIL88, Ligne 4120].

La vitesse de germination est fonction de la température (partie 5.5.2.2), et on a supposé que la température des grains est égale à celle de la couche du sol comprise entre 0 et 0,1 m [MIL88, Ligne 4140].

La quantité de semence utilisée dans l'expérience est de 3 kg ha⁻¹ de MS, alors que les paysans sèment en moyenne entre 5 et 6 kg ha⁻¹. Cette valeur a été utilisée dans le modèle de simulation [FORCROS, Ligne 1130].

Taux de germination et conversion grain - plantule

Le nombre des plantules par poquet à l'émergence est 35 et 40 sous les traitements T0 et T3, respectivement (Tableau 5.7). Le nombre des grains semés par poquet est de 42; le taux moyen de germination est donc 89%. Cette valeur est relativement forte en comparaison avec des valeurs obtenues au Etats Unis par Mohamed *et al.* (1989). Dans le modèle de simulation on a fixé le taux de germination à 89% [Mil88, Ligne 1300].

Penning de Vries *et al.* (1989) ont estimé que le processus de germination des grains de céréales à un fort pouvoir germinatif (plus de 80%) produirait 0,25 g de plantule par g de grain. A partir de nos données expérimentales (Tableau 5.7) cette conversion a été calculée comme 0,45 g g⁻¹. La différence constatée pourrait résulter de temps de mesure différents dans les deux cas considérés. La valeur obtenue *in situ* a été utilisée dans le modèle [Mil88, Ligne 2020].

5.3. Conclusion

Les expérimentations conduites ont permis de déterminer un certain nombre de paramètres nécessaires pour le modèle de simulation.

Les conditions expérimentales de cette année n'ont pas permis de mettre éventuellement en évidence l'effet des traitements mis en place les termes du bilan hydrique et notamment sur les stocks hydriques de la zone racinaire, sur les lames d'eau évapotranspirées par le mil et drainées (au-delà du front racinaire). Les conditions ont également, par suite de forte pluie, provoqué des transferts hydriques et minéraux latéraux que n'ont pas été mesurés et qui posent des problèmes pour le calcul du bilan hydrique et pour l'interprétation des mobilisations minérales du mil et de la contribution des différentes sources dans l'alimentation minérale de la plante.

Ainsi la détermination des paramètres nécessaires pour faire tourner le modèle et qui concernant le minéral n'a pas été complétée et dans certains cas il est nécessaire de reprendre certaines mesures ou observations; ce sera un volet dans la poursuite des travaux commencés cette année.

5B. Paramètres bibliographiques

5.4. Paramètres de la culture

5.4.1. Caractéristiques de la photosynthèse

La production de la matière sèche résulte du processus d'assimilation du CO₂ par les feuilles. Dans le modèle de simulation ce processus est caractérisé par deux paramètres principaux: la vitesse maximale d'assimilation du CO₂ (AMAX) et l'efficacité initiale d'utilisation de la lumière (EFF).

La vitesse maximale d'assimilation de CO₂ du mil, plante de type C4, a été estimée à 70 kg CO₂ ha⁻¹ h⁻¹ (Jansen & Gosseye, 1986). Cependant des expériences ont démontré que le taux d'azote des feuilles peut limiter cette vitesse (van Keulen & Seligman, 1987). Les données disponibles sur mil (Alagarswarny *et al.*, 1988) et *Panicum maximum* (Wilson, 1975; Bolton & Brown, 1980) utilisées ont permis de tracer la courbe de la Figure 5.18 qui permet de calculer la vitesse maximale d'assimilation de CO₂ (AMAXN) par l'équation:

$$AMAXN = 10,16 * NCLV - 2,50 \quad (r^2 = 0,86) \quad (5.2)$$

où

NCLV = Taux d'azote des feuilles.

La valeur de ce paramètre (AMAXN) ainsi obtenue est seulement valable sous des conditions optimales. En général la température optimum d'assimilation pour les espèces C4 est supérieure à 13 °C (de Wit *et al.*, 1978); et selon Penning de Vries *et al.* (1989) c'est au moins 25 °C. Jansen & Gosseye (1986) ont avancé pour le mil un optimum de température entre 20 et 40 °C. Dans le modèle de simulation on a retenu la gamme 13-40 °C comme intervalle de température optimum [MIL88, Ligne 2050].

L'efficacité initiale d'utilisation de la lumière a été estimée par Jansen & Gosseye (1986) à 0,40 kg CO₂ ha⁻¹ h⁻¹/J m⁻² s⁻¹; van Kraalingen & van Keulen (1988) ont utilisé une valeur de 0,45 kg CO₂ ha⁻¹ h⁻¹/J m⁻² s⁻¹ [MIL88, Ligne 2040]. Du fait que l'importance relative de la photorespiration augmente avec la température, la valeur réelle de cette efficacité diminuera. Cette valeur pour les espèces C4 est constante à 40 °C, mais elle diminue rapidement à partir de 45 °C (Penning de Vries *et al.*, 1989) [MIL88, Lignes 2050 et 6220].

5.4.2. Processus de la germination

La simulation de la germination et de l'émergence est très difficile, parce que les conditions de l'environnement des grains ne sont pas faciles à déterminer de manière précise (Penning de Vries *et al.*, 1989). Dans le modèle de simulation les processus de la germination et de l'émergence sont décrits comme fonction de la température et de la quantité d'eau dans la couche de germination.

Les grains de mil (variétés Sanio (Sénégal), Kala (India) et Oasis (Niger)) germent à partir de 8-13,5 °C; la température optimum se situant entre 29-37 °C. La germination est inhibée si la température dépasse 40-45 °C (ODA, 1987b). D'autres auteurs (cités par Gosseye, 1989) ont trouvé pour la germination d'autres variétés une température minimum de 10-15 °C,

optimum de 32-35 °C et maximum de 39-48 °C. Dans le modèle la température minimum est fixée à 12 °C, l'optimum à 30-35 °C et le maximum à 42 °C. Une relation linéaire entre la température minimum et optimum et entre la température optimum et maximum a été supposée.

Pour décrire l'influence du facteur hydrique sur le processus de la germination 3 phases sont distinguées. La phase 1 c'est l'imbibition qui est un processus bien rapide. Peu d'eau est absorbée pendant la phase 2, celle de la préparation métabolique. Une augmentation forte de l'absorption d'eau annonce la troisième phase, celle de la germination visible (Bewley & Black, cités par Breman *et al.*, 1982).

La teneur en eau du sol optimum est définie comme 1,2 fois celle au point de flétrissement permanent, exprimée en cm³ d'eau par cm³ de sol (van Keulen & Seligman, 1987).

Si la température du sol se situe entre 30 et 35 °C et si l'eau n'est pas limitante, la germination commencera directement. Siband (1980; 1981) a observé que 50% des grains de mil (Souna III) germaient après 4,2 heures (température inconnue), 80% après 5 heures et 100% après 10 heures. La racine séminale apparaît in-situ entre 24 et 48 heures après la première pluie (Chopart, 1983). L'émergence commence 2 jours après semis et est complète 3 jours après semis (Gosseye, 1989). Dans le modèle de simulation on a fixé l'émergence à 3 jours après semis.

Si la température se situe entre 12 et 30 °C ou entre 35 et 42 °C, dans les mêmes conditions hydriques l'émergence est complète après 4 jours [MIL88, Ligne 4190].

Si l'humidité du sol est optimale mais la température du sol est très élevée (plus de 42 °C) ou très faible (moins de 12 °C) la germination s'arrête, mais pourra redémarrer si moins que 5 jours après ce moment la température est favorable, si non, les grains meurent [MIL88, Ligne 4170].

Si après la germination commence le sol se dessèche, celle-ci s'arrêtera presque aussitôt. Elle reprendra si l'état hydrique du sol redevient satisfaisant. Sinon, les grains meurent [MIL88, Ligne 4180].

Le processus de la germination dans le modèle de simulation est illustré à la Figure 5.19.

5.5. Paramètres additionnels

5.5.1. Teneur en azote d'eau des pluies

A Nioro du Rip la concentration en N des eaux de pluies est de 0,24 ppm, soit 2,4 g ha⁻¹ mm⁻¹ de pluie (1976-1978) (Piéri, 1979). Cette concentration est du même ordre de grandeur que celle obtenue par Krul *et al.* (1982) et qui s'élève à 0,3 ppm.

Par ailleurs la déposition sèche d'azote (absorption par le sol et la végétation) a été estimée comme étant nulle dans les déserts, et égale aux apports par les pluies dans les zones humides (Soderland & Svensson, cités par Krul *et al.*, 1982). Sur cette base Krul *et al.* (1982) ont estimé une déposition sèche d'azote équivalent à la moitié des apports par les pluies dans les régions tropicales semi-arides.

La dernière contribution aux taux de N des pluies sera la quantité de NO_x. Ce total a été estimé à 0,2 ppm (Krul *et al.*, 1982).

On peut donc estimer à 0,56 ppm environ la concentration en azote des eaux des pluies. Cette valeur a donc été utilisée pour la simulation faite [NIORO1SN.DAT].

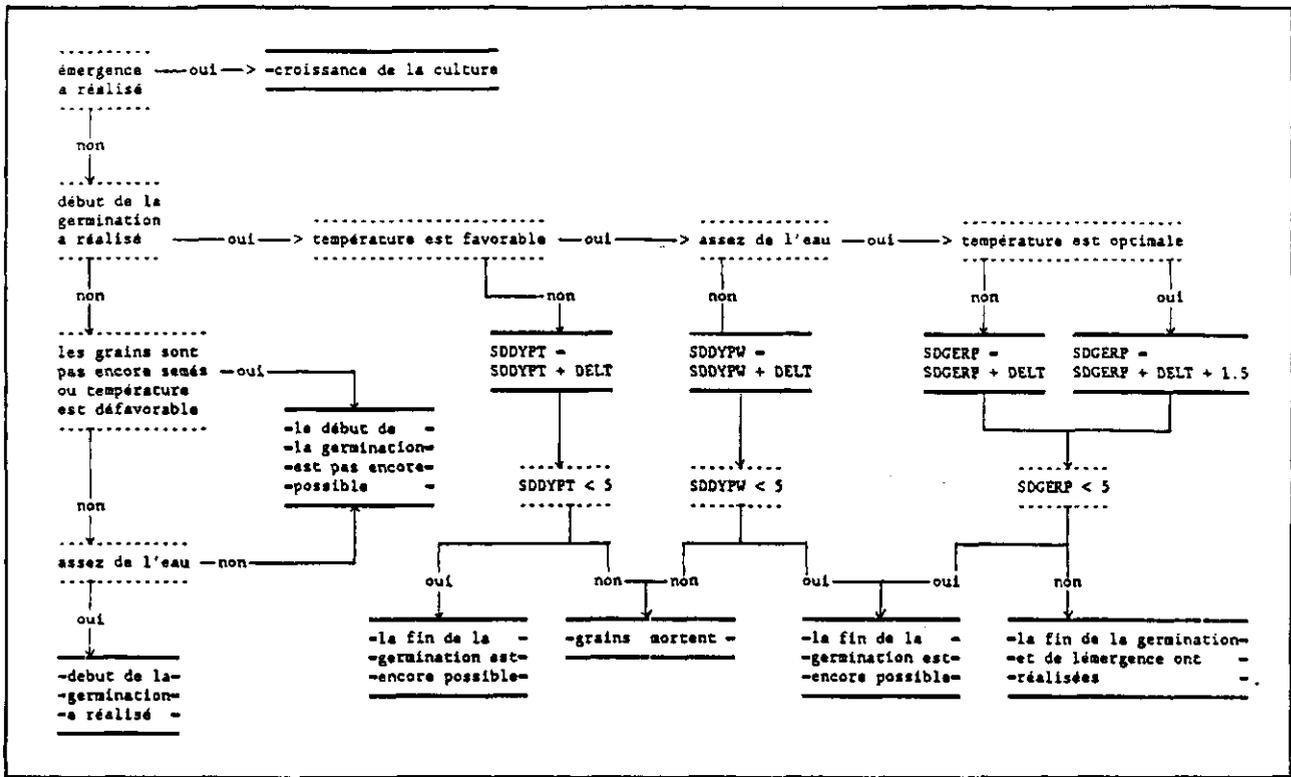


Figure 5.19. Présentation schématique du processus de la germination et de l'émergence comme il est décrit dans le modèle de simulation [MIL88, Lignes 4000-4270].

5.5.2. Quantité et qualité des résidus de récolte

La masse de matière organique provenant du système racinaire du mil de l'année précédente qui reste dans le sol, est estimée à 350-400 kg ha⁻¹. La valeur réelle d'apport est probablement plus importante, par suite de la dégénérescence d'une partie du système racinaire en cours de la saison de croissance (Chopart, 1983). Mais on suppose que cette partie des racines se décompose durant le cycle végétatif. La quantité des résidus de récolte introduite dans le modèle a été fixée à 400 kg ha⁻¹ [NIORO1SN.DAT].

La qualité de la matière organique a été caractérisée par le taux de N et de C. Leurs valeurs sont 0,0086 et 0,4 g g⁻¹, respectivement [NIORO1SN.DAT].

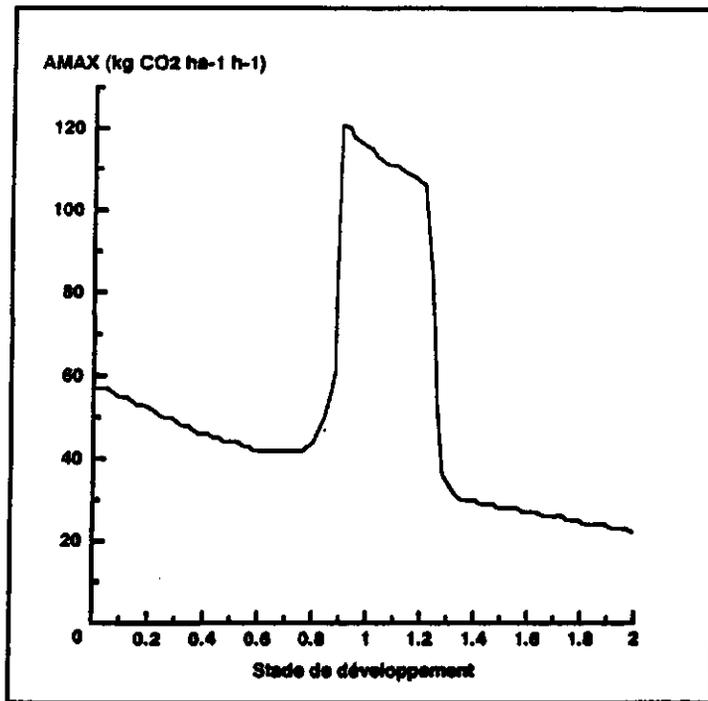


Figure 6.1. Vitesse d'assimilation maximale simulée en fonction du stade de développement.

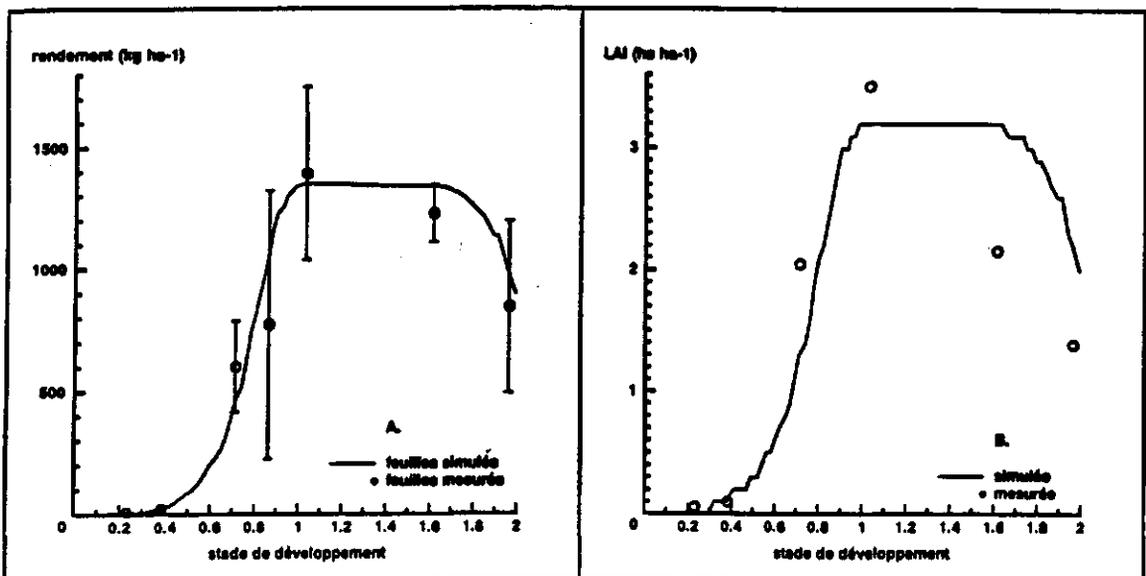


Figure 6.2. Poids (matière sèche) des feuilles (A) et index surface foliaire correspondant (B) en fonction du stade de développement.

6. Simulation de la croissance du mil

6.1. Préliminaires

Avant de présenter les résultats de simulation, il faut noter que:

- le bilan d'azote n'est pas encore testé; mais le taux de N des feuilles mesuré pendant la saison de croissance a été introduite comme une fonction dans le modèle de simulation.
- le poids de matière sèche des racines mesuré est trop faible pour calibrer le modèle de simulation.
- l'évaporation a été calculée au début de la saison de croissance avec un index moyen de surface foliaire estimé à l'hectare; par conséquent, le bilan hydrique calculé par le modèle de simulation pourrait présenter des écarts avec celui mesuré.
- on a seulement essayé de calibrer le modèle de simulation à partir des résultats obtenus en 1988. Le temps disponible n'a pas permis de valider le modèle de simulation en utilisant d'autres données disponibles (p.e. les poids matière sèche à la récolte à Thilmakha en 1986 et en 1988).
- le taux de réserves dans les tiges n'a pas été mesuré; le poids de matière sèche de réserves utilisé est donc une estimation à vérifier ultérieurement.

6.2. Résultats et interprétations

6.2.1. Paramètres physiologiques

La Figure 6.1 montre l'effet de la grande demande de produits photosynthétiques par les tiges pendant le montaison sur la vitesse maximale d'assimilation de CO₂ (AMAX). Des travaux menés ont aussi rapporté une croissance élevée pendant cette période (Yanuka *et al.*, 1982).

6.2.2. Evolution des poids de matière sèche des organes

L'évolution des poids matière sèche des feuilles est présentée à la Figure 6.2A. L'index de surface foliaire est présenté à la Figure 6.2B. Les quantités des réserves (simulées), des tiges + gaines + réserves, des inflorescences et des grains (obtenues par simulation et mesures) sont présentées respectivement aux Figures 6.3A à 6.3D. Les poids de racines et la profondeur d'enracinement (simulés) sont présentés à la Figure 6.4. Le poids matière sèche de la partie aérienne totale est présenté à la Figure 6.5A. Figure 6.5B montre que la production pendant la saison de croissance a été presque en condition potentielle (concernant la disponibilité d'eau).

6.2.3. Bilan hydrique

La transpiration et l'évapotranspiration (simulées) s'élèvent à 200 et 610 mm respectivement entre le semis et la récolte. L'évaporation (Bac A) s'élève au cours de la même période à environ 400 mm (Tableau 6.1). La Figure 6.6 montre que les résultats de l'évaporation simulés et ceux mesurés diffèrent pendant quelques jours, mais avec un écart type acceptable. La Figure 6.7 montre l'évaporation d'eau de la surface du sol. La vitesse de

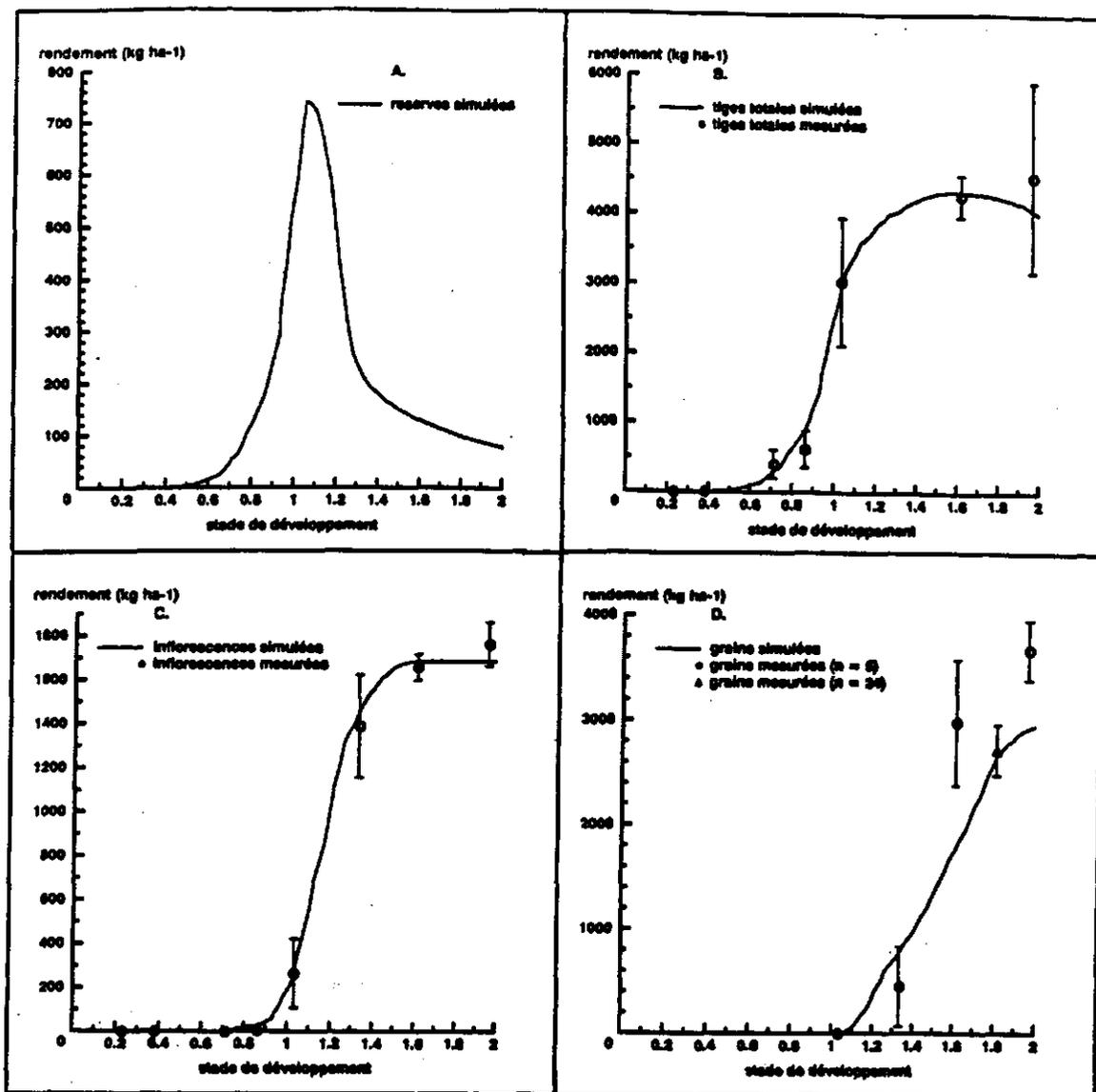


Figure 6.3. Poids (matière sèche) des réserves (A), des tiges + gaines + réserves (B), des inflorescences (C) et des grains (D) en fonction du stade de développement.

transpiration journalière de la culture est présentée à la Figure 6.8A et l'évolution de la quantité cumulative à la Figure 6.8B. La Figure 6.9 donne les valeurs simulées et mesurées de la teneur en eau du sol à 4 dates. On constate, en examinant ces figures, un écart très important entre les valeurs obtenues par simulation et celles mesurées *in situ*.

La méthode de simulation de ce paramètre est donc à revoir et à corriger.

6.2.4. Bilan d'azote

Comme décrit ci-dessus la simulation du bilan d'azote n'est pas encore calibrée. Une partie du bilan d'azote est la simulation de la température, qui influence la décomposition de la matière organique, dans le profil de sol. La comparaison des valeurs simulées et mesurées à

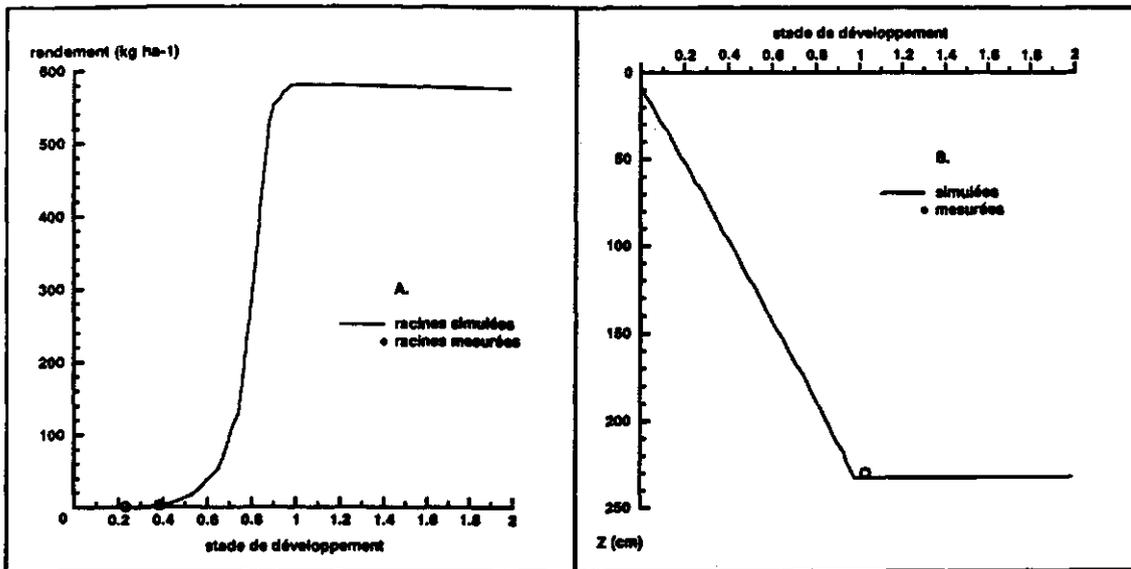


Figure 6.4. Poids (matière sèche) des racines (A) et profondeur d'enracinement (B) en fonction du stade de développement.

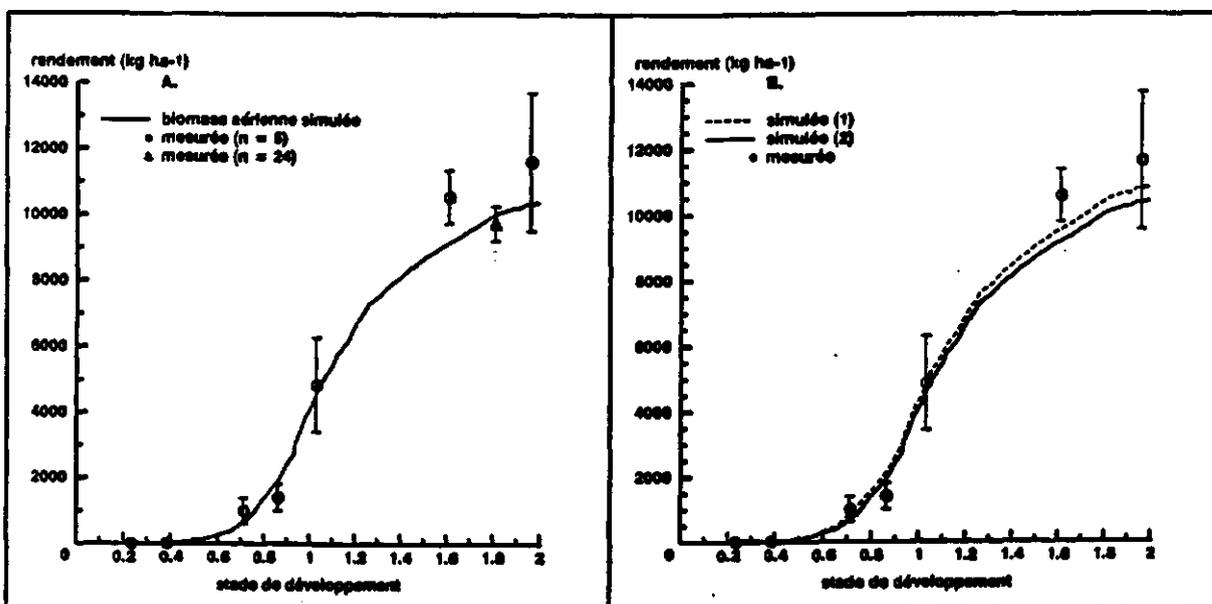


Figure 6.5. Poids (matière sèche) de la partie aérienne en conditions pluviales à Nioro du Rip (A et B2) et en conditions irriguées (B1) en fonction du stade de développement.

Tableau 6.1. Evaporation (bac "A") pentadaire à Nioro du Rip en 1988 (mm)
(ISRA, Service de Bioclimatologie).

	1	2	3	4	5	6	total
Mai	68,0	60,3	60,4	63,5	57,2	53,5	362,9
Juin	50,1	53,2	37,8	43,3	32,8	41,9	259,1
Juillet	33,1	42,1	24,3	35,7	28,6	27,4	191,2
Août	22,7	21,3	29,8	22,3	21,1	27,3	144,5
Septembre	17,8	26,8	25,4	20,6	?	?	?
Octobre	22,8	24,8	25,6	27,7	26,9	37,1	164,9
Novembre	23,7	30,3	25,5	30,0	32,4	32,5	174,4

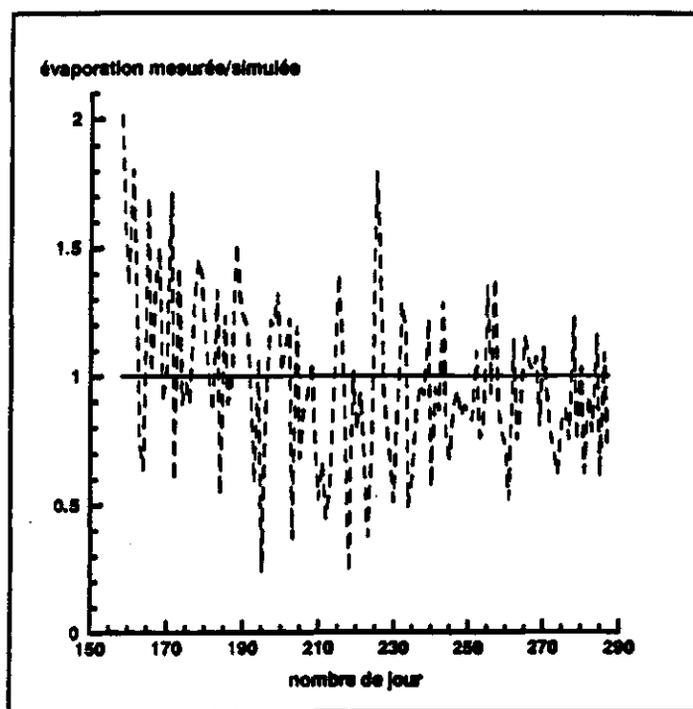


Figure 6.6. Rapport de la vitesse de l'évaporation (Bac A) journalière mesurée par celle simulée au cours de la saison de croissance.

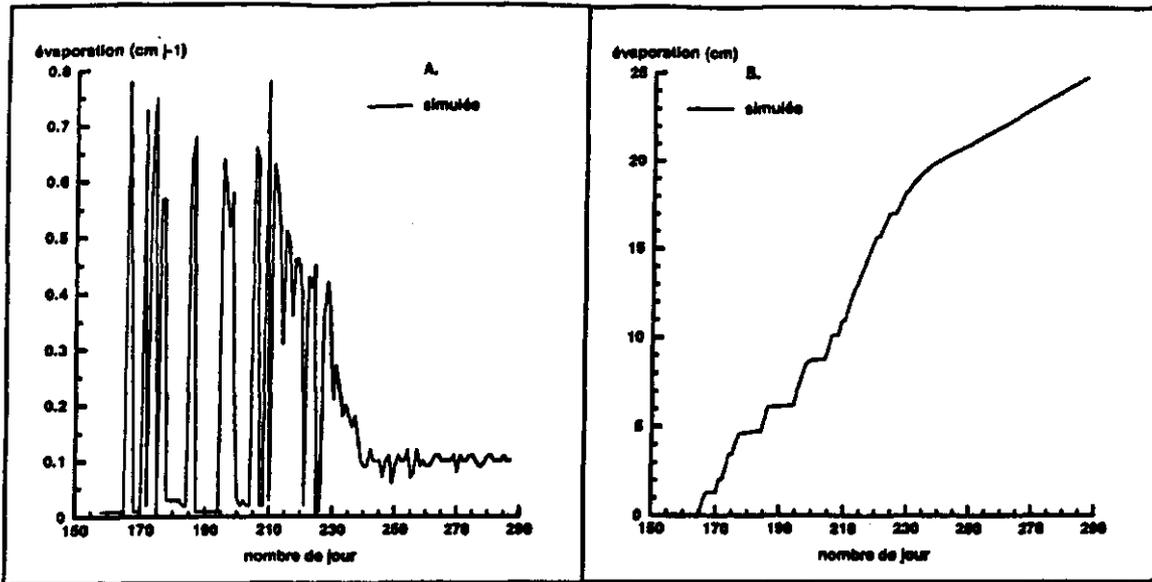


Figure 6.7. Vitesse d'évaporation d'eau de la surface du sol (A) et quantité cumulative d'eau évaporée du sol (B).

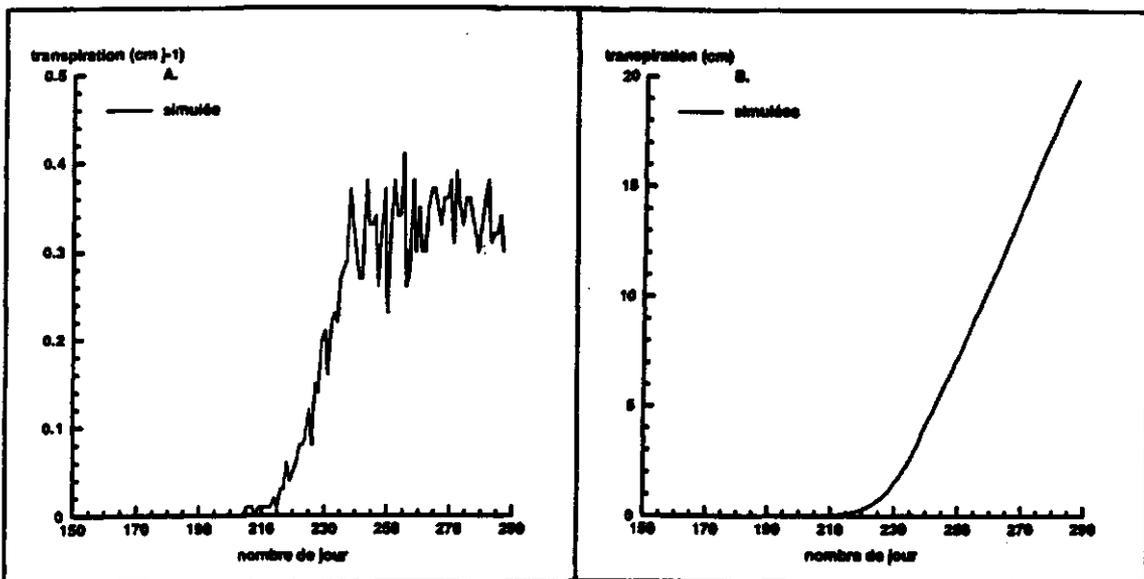


Figure 6.8. Vitesse de transpiration (A) et quantité cumulative transpirée par la plante (B), simulées en conditions potentielles.

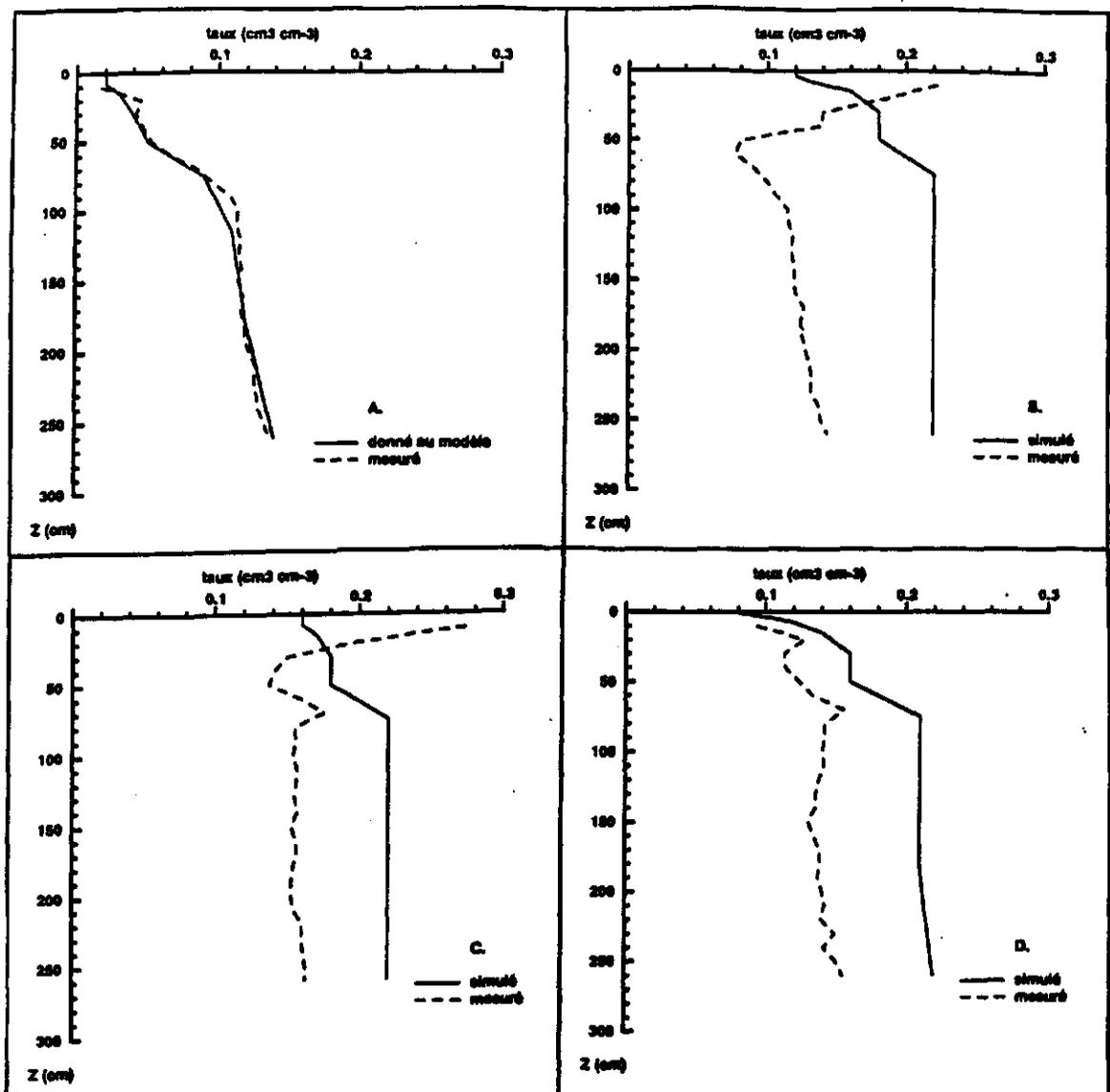


Figure 6.9. Teneurs en eau du sol à 4 dates: 6/6 (A); 15/7 (B); 3/9 (C) et 13/10 (D), mesurées sous le traitement T3 et simulées en conditions potentielles.

différentes profondeurs du sol est tournée à la Figure 6.10. Il se dégage clairement, en examinant cette figure, que la subroutine SOLTMP (valable dans les conditions aux Pays Bas) qui simule la température du sol doit être revue et modifiée. Cependant il faut réaliser que la simulation de la température est très difficile sans une description très détaillée. Pour une telle description on a besoin des paramètres très spécifiques (conductibilité thermique) qui peut donc différer d'un sol avec l'autre, et qui sont difficiles à déterminer au champs.

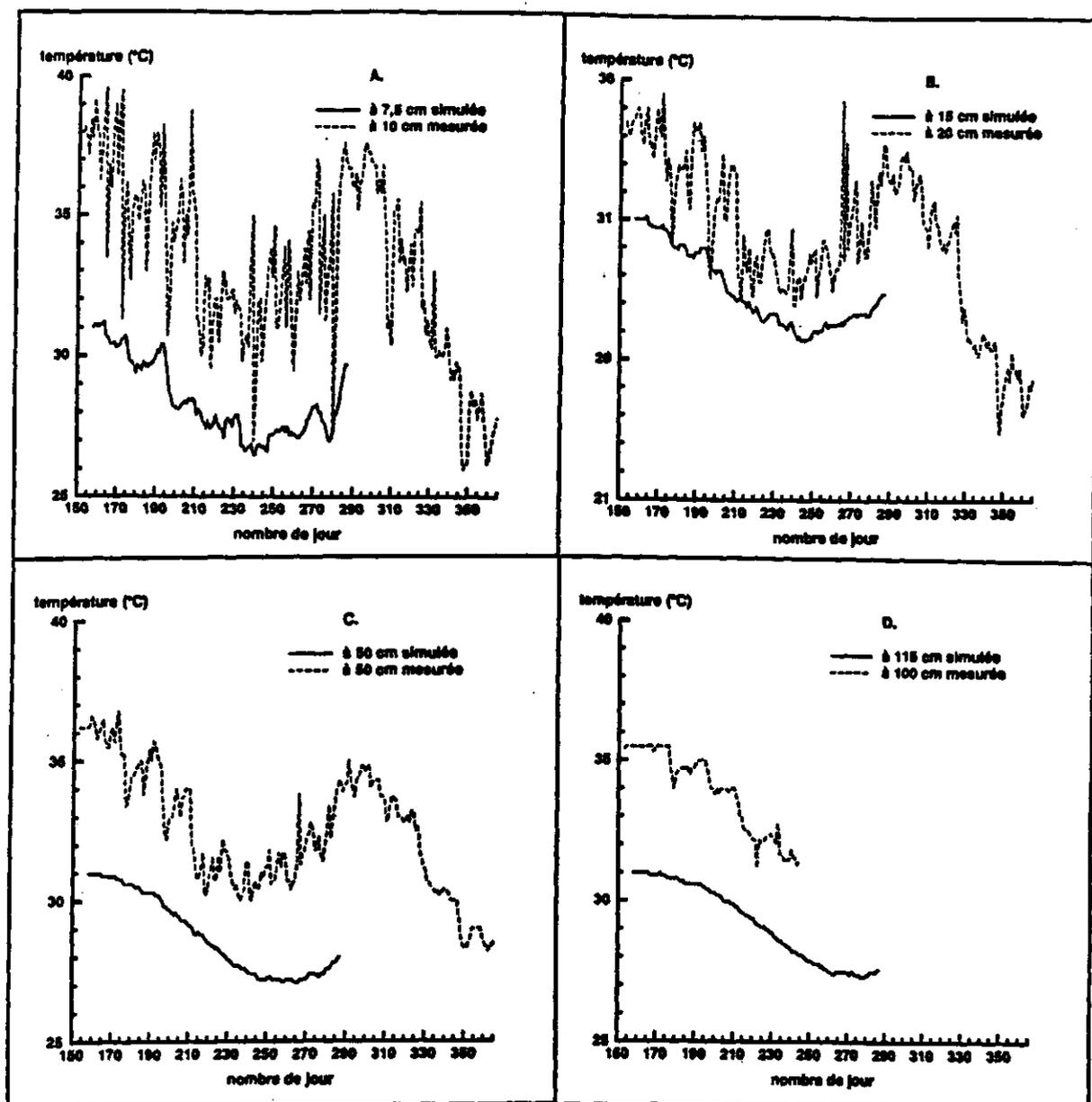


Figure 6.10. Température du sol pendant la saison de croissance à différentes profondeurs, mesurée sous un sol nu et simulée en conditions potentielles sous une couverture de culture.

6.3. Conclusion

Certains paramètres nécessaires pour le modèle de simulation ont pu être mesurés de façon satisfaisante; d'autres n'ont pas été mesurés ou les valeurs obtenus doivent faire l'objet d'une confirmation. Il apparaît que certains paramètres sont mal simulés par le modèle. Dans ces conditions on ne peut tirer des conclusions fiables sur la validité du modèle. Il reste à poursuivre les travaux entrepris pour compléter les données, ajuster certains parties du modèle de simulation et terminer aussi son calibrage. Le travail effectué constitue une étape importante qui dégage des perspectives très encourageantes.

7. Conclusions et recommandations

Les conclusions que l'on peut tirer de cette étude sont:

1. La vitesse relative de décomposition de la matière organique pendant les 30 premiers jours après enfouissement a une valeur 2,5 fois plus élevée que celle-ci de la phase qui suit cette période. Malgré la différence de qualité (rapport C/N), la vitesse relative de décomposition mesurée est dans la même ordre de grandeur pour le fumier et la paille de mil.
2. Les proportions d'azote et de phosphore décomposées sont identiques pour la paille de mil et le fumier. Cependant les quantités de N et de P fournies par le fumier sont 2 fois plus élevées que celles fournies par la paille.
3. Les conditions hydriques ont permis une alimentation non-limitante de la culture. On n'a pas observé de différence de stock hydrique (entre 0 et 2 m) entre les deux traitements T0 (témoin) et T3 (labour + fumier + fumure minérale). On peut donc avancer que, très probablement, le rendement sur T3 résulte d'une meilleure alimentation minérale induite par la fertilisation minérale et l'apport de fumier. Cependant le rendement de T0 apparaît trop élevé comparativement aux autres traitements (T1 et T2; labour + fumier et labour + fumure minérale, respectivement).
4. Les absorptions d'azote et de phosphore par la culture sont élevées. Il semble que la disponibilité de ces éléments nutritifs aux parcelles principaux n'est pas limitative. Le traitement T0 ne se présente pas comme un témoin non-fertilisé.
5. En plus les résultats du suivi de N-minéral introduisent certaine doute. C'est ainsi que des essais supplémentaires seront indispensables pour la vérification de nos hypothèses liées aux relations entre la disponibilité en eau et en azote du sol.
6. Les résultats des expérimentations ont permis de calculer des paramètres nécessaires pour le modèle de simulation.
7. Le modèle de simulation développé doit encore être amélioré dans certaines de ces parties (estimation des teneurs en eau et de la température du sol). La calibration du modèle doit être poursuivi.

La coopération entre l'ISRA et le CABO dans le cadre du réseau R3S a été très fructueuse, et les résultats obtenus ouvrent de bonnes perspectives; il est hautement souhaitable que le travail commencé se continue, sur trois terrains:

A. Approfondir la connaissance sur les relations entre la disponibilité en eau et en éléments nutritifs du sol.

Quelques questions particulières qui se pose concerne:

- la disponibilité des éléments nutritifs en rapport avec la profondeur et la durée d'humidification du sol, en tenant compte du teneur en matière organique du profil et sa qualité;
- la détermination précise, en augmentant le nombre et la fréquence des prélèvements, des quantités de l'azote minéral du sol au cours de la saison de croissance de la culture;
- la décomposition de la matière organique apportée au sol sous 4 conditions: non-irriguée et sous culture, irriguée et sous culture, irriguée sous sol nu et le témoin (non-irriguée et sol nu).

B. Améliorer le modèle de simulation de mil avec l'aide des données à obtenir avec les essais liés au point A, poursuivre sa calibration et tester son utilité pratique.

C. Etendre l'approche de la coopération actuelle en incluant des cultures de légumineuses, ce qui implique que le phosphore devra recevoir une attention comparable à celle pour l'azote.

8. Références bibliographiques

- Alagarswamy, G., J.C. Gardner, J.W. Maranville & R.B. Clark, 1988.
Measurements of instantaneous nitrogen use efficiency among pearl millet genotypes. *Crop Science* 28: 681-685.
- Berendse, F., R. Bobbink & G. Rouwenhorst, 1989.
A comparative study on nutrient cycling in wet heathland ecosystems. II. Litter decomposition and nutrient mineralization. *Oecologia* 78: 338-348.
- Binh, T., 1980.
Utilisation des radioéléments pour l'étude de l'enracinement du mil et de l'arachide au Sénégal. AIEA, Vienna, Projet SEN/5/011, 23 pp.
- Binh, T., 1982.
Utilisation du ³²P pour l'étude de l'enracinement du mil au Sénégal (études complémentaires du projet SEN/5/011). AIEA, Vienna, 13 pp.
- Breman, H. & J.M. Krul, 1982.
La pluviosité et la production de fourrage sur les pâturages naturels. Dans: F.W.T. Penning de Vries & M.A. Djitéye (Eds.). p. 304-321.
- Breman, H., A.M. Cissé, M.A. Djitéye & W.Th. Elberse, 1982.
Le potentiel botanique des pâturages. Dans: F.W.T. Penning de Vries & M.A. Djitéye (Eds.). p. 98-165.
- Bolton, J.K. & R.H. Brown, 1980.
Photosynthesis of grass species differing in carbon dioxide fixation pathways V. Response of *Panicum maximum*, *Panicum milloides*, and tall fescue (*Festuca arundinacea*) to nitrogen nutrition. *Plant Physiology* 66: 97-100.
- Charreau, C., 1961.
Dynamique de l'eau dans deux sols du Sénégal. *Agronomie tropicale* 26: 504-561.
- Chopart, J.L., 1980.
Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (Arachide, Mil, Sorgho, Riz pluvial). PhD-thesis INP, Toulouse, 160 pp.
- Chopart, J.L., 1983.
Etude du système racinaire du mil (*Pennisetum typhoides*) dans un sol sableux du Sénégal. *Agronomie tropicale* 38: 37-46.
- Chopart, J.L. & R. Nicou, 1976.
Influence du labour sur le développement racinaire de différentes plantes cultivées au Sénégal - conséquences sur leur alimentation hydrique. *Agronomie tropicale* 31: 7-28.
- CILSS, 1982.
Projet régional d'amélioration des mil, sorgho, niébé et maïs, essais régionaux mil- 1981. Institut du Sahel, Bamako. 41 pp.
- 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 du Sénégal. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL). 184 pp.
- Cissé, L., 1988.
Influence d'apports de matière organique sur la culture de mil et d'arachide sur un sol sableux du Nord-Sénégal. I. Développement des plantes et mobilisations minérales. *Agronomie* 8: 411-417.
- Cissé, L. & G. Vachaud, 1987a.
Effet d'un amendement organique sur l'infiltration, les coefficients de transferts hydriques, et l'évaporation d'un sol sableux dégradé du Nord-Sénégal. *Hydrol. Continent.*, 2: 15-28.
- Cissé, L. & G. Vachaud, 1987b.
Une méthode simplifiée d'estimation in situ de l'extraction de l'eau par les racines. *Agronomie tropicale* 42: 241-247.
- Cissé, L. & G. Vachaud, 1988.
Influence d'apports de matière organique sur la culture de mil et d'arachide sur un sol sableux du Nord-Sénégal. I. Bilans de consommation, production et développement racinaire. *Agronomie* 8: 315-326.

- Cissé, L. & G. Vachaud, 1989.
Amélioration de l'alimentation hydrique et minérale des cultures par des techniques culturales: caractérisation du site expérimental. Projet ISRA/IMG/R3S (en prép).
- Dancette, C., 1983.
Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *Agronomie Tropicale* 38: 281- 294.
- Duivenbooden, N. van, L. Cissé & N. de Ridder, 1988.
L'amélioration de l'alimentation hydrique par des techniques culturales liées à l'interaction eau/fertilisation azotée. Rapport périodique CE, No. TS2-0010-NL(GDF). ISRA/CABO, Wageningen. 7 pp. + 8 pp. annex.
- Feller, C. & F. Ganry, 1982.
Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agro-système tropical. III. Effet du compostage et de l'enfouissement de divers résidus de récolte sur la répartition de la matière organique dans différents compartiments d'un sol sableux. *Agronomie tropicale* 37: 262-269.
- Feller, C., F. Ganry & M. Cheval, 1982a.
Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agro-système tropical. I. Influence d'une fertilisation azotée (urée) et d'un amendement organique (compost) sur la répartition du carbone et de l'azote dans différents compartiments d'un sol sableux. *Agronomie tropicale* 36: 9-17.
- Feller, C., F. Ganry & M. Cheval, 1982b.
Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agro-système tropical. II. Décomposition des résidus végétaux (compost) pendant une saison des pluies dans un sol sableux. *Agronomie tropicale* 36: 18-25.
- Fussel, L.K., P.G. Serafini, A. Bationo & M.C. Klajj, 1987.
Management practices to increase yield and yield stability of pearl millet in Africa. Dans: ICRISAT. p. 255-268.
- Ganry, F., J. Bideau & J. Nicoli, 1974.
Action de la fertilisation azotée et de l'amendement organique sur le rendement et la valeur nutritionnelle d'un mil Souina III. *Agronomie tropicale* 29: 1006-1015.
- Gosseye, P., 1989.
La croissance du mil. Thèse de Doctorat, Agricultural University, Wageningen, (en prép).
- Groot, J.J.R., 1987.
Simulation of nitrogen balance in a system of winter wheat and soil. *Simulation Reports CABO-TT No 13*, CABO, Wageningen. 69 pp.
- Heemst, H.D.J van, 1986.
Crop phenology and dry matter distribution. Dans: H. van Keulen & J. Wolf (Eds.). p. 27-40.
- Hong, C.W., 1987.
Agronomy for the realization of yield potential of pearl millet - a speculation. Dans: ICRISAT. p. 317.
- ICRISAT, 1987.
Proceedings of International Pearl Millet Workshop. 7-11 April 1986, ICRISAT Center, India. 354 pp.
- Jansen, D.M. & P. Gosseye, 1986.
Simulation of growth of millet (*Pennisetum americanum*) as influenced by waterstress. *Simulation Reports CABO-TT, No 10*, CABO, Wageningen. 108 pp.
- Kassam, A.H., 1976.
Crops of the west African semi-arid tropics. ICRISAT, India. 154 pp.
- Keulen, H. van, 1975.
Simulation of water use and herbage growth in arid regions. *Simulation Monographs, Pudoc*, Wageningen. 175 pp.
- Keulen, H. van, 1985.
Modélisation de la croissance des plantes. Dans: Photosynthèse et physiologie de la plante entière. Organisation for economic co-operation and development, Paris. 174 pp.
- Keulen, H. van & N.G. Seligman, 1987.
Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. *Simulation Monographs, Pudoc*, Wageningen. 310 pp.
- Keulen, H. van & J. Wolf (Eds.), 1986.
Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. *Simulation Monographs, Pudoc*, Wageningen. 479 pp.

- Keulen, H. van, H. Breman, J.J. van der Lek, J.W. Menke, L. Stroosnijder & P.W.J. Uithol, 1986.
Prediction of actual primary production under nitrogen limitation. Dans: N. de Ridder, H. van Keulen, N.G. Seligman & P.J.H. Neate (Eds.). Modelling of extensive livestock production systems, Proc. of ILCA/ARO/CABO Workshop, Bet Dagan, Israel, 5-9 Febr. 1985. p. 42-79.
- Kiniry, J.R., C.A. Jones, J.C. O'Toole, R. Blanchet, M. Cabelguenne & D.A. Spanel, 1989.
Radiation-Use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. *Field Crops Research*, 20: 51-64.
- Kraalingen, D.W.G. van & H. van Keulen, 1988.
Model development and application for the 'Projet pilote en agrométéorologie'. Report submitted to WMO, TPE/CABO, Wageningen. 167 pp.
- Kraalingen, D.W.G. van & C. Rappoldt, 1989.
Subprograms in simulation models. Simulation Reports CABO-TT no. 18, CABO, Wageningen. 40 pp. (en prép.).
- Krul, J.M., F.W.T. Penning de Vries & K. Traoré, 1982.
Les processus du bilan d'azote. Dans: F.W.T. Penning de Vries & M.A. Djitéye (Eds.). p. 226-246.
- Lambert, C., 1983a.
Influence de la précocité sur le développement du mil en conditions naturelles. I. Elaboration de la touffe. *Agronomie tropicale*, 38: 7-15.
- Lambert, C., 1983b.
Influence de la précocité sur le développement du mil en conditions naturelles. II. Elaboration du rendement. *Agronomie tropicale*, 38: 16-26.
- Lambert, C., 1983c.
L'IRAT et l'amélioration du mil, présentation du travaux. *Agronomie tropicale* 38: 78-88.
- MdlC (Ministère de la Coopération), 1977.
Mémento de l'agronome, techniques rurales en Afrique. République française, Ministère de la Coopération, 1592 pp.
- Microsoft, 1987.
Microsoft FORTRAN Optimizing Compiler for the MS-DOS operating system.
- Mohamed, A., F.L. Barnett, R.L. Vanderlip & B. Khaleeq, 1989.
Emergence and stand establishment of pearl millet as affected by mesocotyl elongation and other seed and seedling traits. *Field Crops Research*, 20: 41-49.
- Monteith, J.L. 1977.
Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. London*, B 281. p. 277-294.
- ODA (Overseas Development Administration), 1987a.
Microclimatology in tropical agriculture. Volume I. Introduction, methods and principles. University of Nottingham. 202 pp.
- ODA (Overseas Development Administration), 1987b.
Microclimatology in tropical agriculture. Volume II. Applications in agronomy and breeding. University of Nottingham. 203 pp.
- Penning de Vries, F.W.T., J.M. Krul & H. van Keulen, 1980.
Productivity of Sahelain rangelands in relation to the availability of nitrogen and phosphorus from the soil. Dans: T. Rosswal (Ed.). Nitrogen cycling in West African Ecosystems. SCOPE/UNEP International Nitrogen Unit, Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm, 95-113.
- Penning de Vries, F.W.T. & M.A. Djitéye (Eds.), 1982.
La productivité des pâturage sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. Agricultural Research Reports No. 918, Pudoc, Wageningen. 525 pp.
- Penning de Vries, F.W.T. & H. van Keulen, 1982.
La production actuelle et l'action de l'azote et du phosphore. Dans: F.W.T. Penning de Vries & M.A. Djitéye (Eds.). p. 196-225.
- Penning de Vries, F.W.T., D. Jansen, H. ten Berge & A. Bakema, 1989.
Simulation of ecophysiological processus of growth of several annual crops. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen. (in press).
- Pichot, J., S. Burdin, J. Charoy & J. Nabos, 1974.
L'enfouissement des pailles de mil Pennisetum dans les sols sableux dunaires. son influence sur les rendements et la nutrition minérale du mil. Son action sur les caractéristiques chimiques du sol et la dynamique de l'azote minéral. *Agronomie tropicale*, 29: 995-1005.

- Pièri, C., 1969.
Etude pédologique de la Région de Nioro du Rip. Note interne du CNRA, Bambey.
- Pièri, C., 1979.
La fertilisation potassique du mil pennisetum et ses effets sur la fertilité d'un sol sableux du Sénégal (compte rendu des années d'expérimentation). CNRA, Bambey / IRAT, Montpellier. 72 pp. + 5 annex.
- Reyniers, F.N. & F. Forest, 1988.
Améliorer l'alimentation hydrique et son efficacité en agriculture pluviale en Afrique au sud du Sahara. Séminaire ILRI/CTA, Harare, 25-29 Avril 1988. 27 pp.
- Seligman, N.G. & H. van Keulen, 1981.
PAPRAN: a simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. Dans: M.J. Frissel & J.A. van Veen (Eds.): Simulation of nitrogen behaviour of soil-plant systems. Pudoc, Wageningen.
- Siband, P., 1980.
Croissance, alimentation minérale et production du mil (premier essai de synthèse: 1974 - 1980). IRAT, Montpellier. 32 pp.
- Siband, P., 1981.
Croissance, nutrition et production du mil, essai d'analyse du fonctionnement du mil en zone sahélienne. Thèse de doctorat Académie de Montpellier, Univ. des sciences et techniques du Languedoc. 300 pp.
- Siband, P., 1983.
Essai d'analyse du fonctionnement du mil en zone sahélienne. *Agronomie tropicale* 38: 27-36.
- Steinberger, Y. & W.G. Whitford, 1988.
Decomposition process in Negev ecosystems. *Oecologia (Berlin)* 75: 61-66.
- Spencer, D.S.C. & M.V.K. Sivakumar, 1987.
Pearl millet in african agriculture. Dans: ICRISAT. p. 19-32.
- Spiertz, J.H.J. & H. van Keulen, 1980.
Effects of nitrogen and water supply on growth and grain yield of wheat. Proc. 3rd Inter. Wheat Conference, Madrid, Spain. p. 595-610.
- Squire, G.R., C.K. Ong & J.L. Monteith, 1987.
Crop growth in semi-arid environments. Dans: ICRISAT. p. 219-232.
- Vachaud, G., 1988.
Influence d'apport en matière organique sur la production, les bilans de consommation et les pertes minérales en culture de mil et d'arachide au Sénégal. Rapport envoyé à AIEA, Vienna.
- Whitford, W.G., K. Stinnett & J. Anderson, 1988.
Decomposition of roots in a Chichuahuan desert ecosystem. *Oecologia (Berlin)* 75: 8-11.
- Wilson, J.R., 1975.
Influence of temperature and nitrogen on growth, photosynthesis and accumulation of non-structural carbohydrate in a tropical grass, *Panicum maximum* var. *trichoglume*. *Neth. J. Agric. Sci.* 23, 48-61.
- Wit, C.T. de, J. Goudriaan, H.H. van Laar, F.W.T. Penning de Vries, R. Rabbinge, H. van Keulen, W. Louwse, L. Sibma & C. de Jonge, 1978.
Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen. 141 pp.
- Yanuka, M., Y. Leshem & A. Dovrat, 1982:
Forage corn response to several trickle irrigation and fertilization regimes. *Agron. Journal* 74: 736-740.

L'amélioration de l'alimentation hydrique par des techniques culturales liées à l'interaction eau/fertilisation azotée

**Rapport final
Annexes**

CABO Rapport N° 117

N. van Duivenbooden¹⁾ & L. Cissé²⁾

Mai 1989

Annexe I. Abréviations

CABO	Centre de Recherches Agrobiologiques
CEE	Communauté Economique Européenne
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CNRA	Centre National de Recherches Agronomiques
ICRISAT	International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics
IMG	Institut de Mécanique de Grenoble
IRAT	Institut de Recherches Agronomiques Tropicales
ISRA	Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
JAE	Jours après enfouissement
JAL	Jours après levée
JAS	Jours après semis
MS	Matière sèche
R3S	Réseau de Recherche sur la Résistance à la Sécheresse

Annexe II. Plan de travail

1. Introduction.

L'agriculture dans les pays sahéliens rencontre de plus en plus les difficultés à nourrir et à donner une existence satisfaisante aux populations de la zone. Beaucoup de la recherche est consacrée à l'objectif d'intensifier l'agriculture pluviale. La disponibilité des éléments nutritifs, en particulier de l'azote et du phosphore, occupe une place importante: ces éléments constituent souvent les facteurs limitants pour la production végétale. Les expériences nombreuses réalisées e.a. par l'IRAT, l'ICRISAT et les organismes de recherches nationaux ont mis en évidence cet aspect. En utilisant des modèles mathématiques de simulation, validés et vérifiés par des expérimentations au terrain, Van Keulen (1975) et Penning de Vries & Djitèye (1982) sont arrivés à la même conclusion. Avec ces modèles, on peut estimer la production potentielle en se basant sur des données météorologiques, des caractéristiques des sols et des cultures. La production potentielle est définie comme la production possible en supposant que les éléments nutritifs ne sont pas limitants. Les modèles, qui décrivent quantitativement la production actuelle, sont moins développés (van Keulen *et al.*, 1986). La description quantitative de la dynamique des bilans d'azote et de phosphore est encore moins précise, parce que les processus en jeu sont moins bien compris et les interactions entre la disponibilité de l'eau et celle des éléments nutritifs ne sont pas bien établies. Par ailleurs il est très difficile d'interpréter des données expérimentales disponibles. La connaissance des processus est donc indispensable pour pouvoir dégager des recommandations viables pour l'intensification agricole. La priorité de recherche au Centre de Recherches Agrobiologiques (CABO) de Wageningen, Pays-Bas, est axée sur ce domaine, aussi bien pour la zone tempérée que pour la zone semi-aride tropicale. Les premiers modèles de simulation pour la culture de mil ont été développés par Jansen & Gosseye (1986) et puis par Van Kraalingen & Van Keulen (1988). L'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) de Dakar, Sénégal, a s'orienté pendant plusieurs années aux expérimentations de la culture de mil, de la décomposition et de la minéralisation (Feller *et al.*, 1981a; Feller *et al.*, 1981b; Feller & Ganry, 1982; Cissé, 1986). Pour cela, l'ISRA et le CABO ont réalisé un programme de recherche en essayant de combiner l'expertise au terrain avec celle de modélisation. Le programme d'une année a pour objectifs:

1. De quantifier d'une part l'effet de l'humidité du sol sur la disponibilité de l'azote et d'autre part les effets de ces deux facteurs sur la production végétale;
2. D'étudier de façon approfondie les relations entre la disponibilité en eau et celle en azote du sol;
3. De développer et améliorer un modèle mathématique de simulation de la croissance du mil en fonction de la quantité d'eau et d'azote mobilisable par la culture.

Pour la réalisation des ces objectifs un plan de travail a été établi et présenté ci-dessous.

2. Mise au point de la modélisation de la croissance du mil

2.1. Développement du modèle mathématique

Le développement du modèle mathématique de simulation sera fait aux Pays-Bas (CABO). En utilisant les modules déjà existants, il ne nécessitera plus beaucoup de temps pour établir un modèle préliminaire de simulation de la croissance de mil. Ce travail préliminaire sera effectué au CABO. Une mise au point d'une version du modèle utilisable sur les micro-ordinateurs disponibles au CNRA de Bambey sera ensuite faite au CNRA. Après calibrage et validation, l'ISRA disposera du modèle ainsi établi.

2.2. Calibrage et validation du modèle

Le modèle sera calibré et validé à partir des mesures et observations qui seront faites sur le dispositif expérimental qui sera mis en place à la station de Nioro du Rip (voir Figure 0.1). Ce dispositif expérimental comprend deux séries cultivées en rotation mil-arachide. Quatre traitements seront mis en place (voir Figure 1.1):

1. témoin absolu;
2. labour + fumier;
3. labour + fumure minérale;
4. labour + fumure minérale + fumier.

Des dispositifs expérimentaux complémentaires seront installés à côté du dispositif principal pour effectuer des mesures additionnelles. Parce que le modèle est valable pour la croissance des céréales, on ne travaillera que sur la culture du mil. Le traitement témoin absolu (dispositif principal) est retenu pour le calibrage et le traitement labour + fumure minérale + fumier (dispositif principal) sera utilisé pour la validation du modèle. Les mesures à effectuer sont présentées ci-dessous.

Les mesures au niveau du sol

A. Mesures de pF

Les mesures seront faites sur des échantillons prélevés aux profondeurs suivants: 0-20 cm, 20-60 cm, 60-80 cm et 80-200 cm. Les valeurs de pF à déterminer sont: pF_{4,2} et pF_{2,5}.

B. Analyses chimiques

Les éléments C, N, P-ass et P-tot, seront analysés sur des échantillons du sol des couches de 0-10, 10-20, 20-40, 40-80 et de 80-200 cm, avec 5 répétitions par couche. Les prélèvements se feront au début (avant semis, mais après l'application d'engrais) et à la fin de la saison aux deux traitements: le témoin absolu et le labour + fumure minérale + fumier.

C. Evolution du taux de N minéral

Le taux de N minéral sera suivie sur les deux traitements retenus pour la validation et le calibrage du modèle de simulation.

C1. Témoin absolu

A cinq dates de prélèvement (7, 14, 28 jours après levée, à la floraison et à la récolte) des échantillons seront pris aux profondeurs de 0-10, 10-20, 20-40, 40-80 et de 80-200 cm, avec 5 répétitions par couche.

C2. Labour + fumure minérale + fumier

A deux dates de prélèvement (14 jours après levée et à la floraison), les mêmes types d'échantillonnage seront aussi effectués à ce traitement.

Les mesures au niveau de la culture

D. Rendements

La matière sèche totale sera déterminée sur les deux traitements:

D1. Témoin absolu.

Les plantes prélevées seront séparées selon le stade végétatif en feuilles, tiges + gaines, chandelles et graines. Les prélèvements se feront aux 7, 14, 28 jours après levée, à la floraison et à la récolte. En outre, à la floraison une estimation des masses racinaires sera faite à raison de 3 répétitions.

D2. Labour + fumure minérale + fumier.

Le traitement des échantillons prélevés se fera de la même façon que ci-dessus et les prélèvements auront lieu aux 3 dates: 14 jours après levée, à la floraison et à la récolte. Une estimation de masses racinaires à la floraison sera faite également sur ce traitement.

E. Analyses chimiques des échantillons prélevés

A chaque date de prélèvement, un échantillon moyen sera pris selon le stade végétatif des feuilles, tiges + gaines, chandelles, graines, matière morte et racines pour l'analyse des taux de N et de P.

3. Minéralisation en relation avec la qualité de la matière organique et la disponibilité en azote

Pour une meilleure quantification de la disponibilité en azote dans le temps, en relation avec la disponibilité en eau, deux expérimentations sont prévues (voir Figure 2.1).

3.1. Décomposition de la matière organique

Deux types de matière organique (paille et fumier) seront suivis dans le temps sous deux conditions:

A. Pluvial strict et

B. Pluvial avec apports d'eau complémentaire en cas de besoin (période sèche).

La matière organique sera mise dans des sacs en polyéthylène (Monodur MON PE 300 N) avec une maille de 300 μ et enfouie dans le sol à 15 cm de profondeur. Le sol sera labouré et semé en mil. Les sacs seront mis à 50 cm des pieds de mil et ils seront placés juste après le

semis. A chacune des 7 dates de prélèvements retenus (7, 14, 28, 42, 56, 60, 90 jours après levée), 5 sacs seront pris au hasard et les taux de C, de N et de P de la matière organique seront analysés.

3.2. Minéralisation totale

Pour déterminer la minéralisation totale, un terrain de 15 m² sera semé de façon très dense avec un mélange de mil (20 g m⁻²) et de graminée fourragère (*Schoenefeldia gracilis* p.e., 2,5 g m⁻²), avant que les pluies commencent. Les plantes seront récoltées chaque fois qu'elles meurent à cause d'une forte sécheresse (surtout au début) et le terrain sera ressemé. A la fin de la saison des pluies, au moment des récoltes, les plantes seront récoltées, séchées et pesées. Un échantillon moyen sera prélevé pour déterminer les taux de N et de P. Avant la mise en place de cette expérimentation, les taux de C, de N et de P du sol seront analysés.

4. Exécution de travail

Pour la réalisation du travail retenu, on propose que Niek van Duivenbooden (CABO) séjourne du 15 Avril au 15 Novembre à Bambey pour être associé au programme, sous la supervision de L. Cissé. Il participera à la mise en place des expérimentations, aux suivis et au travail de laboratoire, notamment à l'analyse de l'azote minéral du sol.

5. Missions de travail

Une mission de travail (2 à 3 jours) est prévue pour H. Breman, chef du département de la recherche des systèmes agricoles (CABO), fin Mai début Juin, pour s'assurer que l'exécution du plan de travail retenu se passe normalement et apporter éventuellement un appui méthodologique pour la mise en place des essais.

6. Utilisation et diffusion des résultats

Toute utilisation des résultats de ce travail se fait en mentionnant les deux organismes (ISRA et CABO). Toute publication dans une revue sera signée au moins par deux auteurs, un de chaque organisme.

Le rapport final pour la CEE sera rédigé par les représentants de deux organismes au début de 1989.

7. Modifications pendant le projet

Au fur et à mesure il y avait des modifications mineures dans le plan de travail, qui sont résumées par la suite:

- La mesure précise de la matière sèche produite au stade plantule et au stade de tallage est une donnée importante pour la validation du modèle. Pendant la visite de H. van Keulen en Juin 1988, la croissance différente des racines du mil cultivé au sol non-fertilisé (témoin) et au sol fertilisé avec la matière organique, a été discutée. Après cette discussion, il a été décidé de mesurer la densité des racines aussi. Pour la détermination de ce paramètre une

expérimentation additionnelle a été proposée.

Deux surfaces de 15 m² chacune seront semées en mil avec une densité de 1 poquet/m². La moitié des plantules de chaque surface sera récoltée après la levée, et les plantules seront séparées en feuilles, tiges et racines. Les plantes restantes seront récoltées au tallage, et aussi séparées en feuilles, tiges et racines. A chaque date de prélèvement les poids de matière sèche, la surface foliaire et la profondeur maximale d'enracinement et la longueur totale des racines seront mesurés.

- Pendant sa mission de travail, H. Breman a proposé de déterminer aussi le taux d'azote des gaines du mil. La qualité des parties différentes des plantes est importante du point de vue de la nutrition des animaux. Il a été observé que les animaux consomment les feuilles et les gaines en préférence. Il est attendu que la qualité des gaines, reflétée par le taux de N, se diffère de la qualité des tiges. Donc, à la récolte les tiges et les gaines seront aussi séparés et leur taux de N et de P seront déterminés séparément.
- La période de croissance du *Schoenefeldia gracilis* est trop courte pour la détermination de la minéralisation totale pendant une saison des pluies, si la saison des pluies est satisfaisante. Ainsi, une graminée (*Pennisetum pedicellatum*) à un cycle plus long sera introduite dans le mélange mil-*Schoenefeldia gracilis*.

ANNEXE III. Modèle de simulation

III.1. Installation du modèle de simulation

The model FORCROS can be installed on each type of personal computer which has the abilities to run FORTRAN programs (e.g. MSDOS version 2.11). The type of PC, however, will have effects on the time required to run the model.

For practical purposes the model and other files required to run the model are installed on one directory and 4 sub-directories. This is done to facilitate maintenance. In addition, by running the batch file that omits the original paths, one can run the model without carrying out changes in other directories or installed programs (e.g. if there is an older version of the FORTRAN compiler in one of the original paths, that version will not be used). Table III.1.1 shows the set up of the directory, subdirectories and the required files to run the model FORCROS. In this case the FORTRAN compiler version 4.01 is installed to use Code View Options (debugger), but the model can be run by any STANDARD FORTRAN 77 compiler.

Table III.1. Directories and files required to run FORCROS.

c:\DOS	general MSDOS-files and the file to start with and that omits the original paths: MODEL.BAT
c:\TMP	directory for temporary files of compiler
c:\MODEL\SYSTEM:	batch procedures for compilation and running of the model: EXEM.BAT MAKEFILE.EXE MAKE.EXE file for re-installation of original paths: BACK.BAT compiler and linker: FL.EXE, F1.EXE, F2.EXE, F3.EXE, ERROUT.EXE F3S.EXE, FL.ERR, F1.ERR, F23.ERR, FL.HLP, LINK.EXE library for PC without 8087: LLIBFORA.LIB library for PC with 8087: LLIBFOR77.LIB debugger: CV.EXE, CV.HLP
c:\MODEL\MODEL:	FORCROS.FOR other *.FOR subroutines FORCROS.MAK
c:\MODEL\SOIL:	soil data files, input files of the model
c:\MODEL\WEATHER:	weather files, input files of the model

As it may be desirable to make changes in the main program or subroutines the MAKE procedure is used to save computer time. Only the changed program will be compiled, while the other previously compiled programs remain available. Next, linking of all compiled programs takes place to form an executable program file.

To run the model the following commands should be given:

```
MODEL <return>  
EXEM FORCROS <return>  
FORCROS <return>
```

The files MODEL.BAT, EXEM.BAT, BACK.BAT and FORCROS.MAK are listed in Tables III.2 - Tables III.6, respectively.

Table III.2. Listing of MODEL.BAT

```
prompt $p$g  
path c:\model\system;c:\dos  
FASTSCR  
CD \model\model  
set lib=c:model\system  
set tmp=c:\tmp
```

Table III.3. Listing of EXEM.BAT

```
makefile %1.mak  
make tem$main.mak  
del tem$main.mak
```

Table III.4. Listing of BACK.BAT

```
PATH C:\UTIL\DOS;C:\UTIL\USER;C:\UTIL\COMMANDE;C:\SUIVIH\PROGRAM
ECHO DELETING TEMPORARY FILES FROM C:\TMP
DEL C:\TMP\*.*
cd\
cls
```

Table III.5. Listing of FORCROS.MAK (for a IBM XT without 8087)

```
c:\model\system\fl /Gt /4Yb /Od /AH /FPa /Zi /c
c:\model\system\link /co
c:\model\system\llibfora.lib
forcros
mil88
crpout
water
nitbal
nitout
soltmp
soilpr
soilnr
osubr1
osubr2
osubr3
```

Table III.6. Listing of FORCROS.MAK (for a IBM XT with 8087)

```
c:\model\system\fl /Gt /4Yb /Od /AH /Zi /c
c:\model\system\link /co
c:\model\system\llibfora.lib
forcros
mil88
crpout
water
nitbal
nitout
soltmp
soilpr
soilnr
osubr1
osubr2
osubr3
```

Annexe III.2. Liste du modèle de simulation

2

```

*-----*
* REAL FUNCTION AFGEN
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 28-JAN-1987
* Purpose: This function is a linear interpolation function. The
* function does not extrapolate : in case of X below or
* above the region defined by TABLE, the first
* respectively the last Y-value is returned and a message
* is generated.
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=Input, O=output, C=control, IN=init, Y=cure)
* name meaning
*-----*
* AFGEN Function name, result of the interpolation - O
* ILTAB The number of elements of the array - I
* TABLE
* TABLE A one-dimensional array with paired - I
* data: x,y,x,y, etc.
* X The value at which interpolation should - I
* take place
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
*-----*
* TABLE(I) < TABLE(I-2) , for I odd
* ILTAB odd
*
* No WARNINGS using the control variable IWAR are generated since
* nobody will check IWAR after each AFGEN call ; instead an X-value
* below TABLE(1) or above TABLE(ILTAB-1) is reported on screen
* with a message containing the value of ILTAB and X. Further
* information on the error is not available within this function.
*
* No other SUBROUTINES and FUNCTIONS are called
* No FILE's are used (error message with WRITE(*,...)....)
*-----*

```

100

```

REAL FUNCTION AFGEN (ILTAB, TABLE, X)
IMPLICIT REAL (A-Z)
INTEGER I, IUP, ILTAB
REAL TABLE(ILTAB)

```

150

```

check on odd ILTAB
IF (MOD(ILTAB,2).NE.0) THEN
WRITE (*, '(A,I4/,A)')
& ' ERROR in function AFGEN: ILTAB=', ILTAB,
& ' ILTAB must be even!'
STOP
END IF

```

200

```

IUP = 0
DO 10 I=3, ILTAB, 2
check on ascending order of X-values in function
IF (TABLE(I).LE.TABLE(I-2)) THEN

```

3

```

WRITE (*, '(A,I4/,A,I4/,A/A)')
& ' X-coordinates not in ascending order *c element', I,
& ' AFGEN-function contains', ILTAB, ' points',
& ' Run deleted!'
STOP

```

```

END IF
IF (IUP.EQ.0.AND.TABLE(I).GE.X) IUP = I
10 CONTINUE

```

300

```

IF (X.LT.TABLE(1)) THEN
WRITE (*, '(A/A,I4,A/A,G12.4)')
& ' Interpolation below defined region!',
& ' AFGEN-function contains', ILTAB, ' points',
& ' Interpolation at X=', X
AFGEN = TABLE(2)
GO TO 40
END IF

```

400

```

IF (X.GT.TABLE(ILTAB-1)) THEN
WRITE (*, '(A/A,I4,A/A,G12.4)')
& ' Interpolation above defined region!',
& ' AFGEN-function contains', ILTAB, ' points',
& ' Interpolation at X=', X
AFGEN = TABLE(ILTAB)
GO TO 40
END IF

```

500

```

* normal interpolation
SLOPE = (TABLE(IUP+1)-TABLE(IUP-1))/(TABLE(IUP)-TABLE(IUP-2))
AFGEN = TABLE(IUP-1)+(X-TABLE(IUP-2))*SLOPE

```

600

```

40 RETURN
END

```

```

*-----*
* SUBROUTINE ASSIM-G4
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 10-Dec-1987
* Purpose: This subroutine performs a Gaussian integration over
* depth of canopy by selecting three different LAI's and
* computing assimilation at these LAI levels. The
* integrated variable is FGROS. (See CARO-TPE report #?).
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=Input, O=output, C=control, IN=Init, T=time)
* name meaning units class
*-----*
* DAYL Daylength h I
* AMAX Assimilation rate at light saturation kg CO2/h I
* EFF Initial light use efficiency ha leaf/h I
* KDIF Extinction coefficient for diffuse kg CO2/J I
* radiation ha/h m2 s I
* LAI Leaf area index ha/ha I
* PARDIR Array of instantaneous flux of direct (PAR) W/m2 I
* radiation
* PARDIF Array of instantaneous flux of diffuse (PAR) W/m2 I
* radiation
* SINB Array of sine of solar height I
* DTGA Daily total gross assimilation kg CO2/ha soil/d O
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
*-----*
* LAI < 0, LAI > 10
* EFF < 0.3, EFF > 0.6
* AMAX < 0, AMAX > 130 (AMAX > 85 FOR C3-SPECIES)
* KDIF < 0.3, KDIF > 1
* DTGA < 0, DTGA > 1000
*
* WARNINGS (nonzero value of IVAR returned)
* condition
*-----*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : ERROR
*
* FILE usage : a file opened with unit IDEBUG
*-----*
SUBROUTINE ASSIM (DAYL,AMAX,EFF,KDIF,LAI,PARDIR,PARDIF,SINB,
6 DTGA)
*-----Initial data types
IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)
REAL XGAUS(3), WGAUS(3)
LOGICAL TERNNL,DEBUG,WATER

```

```

COMMON /SIM/ STTIME,STCROF,TIME,DELT,FINTIM,
6 DAY,STYEAR,YEAR,
& TERNNL,DEBUG,WATER,
& IIN,IOUT,IDEBUG,IMATER,INITRO
REAL PARDIR(3), PARDIF(3), SINB(3), COSB(3)
DATA XGAUS /0.1127, 0.5000, 0.8873/
DATA WGAUS /0.2778, 0.4444, 0.2778/
DATA IGAUS /3/
*-----check on input range of parameters
IF (LAI.GT.10.) CALL ERROR (1,'LAI',LAI,'ASSIM')
IF (LAI.LT.0.) CALL ERROR (2,'LAI',LAI,'ASSIM')
IF (EFF.GT.0.6) CALL ERROR (1,'EFF',EFF,'ASSIM')
IF (EFF.LT.0.3) CALL ERROR (2,'EFF',EFF,'ASSIM')
IF (AMAX.GT.130.) CALL ERROR (1,'AMAX',AMAX,'ASSIM')
IF (AMAX.LT.0.) CALL ERROR (2,'AMAX',AMAX,'ASSIM')
IF (KDIF.GT.1.) CALL ERROR (1,'KDIF',KDIF,'ASSIM')
IF (KDIF.LT.0.3) CALL ERROR (2,'KDIF',KDIF,'ASSIM')
SCV =0.2
REFR=(1.-SQRT(1.-SCV))/(1.+SQRT(1.-SCV))
*-----assimilation set to zero and three different times of
* the day (HOUR)
DTGA=0.
DO 10 IHOUR=1,IGAUS
REFS = REFR*2./(1.+1.6*SINB(IHOUR))
*-----extinction coefficient for direct radiation and total
* direct flux
KDIRBL = (0.5/SINB(IHOUR))*KDIF/(0.8*SQRT(1.-SCV))
KDIRT = KDIRBL*SQRT(1.-SCV)
*-----selection of depth of canopy, canopy assimilation
* is set to zero
FGROS = 0.
DO 20 ILAI=1,IGAUS
LAIC = LAI * XGAUS(ILAI)
*-----absorbed fluxes per unit leaf area: diffuse flux, total direct
* flux, direct component of direct flux.
VISDF = (1.-REFS)*PARDIF(IHOUR)*KDIF*EXP(-KDIF*LAIC)
VIST = (1.-REFS)*PARDIR(IHOUR)*KDIRT*EXP(-KDIRT*LAIC)
VISD = (1.-SCV)*PARDIR(IHOUR)*KDIRBL*EXP(-KDIRBL*LAIC)
*-----absorbed flux (J/N2 leaf/s) for shaded leaves and
* assimilation of shaded leaves

```

*-----check on output range of parameters
 IF (DTGA.GT.1000.) CALL ERROR (1,'DTGA',DTGA,'ASSIM')
 IF (DTGA.LT.0.) CALL ERROR (2,'DTGA',DTGA,'ASSIM')

RETURN
 END

1000

VISSHD = VISDF+VIST-VISD
 FGRSH = AMAX*(1.-EXP(-VISSHD*EFF/AMAX))
 *-----direct flux absorbed by leaves perpendicular on
 * direct beam and assimilation of sunlit leaf area

VISPP = (1.-SCV)*PARDIR(IHOUR)/SINB(IHOUR)
 FGRSUN = 0.

DO 30 I2=1,IGAUS

VISSUN = VISSHD+VISPP*XGAUS(I2)

FGRS = AMAX*(1.-EXP(-VISSUN*EFF/AMAX))

FGRSUN = FGRSUN+FGRS*XGAUS(I2)

30 CONTINUE

1100

*-----fraction sunlit leaf area (FSLLA) and local
 * assimilation rate (FGL)

FSLLA = EXP(-KDIBL*LAIC)

FGL = FSLLA*FGRSUN+(1.-FSLLA)*FGRSH

*-----calculation of average assimilation rate of canopy (FGROS)

FGROS = FGROS+FGL*XGAUS(I1AI)

20 CONTINUE

*-----integration of average rate over crop LAI

FGROS = FGROS * LAI

*-----calculation of average assimilation rate of daylength

DTGA = DTGA+FGROS*XGAUS(IHOUR)

10 CONTINUE

1200

*-----integration of average rate over daylength

DTGA = DTGA * DAYL

1300

*-----Debug information is written to file when DEBUG logical is true

IF (DEBUG) WRITE (IDEBUG,'(A,F8.2/,11(A,G14.6/))')

& ' Debug of ASSIM at time-',TIME,

& ' PARDIR(1)=-',PARDIR(1),

& ' PARDIR(2)=-',PARDIR(2),

& ' PARDIR(3)=-',PARDIR(3),

& ' PARDIF(1)=-',PARDIF(1),

& ' PARDIF(2)=-',PARDIF(2),

& ' PARDIF(3)=-',PARDIF(3),

& ' DAYL =',DAYL,

& ' AMAX =',AMAX,

& ' EFF =',EFF,

& ' LAI =',LAI,

& ' DTGA =',DTGA

ASSIM

```

*-----*
* SUBROUTINE ASSIM-C4
* Authors: N. van Duivenbooden
* Date : 17-Jan-1989
* Purpose: This subroutine performs a Gaussian integration over
* depth of a clustered canopy by selecting three different
* LAI's and computing assimilation at these LAI levels.
* The integrated variable is FCROS. (See CABO-TPE report
* #7). This routine is based on ASSIM
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
*-----*
* DAYL Daylength h I
* AMAX Assimilation rate at light saturation kg CO2/ha leaf/h I
* EFF Initial light use efficiency kg CO2/ha/h m2/s I
* KDIF Extinction coefficient for diffuse radiation ha/ha I
* LAI Leaf area index (PAR) W/m2 I
* PARDIR Array of instantaneous flux of direct radiation (PAR) W/m2 I
* PARDIF Array of instantaneous flux of diffuse radiation (PAR) W/m2 I
* SINB Array of sine of solar height kg CO2/ha soil/d I
* DTGA Daily total gross assimilation m2 I
* CROPS Surface of crop, projected to soil surface m2 O
* CROPH Height of crop during juvenile growth m2 I
* SSHADE Soil surface shaded by crop m2 O
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
*-----*
* LAI < 0, LAI > 10
* LAICL < 0, LAICL > 10
* EFF < 0.3, EFF > 0.6
* AMAX < 0, AMAX > 130 (>85 FOR C3-species)
* KDIF < 0.3, KDIF > 1
* DTGA < 0, DTGA > 1000
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned)
* condition returned IWAR value
*-----*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : ERROR
*
* FILE usage : a file opened with unit IDEBUG
*-----*

```

```

SUBROUTINE ASSIM (DAYL,AMAX,EFF,KDIF,LAI,PARDIR,PARDIF,SINB,
& DTGA,CROPS,CROPH,SSHAD)

```

```

*-----initial data types
IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)

```

```

REAL XGAUS(3), WGAUS(3)
LOGICAL TERMNL,DEBUG,WATER
COMMON /SIM/ STTIME,STCROP,TIME,DELT,FINTIM,
& DAY,STYEAR,YEAR,
& TERMNL,DEBUG,WATER,
& IIN,IOUT,IDEBUG,IWATER,INITRO

```

```

REAL PARDIR(3), PARDIF(3),SINB(3),COSB(3)
DATA XGAUS /0.1127, 0.5000, 0.8873/
DATA WGAUS /0.2778, 0.4444, 0.2778/
DATA IGAUS /3/
DATA LAICL /0./

```

```

*-----check on input range of parameters
IF (LAI.GT.10.) CALL ERROR (1,'LAI',LAI,'ASSIMC')
IF (LAI.LT.0.) CALL ERROR (2,'LAI',LAI,'ASSIMC')
IF (LAICL.GT.10.) CALL ERROR (1,'LAI',LAI,'ASSIMC')
IF (LAICL.LT.0.) CALL ERROR (2,'LAI',LAI,'ASSIMC')
IF (EFF.GT.0.6) CALL ERROR (1,'EFF',EFF,'ASSIMC')
IF (EFF.LT.0.3) CALL ERROR (2,'EFF',EFF,'ASSIMC')
IF (AMAX.GT.130.) CALL ERROR (1,'AMAX',AMAX,'ASSIMC')
IF (AMAX.LT.0.) CALL ERROR (2,'AMAX',AMAX,'ASSIMC')
IF (KDIF.GT.1.) CALL ERROR (1,'KDIF',KDIF,'ASSIMC')
IF (KDIF.LT.0.3) CALL ERROR (2,'KDIF',KDIF,'ASSIMC')

```

```

SCV =-0.2
REFH=(1.-SQRT(1.-SCV))/(1.+SQRT(1.-SCV))

```

```

*-----assimilation set to zero and three different times of
* the day (HOUR)

```

```

DTGA=0.
DO 10 IHOURL=1,IGAUS
REFS = REFH*2./(1.+1.6*SINB(IHOURL))

```

```

*-----extinction coefficient for direct radiation and total
* direct flux

```

```

KDIRBL = (0.5/SINB(IHOURL))*KDIF/(0.8*SQRT(1.-SCV))
KDIRT = KDIRBL*SQRT(1.-SCV)

```

```

*-----calculation of soil surface shaded by leaves and of corrected
* LAI to account for clustering of leaves blades during juvenile

```

```

* growth (according to Goudriaan, 1977)
COSB(IHOUR) = SQRT(1. - SINB(IHOUR)*SINB(IHOUR))
SSHADE = CROPS * (1. + CROPH * COSB(IHOUR)/SINB(IHOUR))
IF (SSHADE.LT.0.8E4) THEN
  LAICL = LAI * 1.E4 / SSHADE
ELSE
  LAICL = LAI
END IF

*-----selection of depth of canopy, canopy assimilation
is set to zero
FGROS = 0.
DO 20 ILAI-1, IGAUS
  LAIC = LAICL * XGAUS(ILAI)

*-----absorbed fluxes per unit leaf area: diffuse flux, total direct
flux, direct component of direct flux.
VISDF = (1.-REFS)*PARDIF(IHOUR)*KDIF*EXP(-KDIF*LAIC)
VIST = (1.-REFS)*PARDIR(IHOUR)*KDIRT*EXP(-KDIRT*LAIC)
VISD = (1.-SCV)*PARDIR(IHOUR)*KDIRBL*EXP(-KDIRBL*LAIC)

*-----absorbed flux (J/m2 leaf/s) for shaded leaves and
assimilation of shaded leaves
VISSHD = VISDF+VIST-VISD
FGRSH = AMAX*(1.-EXP(-VISSHD*EFF/AMAX))

*-----direct flux absorbed by leaves perpendicular on
direct beam and assimilation of sunlit leaf area
VISPP = (1.-SCV)*PARDIR(IHOUR)/SINB(IHOUR)
FGRSUN = 0.
DO 30 I2-1, IGAUS
  VISSUN = VISSHD+VISPP*XGAUS(I2)
  FGRS = AMAX*(1.-EXP(-VISSUN*EFF/AMAX))
  FGRSUN = FGRSUN+FGRS*XGAUS(I2)
CONTINUE

*-----fraction sunlit leaf area (FSLLA) and local
assimilation rate (FGL)
FSLLA = EXP(-KDIREL*LAIC)
FGL = FSLLA*FGRSUN+(1.-FSLLA)*FGRSH

*-----calculation of average assimilation rate of canopy (FGROS)
FGROS = FGROS+FGL*XGAUS(ILAI)
CONTINUE

*-----integration of average rate over crop LAI

```

```

FGROS = FGROS * LAICL

*-----calculation of average assimilation rate of daylength
DTGA = DTGA+FGROS*XGAUS(IHOUR)
CONTINUE

*-----integration of average rate over daylength and correction for
clustering of leaf blades during juvenile growth
IF (SSHADE.LT.1.E4) THEN
  DTGA = DTGA * DAYL * SSHADE / 1.E4
ELSE
  DTGA = DTGA * DAYL
END IF

*-----Debug information is written to file when DEBUG logical is true
IF (DEBUG) WRITE (IDEBUG, '(A,F8.2/,11(A,G14.6/))')
& , Debug of ASSIM at time=', TIME,
& , PARDIR(1)=-', PARDIR(1),
& , PARDIR(2)=-', PARDIR(2),
& , PARDIR(3)=-', PARDIR(3),
& , PARDIF(1)=-', PARDIF(1),
& , PARDIF(2)=-', PARDIF(2),
& , PARDIF(3)=-', PARDIF(3),
& , DAYL =', DAYL,
& , AMAX =', AMAX,
& , EFF =', EFF,
& , LAI =', LAI,
& , DTGA =', DTGA

*-----check on output range of parameters
IF (DTGA.GT.1000.) CALL RERROR (1, 'DTGA', DTGA, 'ASSIM')
IF (DTGA.LT.0.) CALL RERROR (2, 'DTGA', DTGA, 'ASSIM')

RETURN
END

```

1400

1500

700

800

900

1000

1100

20

*-----

```

*-----*
* SUBROUTINE ASTRO
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 9-Aug-1987
* Purpose: This subroutine calculates astronomic daylength and
* photoperiodic daylength. (see CABO-TPE report #?)
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
* ----
* DAY Day number (Jan 1st = 1) I
* LAT Latitude of the site degrees I
* DAYL Astronomical daylength (base = 0 degrees) h O
* DAYLP Photoperiodical daylength (base = -4 degrees) h O
* SINLD Intermediate variable for subroutine RADIAT - O
* COSLD Intermediate variable for subroutine RADIAT - O
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* DAY < 1, DAY > 365
* LAT > 67, LAT < -67
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : none
*-----*

```

```

*-----*
* SUBROUTINE ASTRO
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 9-Aug-1987
* Purpose: This subroutine calculates astronomic daylength and
* photoperiodic daylength. (see CABO-TPE report #?)
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
* ----
* DAY Day number (Jan 1st = 1) I
* LAT Latitude of the site degrees I
* DAYL Astronomical daylength (base = 0 degrees) h O
* DAYLP Photoperiodical daylength (base = -4 degrees) h O
* SINLD Intermediate variable for subroutine RADIAT - O
* COSLD Intermediate variable for subroutine RADIAT - O
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* DAY < 1, DAY > 365
* LAT > 67, LAT < -67
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : none
*-----*

```

```

*-----*
* SUBROUTINE ASTRO (DAY,LAT,
* &
* DAYL,DAYLP,SINLD,COSLD)
* IMPLICIT REAL (A-Z)
*
*-----PI and conversion factor from degrees to radians
* PARAMETER (PI=3.141592654, RAD=0.017453292)
*
*-----check on input range of parameters
*
* IF (DAY.GT.365.) STOP 'ERROR IN ASTRO: DAY > 365'
* IF (DAY.LT.0.) STOP 'ERROR IN ASTRO: DAY < 0'
* IF (LAT.GT.67.) STOP 'ERROR IN ASTRO: LAT > 67'
* IF (LAT.LT.-67.) STOP 'ERROR IN ASTRO: LAT < -67'
*
*-----declination of the sun as function of daynumber (DAY)
* DEC = -ASIN(SIN(23.45*RAD)*COS(2.*PI*(DAY+10.)/365.))
*
*-----SINLD, COSLD and AOB are intermediate variables
*
* SINLD = SIN(RAD*LAT)*SIN(DEC)
* COSLD = COS(RAD*LAT)*COS(DEC)

```

```

*-----*
* AOB = SINLD/COSLD
*-----daylength (DAYL) and photoperiodic daylength (DAYLP)
*
* DAYL = 12.0*(1.+2.*ASIN(AOB)/PI)
* DAYLP = 12.0*(1.+2.*ASIN((-SIN(-4.*RAD)+SINLD)/COSLD)/PI)
*
* RETURN
* END

```

```

*-----*
* SUBROUTINE ASTRO (DAY,LAT,
* &
* DAYL,DAYLP,SINLD,COSLD)
* IMPLICIT REAL (A-Z)
*
*-----PI and conversion factor from degrees to radians
* PARAMETER (PI=3.141592654, RAD=0.017453292)
*
*-----check on input range of parameters
*
* IF (DAY.GT.365.) STOP 'ERROR IN ASTRO: DAY > 365'
* IF (DAY.LT.0.) STOP 'ERROR IN ASTRO: DAY < 0'
* IF (LAT.GT.67.) STOP 'ERROR IN ASTRO: LAT > 67'
* IF (LAT.LT.-67.) STOP 'ERROR IN ASTRO: LAT < -67'
*
*-----declination of the sun as function of daynumber (DAY)
* DEC = -ASIN(SIN(23.45*RAD)*COS(2.*PI*(DAY+10.)/365.))
*
*-----SINLD, COSLD and AOB are intermediate variables
*
* SINLD = SIN(RAD*LAT)*SIN(DEC)
* COSLD = COS(RAD*LAT)*COS(DEC)

```

```

*-----*
* AOB = SINLD/COSLD
*-----daylength (DAYL) and photoperiodic daylength (DAYLP)
*
* DAYL = 12.0*(1.+2.*ASIN(AOB)/PI)
* DAYLP = 12.0*(1.+2.*ASIN((-SIN(-4.*RAD)+SINLD)/COSLD)/PI)
*
* RETURN
* END

```

```

*-----*
* SUBROUTINE CRPOUT
* Authors: Niek van Duivenbooden & Willem Stol
* based on an earlier version by Daniel van Kraalingen (van
* Kraalingen
* Date : 30-05-1988
* Purpose: This subroutine writes plant information to output
* device IOUW at every fifth day.
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input, O=output, C=control, IN=init, T=time)
* name meaning units class
* -----
* CRPNAM Name of crop I
* WSTAT Name of weather station I
* RSTAT Name of rainfall station I
* RSOIILP Requested soil data file with physical
* characteristics I
* RSOIILN Requested soil data file with nitrogen
* characteristics I
* IPRLEV Production level of simulation I
* DVS Development stage I
* WLW Dry weight of green leaves kg/ha I
* WRES Dry weight of reserves kg/ha I
* WSHTOT Dry weight of stems (including reserves) kg/ha I
* WCO Dry weight of combs kg/ha I
* WGR Dry weight of storage organs kg/ha I
* WRT Dry weight of roots kg/ha I
* WSHTOT Total dry weight of shoot (including dead
* plant parts) kg/ha I
* LAI Leaf area index ha/ha I
* RD Rooting depth cm I
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* none
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : * file opened with unit IOUW
*-----*

```

```

SUBROUTINE CRPOUT (CRPNAM, WSTAT, RSOIILP, RSOIILN, RSTAT, IPRLEV,
&
DVS, WLW, WRES, WSHTOT, WCO, WGR, WRT, WSHTOT, LAI, RD)
100
&
*-----initial data types
IMPLICIT REAL (A-H, J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)
200

```

```

LOGICAL INIT, TERMNL, DEBUC, WATER
COMMON /SIM/ STTIME, STCROP, TIME, DELT, FINTRM,
&
DAY, STYEAR, YEAR,
&
TERMNL, DEBUC, WATER,
&
IIN, IOUW, IDEBUC, IWATER, INITRO

CHARACTER*(*) CRPNAM
CHARACTER*(*) RSOIILP
CHARACTER*(*) RSOIILN
CHARACTER*(*) WSTAT
CHARACTER*(*) RSTAT

*-----data initialisation
DATA INIT /.TRUE./
DATA ISCREN /6/
DATA IFILE /30/

*-----the crop name is limited to a maximum of 30 characters
ILCRP = LEN (CRPNAM)
IF (ILCRP.LT.30) THEN
  IL = ILCRP
ELSE
  IL = 30
END IF

IF (.NOT.INIT) GOTO 20
INIT = .FALSE.

*-----writes cropname and other data to IOUW and FOR06.DAT
10 WRITE (IOUW, '( /, LX, A22, //, 2(A, A15) //, A, A18, A, A15, //,
&
&
CRPNAM(1:IL),
&
' Weather station: ', WSTAT,
&
' Rainfall station: ', RSTAT,
&
' Soil-fysics: ', RSOIILP,
&
' Soil-nitrogen: ', RSOIILN,
&
' Emergence: ', DAY,
&
' Start year: 19', STYEAR

*-----writes header to IOUW as a function of production level
IF (IPRLEV.EQ.1) THEN
  WRITE (IOUW, '(2(/, A))')
&
&
' POTENTIAL CROP PRODUCTION',
&
ELSE IF (IPRLEV.EQ.2) THEN
  WRITE (IOUW, '(2(/, A))')
&
&
' WATER LIMITED CROP PRODUCTION',
&
&
ELSE IF (IPRLEV.EQ.3) THEN

```

```

300
400
500
600

```

```

WRITE (IOUT, '(2(/,A))')
& ' WATER AND NITROGEN LIMITED CROP PRODUCTION' ,
& ' ' ,
END IF
ICOUNT = MOD (ICOUNT+1,1)
RETURN
END
1200
1300

```

```

ICOUNT = MOD (ICOUNT+1,1)
RETURN
END

```

```

WRITE (IOUT, '(2(/,A))')
& ' WATER AND NITROGEN LIMITED CROP PRODUCTION' ,
& ' ' ,
END IF
WRITE (IOUT, '(/1X,A4,A5,9A7,A6)')
& 'YEAR', 'DAY', 'DVS', 'WLV', 'WRES', 'WSTTOT', 'WCO', 'WGR',
& 'WRT', 'WSHTOT', 'LAI', 'RD'

```

```

IF (IOUT.EQ.6) THEN
  IOUT = IFILE
  CALL FOPEN (IOUT, 'FOR06.DAT', 'NEW', 'DEL')
  GO TO 10
END IF
IOUT = ISCREEN

```

```
20 CONTINUE
```

```

IF (WGR.LT.1.) THEN
  WGRP = 0.
ELSE
  WGRP = WCR
END IF
700

```

```
*-----writes crop variables to output-device during simulation at every 800
* fifth day
```

```

30 IF (ICOUNT.EQ.0.) THEN
  WRITE (IOUT, '(1X,F4.0,F5.0,F7.2,8(F7.1),F6.0)')
  & YEAR, DAY, DVS, WLV, WRES, WSTTOT, WCO, WGRP, WRT, WSHTOT, LAI, RD
  END IF

```

```
*-----writes crop variables to IOUT in case TERML is true 900
```

```

IF (TERML.AND.ICOUNT.NE.0) THEN
  WRITE (IOUT, '(1X,F4.0,F5.0,F7.2,8(F7.1),F6.0)')
  & YEAR, DAY, DVS, WLV, WRES, WSTTOT, WCO, WGRP, WRT, WSHTOT, LAI, RD

```

```
END IF
```

```
IF (TERML) THEN 1000
```

```

WRITE (IOUT, '(/A/)')
& ' Simulation halted normally due to finish condition '
END IF

```

```
*-----write same information to file FOR06.DAT. 1100
```

```

IF (IOUT.EQ.6) THEN
  IOUT = IFILE
  GO TO 30
END IF
IOUT = ISCREEN

```

```
C ICOUNT = MOD (ICOUNT+1,5) 1200
```

EVSOIL

```

*-----*
* SUBROUTINE EVSOIL
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 28-JAN-1987
* Purpose: This subroutine calculates soil evaporation and
*          distributes evaporation over layers with exponential
*          decrease.
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name      meaning      units      class
* ----      -
* LAITOT    Total leaf area index (including dead  ha/ha      I
*          leaves)
* EO        Potential evaporation rate           cm/d        I
* ILAYER    Number of soil layers present         I
* WCACT     Array of actual water contents per layer cm3/cm3  I
* WCMAX     Array of maximum water contents per layer cm3/cm3  I
* WCFLDC    Array of water contents per layer at  cm3/cm3      I
*          field capacity
* WCAIR     Array of air dry water contents per layer cm3/cm3  I
* THCKN     Array of thickness of each layer      cm          I
* PROP      Proportionality factor for soil evaporation cm-1  I
* DEPTH     Array of depths of the centre of each layer cm      I
* ESOIL     Evaporation rate of soil              cm/d        I
* RESOIL    Array of evaporation rates per cm    cm/cm/d      I
*          soil layer
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* ILAYER > 100
* THCKN(1) < 2
* WCACT(1) > WCMAX(1) (I=1,ILAYER)
* WCACT(1) < 0.75 * WCAIR(1) (I=1,ILAYER)
* PROP < 5, PROP > 30
* EO < 0, EO > 1.2
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned)
* condition
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : ERROR
*
* FILE usage : files opened with units IDEBUG and IOUT
*-----*

```

```

*-----*
* SUBROUTINE EVSOIL (LAITOT,EO,ILAYER,WCACT,WCMAX,WCFLDC,WCAIR,
*                   THCKN,PROP,DEPTH,
*                   ESOIL,RESOIL)
*-----initial data types
* IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
* IMPLICIT INTEGER (I)

```

```

LOGICAL TERMNL,DEBUG,WATER
COMMON /SIM/ STTIME,STCROP,TIME,DELT,FINTIM,
&
DAY,STYEAR,YEAR,
&
TERMNL,DEBUG,WATER,
&
IIN,IOUT,IDEBUG,IWATER,INITRO
&
REAL WCACT(ILAYER),WCMAX(ILAYER),WCFLDC(ILAYER),WCAIR(ILAYER),
&
THCKN(ILAYER),DEPTH(ILAYER),RESOIL(ILAYER),
&
DRYLTB(14),VAR(100)

```

```

*-----effect of relative water content in first soil layer
* on ratio of actual and potential soil evaporation,
* Seligman & van Keulen, 1985 for a soil layer of 2 cm.
&
DATA DRYLTB /-1.,0.,0.,0.,0.2,0.05,0.22,0.275,0.33,0.9,
&
1.,1.,1.5,1./
&
DATA IDRY /14/

```

```

*-----check on number of layers
IF (ILAYER.GT.100) THEN
WRITE (IOUT, '(A,A/A)')
&
, Maximum number of layers exceeded for calculation of',
&
, soil evaporation',
&
, Run deleted!'
&
STOP
END IF

```

```

*-----checks on thickness of first layer
IF (THCKN(1).NE.2.) THEN
WRITE (IOUT, '(A,A/A)')
&
, First soil layer has incorrect thickness!',
&
, Thickness should be 2 cm!',
&
, Run deleted!'
&
STOP
END IF

```

```

*-----check on water contents
DO 10 I=1,ILAYER
IF (WCACT(I).GT.WCMAX(I)) THEN
WRITE (IOUT, '(A,I3/A,F8.2/A)')
&
, Actual water content greater than maximum in layer',I,
&
, at time-',TIME,
&
, Run deleted!'
&
STOP
END IF

```

```

IF (WCACT(I).LT.WCAIR(I)*0.75) THEN
WRITE (IOUT, '(A,I3/A,F8.2/A)')
&
, Actual water content less than air dry in layer',I,
&
, at time-',TIME,
&
, Run deleted!'
&
STOP
END IF
10 CONTINUE

```

```

*-----check on range of proportionality factor PROP
IF (PROP.GT.30.) CALL RERROR (1,'PROP',PROP,'EVSOIL')
IF (PROP.LT.5.) CALL RERROR (2,'PROP',PROP,'EVSOIL')
IF (EO.GT.1.2) CALL RERROR (1,'EO',EO,'EVSOIL')
IF (EO.LT.0.) CALL RERROR (2,'EO',EO,'EVSOIL')

*-----calculation of soil evaporation
EVMAX = EO*EXP(-0.5*LAI/TOT)
RELWC = (WCACT(1)-WCAIR(1))/(WCFDLC(1)-WCAIR(1))
ESOIL = EVMAX*AFGEN (IDRY,DRYLTB,RELWC)

SUM = 0.
DO 20 I=1,ILAYER
  VAR(I) = (WCACT(I)-WCAIR(I))*EXP(-PROP*0.01*DEPTH(I))
  SUM = SUM+VAR(I)*THCKN(I)
20 CONTINUE

*-----calculation of evaporation rate per soil layer (RESOIL)
* with exponential extinction of evaporated moisture over
* soil layers
IF (SUM.GT.0.) THEN
  DIF = 0.
  DO 30 I=1,ILAYER
    AVAIL = MAX (WCACT(I)-WCAIR(I),0.)
    RESOIL(I) = ESOIL*VAR(I)/SUM
    IF (RESOIL(I).GT.AVAIL) THEN
      DIF = DIF+(RESOIL(I)-AVAIL)*THCKN(I)
      RESOIL(I) = AVAIL
    END IF
  CONTINUE
  ESOIL = ESOIL-DIF
ELSE
  DO 40 I=1,ILAYER
    RESOIL(I) = 0.
  CONTINUE
END IF

*-----debug information is written to file when logical DEBUG is true
IF (DEBUG) WRITE (IDEBUG,'(A,F8.2/4(A,G14.6/))')
& ' Debug of EVSOIL at time=',TIME,
& ' EVMAX =',EVMAX,
& ' RELWC =',RELWC,
& ' ESOIL =',ESOIL,
& ' SUM =',SUM

RETURN
END

```

```

*-----SUBROUTINE EXPERT
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 28-JAN-1987
* Purpose: This subroutine stores messages that occurred during
* simulation and writes them to IOUT after the simulation
* run, see the crop documentation for interpretation
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=Input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
* ----
* I Number of the expert message - I
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* ----
* I > 50
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition
* ----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : a file opened with unit IOUT
*
*-----SUBROUTINE EXPERT (I)
*-----initial data types
IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)

LOGICAL TERMNL,DEBUG,WATER
COMMON /SIM/ STTIME,STCROP,TIME,DELT,FINTIM,
& DAY,STYEAR,YEAR,
& TERMNL,DEBUG,WATER,
& IIN,IOUT,IDEBUG,IWATER,INITRO

INTEGER INMESS (50)
REAL MESSTH (50)
DATA INMESS /50*0./
DATA MESSTH /50*0./

IF (I.GT.50) STOP 'Expert message no. illegal'

*-----message number is stored and time of occurrence and number of
* occurrences
IF (I.GT.0) THEN
  ISWTCH=1
  IF (INMESS(I).EQ.0) MESSTH(I)=TIME

```

```

*-----*
* SUBROUTINE FOPEN
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 28-JAN-1987
* Purpose: This subroutine opens files by doing an inquiry about
* the existence first
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
* ----
* IUNIT Unit number of the file to be opened - I
* FILE Name of the file to be opened - I
* STATUS Status of the file to be opened
* ('new' or 'old')
* PRIV Privilege, in case the status='new' and the
* file exists, valid privileges are 'del',
* 'unk', 'nod' which stand for delete, unknown
* and nodelete. I
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* existence of FILE if STATUS='OLD'
* existence of FILE if STATUS='NEW' and PRIV='NODEL'
* unknown PRIV and STATUS
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : ILEN
*
* FILE usage : a file opened with unit = IUNIT
*-----*

```

```

INNESS(I)-INNESS(I)+1
END IF
*-----expert messages are printed on the screen when terminal stage of 300
* the simulation is reached
IF (I.EQ.0.AND.ISWICH.EQ.1) THEN
WRITE (IOUT,'(A/A)')
& ' The following expert messages have been identified:'
& ' Message: First Time of occurrence: Number of occurrences:'
DO 10 IT=1,50
IF (INNESS(IT).GT.0)
& WRITE (IOUT,'(15,12X,F8.2,16X,15)') IT,MESSTH(IT),INNESS(IT)
10 CONTINUE
END IF
RETURN
END

```

400

```

SUBROUTINE FOPEN (IUNIT,FILE,STATUS,PRIV)
INTEGER IUNIT,LFILE
LOGICAL EXIST
CHARACTER*(*) FILE,STATUS,PRIV
CHARACTER CHOICE*1
LFILE = ILEN (FILE)
IF (STATUS(1:3).EQ.'OLD'.OR.STATUS(1:3).EQ.'old') THEN
INQUIRE (FILE-FILE(1:LFILE),EXIST-EXIST)
IF (.NOT.EXIST) THEN
WRITE (*,'(3A)') ' File ',FILE(1:LFILE),' does not exist'
STOP
ELSE
OPEN (IUNIT,FILE-FILE(1:LFILE),STATUS='OLD')
END IF

```

100

200

```

ELSE IF (STATUS(1:3).EQ.'NEW'.OR.STATUS(1:3).EQ.'new') THEN      300
    INQUIRE (FILE-FILE(1:LFIL),EXIST-EXIST)
    IF (.NOT.EXIST) THEN
        OPEN (IUNIT,FILE-FILE(1:LFIL),STATUS='NEW')
    ELSE
        IF (PRIV(1:3).EQ.'DEL'.OR.PRIV(1:3).EQ.'del') THEN      500
            OPEN (IUNIT,FILE-FILE(1:LFIL),STATUS='OLD')
            REWIND (IUNIT)
        ELSE IF (PRIV(1:3).EQ.'UNK'.OR.PRIV(1:3).EQ.'unk') THEN  600
            WRITE (*,'(3A)') ' File ',FILE(1:LFIL),' already exists'
            WRITE (*,'(A)') ' Overwrite (Y/N): '
            READ (*,'(A)',END=100) CHOICE
            IF (CHOICE.EQ.'Y'.OR.CHOICE.EQ.'y') THEN
                OPEN (IUNIT,FILE-FILE(1:LFIL),STATUS='OLD')
                REWIND (IUNIT)
            ELSE
                STOP 'File not overwritten, program stopped'
            END IF
        ELSE IF (PRIV(1:3).EQ.'NOD'.OR.PRIV(1:3).EQ.'nod') THEN  800
            WRITE (*,'(3A)') ' File ',FILE(1:LFIL),' already exists'
            STOP 'File not overwritten, program stopped'
        ELSE
            STOP 'Unknown privilege, program stopped'
        END IF
    ELSE
        STOP 'Unknown file status, program stopped'
    END IF
RETURN
100 CONTINUE
STOP 'End_of_File detected by FOPEN, program STOP'
END
900

```

```

* machine dependent for screen input and output!!!
IIN - 5
IOUT - 6
IDEBUG - 20
IWATER - 21
IWEATH - 22
IRAIN - 23
ISTHP - 24
INITRO - 25

*-----regression constants for Angstrom formula (Frere and Popov)
* location specific (Berkhout & van Keulen, 1986)
DATA A /0.25/, B /0.45/

*-----program name and purpose are written to the screen
WRITE (IOUT, '(///,A)')
& ' *-----*
WRITE (IOUT, '(A)')
& ' * FORCROS (version 1.0, 1988)
WRITE (IOUT, '(A)')
& ' *-----*
WRITE (IOUT, '(A)')
& ' * This model simulates changes in the soil water and soil *
WRITE (IOUT, '(A)')
& ' * nitrogen status, crop growth, crop development and *
WRITE (IOUT, '(A)')
& ' * nitrogen distribution in the crop.
WRITE (IOUT, '(A)')
& ' *-----*

*----- temporary go to to avoid to much typewriting
IF (IDEBUG.NE.1) GO TO 999

*----- interactive input of data
WRITE (*, '(2(/,A))')
& ' For running of the model the following questions',
& ' should be answered.'

*-----the production level is read
WRITE (IOUT, '(5(/,A),A,3(/,A))')
& ' Which production level do you want: ',
& ' 1 - POTENTIAL CROP PRODUCTION',
& ' (irrigation and fertilizer application)',
& ' 2 - WATER LIMITED PRODUCTION',
& ' (natural rainfall with manure',
& ' and fertilizer application)',
&

```

```

*-----* MAIN
*
* FORCROS (version 1.0, 1988)
*-----*
* MAIN PROGRAM CROP ENVIRONMENT GENERATOR
*
* Author : Niek van Duivenbooden
* Kraalingen & van Keulen, 1988) and Rob Groot (1987)
*
* Date : 30-05-1988
* Purpose: This program integrates the various subroutines, required
* to simulate changes in the soil water and soil nitrogen
* status, crop growth, crop development and nitrogen dis-
* tribution in the crop. Simulation is performed throughout
* a complete growth cycle (i.e. from sowing till ripeness).
* The time step of integration is one day.
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
*-----*
* STTIME > SUNDAY
*
* SUBROUTINES AND FUNCTIONS called:
* FOPEN, WEATHR, RAINFL, ASTRO, RADIAT
* PENMAN, WATER1 or WATER2, SOLTWP, NITBAL
* MILL88, TIMER, EXPERT
*-----*
PROGRAM MAIN
100
200
*-----initial data types
IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)

LOGICAL TERMNL, DEBUG, NITRO, WATER, STEMP
COMMON /SIM/ STTIME, STCROP, TIME, DELT, FINTIM,
&
& DAY, STYEAR, YEAR,
&
& TERMNL, DEBUG, WATER,
& IIN, IOUT, IDEBUG, IWATER, INITRO

CHARACTER DEBCHO*1, WATCHO*1, STPCHO*1, NITCHO*1
CHARACTER*80 NSTAT
CHARACTER*80 RSTAT
CHARACTER*80 RSOILP
CHARACTER*80 RSOILN

*-----data initialization
REAL DEPTH(10), FLOW(11), PARDIR(3), PARDIF(3)
REAL RHOD(10), SINE(3), SOILTP(10)
REAL THCKN(10), TRR(10), WCACT(10), WCACTO(10)
REAL WCFLDC(10), WCREL(10), WCWILT(10)

*-----the unit numbers for input and output are defined, these are

```

400

250

250

300

100

200

300

200

```

& , 3 - WATER AND NITROGEN LIMITED PRODUCTION',
& , (natural conditions)',
& , Your choice: '
  READ (IIN,*) IPRLEV
*-----the choice is read between weather data with actual rainfall or
* climate data with actual rainfall
  WRITE (IOUT,'(4(/,A))')
& , Do you want: '
& , average weather data with actual rainfall (1) ?',
& , actual weather data with actual rainfall (2) ?',
& , Your choice: '
  READ (IIN,*) IWTCHO
*-----input of the station name and soil data file
  WRITE (IOUT,'(/,A)')
& , Give weather station code (path plus name) : '
  READ (IIN,'(A)') WSTAT
  IF (IWTCHO.EQ.1) THEN
    WRITE (IOUT,'(/,A)')
& , Give rainfall station code (path plus name) : '
    READ (IIN,'(A)') RSTAT
    END IF
  WRITE (IOUT,'(2(/,A))')
& , Give name of soil data file with characteristics ',
& , for WATER balance (path plus name) : '
  READ (IIN,'(A)') RSOILP
  WRITE (IOUT,'(2(/,A))')
& , Give name of soil data file with characteristics ',
& , for NITROGEN balance (path plus name) : '
  READ (IIN,'(A)') RSOILN
*-----input of the start year of simulation, when zero is taken,
* climate data are taken for the environment
  WRITE (IOUT,'(/,A)')
& , Which start year of environment generation (19...) : '
  READ (IIN,*) STYEAR
  STYEAR = STYEAR-1900.
*-----start date for the environment is read
  WRITE (IOUT,'(2(/,A))')
& , Which start time of environment generation (1-365) ',
& , (01-01-1, 01-04-91, 01-07-182, 01-10-274) : '
  READ (IIN,*) STTIME
*-----Interactive input of the sowing date

```

```

22  WRITE (IOUT,'(/,A)')
& , Give the sowing date (150<<200) : '
  READ (IIN,*) SOWDAY
  IF (SOWDAY.LT.150..OR.SOWDAY.GT.200.) THEN
    WRITE (IOUT,'(A,/A)') , Try again, wrong entry!',
& , Sowing date outside limits!'
  GO TO 22
  END IF
  IF (STTIME.GT.SOWDAY) THEN
    WRITE (IOUT,'(2(/,A))')
& , Crop cannot grow without environment!',
& , Run deleted!'
  STOP
  END IF
*-----Interactive input of the sowing density
24  WRITE (IOUT,'(/,A)')
& , Give the sowing density (2<<10 kg/ha) : '
  READ (IIN,*) SOWDEN
  IF (SOWDEN.LT.2..OR.SOWDEN.GT.10.) THEN
    WRITE (IOUT,'(A,/A)') , Try again, wrong entry!',
& , Sowing density outside limits!'
  GO TO 24
  END IF
*-----temporary data block with inputdata
999  IPRLEV = 1
  IWTCHO = 2
  WSTAT = 'NIOR01'
  RSTAT = 'NIOR01'
  RSOILP = 'NIOR01SP.DAT'
  RSOILN = 'NIOR01SN.DAT'
  STYEAR = 88
  STTIME = 158
  SOWDAY = 195
  SOWDEN = 3
*-----debug information can be written to file
  WRITE (IOUT,'(2(/,A))')
& , Do you want debug information to be written to file',
& , DEBUG.DAT (Y/N), (Default=N) ? : '
  READ (IIN,'(A)') DEBCHO
*-----debug file is opened in case a positive choice is made
  IF (DEBCHO.EQ.'Y'.OR.DEBCHO.EQ.'y') THEN
    DEBUG=.TRUE.
    CALL FOPEN ('DEBUG','DEBUG.DAT','NEW','DEL')

```

```

ELSE
  DEBUG-.FALSE.
END IF
*-----the user can chose to write information on the soil water status 1400
* to file WATER.DAT
  WRITE (IOUT,'(3(/,A))')
  & , Do you want detailed information on the',
  & , soil water status to be written to file',
  & , WATER.DAT (Y/N), (Default=N) ? : '
  READ (IIN,'(A)') WATCHO
*-----in case soil water information is wanted the appropriate file is 1500
* opened
  IF (WATCHO.EQ.'Y'.OR.WATCHO.EQ.'y') THEN
    WATER = .TRUE.
    CALL FOPEN (IWATER,'WATER.DAT','NEW','DEL')
  ELSE
    WATER = .FALSE.
  END IF
*-----the user can chose to write information on the soil nitrogen 1510
* status to file NITRO.DAT
  WRITE (IOUT,'(3(/,A))')
  & , Do you want detailed information on the',
  & , soil nitrogen status to be written to file',
  & , NITRO.DAT (Y/N), (Default=N) ? : '
  READ (IIN,'(A)') NITCHO
*-----in case soil-nitrogen information is wanted the appropriate file 1520
* is opened
  IF (NITCHO.EQ.'Y'.OR.NITCHO.EQ.'y') THEN
    NITRO-.TRUE.
    CALL FOPEN (INITRO,'NITRO.DAT','NEW','DEL')
  ELSE
    NITRO-.FALSE.
  END IF
*-----the user can chose to write information on the soil temperature 1400
* to file STEMP.DAT
  WRITE (IOUT,'(3(/,A))')
  & , Do you want detailed information on the',
  & , soil temperature to be written to file',
  & , STEMP.DAT (Y/N), (Default=N) ? : '
  READ (IIN,'(A)') STPCHO
*-----in case soil water information is wanted the appropriate file is 1500
* opened
  IF (STPCHO.EQ.'Y'.OR.STPCHO.EQ.'y') THEN
    STEMP = .TRUE.
    CALL FOPEN (ISTMP,'STEMP.DAT','NEW','DEL')
  ELSE
    STEMP = .FALSE.
  END IF
*-----initial timer, DELI, FINTIM and STTIME must be specified 1600
  DELT = 1.
  FINTIM = 500.
  CALL INITIM
*-----
* DYNAMIC SECTION
* the simulation model is run as long as the logical TERMNL is
* false, anywhere in the model this logical can be set to true to
* terminate the run, note that TERMNL is common throughout the model
* and that INIT is not!, INIT is local to each module.
*-----
900 IF (TERMNL) GOTO 1000 1700
*-----the appropriate subroutine is called for the generation 1800
* of weather data
  IF (IWTCHEQ.EQ.1) THEN
    IDAYR = INT (DAY)
    CALL WEATHR (IWEATH,IWAR,WSTAT,0,IDAYR,30,LONGIE,LAT,
    & ELEV,TMIN,TMAX,AVRAD,RAIN,WIND,VAP)
    & AVRAD = AVRAD*1.E6
    CALL RAINFL (IRAIN,RSTAT,IYEARR,IDAYR,RAIN)
  ELSE
    IYEARR = INT (YEAR)
    IDAYR = INT (DAY)
    CALL WEATHR (IWEATH,IWAR,WSTAT,IYEARR,IDAYR,10,
    & LONGIE,LAT,ELEV,
    & TMIN,TMAX,AVRAD,RAIN,WIND,VAP)
    AVRAD = AVRAD*1.E6
    IF (IWAR.NE.0) THEN
      WRITE (IOUT,'(A,I4)') , Warning from WEATHR no.:',IWAR
      WRITE (IOUT,'(A,F8.2)') , At time:',TIME
      IWAR = 0
    END IF
  END IF
*-----The subroutine ASTRO is called to compute the photoperiodic and 1900

```

```

* and the environmental parameters are passed to the subroutine
IF (IEMER.EQ.1) THEN
  CALL MIL88 (WSTAT,RSTAT,RSOILP,RSOILN,
    & TMIN,TMAX,DAYL,PARDIR,PARDIF,SINB,
    & ILLAYER,WCREL,DEPTH,RDMSOL,THCKN,IPRLEV,
    & LAITOT,ETO,TRR,TRTOT,
    & SOWDEN,SOWDAY,SOILT,P,
    & NDEM,NUPTOT,WGWILT,WCACT)
END IF

*-----the TIME is updated with this subroutine, as all time variables 2500
* are common, there need not be any arguments

CALL TIMER

GOTO 900

*-----
* TERMINAL SECTION
*-----
*-----program execution arrives here when TERMNL is true
1000 CONTINUE

*-----water balance is called for output of statistics 2610

IF (IPRLEV.EQ.1) THEN
  CALL WATER1 (RSOILP,E0,LAITOT,TRTOT,
    & WCREL,RDMSOL,THCKN,DEPTH,ILLAYER,
    & WCACT,WCACTO,FLOW,RHOD,WCFDLC,WGWILT)
  ELSE
  CALL WATER2 (RSOILP,E0,LAITOT,TRTOT,TRR,RAIN,
    & WCREL,RDMSOL,THCKN,DEPTH,ILLAYER,
    & WCACT,WCACTO,FLOW,RHOD,WCFDLC,WGWILT)
  END IF

*-----nitrogen balance is called for output of statistics 2620

CALL NITRAL (WSTAT,RSTAT,RSOILP,RSOILN,NITRO,IPRLEV,
  & FLOW,WCACT,WCFDLC,WGWILT,THCKN,DEPTH,
  & ILLAYER,WCACTO,RHOD,TRR,RD,SOILT,P,DVS,
  & NDEM,NUPTOT)

*-----soil temperature subroutine is called for output of statistics 2630

CALL SOLTMP (ISTMP,STEMP,THIN,TMAX,ILLAYER,SOILT,P)

*-----the subroutine EXPERT is called to display messages on the screen 2640
* that occurred during simulation, a dummy argument is passed as
* no expert message is to be generated

CALL EXPERT (0)

STOP
END

```

```

* normal daylength (DAYLP and DAYL)
CALL ASTRO (DAY,LAT,DAYL,DAYLP,SINLD,COSLD)

*-----the subroutine RADIAT is called to compute diffuse and direct
* radiation and the sine of solar angle

CALL RADIAT (DAYL,SINLD,COSLD,AVRAD,SINB,PARDIR,PARDIF,ATMTR)

*-----the subroutine PENMAN is called to compute evaporation rates 2100
* (cm/d)

CALL PENMAN (IWAR,ELEV,A,B,ATMTR,THIN,TMAX,AVRAD,WIND,VAP,
  & E0,ESO,ETO)

*-----the soil water routines are called dependent on the production
* level choosen above 2200

IF (IPRLEV.EQ.1) THEN
  CALL WATER1 (RSOILP,E0,LAITOT,TRTOT,
    & WCREL,RDMSOL,THCKN,DEPTH,ILLAYER,
    & WCACT,WCACTO,FLOW,RHOD,WCFDLC,WGWILT)
  ELSE
  CALL WATER2 (RSOILP,E0,LAITOT,TRTOT,TRR,RAIN,
    & WCREL,RDMSOL,THCKN,DEPTH,ILLAYER,
    & WCACT,WCACTO,FLOW,RHOD,WCFDLC,WGWILT)
  END IF

*-----the soil-temperature routine is called to compute the
* soil temperature
* depending on the available time for model development one
* should have the possibility to chose between measured and
* computed soil temperatures.

CALL SOLTMP (ISTMP,STEMP,THIN,TMAX,ILLAYER,SOILT,P)

*-----the nitrogen balance routine is called to compute the actual
* status of the nitrogen balance 2250

CALL NITRAL (WSTAT,RSTAT,RSOILP,RSOILN,NITRO,IPRLEV,
  & FLOW,WCACT,WCFDLC,WGWILT,THCKN,DEPTH,
  & ILLAYER,WCACTO,RHOD,TRR,RD,SOILT,P,DVS,
  & NDEM,NUPTOT)

*-----in case seeding has not taken place yet the seeding conditions 2300
* tested, seeding is generated by IEMER

IF (TIME.GE.SOWDAY) THEN
  IEMER=1
  ELSE
  IEMER=0
  END IF

*-----in case emergence must take place the subroutine PLANT is called 2400

```

```

*-----*
* INTEGER FUNCTION ILEN
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 28-JAN-1987
* Purpose: This function determines the significant length (ILEN)
* of a string (STRING). If the string is empty a zero is
* returned.
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=Input,O=Output,C=Control,IN=Init,T=time)
* name meaning
* ----
* ILEN Returned function name
* STRING String of which the length is to be
* determined
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : none
*-----*

```

INTEGER FUNCTION ILEN (STRING)

100

CHARACTER*(*) STRING

200

```

DO 10 ILEN=LEN(STRING),1,-1
  IF (STRING(ILEN:ILEN).NE.' ') RETURN
10 CONTINUE

```

RETURN
END

```

*-----*
* SUBROUTINE INITIM
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 28-JAN-1987
* Purpose: This subroutine sets the time variables to the initial
* values.
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning
* ----
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* DELT <- 0
* FINTIM < TIME
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition
* ----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : a file with unit IOUT
*-----*

```

100

SUBROUTINE INITIM

```

*-----initial data types
IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)

LOGICAL TERML,DEBUG,WATER
COMMON /SIM/ STIME,STCROP,TIME,DELT,FINTIM,
& DAY,SYEAR,YEAR,
& TERML,DEBUG,WATER,
& IIN,IOUT,IDEBUG,IWATER,INITRO

*-----check on the value of DELT
IF (DELT.LE.0.) THEN
WRITE (IOUT,*) ' DELT not set, run deleted!'
STOP
END IF

*-----check on the value of FINTIM
IF (FINTIM.LT.TIME) THEN
WRITE (IOUT,*) ' FINTIM not set, run deleted!'
STOP
END IF

```

200

300

400

```

TIME = STIME
YEAR = SYEAR

```

```

*-----January 1st is defined as DAY=1!!

```

```

DAY = 1 + MOD (TIME-1,365.)

```

```

RETURN
END

```

500

```

*-----*
* REAL FUNCTION LIMIT
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 28-JAN-1987
* Purpose: This function limits a value between two boundaries
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
* ----
* LIMIT Returned value, name of function - 0
* P1 Lower boundary - I
* P2 Upper boundary - I
* X Variable to be limited - I
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* P1 > P2
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : none
*-----*

```

100

```

REAL FUNCTION LIMIT (P1,P2,X)

```

```

*-----initial data types
IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)

IF (P1.GT.P2) THEN
  WRITE (*,'(A)') ' LIMIT function arguments error'
  WRITE (*,'(A,F8.2,A,F8.2)')
    & ' Lower bound =',P1,'; Upper bound =',P2
  WRITE (*,'(A)') ' Run deleted!'
  STOP
END IF

IF (X.GT.P2) THEN
  LIMIT = P2
ELSE
  IF (X.LT.P1) THEN
    LIMIT = P1
  ELSE
    LIMIT = X
  END IF
END IF

RETURN
END

```

200

300

400

```

*-----*
* REAL FUNCTION INTGRL
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 28-JAN-1987
* Purpose: This function integrates the rate of change of a state
* variable (DELT is assumed 1).
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
* ----
* INTGRL New state, function name ? 0
* CR Rate of change ?/d I
* H State ? I
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : none
*-----*

```

100

```

REAL FUNCTION INTGRL (CR,H)

```

```

*-----initial data types
IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)
LOGICAL TERMINL, DEBUG, WATER

COMMON /SIM/ STTIME, STCROP, TIME, DELT, FINTIM,
& DAY, STYEAR, YEAR,
& TERMINL, DEBUG, WATER,
& IIN, IOUT, IDEBUG, IWATER, INITRO

*-----multiplication of rate and time step and addition to previous
* value
INTGRL = H+DELT*CR

RETURN
END

```

200

300


```

*-----declaration of soil arrays
DIMENSION WCREL(ILAYER), DEPTH(ILAYER), THCKN(ILAYER)
DIMENSION TRR(ILAYER), SOILTP(ILAYER)
DIMENSION WCWILT(ILAYER), WCACT(ILAYER)
*-----declaration of arrays for root activity
DIMENSION TRREDT(14), EDFTT(10), TRACTT(20)
*-----declaration of arrays for development rates
DIMENSION DVRVGT(6), DVRET(8)
*-----declaration of arrays for dry matter distribution functions,
* reduction factor for specific leaf area and green area of
* stem and age, weight, area of leaf classes, number of
* tillers, reduction factor for photosynthetic activity of
* leaf sheaths and stems and factor to increase photosynthesis
* when stem growth increases
DIMENSION FGHT(16), FRIT(16), FLVI(18), FSTT(22)
DIMENSION FORT(14), FCOT(20), FREST(22)
DIMENSION LVSLAT(14), STCT(10)
DIMENSION LWVEIG(366), LVTOTV(366), LVSLVA(366), LVAGE(366)
DIMENSION NTLT1(10), NTLT2(10), LSART(14), CFSST(10)
*-----declaration of arrays for maximum nitrogen content in plant
* organs and nitrogen accumulation rate in grains
DIMENSION NMXRTT(6), NMXLVT(10), NMXSTT(16), NMXCOT(8)
DIMENSION PNARIT(14)
*-----declaration of arrays for potential growth rate of individual
* grains as a function of development stage and of ambient
* temperature
DIMENSION PGRDRT(8)
DIMENSION PGRCT(6)
*-----declaration of array for time constant of reserve flow
DIMENSION TCREST(10)
*-----declaration of array for surface of crop projected on soil
DIMENSION CROPSI(14)
*-----DEFINITION OF PARAMETERS

```

```

1030
1040
1050
1060
1070
1080
1090
1100
2000

```

*-----crop name of this subroutine

```

DATA CRFNAM /'Millet - Souna III'/
*-----definition of number of seed pockets per ha, weight of one seed,
* fraction that germinates and conversion factor of seed dry matter
* into seedling dry matter
* field data from Nloro du Rip (van Duivenbooden & Cissé, 1989)
DATA SOWPOC /10000/
DATA SDWEIG /7.1E-6/
DATA GERPER /0.89/
DATA CVSSDL /0.45/
*-----definition of conversion factor from crop weight to root uptake
* capacity for nitrogen (kg DM/kg N)
DATA FC /200./
*-----initial light use efficiency parameters and growth efficiency
* parameters (kg CH2O/kg DM)
DATA EFF0 /0.45/
DATA KDIF /0.7155/
DATA EFCCH /1.25/
DATA EFCPR /2.25/
*-----responses of rate of photosynthesis (Jansen & Gosseye, 1986) and
* initial light use efficiency (generalized function for C4 plants,
* Penning de Vries et al., 1989) to temperature
DATA ANAXFT /0., 0., 8., 0., 13., 1., 40., 1., 50., 0./
DATA EFFRFT /0., 1., 40., 1., 50., 0.025/
DATA IAMXRN /10/
DATA IEFN /6/
*-----time constant for translocation of reserves as a function of
* reserve level in plant
DATA TCREST /0., 50., 0.05, 8., 0.1, 2., 0.2, 1., 1.0, 1./
DATA IICREN /10/
*-----relative maintenance respiration rates (kg CH2O/kg DM/d)
DATA MAINLV /0.03/
DATA MAINST /0.015/
DATA MAINRT /0.01/
DATA MAINCO /0.015/
DATA MAINGR /0.01/
*-----reference temperature and Q10 for maintenance respiration
DATA MAIRTP /25./

```

```

2020
2030
2040
2050
2060
2070
2080

```

DATA Q10 /2./ 2090
 *-----fraction of dry matter allocated to shoots as function of
 * development stage
 * field data from Nioro du Rip (van Duivenbooden & Cissé, 1989)
 & DATA FSHT /0.00, 0.80, 0.10, 0.85, 0.32, 0.92, 0.71, 0.86,
 & 0.82, 0.70, 0.90, 0.97, 1.00, 1.00, 2.10, 1.00/
 DATA IFSHN /16/
 *-----fraction of dry matter allocated to roots as function of
 * development stage, potential daily root growth rate (cm/d) and
 * potential rooting depth of the crop (cm)
 * field data from Nioro du Rip (van Duivenbooden & Cissé, 1989)
 & DATA FRIT /0.00, 0.20, 0.10, 0.15, 0.32, 0.08, 0.71, 0.14,
 & 0.82, 0.30, 0.90, 0.03, 1.00, 0.00, 2.10, 0.00/
 DATA IFRTN /16/
 DATA RGH /5.0/
 DATA RUMCR /230./
 *-----fraction of shoot dry matter allocated to leaves as function of
 * development stage and average life span of leaf blades in d C
 * field data from Nioro du Rip (van Duivenbooden & Cissé, 1989)
 & DATA FLVT /0.00, 0.75, 0.10, 0.83, 0.32, 0.75, 0.86, 0.43,
 & 0.90, 0.12, 1.00, 0.01, 1.05, 0.00, 1.20, 0.00,
 & 2.10, 0.00/
 DATA IFLVN /18/
 DATA SPAN /975./
 *-----fraction of shoot dry matter allocated to stems as function of
 * development stage
 * field data from Nioro du Rip (van Duivenbooden & Cissé, 1989)
 & DATA FSTT /0.00, 0.25, 0.10, 0.16, 0.32, 0.22, 0.86, 0.42,
 & 0.90, 0.63, 1.00, 0.58, 1.05, 0.48, 1.20, 0.43,
 & 1.35, 0.35, 1.60, 0.0, 2.10, 0.00/
 DATA IFSN /22/
 *-----fraction of shoot dry matter allocated to reserves as function
 * of development stage
 * estimated data (van Duivenbooden & Cisse, 1989)
 & DATA FREST /0.00, 0.00, 0.10, 0.01, 0.32, 0.03, 0.86, 0.13,
 & 0.90, 0.20, 1.00, 0.27, 1.05, 0.18, 1.20, 0.18,
 & 1.35, 0.00, 1.60, 0.00, 2.10, 0.00/
 DATA IFRESN /22/
 *-----fraction of shoot dry matter allocated to combs as function of
 * development stage
 * field data from Nioro du Rip (van Duivenbooden & Cissé, 1989)
 & DATA FCOT /0.00, 0.00, 0.32, 0.00, 0.86, 0.02,

& 0.90, 0.05, 1.00, 0.14, 1.05, 0.34, 1.20, 0.34,
 & 1.35, 0.26, 1.60, 0.00, 2.10, 0.00/
 DATA IFCON /20/
 *-----fraction of shoot dry matter allocated to grains as function of
 * development stage
 * field data from Nioro du Rip (van Duivenbooden & Cissé, 1989)
 & DATA FGRT /0.00, 0.00, 1.00, 0.00, 1.05, 0.00, 1.20, 0.05,
 & 1.35, 0.39, 1.60, 1.00, 2.10, 1.00/
 DATA IFGRN /14/
 *-----specific leaf area of leaf blades as function of development
 * stage
 * field data from Nioro du Rip (van Duivenbooden & Cissé, 1989)
 & DATA LVSLAT /0.00, 0.0085, 0.10, 0.0060, 0.31, 0.0040,
 & 0.45, 0.0032, 0.70, 0.0024, 1.05, 0.0019,
 & 2.10, 0.0019/
 DATA ISLALN /14/
 *-----circumference of stems and number of tillers as function of
 * development stage
 * field data from Nioro du Rip (van Duivenbooden & Cissé, 1989)
 & DATA STCT /0.0, 0.002, 0.4, 0.010, 0.74, 0.015,
 & 1.0, 0.042, 2.1, 0.042/
 & DATA NTILT1 /0.00, 40., 0.24, 20., 0.25, 3.0, 0.40, 5.7,
 & 0.91, 5.3/
 & DATA NTILT2 /0.0, 42., 0.24, 23., 0.25, 3.0, 0.40, 10.,
 & 0.91, 7.6/
 DATA ISTCN /10/
 DATA INOT1 /10/
 DATA INOT2 /10/
 *-----relative growth rate of leaf area during juvenile growth
 * (ha leaves/ha ground/ C/d)
 * field data from Nioro du Rip (van Duivenbooden & Cissé, 1989)
 & DATA LVARGR /0.00891/
 *-----reduction factors of thinning (10 days after emergence)
 * field data from Nioro du Rip (van Duivenbooden & Cissé, 1989)
 & DATA THIREL /0.25/
 & DATA THIRFS /0.26/
 & DATA THIRFR /0.21/
 *-----reduction factor for photosynthetic activity of leaf sheaths and
 * of stems relative to that of leaves
 * estimated values
 & DATA LSARFT /0.0, 0.0, 0.2, 0.0, 0.5, 0.5, 0.7, 1.0,

DATA TCNTR /10./ 2280

*-----maximum nitrogen concentration in leaf blades, stems, combs and roots as a function of development stage, and maximum nitrogen concentration in grains
 * field data from Niore du Rip (van Duivenbooden & Cissé, 1989)

DATA NMLVLT /0.0, .059, 0.4, .047, 1.0, .036, 2.0, .024;
 & 2.1, .024/
 DATA NMXSTI /0.0, .050, 0.3, .042, 0.4, .035, 0.74, .022,
 & 1.0, .021, 1.6, .009, 2.0, .008, 2.1, .008/
 DATA NMRWTT /0.0, .020, 2.0, .010, 2.1, .010/
 DATA NMGOT /0.0, .022, 1.0, .022, 1.6, .009, 2.1, .009/
 DATA NMAXGR /0.025/
 DATA INMKSN /16/
 DATA INMKLN /10/
 DATA INMKRN /6/
 DATA INMKCN /8/

*-----residual non-remobilizable nitrogen concentrations in leaf blades, stems, roots and combs, respectively and minimum nitrogen concentration in grains
 *NEEDS FURTHER EXAMINATION FROM LITERATURE OR FIELD EXPERIMENTS

DATA RNCLV /0.005/
 DATA RNGST /0.0015/
 DATA RNGRT /0.001/
 DATA RNCCO /0.0025/
 DATA RNCGR /0.009/

*-----reduction factor for water uptake by the roots due to low moisture content of the soil

DATA TRREDT /0.00, 0.0, 0.1, 0.4, 0.15, 0.50, 0.3, 0.8, 0.5, 1.0,
 & 0.75, 1.0, 1.1, 1.0/
 DATA INREDN /14/

*-----root activity coefficient as function of fraction available water (i.e. field capacity minus wilting point) and function of soil temperature (5 degrees above those of Seligman & van Keulen, 1987)

DATA EDPTI /0., 0.15, 0.15, 0.6, 0.3, 0.8, 0.5, 1.0, 1.1, 1.0/
 DATA TRACTT /0., 0.06, 5., 0.06, 8., 0.29, 15., 0.85, 21., 0.94,
 & 23., 1.0, 27., 1.0, 36., 0.87, 45., 0.60, 55., 0.30/
 DATA IEDPTN /10/
 DATA ITCTPN /20/

*-----crop surface, calculated as projected area on soil with rectangular light (m²/ha) as function of shoot weight
 * estimated data from Niore du Rip 1988

DATA CROPST /0.00, 0.00, 0.4, 16., 13., 100., 43., 300.,
 & 303., 800., 1016., 1960., 3000., 7000. /

DATA CFSST /0.0, 1.0, 1.3, 0.0, 2.1, 0.0/ 2210
 & 0.9, 0.3/ field data from Niore du Rip 1988
 DATA ILSAIN /14/ base temperature 10 C (van Heemst, 1988)
 DATA ICFSS /10/

*-----pre-anthesis development rate as function of mean temperature
 * field data from Niore du Rip 1988
 * base temperature 10 C (van Heemst, 1988)

DATA DVRVCT /0., 0., 17.6, 0.022, 25., 0.030/
 DATA IDVRTI /6/

*-----reduction factor for development rate after anthesis as function of temperature and potential post-anthesis development rate

DATA DVRET /0., 0., 10., 0., 28.8, 1.0, 45., 1.0/
 DATA IDVREN /8/
 DATA DVRGEF /0.025/

*-----potential growth rate of individual grains (10-6 kg/d) as function of development rate and correction factor for effect of temperature (estimated)
 * field data from Niore du Rip (van Duivenbooden & Cissé, 1989)

DATA PGRDRT /1.0, 0.0, 1.15, 0.13, 1.40, 0.30, 2.1, 0.21/
 DATA PGRGRT /20., 0.9, 30., 1.0, 40., 0.9/
 DATA IPGRDN /8/
 DATA IPGRCN /6/

*-----relative death rates (d⁻¹) of leaf blades, stems and roots,
 * the latter two relative to the death rate of leaves

DATA PERDLV /0.03/
 DATA LSLBR /0.60/
 DATA RLRT /0.25/

*-----potential rate of nitrogen uptake (kg/ha/d)
 *NEEDS FURTHER EXAMINATION FROM LITERATURE OR FIELD EXPERIMENTS

DATA PNUPR /6.0/

*-----potential nitrogen accumulation rate in the grain (10-6 kg/d) as function of temperature
 *NEEDS FURTHER EXAMINATION FROM LITERATURE OR FIELD EXPERIMENTS

DATA PNARIT /-10, 0., 0., 8., 0., 12.5, 0.022, 18.5, 0.029,
 & 27.5, 0.032, 55., 0.032/
 DATA IPNARN /14/

*-----time constant for nitrogen translocation from vegetative tissue to the grain (d)

```

DATA ICRPS /14./
*-----initialization of the variables EMERG and GERM
2330
DATA EMERG /0./
DATA GERH /0./
*-----
* DYNAMIC PART
3000
*-----check on input parameters (expert information)
3100
IF (TMIN.LT.10.) CALL EXPERT (1)
IF (TMIN.LT.0.) CALL EXPERT (2)
*-----average daily temperature and effective air temperature
3100
* during daytime
TPMA = (TMAX + TMIN) / 2.
EAI RTP = TMAX - 0.25 * (TMAX - TMIN)
4000
*-----
* GERMINATION
4100
*-----
* process of germination
4110
*-----check whether emergence has taken place
IF (EMERG.GT.0.5) GOTO 120
4120
*-----calculation of thickness of germination layer
GERLAY = 0.
DO 10 I=1,3
  GERLAY = GERLAY + THCKN(I)
  IF (GERLAY.GT.10.) THEN
    STOP 'Germination layer exceeding 10 cm'
  END IF
10 CONTINUE
*-----calculation of amount of soil water in the germination layer
4130
WATGER = 0.
DO 20 I=1,3
  WATGER = WATGER + WACT(I) * THCKN(I)
20 CONTINUE
*-----calculation of temperature of seeds, set equal to soil
* temperature around seeds. It is assumed that seeds are sown
* at 3-5 cm depth
IF (THCKN(1).LT.5.) THEN
  SDTEMP = SOILTP(1)

```

```

ELSE
  IF (THCKN(1)+THCKN(2).LT.5.) THEN
    SDTEMP = SOILTP(3)
  ELSE
    SDTEMP = SOILTP(2)
  END IF
END IF
*-----check whether germination has taken place and whether it is
* possible. Check whether STDAY > SOWDAY has already been carried
* out in CROPEG.
4150
IF (GERM.LT.0.5) THEN
  IF ((DAY.LT.SOWDAY+1).OR.(SDTEMP.LT.15.).OR.
    & (SDTEMP.GT.40.)) GOTO 104
*-----seeds have not yet germinated. Check on volumetric soil
* moisture content of germination layer, germination proceeds
* only if volumetric water content is 1.2 times wilting point
* (Seligman and van Keulen, 1987)
4160
IF (WATGER.LT.GERLAY+WCWILT(1)*1.2) THEN
  GOTO 104
ELSE
  GERM = 1.
  SDDYPT = 0.
  SDGERP = 0.
  SDDYFW = 0.
  GERDAY = DAY
  WRITE (*,'(A,F5.0)') ' Day of germination:',GERDAY
  RETURN
END IF
END IF
4170
*-----seeds have germinated. Check on temperature of seeds. If
* temperature is not within the temperature range permitted,
* germination stops after 5 days and emergence is not possible
* anymore
IF ((SDTEMP.LT.12.).OR.(SDTEMP.GT.42.)) THEN
  SDDYPT = SDDYPT + DELT
  IF (SDDYPT.LT.5) THEN
    GOTO 104
  ELSE
    WRITE (*,'(A/A)')
    & ' Seeds have died due to unfavourable temperatures',
    & ' restart model with new seeds',
    STOP
  END IF
END IF
4180
*-----check on volumetric soil moisture content of the upper three
* layers, germination continues only if volumetric water content
* is higher than 1.2 times wilting point (Seligman & van Keulen,

```

```

* 1987)
IF (WATER.LT.GERLAY*WUWILT(1)*1.2) THEN
  SDDYPW = SDDYPW + DELT
  IF (SDDYPW LE.5) THEN
    GO TO 104
  ELSE
    WRITE (*,'(A/A)')
    & ' Seeds have died, due to drying out of the soil',
    & ' restart with new seeds',
    STOP
  END IF
END IF
4190
*-----check whether optimal germination temperature is reached and
* whether threshold value for germination has been reached. It is
* assumed that under optimal conditions all viable seeds emerge
* within 2 days (thus 3 days after sowing). With less favourable
* temperatures it takes 5 days.
IF ((SDTEMP.GT.25.).AND.(SDTEMP.LT.35)) THEN
  SDGERP = SDGERP + DELT + 1.5
ELSE
  SDGERP = SDGERP + DELT
END IF
IF (SDGERP.LT.5) THEN
  GOTO 104
ELSE
  EMERG = 1.
  EMDAY = DAY
  WRITE (*,'(A.F5.0)') ' Day of emergence: ', EMDAY
  GOTO 105
END IF
*-----germination and emergence are still possible but threshold
* values have not yet been reached, return to CROPEG
104 CONTINUE
RETURN
*-----initialization of seedlings
*-----distribution factors of dry weight from seed to seedling,
* field data from Micro du Rip 1988
105 CONTINUE
EMERNO = SOWDEN * GERPER / (SDWEIG * SOMPOC)
WLV = SOWDEN * GERPER * CVSSDL * 0.35
WST = SOWDEN * GERPER * CVSSDL * 0.35
WRT = SOWDEN * GERPER * CVSSDL * 0.30
WOO = 0.

WGR = 0.
WLV = 0.
WST = 0.
WRES = 0.
RD = 8.
WSTOA = 0.
IC = 0.
DVS = 0.
INITOC = .TRUE.
GLV = WLV/DELT
GST = WST/DELT
GRT = WRT/DELT
GLV = 0.
GST = 0.
GRT = 0.
GLA = 0.
THIDAY = 0.
CROPH = 0.035
NDEMGR = 0.

*-----initialization of first element of leaf arrays
4220
C LWWEIG(1) = GLV*DELT
C LVTOTW(1) = GLV*DELT
LWWEIG(1) = WLV
LVTOTW(1) = WLV
LVSLVA(1) = AFGEN(1SLALN,LVSLAT,DVS)
LVAGE(1) = (TMPA-10.)*DELT
*-----calculation of initial leaf area
4230
LAI = WLV * LVSLVA(1)
*-----calculation of initial nitrogen distribution
4240
NCLV = AFGEN(INNXLN,NMXLVT,DVS)
NCST = AFGEN(INNCSN,NMCSST,DVS)
NCRT = AFGEN(INNCRN,NMCRIT,DVS)
*-----calculation of initial amount of nitrogen
4250
NLV = WLV * NCLV
NST = WST * NCST
NRT = WRT * NCRT
*-----initialization of maximum nitrogen levels in various organs
4260
NMAXLV = AFGEN(INNXLN,NMXLVT,DVS)
NMAXST = AFGEN(INNCSN,NMCSST,DVS)
NMAXRT = AFGEN(INNCRN,NMCRIT,DVS)
NMAXCO = AFGEN(INNCOGN,NMCOGOT,DVS)
*-----plant has emerged (not initial)
4270

```

```

120 CONTINUE
*-----initialization of nitrogen in combs and grains
IF (INITCG) THEN
  NCCO = AFGEN(INMXCN,NMXCOT,DVS)
  NCCR = NMAXGR
  INITCG = .FALSE.
END IF
END IF
*-----
* Thinning
*-----10 days after emergence the number of seedlings is reduced by
* thinning, hence weights, growth rates and corresponding amounts
* of nitrogen of leaf blades, stems, reserves and roots are reduced
* reduction factors obtained from field experiments
* (van Duivenbooden & Cissé, 1989)
THIDAY = THIDAY + DELT
IF (THIDAY.EQ.10.) THEN
  WST = WST * THIRFS
  WRES = WRES * THIRFS
  WRT = WRT * THIRFR
  WLVD = WLVD * THIRFL
  WSTD = WSTD * THIRFS
  WRTD = WRTD * THIRFR
  NLV = NLV * THIRFL
  NST = NST * THIRFS
  NRT = NRT * THIRFR
  NLVD = NLVD * THIRFL
  NSTD = NSTD * THIRFS
  NRTD = NRTD * THIRFR
  GLV = GLV * THIRFL
  GST = GST * THIRFS
  GRT = GRT * THIRFR
  DLV = DLV * THIRFL
  DST = DST * THIRFS
  DRT = DRT * THIRFR
  LAI = LAI * THIRFL
DO 125 I=1,IC
  LVWEIG(I) = LVWEIG(I) * THIRFL
125 CONTINUE
END IF

```

```

*-----
* WEIGHTS OF PLANT ORGANS AND AMOUNTS OF NITROGEN
*-----
*-----integration of growth rates of stems, reserves in stem, combs,
* grains and roots, integration of death rates of leaf blades,
* stems and roots and integration of rooting depth and development
* rate
IF (DVS.LT.1.0) THEN
  DVS = INTGRL(DWRVEC,DVS)
ELSE
  DVS = INTGRL(DVRGEN,DVS)
END IF
IF (DVS.GT.0.) THEN
  WST = INTGRL(GST-DST,WST)
  WRES = INTGRL(GRES-URES,WRES)
  WCO = INTGRL(GCO,WCO)
  WGR = INTGRL(GGR,WGR)
  WRT = INTGRL(GRT-DRT,WRT)
  WLVD = INTGRL(DLV,WLVD)
  WSTD = INTGRL(DST,WSTD)
  WRTD = INTGRL(DRT,WRTD)
  RD = INTGRL(RRD,RD)
END IF
WSH = WLW + WST + WLVD + WSTD + WRES
*-----integration of rates of change in nitrogen content of the
* various organs
NLV = INTGRL(NDPLV-NTRLV-NLLVD,NLV)
NST = INTGRL(NUPST-NTRST-NLSTD,NST)
NCO = INTGRL(NUPCO-NTRCO,NCO)
NRT = INTGRL(NUPRT-NTRRT-NLRTD,NRT)
NGR = INTGRL(NCGR,NGR)
NLVD = INTGRL(NLLVD,NLVD)
NSTD = INTGRL(NLSTD,NSTD)
NRTD = INTGRL(NLRTD,NRTD)
*-----
* GROWTH PROCESSES
*-----
*-----
* leaf growth arrays
*-----
*-----check for size of array
IF (LVTOTW(366).NE.0.) THEN
  WRITE (IOUT,'(A/A)')
  & ' Array size is not sufficient for leaf weights',
  & ' Run deleted'

```

```

&      ' Crop died at day:', DAY ,
&      ' due to death of all leaves'
END IF
STOP
END IF
6150
*-----calculation of area of leaf sheaths and stems with
* photosynthetic activity, cumulative height of stems as a
* function of height and number of tillers (DVS < 0.9) thereafter
* as function of shoot dry weight, during first 10 days
* contribution of LSAI is neglected
* area is reduced to account for photosynthetic activity of leaf
* sheaths and of stems relative to that of leaf blades
* water limitation or nitrogen limitation reduces relative growth
* rate of crop height growth, field data from Miro du Rip, 1988
* remark: 0.8 * Nmaxlv is arbitrarily chosen and number of tillers
* (NOTIL) is rounded and held constant
IF (DVS.LT.0.90) THEN
  IF (NCLV.LT.0.8*NMAXLV) THEN
    CRHRGR = 0.082
    NOTIL = AFGEN(INOT1,NTILT1,DVS)
  ELSE
    CRHRGR = 0.092
    NOTIL = AFGEN(INOT2,NTILT2,DVS)
  END IF
  GCRPH = CROPH * (EXP(CRHRGR * DELT) - 1.)
  CROPH = INTGRL(GCROPH,CROPH)
  STLTOT = CROPH * NOTIL * SOWPOC
END IF
STC = AFGEN(ISTCN,STCT,DVS)
STLTOT = 3.6E4 + 23.8 * WSH
LSAIRF = AFGEN(ILSAIN,LSARFT,DVS)
LSAI = LSAIRF * STC * STLTOT / 1.E4
*-----
* PHOTOSYNTHESIS
*-----
*-----calculation of development rate as function of temperature
IF (DVS.LT.1.0) THEN
  DVRVEG = AFGEN (IDVRT1,DVRVCT,(TMPA-10))
ELSE
  DVRGEN = DVRGEP * AFGEN (IDVREN,DVRET,TPMA)
END IF
*-----maximum rate of photosynthesis depends on nitrogen content of
* leaves and on temperature. AMAXN calculated from various articles
* photosynthesis is stimulated when stem elongation occurs
* (van Duivenbooden & Cissé, 1989).
AMAXN = MAX (0., 1016 * NCLV - 2.50)

```

```

STOP
END IF
6120
*-----leaf ages, leaf areas and leaf weights are shifted to the next
* class
IC = IC + 1
DO 130 I=IC,2,-1
  LWWEIG(I) = LWWEIG(I-1)
  LVTOIW(I) = LVTOIW(I-1)
  LVSLVA(I) = LVSLVA(I-1)
  LVAGE(I) = LVAGE(I-1)
130 CONTINUE
DO 140 I=2,IC
  LVAGE(I) = LVAGE(I)+(TMPA-10.)*DELT
140 CONTINUE
*-----initialization of first element of arrays
IF (DVS.GT.0) THEN
  LWWEIG(1) = GLV*DELT
  LVTOIW(1) = GLV*DELT
  LVSLVA(1) = AFGEN(ISLAIN,LVSLAT,DVS)
  LVAGE(1) = (TMPA-10.)*DELT
END IF
*-----calculation of new leaf area, leaf weight and total leaf area
* During juvenile growth leaf growth is limited, being a function
* of RGR of leaf area
WLV = 0.
IF (DVS.LT.0.45) THEN
  GLA = LAI * (EXP(LVARGR * EAIRTP * DELT) - 1.)
  LAI = INTGRL(GLA, LAI)
  DO 150 I=1,IC
    WLV = WLV + LWWEIG(I)
  CONTINUE
ELSE
  LAI = 0.
  LAITOT = 0.
  DO 155 I=1,IC
    WLV = WLV + LWWEIG(I)
    LAI = LAI + LWWEIG(I) * LVSLVA(I)
    LAITOT = LAITOT + LVTOIW(I) * LVSLVA(I)
155 CONTINUE
END IF
IF (WLV.EQ.0.) THEN
  WRITE (*, '(A,F5.0/A)')

```

```

6130
6140
6200
6210
6220

```

```

AMAXRF = AFGEN(IAMXRN,AMAXFT,EAIRTP)
FSTTOT = FST + FRES
CFSS = AFGEN(ICFSS,CFSSST,FSTTOT)
AMAX = AMAXN * AMAXRF / CFSS

*-----initial light use efficiency depends on temperature (Penning de
* Vries et al., 1989).

EFF = EFF0 * AFGEN(IEFFN,EFFRFT,EAIRTP)

*-----projection of crop on soil surface with rectangular light,
* required during juvenile growth when leaf blades are clustered

IF (DVS.LT.0.90) THEN
  CROPS = AFGEN(ICRPS,CROPSST,WSH)
END IF

*-----daily total gross assimilation (DTGA)
* photosynthesis of total plants is for the time being calculated
* as photosynthetic activity of LAI and LSAI (as output LAI
* refers only to that of leaf blades, LSAI is substracted again
* after DTGA calculation)
* if projected area of crop is below the threshold value, leaf
* blades are clustered, with corresponding calculation of DTGA

LAI = LAI + LSAI
IF (SSHAD.LT.0.8E4) THEN
  CALL ASSIMC (DAYL,AMAX,EFF,KDIF,LAI,PARDIR,PARDIF,SINB,
    & DTGA,CROPS,CROPH,SSHAD)
ELSE
  CALL ASSIM (DAYL,AMAX,EFF,KDIF,LAI,PARDIR,PARDIF,SINB,
    & DTGA)
ENDIF
LAI = LAI - LSAI

*-----effect of water stress, search for layer where root growth takes
* place plus penetration in deepest layer.

DO 160 I=1,ILAYER
  IF (RD.GT.(DEPTH(I)-0.5*THCKN(I)).AND.
    & RD.LE.(DEPTH(I)+0.5*THCKN(I))) IN=I
160 CONTINUE

RDINL = RD-(DEPTH(IN-1)+0.5*THCKN(IN-1))

*-----reduction factor in TRMAX of 0.7 added by Van Kraalingen
* deleted here and replaced by TRACTP function Seligman & van
* Keulen (1987, pp 100).
* another possible solution may be by closing of stomata as a
* function of the rate of photosynthesis (Hochman, 1978 ??)

TRMAX = 0.7 * ETO * (1.-EXP(-0.75*KDIF*LAI))
ER = 0.

```

```

DO 170 I=1,IN-1
  ER = ER + THCKN(I) * AFGEN(IEDPTN,EDPTT,WCREL(I))
170 CONTINUE

ER = ER + RDINL * AFGEN(IEDPTN,EDPTT,WCREL(IN))
TRPMM = TRMAX/ER
TRTOT = 0.
DO 180 I=1,ILAYER
  IF (I.LE.IN-1) THEN
    TRWRED = AFGEN(IWREDN,TRREDT,WCREL(I))
    TRACWA = AFGEN(IEDPTN,EDPTT,WCREL(I))
    TRACTP = AFGEN(ITCTPN,TRACTT,SOILTTP(I))
    TRR(I) = TRPMM * TRWRED * TRACWA * TRACTP
    TRTOT = TRTOT + TRR(I) * THCKN(I)
  ELSE
    TRR(I) = 0.
  END IF
180 CONTINUE

TRWRED = AFGEN(IWREDN,TRREDT,WCREL(IN))
TRACWA = AFGEN(IEDPTN,EDPTT,WCREL(IN))
TRACTP = AFGEN(ITCTPN,TRACTT,SOILTTP(IN))
TRR(IN) = TRPMM * TRWRED * TRACWA * TRACTP * RDINL/THCKN(IN)
TRTOT = TRTOT + TRR(IN) * THCKN(IN)
PHOTRF = TRTOT / TRMAX

*-----actual assimilation rate, as corrected for transpiration deficit
* and conversion from CO2 to CH2O
* additional reduction factor introduced by Van Kraalingen (0.9)
* deleted

GPHOT = DTGA * PHOTRF * 30./44.

*-----Maintenance respiration
* -----being affected by temperature and nitrogen concentration and
* available assimilates for growth

TEFF = Q10**((TMEA-MAIRT)/10.)
MACNLV = (NCLV-RNGLV)/(NMAXLV-RNGLV)
MACNST = (NCST-RNCST)/(NMAXST-RNCST)
MACNCO = (NCCO-RNCCO)/(NMAXCO-RNCCO)
MACNGR = (NCGR-RNCGR)/(NMAXGR-RNCGR)
MACNRT = (NCRV-RNCRV)/(NMAXRT-RNCRV)

MAILV = WLIV * MAINLV * MACNLV * TEFF
MAIST = WST * MAINST * MACNST * TEFF
MAICO = WCO * MAINCO * MACNCO * TEFF
MAIGR = WGR * MAINGR * MACNGR * TEFF
MAIRT = WRT * MAINRT * MACNRT * TEFF
MAITOT = MAILV + MAIST + MAIRT + MAICO + MAIGR

```

```

IF (MAILV.LT.0..OR.MAIST.LT.0..OR.MAICO.LT.0..OR.MAIGR.LT.0.
& .OR.MAIRT.LT.0.) THEN
WRITE (*,'(A,F5.0/A)')
& ' Maintenance negative at day:', DAY ,
& ' Run deleted '
STOP
END IF
*-----
* Net assimilate production and its distribution
*-----
*-----nett assimilates
AVASS - MAX (0.,GPHOT-MAITOT)
*-----fraction of dry matter accumulation in shoots, leaves, stems,
* reserves, roots, combs and grains.
FSH - AFGEN(IFSH,FSHT,DVS)
FLV - AFGEN(IFLV,FLVT,DVS)
FST - AFGEN(IFSTN,FSTI,DVS)
FRES - AFGEN(IFRESN,FREST,DVS)
FCO - AFGEN(IFCON,FCOT,DVS)
FCR - AFGEN(IFGRN,FCRT,DVS)
FRT - AFGEN(IFRTN,FRTI,DVS)
*-----check on consistency of dry matter partitioning
SUM1 - FRT+FSH
IF (SUM1.GT.1.01) CALL ERROR (1,'Dmpart',SUM1,'PLANT ')
IF (SUM1.LT.0.99) CALL ERROR (2,'Dmpart',SUM1,'PLANT ')
SUM2 - FLV + FST + FRES + FCO + FCR
IF (SUM2.GT.1.01) CALL ERROR (1,'Dmpart',SUM2,'PLANT ')
IF (SUM2.LT.0.99) CALL ERROR (2,'Dmpart',SUM2,'PLANT ')
*-----Calculation of number of grains at anthesis
* as DVS = 1.0 can not always be calculated, a small range is
* used
IF (DVS.GT.0.99.AND.DVS.LT.1.02) THEN
WSHTOA - WLW + WLVD + WST + WSTD + WCO + WRES
NUNGR - 2.85E8 + 59400 * WSHTOA
END IF
*-----assimilate requirements for dry matter production
* (kg CH2O/kg DM)
PRCLV - 6.25 * NCLV
PRGST - 6.25 * NCST
PRGCO - 6.25 * NCCO
PRCRT - 6.25 * NCRT
IF (DVS.LT.1.0) THEN
PRGCR - PRGST
ELSE
PRGCR - 5.7 * NCGR
END IF
ASRQLV = PRCLV*EFCPR + (1.-PRCLV)*EFCCH
ASRQST = PRGST*EFCPR + (1.-PRGST)*EFCCH
ASRQRT = PRCRT*EFCPR + (1.-PRCRT)*EFCCH
ASRQCO = PRGCO*EFCPR + (1.-PRGCO)*EFCCH
ASRQGR = PRGGR*EFCPR + (1.-PRGGR)*EFCCH
ASRQRE = 0.947/1.111
ASRQ - FSH * (FLV*ASRQLV+FT*ASRQST+FCO*ASRQCO+FGR*ASRQGR
& + FRES*ASRQRE) + FRT * ASRQRT
*-----
* Death rates of leaf blades, roots and stems
*-----
*-----death of leaf blades due to water stress or high LAI or nitrogen
* shortage is distributed over the crop
DLV1 - WLW * PERDLV * (1.-TRTOT/TRMAX)
DLV2 - WLW * MAX (0.,1.-6./MAX (0.01,LAI))
DLV3 - WLW * PERDLV * (1.-((NMAXLV-RNCLV)/(NCLV-RNCLV+1.0E-9))
DLVA - MAX (DLV1,DLV2,DLV3)
*-----definition of death rate of leaf blades, oldest leaf blades die
* first
IF (DLVA.GT.0.) THEN
DLVT - DLVA
I - IC
IF (DLVT.GT.0..AND.I.GE.1) THEN
IF (LVWEIG(I).GT.0.) THEN
DUM - MIN (DLVT,LVWEIG(I))
LVWEIG(I) - LVWEIG(I)-DUM
DLVT - DLVT-DUM
END IF
I - I-1
GOTO 215
END IF
END IF
215 IF (DLVT.GT.0..AND.I.GE.1) THEN
IF (LVWEIG(I).GT.0.) THEN
DUM - MIN (DLVT,LVWEIG(I))
LVWEIG(I) - LVWEIG(I)-DUM
DLVT - DLVT-DUM
END IF
I - I-1
GOTO 215
END IF
END IF
*-----definition of death rate of leaf blades, due to senescence
DLVB = 0.
DO 225 I=1,IC
IF (LVAGE(I).GT.SPAN.AND.LVWEIG(I).GT.0.) THEN
DLVB = DLVB+LVWEIG(I)/DELT
LVWEIG(I) = 0.
END IF
225 CONTINUE
*-----total death rate of leaf blades

```

6400

6410

6420

6430

6440

6450

6500

6510

6530

6540

```

DLV - DLVA + DLVB
IF (DLV*DELT.GT.WLV) THEN
  DLV - WLW / DELT
END IF

*-----death rate of stems, due to water stress, senescence or
* nitrogen shortage 6550

DST1 - LSLR * DLV1
DST2 - LSLR * DLV2
DST3 - WST * PERDLV * LSLR *
      (1.-(NMAXST-RNCST)/(NCSST-RNCST)+1.0E-9)
IF (DLVB.GT.0.) THEN
  DSTB - LSLR * DLVB
ELSE
  DSTB = 0.
END IF
DST - MAX (DST1,DST2,DST3,DSTB)

IF (DST*DELT.GT.WST) THEN
  WRITE (*, (A,A)')
  & ' Amount of dead stems exceeds available',
  & ' living stems',
  STOP
END IF

*-----death rate of roots, due to water stress, senescence or
* nitrogen shortage 6560

DRT1 - RLRT * DLV1
DRT2 - RLRT * DLV2
DRT3 - WRT * PERDLV * RLRT *
      (1.-(NMAXRT-RNCRT)/(NCRRT-RNCRT)+1.0E-9)
DRT - MAX (DRT1,DRT2,DRT3)
IF (DRT*DELT.GT.WRT) THEN
  WRITE (*, (A,A)')
  & ' Amount of dead roots exceeds available',
  & ' living roots',
  STOP
END IF

*-----Growth rates of roots and shoots in kg DM/ha/day 6600

GLV - FLV * FSH * AVASS/ASRQ
GST - FST * FSH * AVASS/ASRQ
GCO - FCO * FSH * AVASS/ASRQ
GRT - FRT * AVASS/ASRQ

*-----before anthesis reserves are formed, which can be used for grain 6610
* filling after anthesis.
* transport costs of reserves are 5.3 % of amount translocated and
* conversion of glucose to starch equals 1/1.111 (Jansen & Gossyeye,

```

```

* 1986) (water loss for conversion of glucose into starch and water
* use for conversion of starch into glucose are not taken into
* account)

IF (DVS.IT.1.05) THEN
  GRES - FRES * FSH * 0.947/1.111 * AVASS/ASRQ
  GGR - 0.
ELSE
  RESL - WRES / (WLVA+WST+WRES)
  TCRES - AFGEN(ITCREN,TCREST,RESL)
  URES - WRES / TCRES
  PGRCTI - AFGEN(IPGRCN,PGRCT,TPA)
  PGRIGR - PGRCTI * 1.E-6 * AFGEN(IPGRDN,PGRDIT,DVS)
  CDEMGR - NUMGR * PGRIGR * ASRQGR
  CSUFGR - FSH * FGR * AVASS/ASRQ + URES * 1.111 * 0.947 +
  & FRES * FSH * AVASS/ASRQ
  GGR - 1./ASRQ * MIN(CDEMGR,CSUFGR)

IF (CDEMGR.LT.CSUFGR) THEN
  GRES - CSUFGR - CDEMGR
ELSE
  GRES = 0.
END IF
END IF

*-----root growth ceases in case of dryness of soil compartment, when
* no assimilates are diverted to roots, when an impenetrable soil
* layer has been reached or when the maximum rooting depth of the
* crop has been reached. 6620

IF (IN.GT.0..AND.FRT.GT.0..AND.WCREL(IN).GT.0..AND.
  & RDM SOL.GT.RD.AND.RDMCR.GT.RD) THEN
  RRD - RGM
ELSE
  RRD=0.
END IF

*-----NITROGEN DISTRIBUTION 7000
*-----maximum nitrogen levels in various organs and potential nitrogen 7010
* accumulation rate of individual grains

NMAXLV - AFGEN(INMXLN,NKXLVT,DVS)
NMAXST - AFGEN(INMXSN,NKXSTT,DVS)
NMAXRT - AFGEN(INMXRN,NKXRTT,DVS)
NMAXCO - AFGEN(INMXCN,NKXCOT,DVS)
PNARIG - AFGEN(IPNARN,PNARIT,TPA)*1.0E-6

*-----calculation of nitrogen demand of crop, as a function of the
* demand of vegetative material only, as nitrogen required for
* grains is translocated 7020

```

```

NUPLV = (NDEMVLV/(NDEMVM+1.0E-9))*NUPTOT
NUPST = (NDEMST/(NDEMVM+1.0E-9))*NUPTOT
NUPCO = (NDEMCO/(NDEMVM+1.0E-9))*NUPTOT
NUPRT = (NDEMRT/(NDEMVM+1.0E-9))*NUPTOT
*-----nitrogen losses caused by death of leaf blades, stems and roots 7050
IF ((DLV1.GE.DLV3).OR.(DLV2.GE.DLV3)) THEN
  NLOLVD = NCLV * DLVA + RNCLV * DLVB
ELSE
  NLOLVD = RNCLV * (DLVA+DLVB)
END IF
IF ((DST1.GE.DST3).OR.(DST2.GE.DST3)) THEN
  NLOSTD = NCST * DST
ELSE
  NLOSTD = RNCST * DST
END IF
IF ((DRT1.GE.DRT3).OR.(DRT2.GE.DRT3)) THEN
  NLORTD = NCLV * DRT
ELSE
  NLORTD = RNCLV * DRT
END IF
*-----maximum nitrogen uptake rate and actual nitrogen uptake rate 7100
* by the crop
MXNUPR = PNUPR * (1.-EXP(-0.5*(WLV+WST+WCO)/FC))
NDEM = MIN (NDEMVM,MXNUPR)
*-----FINISH CONDITION OF SIMULATION 8000
*
IF (DVS.GT.2.) TERMINL=.TRUE.
*-----OUTPUT SPECIFICATIONS 9000
* (to compare model output with observed field data)
*-----it is assumed that all reserves are located in stems 9010
WSHTOT = WSH + WCO + WGR
WSTTOT = WST + WRES
WCROFT = WSHTOT + WRT + WRTD
NCROP = NLV + NLVD + NST + NSTD + NET + NRTD + NGR + NCO
NCSHT = (NCROP - NRT - NRID) / WSHTOT
NCSTOT = (NST + NSTD) / WSTTOT
*-----output of simulation results are written to output file 9020
CALL CRFOUT (CRPNAM,WSTAT,RSOILP,RSOILN,RSTAT,IPRLEV,

```

```

NDEMVLV = MAX (NMAXVLV*WLV - NLV,0.)
NDEMST = MAX (NMAXST*WST - NST,0.)
NDEMRT = MAX (NMAXRT*WRT - NRT,0.)
NDEMCO = MAX (NMAXCO*WCO - NCO,0.)
NDEMVM = NDEMVLV + NDEMST + NDEMCO + NDEMRT
*-----amount of potentially translocatable nitrogen of the various 7030
* organs and total amount
ATNLV = MAX (0.,NLV - WLV*RNCLV)
ATNST = MAX (0.,NST - WST*RNCST)
ATNRT = MAX (0.,NRT - WRT*RNCRRT)
ATNCO = MAX (0.,NCO - WCO*RNCCO)
ATNTOT = ATNLV + ATNST + ATNRT
*-----nitrogen supply for the grains and rate of accumulation 7040
IF (DVS.LT.1.0) THEN
  NSUPGR = 0.
ELSE
  NSUPGR = ATNTOT/TCNTR * TEFF
END IF
*----- Take care the variable NDEMGR was initialized by WS 28-10-98!! 7050
NACGR = MIN (NDEMGR,NSUPGR)
*-----Rate of nitrogen translocation is calculated for the organs 7060
NTRLV = NACGR * ATNLV/(ATNTOT+1.0E-9)
NTRST = NACGR * ATNST/(ATNTOT+1.0E-9)
NTRCO = NACGR * ATNCO/(ATNTOT+1.0E-9)
NTRRT = NACGR * ATNRT/(ATNTOT+1.0E-9)
*-----Nitrogen fractions of the organs 7070
* no nitrogen limitation in this way!!!!
NCLV = NLV / (WLV + 1.0E-9)
NCST = NST / (WST + 1.0E-9)
NCRT = NRT / (WRT + 1.0E-9)
NCLV = AFGEN(INXKLN,NKXLV,DVS)
NCST = AFGEN(INXKSN,NKXST,DVS)
NCRRT = AFGEN(INXKRN,NKXRT,DVS)
NCLVD = NLVD/(WLV+1.0E-9)
NCSTD = NSTD/(WST+1.0E-9)
NCCO = NGR / (WGR + 1.0E-5)
NCCO = NCO / (WCO + 1.0E-2)
NCCR = NMAKGR
NCCO = AFGEN(INXKCN,NKXCOT,DVS)
*-----nitrogen uptake rates of the organs 7080
* NUPTOT output of the subroutine NITBAL

```

```

& DVS,WLV,MRES,WSHTOT,WCO,WGR,WRT,WSHTOT,LAI,RD)
C ANAX IN PLAATS VAN ID
*-----check on parameters for expert information
*-----output for debug information
*-----check on depth of root growth
*-----check on nitrogen use
*-----check on nitrogen uptake
*-----check on depth of root growth
*-----check on impenetrable soil layer
*-----check on parameters for expert information
*-----output for debug information
*-----check on depth of root growth
*-----check on nitrogen use
*-----check on nitrogen uptake
*-----check on depth of root growth
*-----check on impenetrable soil layer

```

```

*-----check on parameters for expert information
*-----output for debug information
*-----check on depth of root growth
*-----check on nitrogen use
*-----check on nitrogen uptake
*-----check on depth of root growth
*-----check on impenetrable soil layer

```

```

*-----check on parameters for expert information
*-----output for debug information
*-----check on depth of root growth
*-----check on nitrogen use
*-----check on nitrogen uptake
*-----check on depth of root growth
*-----check on impenetrable soil layer

```

```

*-----check on parameters for expert information
*-----output for debug information
*-----check on depth of root growth
*-----check on nitrogen use
*-----check on nitrogen uptake
*-----check on depth of root growth
*-----check on impenetrable soil layer

```

```

*-----check on parameters for expert information
*-----output for debug information
*-----check on depth of root growth
*-----check on nitrogen use
*-----check on nitrogen uptake
*-----check on depth of root growth
*-----check on impenetrable soil layer

```

```

*-----check on parameters for expert information
*-----output for debug information
*-----check on depth of root growth
*-----check on nitrogen use
*-----check on nitrogen uptake
*-----check on depth of root growth
*-----check on impenetrable soil layer

```

```

*-----check on parameters for expert information
*-----output for debug information
*-----check on depth of root growth
*-----check on nitrogen use
*-----check on nitrogen uptake
*-----check on depth of root growth
*-----check on impenetrable soil layer

```

```

*-----check on parameters for expert information
*-----output for debug information
*-----check on depth of root growth
*-----check on nitrogen use
*-----check on nitrogen uptake
*-----check on depth of root growth
*-----check on impenetrable soil layer

```

```

*-----check on parameters for expert information
*-----output for debug information
*-----check on depth of root growth
*-----check on nitrogen use
*-----check on nitrogen uptake
*-----check on depth of root growth
*-----check on impenetrable soil layer

```

```

*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* SUBROUTINE MOFILP                                     *
* Authors: Daniel van Kraalingen                       *
* Date : 28-JAN-1987                                  *
* Purpose: This subroutine moves the filepointer across *
*          lines of data files and puts the file pointer *
*          at the first non comment record. Comment lines *
*          have an asterisk (*) in their first column.  *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time) *
* name meaning units class *
*----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* IUNIT File unit where comment lines should be      *
*        skipped                                     *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message) *
* condition *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned)          *
* condition *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* none *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* FILE usage : none *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* SUBROUTINE MOFILP (IUNIT)                          *
* CHARACTER LINE#80,CHR#1                             *
* the file with unit number IUNIT is read as long as the first *
* character of a record is an asterisk (*)           *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* 10 IF (CHR.NE.'*') GOTO 20                          *
*    READ (IUNIT,'(A)') LINE                          *
*    CHR = LINE(1:1)                                   *
*    GOTO 10                                           *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* 20 CONTINUE                                         *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* the file pointer is backspaced one line           *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* BACKSPACE (IUNIT)                                  *
* RETURN                                             *
* END                                               *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* SUBROUTINE NITBAL                                   *
* Author : Niek van Duivenbooden                     *
* based on an earlier version by Rob Groot (1987)    *
* Date : 14-06-1988                                  *
* Purpose: This subroutine calculates the soil nitrogen *
*          status. For each soil compartment, mineralization *
*          is calculated for old organic material and crop *
*          residues as a function of soil temperature *
*          and soil moisture content. Nitrogen losses *
*          out of the potential rooting zone occur by *
*          leaching and crop uptake *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time) *
* name meaning units class *
*----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* WSTAT Name of weather station                      *
* RSTAT Name of rainfall station                    *
* RSOILP Requested soil data file with physical *
*        characteristics                             *
* RSOILN Requested soil data file with nitrogen *
*        characteristics                             *
* IPRELV Production level of simulation            *
* FLOW Array, rate of waterflow between soil *
*        compartments                               *
* WCACT Array, actual watercontent of soil *
*        compartments                               *
* WCFLDC Array, soil moisture content at field *
*        capacity                                   *
* WCWILT Array, water content of soil compartments *
*        at wilting point                           *
* THCKN Array, thickness of soil compartments *
* DEPTH Array, distance from soil surface to *
*        middle of soil compartment 1 *
* ILAYER Number of soil compartments *
* WCACTO Array, actual watercontent of soil *
*        compartments one time step ago *
* RHOD Array, bulk density of soil compartments *
* TRR Array, transpiration rate per soil comp. *
* RD Rooting depth *
* SOILT Array, temperature of soil compartments *
* DVS Crop development stage *
* NDNEN Nitrogen demand of the crop *
* NUPTOT Rate of nitrogen uptake of the crop *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message) *
* condition *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* NBAL > 0.01, NBAL < -0.01 *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned)          *
* condition *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* none *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
* returned IWAR value *
*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*

```



```

& Weather station: , WSTAT,
& Rainfall station: , RSTAT,
& Soil-fysics: , RSOILF,
& Soil-nitrogen: , RSOILN,
& Sowing day: , DAY,
& Start year: 19, STYEAR,
& 'YEAR', 'DAY', 'NCMIX', 'NUPTF', 'NUPDF', 'NUFTOT', 'NMITOT'

1130
*-----reference mineralization rate according to Verbruggen (1985).
* Mineralization is assumed to be optimum at field capacity

DO 130 I=1, ILAYER
AO - 0.22*(MINRTP+0.00064)**1.4425
BO - 0.1737*EXP(-0.119*MINRTP)+0.1107
MRO(I) = AO*(1.-EXP(-BO*WCFLDC(I)/RHOD(I)))
130 CONTINUE

```

```

*-----AMOUNTS OF NITROGEN
*-----
2000

```

```

210 CONTINUE
*-----total amount of nitrogen taken up by the crop (NCROP), total
* mineralization from old organic material (MINOMT), total
* mineralization from crop residues (MINFMT), total amount of
* nitrogen immobilized by biomass (NIMMBT), total amount of soil
* nitrate lost by immobilization (NNIMST) and total N-fertilizer,
* in kg(N) ha-1
NCROP = INTGRL (NUPTOT, NCROP)
MINOMT = INTGRL (MINOMP, MINOMT)
MINFMT = INTGRL (MINFMP, MINFMT)
NIMMBT = INTGRL (NIMHBP, NIMMBT)
NNIMST = INTGRL (NNIMSP, NNIMST)
FERTIL = INTGRL (FERT, FERTIL)

```

```

*-----amounts of mineral nitrogen in each soil compartment
2200

```

```

DO 220 I=1, ILAYER
IF (NUPDF.GT.0.) THEN
  NMILAY(I) = NHILAY(I) - NUPTRL(I) - NUPDFL(I)
ELSE
  NMILAY(I) = NHILAY(I) - NUPTRL(I)
END IF
NHITOT = NHITOT + NMILAY(I)
220 CONTINUE
*-----NITROGEN AVAILABILITY
*-----
3000
*-----reset daily totals to zero
3100

```

```

NNIMSP = 0.0
NIMBFP = 0.0
MINFMP = 0.0
FOMTOT = 0.0
NUPTOT = 0.0
NHITOT = 0.0
MINOMP = 0.0
NUPDF = 0.0

```

```

& CALL SOILNR (RSOILN,
& ILAYER, NMILAY, PLAYER, PLPOM, RDROOM,
& MANURE, RDRHAN, GCMAN, NCMAN,
& CROPR, RDRCCR, GCCRR, NCCRR,
& DISASS, NCRMB, FERDAY, FER, NCRRAIN, TCNDF)
*-----INITIALIZATION of the soil nitrogen balance
*-----
1000
*-----initial amounts of old organic matter, crop residues and manure
* for the soil compartments (in kg/cm)
1110

```

```

*-----read soil nitrogen data
450

```

```

OOCMH = PLPOM * 1.E3
CRCHM = CROPR / PLAYER
IF ((IPRLEV.EQ.1).OR.(IPRLEV.EQ.2)) THEN
  MANCM = MANURE/PLAYER
ELSE
  MANCM = 0.
ENDIF

```

```

110 I = I+1
DEPT = DEPT + THCKN(I)
IF (PLAYER.GT.DEPT) THEN
  OOMLAY(I) = THCKN(I) * OOCMH
  MANLAY(I) = THCKN(I) * MANCM
  CRRLAY(I) = THCKN(I) * CRCHM
  GOTO 110
ELSE
  OOMLAY(I) = (PLAYER-(DEPT-THCKN(I))) * OOCMH
  MANLAY(I) = (PLAYER-(DEPT-THCKN(I))) * MANCM
  CRRLAY(I) = (PLAYER-(DEPT-THCKN(I))) * CRCHM
ENDIF

```

```

*-----initial total nitrogen in the soil
1120
NINCOM = PLPOM * 1.E3 * PLAYER * NCRROOM
NINFOM = MANURE * NCMAN + CROPR * NCCRR
NINMI = 0.
DO 120 I=1, ILAYER
  NINMI = NINMI + NMILAY(I)
120 CONTINUE
NINTOT = NINCOM + NINFOM + NINMI

```

```

310 PNUPTR - 0.0
    NUPTP - 0.0
    NDIF - 0.0
    NCMIX - NCRAIN
*-----root depth, search for compartment where root growth takes place 3200
* plus penetration in deepest compartment
IF (RD.GT.0.) THEN
DO 310 I=1,ILAYER
IF (RD.GT.(DEPTH(I)-0.5*THCKN(I)).AND.
& RD.LE.(DEPTH(I)+0.5*THCKN(I))) IN=I
CONTINUE
310
RDINL = RD-(DEPTH(IN-1)+0.5*THCKN(IN-1))
ENDIF
*-----nitrogen applications only for production levels 1 and 2 3300
IF ((IPRLEV.EQ.1).OR.(IPRLEV.EQ.2)) THEN
IT = IT + 1
IF (DAY.NE.FERDAY(IT).AND.IT.LT.3) THEN
GOTO 320
ELSE
IF (DAY.EQ.FERDAY(IT)) THEN
FERT = FER(IT)
ELSE
FERT = 0
END IF
IT = 0
END IF
ELSE
FERT = 0.
END IF
*-----mineralization is a function of soil temperature and soil
* humidity according to Verbruggen (1985). The temperature and
* soil moisture reduction factor for mineralization (MINFR1(I))
* is calculated for each soil compartment
DO 330 I=1,ILAYER
IF (SOILTP(I).LE.0.) THEN
MINFR1(I) = 0.
ELSE
A1 = 0.22*((SOILTP(I)+0.00064)**1.4425)
B1 = 0.1737*EXP(-0.119*SOILTP(I))+0.1107
MR = A1*(1.-EXP(-B1*WCACT(I)/RHOD(I)))
MINFR1(I) = MR/MRO(I)
ENDIF
330 CONTINUE
*-----check on soil temperature. If below zero, nitrogen from
* mineralization of crop residues (MINFM(I)) and immobilization of
* nitrogen in biomass (NIMB(I)) and loss of soil mineral nitrogen

```

```

* by immobilization (NNIMS(I)) are zero
DO 340 I=1,ILAYER
IF (SOILTP(I).LE.0.) THEN
NIMB(I) = 0.
NNIMS(I) = 0.
MINFM(I) = 0.
ELSE
*-----calculate decomposition rate and potential mineralization rate 3510
* for manure and crop residues. Dissimilation:assimilation ratio
* for growth of microbial biomass (DISASS) and N:C ratio of that
* biomass (NCRMB) have been read from data-file NSOIL.DAT
PDRMAN = RDRMAN * MINFR1(I) * MANLAY(I)
PDRCCR = PDRCCR * MINFR1(I) * CRRLAY(I)
PMINFM = PDRMAN * NCMAN + PDRCCR * NCCRR
NDEMB = ((PDRMAN*CMAN+PDRCCR*CCRR)/(DISASS+1.)) * NCRMB
*-----check on cover of nitrogen demand of soil biomass (NDEMB) 3520
* Less than potential mineralization than supply by decay of
* fresh organic matter
IF (NDEMB.LE.PMINFM) THEN
NIMB(I) = NDEMB
MINFM(I) = PMINFM-NDEMB
NNIMS(I) = 0.
MANLAY(I) = MAX(0.,MANLAY(I)-PDRMAN*DELT)
CRRLAY(I) = MAX(0.,CRRLAY(I)-PDRCCR*DELT)
ELSE
NDEMB = MAX(0.,NDEMB-PMINFM)
*-----check on cover of nitrogen demand of crop biomass by
* nitrogen availability, if so soil mineral nitrogen is
* partly immobilized, otherwise mineralization is reduced
IF (NMILAY(I).GE.NDEMB) THEN
NIMB(I) = NDEMB
MINFM(I) = 0.
NNIMS(I) = NDEMB
MANLAY(I) = MAX(0.,MANLAY(I)-PDRMAN*DELT)
CRRLAY(I) = MAX(0.,CRRLAY(I)-PDRCCR*DELT)
ELSE
NIMB(I) = NMILAY(I)
MINFM(I) = 0.
NNIMS(I) = NMILAY(I)
MINRF2 = NMILAY(I)/NDEMB
MANLAY(I) = MAX(0.,(MANLAY(I)-MINRF2*PDRMAN*DELT))
CRRLAY(I) = MAX(0.,(CRRLAY(I)-MINRF2*PDRCCR*DELT))
END IF
END IF
*-----total fresh organic matter (FOMTOT), rate of immobilization

```

```

* * (NIMBP), mineralization (MINFMP) and storage of mineral
* * nitrogen (NNIMSP) of total soil profile
FOINTOT = FOINTOT + MANLAY(I) + CRRLAY(I)
NIMKBP = NIMKBP + NIMKB(I)
NNIMSP = NNIMSP + NNIMS(I)
MINFMP = MINFMP + MINFM(I)
340 CONTINUE
*-----mineralization of old organic material (humus)
* The total OOM pool does not decrease!!
DO 350 I=1,ILAYER
  IF (SOILT(I).LE.0.) THEN
    MINOOM(I) = 0.
  ELSE
    MINOOM(I) = OOMLAY(I) * MINFRI(I) * RDRoom * NCRoom
  END IF
  MINOMP = MINOMP + MINOOM(I)
350 CONTINUE
*-----nitrogen uptake by uptake of TRANSPIRATION water
*-----nitrogen concentration in soil water.
* According to the complete mixing theory (Burns, 1974), all the
* water and nitrogen entering a soil compartment is completely
* mixed with water and nitrogen already present in the compartment,
* the nitrogen resulting from mineralization, and with nitrogen from
* with fertilizer application. The resulting nitrogen concentration
* is subject to crop uptake in the transpiration stream
DO 410 I=1,ILAYER
  WATMIX = WCACTO(I)*THCKN(I)+FLOW(I)
  IF (I.EQ.1) THEN
    NNMIX = NHILAY(I) + FERT +
      (MINOOM(I)+MINFM(I)-NNIMS(I)+FLOW(I)*NCMIX)*DELTA
  ELSE
    NNMIX = NHILAY(I) +
      (MINOOM(I)+MINFM(I)-NNIMS(I)+FLOW(I)*NCMIX)*DELTA
  ENDIF
  NCMIX = NNMIX / WATMIX
*-----transport out of compartment I now occurs with the
* concentration that results from complete mixing
  NHILAY(I) = NNMIX - (FLOW(I+1)*NCMIX)*DELTA
  NCSC(I) = NHILAY(I)/(WATMIX-FLOW(I+1)*DELTA)
*-----nitrogen that can be taken up in the transpiration stream is
* calculated. It is assumed that water transport caused by
* evaporation is in the gas phase, and does not induce upward
* nitrogen transport. The nitrogen uptake in the transpiration
* stream can never exceed the demand of the crop.

```

```

  NUPTRL(I) = TRR(I)*NCSC(I)*THCKN(I)
  PNUPTR = PNUPTR+NUPTRL(I)
410 CONTINUE
*-----If the nitrogen demand of the crop is smaller then the amount
* that can be taken up by transpiration, NUPTRL(I) is reduced
IF (NDEM.LT.PNUPTR) THEN
  DO 420 I=1,ILAYER
    NUPTRL(I) = NUPTRL(I)*(NDEM/PNUPTR)
    NUPTR = NUPTR - NUPTR+NUPTRL(I)
  CONTINUE
ELSE
  NUPTR = PNUPTR
END IF
*-----nitrogen uptake by nitrogen DIFFUSION towards roots
*-----diffusion is only calculated when roots are present
IF (RD.GT.0.) THEN
  *-----potential diffusion rate is only calculated when crop is
  * not too old
  IF (DVS.LT.1.2) THEN
    NUPDF = MAX (0.,(NDEM-NUPTR))
  ELSE
    NUPDF = 0.
  END IF
*-----nitrogen available for uptake by diffusion in compartments
* that have been penetrated by roots
  IF (NUPDF.GT.0) THEN
    DO 510 I=1,IN-1
      IF (WCACT(I).GT.WCWILT(I)) THEN
        NDIF = NDIF + (NHILAY(I)-NUPTRL(I))/TCNDF
      END IF
    CONTINUE
510
  &
  IF (WCACT(IN).GT.WCWILT(IN)) THEN
    NDIF = NDIF + ((NHILAY(IN)-NUPTRL(I))*
      (RDINL/THCKN(IN)))/TCNDF
  END IF
*-----potential rate of uptake by diffusion is calculated for
* each soil compartment that has been penetrated by roots
  DO 520 I=1,IN-1
    IF (WCACT(I).GT.WCWILT(I)) THEN
      NUPDFL(I) = NUPDF*((NHILAY(I)-NUPTRL(I))/

```

```

&          TCNDF)/NDIF)
&          NUPDFL(1) - 0.0
&          END IF
&          CONTINUE
520
&          IF (WCACI(IN).GT.WCWILT(IN)) THEN
&          NUPDFL(IN) - NUPDF*((NMILAY(1)-NUPDFL(1))*
&          (RDINL/THCKN(IN))/TCNDF)/NDIF)
&          ELSE
&          NUPDFL(IN) - 0.0
&          END IF
&          *-----if the amount of nitrogen available for diffusion is
&          * smaller than the potential uptake rate by diffusion,
&          * potential rates will be reduced
&          IF (NDIF.LT.NUPDF) THEN
&          DO 530 I=1,ILAYER
&          NUPDFL(I) - (NDIF/NUPDF)*NUPDFL(I)
&          CONTINUE
&          END IF
&          530
&          *-----total nitrogen uptake by diffusion during one time step
&          5150
&          DO 540 I=1,ILAYER
&          NUPDF - NUPDF + NUPDFL(I)
&          CONTINUE
&          END IF
&          540
&          *-----NITROGEN UPTAKE BY CROP
&          6000
&          *-----nitrogen uptake of crop is sum of uptake by transpiration and by
&          * diffusion
&          NUPTOT - NUPTR + NUPDF
&          7000
&          *-----DEBUG INFORMATION AND FINAL CHECKS
&          7100
&          *-----debug information is written to file when DEBUG logical is true
&          7100
&          IF (DEBUG) THEN
&          WRITE (IDEBU, '(A,F8.2/,10(A,G8.2/))')
&          &          Debug of NITRAL at TIME =', TIME,
&          &          NMILAY(1) =', NMILAY(1),
&          &          NMILAY(2) =', NMILAY(2),
&          &          NMILAY(3) =', NMILAY(3),
&          &          NMILAY(4) =', NMILAY(4),
&          &          NMILAY(5) =', NMILAY(5),
&          &          NMILAY(6) =', NMILAY(6),
&          &          NMILAY(7) =', NMILAY(7),

```

```

&          NMILAY(8) =', NMILAY(8),
&          NMILAY(9) =', NMILAY(9),
&          NMILAY(10) =', NMILAY(10)
&          END IF
&          *-----check on soil nitrogen balance is performed, this must be done
&          * after writing debug information
&          7200
&          NBALANCE - NINTOT + FERTIL - NCROP - NIMMST - NINHST - NMITOT
&          C IF (NBALANCE.GT.0.01.OR.NBAL.LT.-0.01) THEN
&          WRITE (ICUT, '(A,F8.2/A)')
&          &          ' Error in nitrogen balance at TIME=', TIME,
&          &          ' Run deleted!'
&          STOP
&          END IF
&          *-----detailed information on soil nitrogen status is written in case
&          * NITRO is true
&          7300
&          IF (NITRO) WRITE (INITRO, '(LX,A,F3.0,2X,F4.C,5F8.2)')
&          &          '19', YEAR, DAY, NCHIX, NUPTR, NUPDF, NUPTOT, NMITOT
&          *-----RETURN TO MAIN PROGRAM
&          8000
&          *
&          RETURN
&          END

```

```

& ' Statistics of the soil nitrogen balance',
& ' at production level : ', IPRLEV,
& ' Total amount of fertilizer applied', FERTIL,
& ' Total N-uptake by the crop', NCROP,
& ' Total amount of nitrogen in soil profile', NMITOT,
& ' Total N mineralization from humus', MINOMT,
& ' Total N mineralization from crop residues', MINFMT,
& ' Total N immobilization in biomass', NIMMT,
& ' Total N lost from soil nitrate N by immob.', NNIMST,
& ' Total amount of fresh material', FOMTOT

```

```

RETURN
END

```

```

*-----* NITOUT

```

```

* SUBROUTINE NITOUT
* Author : Niek van Duivenbooden
* Date : 30-05-1988
* Purpose: This subroutine writes output from the soil nitrogen
* balance when the end of the simulation has been reached.
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
* -----
* IPRLEV Production level of simulation kg/ha I
* FERTIL Total amount of fertilizer applied kg/ha I
* NCROP Total N-uptake by the crop kg/ha I
* NMITOT Total amount of nitrogen in soil profile kg/ha I
* MINOMT Total N mineralization from humus kg/ha I
* MINFMT Total N mineralization from crop residues kg/ha I
* NIMMT Total N immobilization in biomass kg/ha I
* NNIMST Total N lost from soil nitrate N by
* immobilization kg/ha I
* FOMTOT Total amount of fresh organic material kg/ha I
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* none
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : none
*-----*

```

```

SUBROUTINE NITOUT (IPRLEV,FERTIL,NCROP,NMITOT,MINOMT,
& MINFMT,NAIMBT,NNIMST,FOMTOT)

```

```

*-----initial data types

```

```

IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)

```

```

LOGICAL TERML, WATER, DEBUG

```

```

COMMON /SIM/ STTIME,STCROP,TIME,DELT,FINTIM,
& DAY,STYEAR,YEAR,
& TERML,DEBUG,WATER,
& IIN,IOUT,IDEBUG,IWATER,INITRO

```

```

*-----statistics of nitrogen balance are printed to IOUT

```

```

WRITE (IOUT,'(/.2A,12.//,8(A,F8.2,/)')

```

```

100

```

```

200

```

```

300

```

```

*-----* PENMAN
* SUBROUTINE PENMAN
* Authors: Daniel van Kraalingen
* based on an earlier version written by: Kees van Diepen
* Date : 9-JAN-1987
* Purpose: This subroutine calculates potential evaporation
* according to Penman (1948).
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input, O=output, C=control, IN=init, T=time)
* name meaning units class
* ----
* IWAR output, when .NE.0 warning!!! - C, O
* ELEV Elevation of site m I
* A Coefficient of Angstrom formula - I
* B Coefficient of Angstrom formula - I
* ATMTR Atmospheric transmission - I
* THIN Minimum temperature during day C I
* THAX Maximum temperature during day C I
* AVRAD Daily total global radiation J/m2/d I
* WIND Average windspeed m/s I
* VAP Vapour pressure mbar I
* EO Potential evaporation of open water cm/d O
* ESO Potential evaporation of soil cm/d O
* ETO Potential evapotranspiration of crop cm/d O
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* ATMTR < 0 or ATMTR > 1
* THIN > THAX
* WIND < 0
* AVRAD < 0
* VAP > SVAP * 1.01 (entered vapour pressure > theor. saturated)
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned)
* condition returned IWAR value
* -----
* AVRAD > 40,000,000 J m-2 d-1 1
* AVRAD < 100,000 J m-2 d-1 -1
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : LIMIT m-2
*
* FILE usage : none
*-----*
* SUBROUTINE PENMAN (IWAR,
* & ELEV, A, B, ATMTR, THIN, THAX, AVRAD, WIND, VAP,
* & EO, ESO, ETO)
*
* IMPLICIT REAL (A-Z)
* INTEGER IWAR
*
*-----Albedo for water surface, soil surface and canopy
* PARAMETER (REFCFW = 0.05)

```

```

PARAMETER (REFCFS = 0.15)
PARAMETER (REFCFC = 0.25)
300
*-----Latent heat of evaporation of water (J/kg-J/mm) and
* Stefan Boltzmann constant (J/m2/d/K) Psychrometric
* instrument constant (mbar K-1)
PARAMETER (LHVAP = 2.45 E6)
PARAMETER (STBC = 4.9 E-3)
PARAMETER (PSYCON= 0.000662)
350
*-----errors and warnings on some input variable ranges
IWAR = 0
IF (ATMTR.LT.0..OR.ATMTR.GT.1.) STOP 'ERR in PENMAN:ATMTR<0 or >1'
IF (THIN.GT.THAX) STOP 'ERR in PENMAN:THIN > THAX'
IF (WIND.LT.0.) STOP 'ERR in PENMAN:WIND < 0'
IF (AVRAD.LT.0.) STOP 'ERR in PENMAN:AVRAD < 0'
IF (AVRAD.LT.100. E3) IWAR=-1
IF (AVRAD.GT.40. E6) IWAR=-1
400
*-----Mean daily temperature and temperature difference (Celsius)
THPA = (THIN+THAX)/2.
TDIF = THAX-THIN
500
*-----Coefficient Bu in wind function, dependent on
* temperature difference
BU = 0.54+0.35*LIMIT (0.,1.,(TDIF-12.)/4.)
600
*-----Barometric pressure (mbar), Psychrometric constant (mbar/K)
PBAR = 1013.*EXP(-0.034*ELEV/(TMPA+273.))
GAMMA = PSYCON*PBAR
700
*-----Saturated vapour pressure according to equation
* of Goudriaan (1977)
SVAP = 6.11*EXP(17.4*TMPA/(TMPA+239.))
800
IF (VAP.GT.SVAP*1.01) STOP 'ERROR in PENMAN: VAP > SVAP'
*-----Derivative of SVAP with respect to temperature, i.e. slope of the
* SVAP-temperature curve (mbar/K)
DELTA = 239.*17.4*SVAP/(TMPA+239.)*+2
900
*-----The expression n/N (RELSSD) from the Penman formula is estimated
* from the Angstrom formula: RI-RA(A+B.n/N) -> n/N=(RI/RA-A)/B,
* where AVRAD=RI and ANGOT=RA, the Angot radiation,
1000
RELSSD = LIMIT (0.,1.,(ATMTR-A)/B)
1100
*-----Terms of the Penman formula, for water surface, soil
* surface and canopy
* Net outgoing long-wave radiation (J/m2/d) according
* to Brunt (1932)
RB = STBC*(TMPA+273.)*+4*(0.56-0.079*SQRT(VAP))*(0.1+0.9*RELSSD)

```

```

*-----Net absorbed radiation, expressed in mm/d
RNV = (AVRAD*(1.-REFCFN)-RB)/LHVAP
RNS = (AVRAD*(1.-REFCFS)-RB)/LHVAP
RNC = (AVRAD*(1.-REFCFC)-RB)/LHVAP

*-----Evaporative demand of the atmosphere (mm/d)
EA = 0.26*(SVAP-VAP)*(0.5+BU*WIND)
EAC = 0.26*(SVAP-VAP)*(1.0+BU*WIND)

*-----Penman formula (1948), and conversion to cm/d
EO = 0.1*(DELTA*RNV+GAMMA*EA)/(DELTA+GAMMA)
ES0 = 0.1*(DELTA*RNS+GAMMA*EA)/(DELTA+GAMMA)
ETO = 0.1*(DELTA*RNC+GAMMA*EAC)/(DELTA+GAMMA)

RETURN
END
    
```

```

*-----SUBROUTINE RADIAT
* Authors: Daniel van Krsalingsen
* Date : 28-JAN-1987
* Purpose: Computes diffuse and direct amounts of photosynthetically
* active radiation and sine of solar angle for three hours
* of the day from average global radiation (AVRAD),
* day of the year and hour of the day.
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
* ----
* DAYL Daylength h I
* SINLD Intermediate variable - I
* COSLD Intermediate variable - I
* AVRAD Daily total radiation J/m2/d I
* SINB Array containing the sine of solar angle at the three hours of the day - 0
* PARDIR Array containing the direct amount of PAR at the three hours of the day J/m2/s 0
* PARDIF Array containing the diffuse amount of PAR at the three hours of the day J/m2/s 0
* ATMTR Average atmospheric transmission - 0
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* AVRAD < 2. E6, AVRAD > 40. E 6
* DAY < 0, DAY > 17
* DAYL < 0
* PARDIR(I) < 0 (I=1,3)
* PARDIF(I) < 0 (I=1,3)
* ATMTR < 0.1, ATMTR > 0.9
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned)
* condition returned IWAR value
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : RERROR
*
* FILE usage : A file with unit IDEBUG
*-----
    
```

SUBROUTINE RADIAT (DAYL,SINLD,COSLD,AVRAD,
SINB,PARDIR,PARDIF,ATMTR)

```

*-----initial data types
IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)

REAL XGAUS(3), WGAUS(3)
LOGICAL TERNL,DEBUG,WATER
COMMON /SIN/ STTIME,STCROP,TIME,DELT,FINTIM,
    
```

```

& DAY,STYEAR,YEAR,
& TERML,DEBUC,WATER,
& IIN,IOUT,IDEBUG,IWATER,INITRO

```

```
REAL PARDIR(3),PARDIF(3),SINB(3)
```

```
PARAMETER (PI=3.1415926)
DATA XGAUS /0.1127, 0.5000, 0.8873/
```

```
*-----check on input range of parameters
```

```
IF (AVRAD.GT.40.E6) CALL ERROR (1,'AVRAD',AVRAD,'RADIAT')
IF (AVRAD.LT.2.E6) CALL ERROR (2,'AVRAD',AVRAD,'RADIAT')
IF (DAY.LT.0.) CALL ERROR (2,'DAY',DAY,'RADIAT')
IF (DAYL.GT.17.) CALL ERROR (1,'DAYL',DAYL,'RADIAT')
IF (DAYL.LT.0.) CALL ERROR (2,'DAYL',DAYL,'RADIAT')
```

200

```
*-----sine of solar elevation (SINB), integral of SINB (DSINB)
* and integral of SINB with correction for lower atmospheric
* transmission at low solar elevations (DSINBE)
```

```
AOB =SINLD/COSLD
DSINB =3600.*(DAYL*SINLD+24.*COSLD*SQRT(1.-AOB*AOB)/PI)
DSINBE=3600.*(DAYL*(SINLD+0.4*(SINLD*SINLD+COSLD*COSLD*0.5))+
& 12.0*COSLD*(2.0+3.0*0.4*SINLD)*SQRT(1.-AOB*AOB)/PI)
```

300

```
*-----solar constant (SC) and daily extraterrestrial radiation (ANGOT)
```

```
SC =1370.*(1.+0.033*COS(2.*PI*DAY/365.))
ANGOT=SC*DSINB
```

400

```
*-----diffuse light fraction (FRDIF) from atmospheric
* transmission (ATMTR)
```

```
ATMTR=AVRAD/ANGOT
IF (ATMTR.GT.0.75) FRDIF=0.23
IF (ATMTR.LE.0.75.AND.ATMTR.GT.0.35) FRDIF=1.33-1.46*ATMTR
IF (ATMTR.LE.0.35.AND.ATMTR.GT.0.07) FRDIF=1.-2.3*(ATMTR-0.07)**2
IF (ATMTR.LE.0.07) FRDIF=1.
```

500

```
*-----three hours of the day are generated
```

```
DO 10 IT=1,3
HOUR=12.0+0.5*DAYL*XGAUS(IT)
SINB(IT)=AMAX1(0.,SINLD+COSLD*COS(2.*PI*(HOUR+12.)/24.))
```

600

700

```
*-----diffuse PAR (PARDIF) and direct PAR (PARDIR)
PAR =0.5*AVRAD*SINB(IT)*(1.+0.4*SINB(IT))/DSINBE
PARDIF(IT)=ANINI(PAR,SINB(IT))*FRDIF*ATMTR+0.5*SC)
PARDIR(IT)=PAR-PARDIF(IT)
```

```
10 CONTINUE
```

```
*-----Debug information is written to file when DEBUG logical is true
```

800

```
IF (DEBUG) WRITE (IDEBUG,'(A,F8.2,/,10(A,G14.6/))')
& ' Debug of RADIAT at time=',TIME,
```

```
& PARDIR(1)-',PARDIR(1),
& PARDIR(2)-',PARDIR(2),
& PARDIR(3)-',PARDIR(3),
& PARDIF(1)-',PARDIF(1),
& PARDIF(2)-',PARDIF(2),
& PARDIF(3)-',PARDIF(3),
& DAYL =',DAYL,
& AVRAD =',AVRAD,
& SC =',SC,
& ATMTR =',ATMTR
```

```
*-----check on output range of parameters
```

```
DO 20 IT=1,3
```

```
IF (PARDIR(IT).LT.0.) CALL ERROR (2,'PARDIR',PARDIR(IT),'RADIAT')
IF (PARDIF(IT).LT.0.) CALL ERROR (2,'PARDIF',PARDIF(IT),'RADIAT')
CONTINUE
```

20

```
IF (ATMTR.GT.0.90) CALL ERROR (1,'ATMTR',ATMTR,'RADIAT')
IF (ATMTR.LT.0.10) CALL ERROR (2,'ATMTR',ATMTR,'RADIAT')
```

```
RETURN
END
```

1000

```

*-----*
* SUBROUTINE RAINFL
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 9-Feb-1988
* Purpose: This subroutine returns rainfall data from a standard
*          rainfall data file. This subroutine is made transparent
*          in the sense that subsequent calls to this subroutine
*          may contain different station names, years or days for
*          which rainfall data are to be returned. No initialization*
*          is to be carried out by the calling program.
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=Input, O=output, C=control, IN=init, T=time)
* name      meaning      units      class
* ----      -
* IUNIT     Unit number that can be used to open rainfall -      I
*          data file      C,I
* STATR     Station name of rainfall data file
* IYEARR    Year for which rainfall data are requested
*          (do not use 19 as a prefix, i.e. 86 is a
*          valid year, 1986 is not)
* IDAYR     Day for which rainfall data are requested
*          (1 <- IDAYR <= 365)
* RAIN      Rainfall
*          cm/d
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
*
* IDAYR < 1, IDAYR > 365
*
* WARNINGS (nonzero value of INAR returned)
* condition
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : MOFILP, ILEN
*
* FILE usage : A rainfall data file opened with UNIT=IUNIT
*-----*
*
* the requested day should be between 1 and 365
* IF (IDAYR.LT.1.OR.IDAYR.GT.365)
* & STOP 'ERROR IN RAINFL: DAY < 1 OR DAY > 365'
*
* ISR = ILEN (STATR)
*
* if a new station name is requested and/or a new year is requested, 300
* a new rainfall data file will be opened, if a rainfall data file
* was already opened is is first closed.
*
* IF (STATO(1:ISO).NE.STATR(1:ISR).OR.IYEARO.NE.IYEARR) THEN
*
* construction of file name from station name and year number
* by making use of an 'internal write' on the string: HULP
*
* WRITE (HULP,'(I2)') IYEARR
* IF (HULP(1:1).EQ.' ') HULP(1:1) = '0'
* FILE = STATR(1:ISR)//HULP//'.RAN'
*
* before opening a rainfall data file, it is checked if a file was
* already open, if true, it is closed
*
* IF (OPENED) CLOSE (IUNIT)
* OPEN (IUNIT,FILE=FILE(1:ISR+6),STATUS='OLD')
* OPENED = .TRUE.
*
* comment lines (coded with '**') are skipped
*
* CALL MOFILP (IUNIT)
*
* STATO(1:ISR) = STATR(1:ISR)
* ISO = ISR
* IYEARO = IYEARR
* IDAYN = 0
* IOS = 0
* END IF
*
* if the requested station name and year remain the same, but the
* requested day is less than where the file pointer currently is
* located, the file is rewound
*
* IF (IDAYR.LT.IDAYN) THEN
* REWIND (IUNIT)
*
* comment lines (coded with '**') are skipped
*
* CALL MOFILP (IUNIT)
*
* IDAYN = 0
* IOS = 0
* END IF
*
* in this loop, the file is read until the requested day is reached

```

```

* or exceeded
10 IF (IDAYN.LT.IDAYR.AND.IOS.EQ.0) THEN
  READ (IUNIT,*,IOSTAT=IOS,ERR=200) IYEARN, IDAYN, RAINN
  GOTO 10
END IF

C100 CONTINUE (LABEL 100 WORDT NERGENS NAAR VERWEZEN (26/10/88))
CONTINUE

IF (IDAYN.EQ.IDAYR) THEN
  RAIN = RAINN
ELSE
  RAIN = 0.
END IF
RETURN

* fatal error is reached at an unexpected end of file
200 STOP 'ERROR in RAINFL: unable to read from data file'
END

```

900

1000

```

*-----*
* SUBROUTINE ERROR
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 28-JAN-1987
* Purpose: This subroutine writes an error to the output device
* if some variable has exceeded a predefined range. (This
* range is checked by the calling program.)
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
* I ----- I
* I indicates an overflow (I-1), or an underflow
* (I-2) I
* NAME The name of the variable whose range is
* exceeded I
* VALUE The value of the variable I
* SUBR The name of the subroutine in which the range
* error occurred I
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition
* -----
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : a file with unit = IOUIT
*-----*

```

100

```

SUBROUTINE ERROR (I,NAME,VALUE,SUBR)

```

```

CHARACTER*(*) NAME, SUBR

```

```

LOGICAL TERNL,DEBUG,WATER
INTEGER IIN, IOUIT, IDEBUG, IWATER
COMMON /SIN/ STTIME, STCROP, TIME, DELT, FINTIM,
& DAY, STYEAR, YEAR,
& TERNML, DEBUG, WATER,
& IIN, IOUIT, IDEBUG, IWATER, INITRO

```

```

ILNAME = LEN (NAME)
ILSUBR = LEN (SUBR)

```

```

*-----value is too large
IF (I.EQ.1) THEN
  WRITE (IOUIT, '(3A,G8.2/A,1X,2A,F8.2,A,F8.2/A)')
  & ' Variable ',NAME(1:ILNAME),' = ', VALUE,
  & ' too large in subroutine ',SUBR(1:ILSUBR),
  & ' at DAY=',DAY, ', Year =', YEAR,
  & ' Run deleted!'
  STOP

```

200

```

*-----*
* SUBROUTINE SOILNR
* Author : Niek van Duivenbooden
* based on an earlier version by Rob Groot (1987)
* Date : 10-05-1988
* Purpose: This subroutine reads soil nitrogen data from the data
* file NSOIL.DAT
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
*-----*
* RSOILN Requested soil data file I
* ILAYER Number of soil compartments I
* NMLAY Array, amount of nitrogen in soil comp. kg/ha 0
* PLAYER Depth of plough layer cm 0
* PLPOOM Percentage old organic material (humus) in
* plough layer 0
* RDRROOM Relative decomposition rate old org.mat. d-1 0
* MANURE Amount of manure applied kg/ha 0
* RDRMNR Relative decomposition of manure d-1 0
* CCMNR Carbon content of manure 0
* NCMNR Nitrogen content of manure 0
* CROPR Amount of crop residues of the previous year kg/ha 0
* RDRGRR Relative decomposition of crop residues d-1 0
* CCGRR Carbon content of crop residues 0
* NCCRR Nitrogen content of crop residues 0
* DISASS Dissimilation:assimilation ratio for growth of
* microbial biomass 0
* NCRMB N:C ratio of microbial biomass 0
* FERDAY Array, dates of nitrogen application 0,T
* AFER Array, amounts of nitrogen in successive
* nitrogen application kg/ha 0
* NCRAIN Nitrogen concentration in precipitation kg/cm 0
* TCNDF Time constant for nitrogen diffusion d 0
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
*-----*
* ILAYER < 1, ILAYER > 10 already checked in SOILPR.FOR
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned)
* condition returned IWAR value
*-----*
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : soil nitrogen data are read from the NSOIL.DAT
*-----*

```

300

400

```

END IF
*-----value is too small
IF (I.EQ.2) THEN
WRITE (IOUT, '(3A,G8.2,A/1X,2A,F8.2,A,F8.2/A)')
& Variable ',NAME(1:ILNAME),'-',VALUE,
& ' too small in subroutine ',SUBR(1:ILSUBR),
& ' at DAY=',DAY,', Year =',YEAR,
& ' Run deleted!'
STOP
END IF
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE SOILNR (RSOILN,
& ILAYER,NMLAY,PLAYER,PLPOOM,RDRROOM,
& MANURE,RDRMNR,CCMNR,NCMNR,
& CROPR, RDRGRR,CCGRR,NCCRR,

```

```

&          DISASS,NCRMB,FERDAY,AFER,NCRAIN,TCNDF)
*-----initial data types
IMPLICIT REAL(A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)
LOGICAL TERMNL,DEBUG,WATER
COMMON /SIM/ STTIME,STCROP,TIME,DELT,FINTIM,
&          DAY,STYEAR,YEAR,
&          TERMNL,DEBUG,WATER,
&          IIN,IOUT,IDEBUG,IWATER,INITRO
CHARACTER SFILEN*80
CHARACTER*(*) RSOILN
*-----data initialization
REAL NMILAY(10),FERDAY(3),AFER(3)
*-----the soil data file with nitrogen status is opened, soil name
* is read
CALL FOPEN (44,RSOILN,'OLD','NWT')
CALL MOFILP (44)
READ (44,'(A)',ERR=100) SFILEN
WRITE (IOUT,'(//A//LX,A//)')
& ' The following soil data file is read and checked:', SFILEN
*-----read depth of ploughing layer (cm)
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) PLPOOM
*-----read percentage organic material (humus) in ploughing layer
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) RDRROOM
*-----read relative decomposition rate of old org.mat. (kg/kg/d)
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) RDRROOM
*-----read amount of manure applied
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) MANURE
*-----read relative decomposition rate of manure
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) RDRMNR
*-----read carbon content of manure
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) CCMNR
*-----read nitrogen content of manure
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) NCMNR
*-----read amount of crop residues from previous crop
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) CROPR
*-----read relative decomposition rate of crop residues
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) RDRCRR
*-----read carbon content of crop residues
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) CCCRR
*-----read nitrogen content of crop residues
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) NCCRR
*-----read nitrogen concentration in rainwater (kg/cm)
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) NCRAIN
*-----read time constant for nitrogen diffusion (day-1)
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) TCNDF
*-----read dissimilation:assimilation ratio for growth of
* microbial biomass
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) DISASS
*-----read N:C ratio biomass
CALL MOFILP(44)
READ(44,*) NCRMB

```

200

1000

1100

1200

1300

1400

1500

1600

1700

1800

1900

300

400

500

600

700

800

900

```

*-----timing of nitrogen application 1, 2 and 3, given as dsynumbers      2000
*
* CALL MOFILP(44)
* READ (44,*) (FERDAY(I),I=1,3)
*
*-----amounts of nitrogen in application 1, 2 and 3      2100
*
* CALL MOFILP(44)
* READ (44,*) (AFER(I),I=1,3)
*
*-----initial amounts of nitrogen in soil compartments in      2200
* in kg(N)/ha/compartement
*
* CALL MOFILP(44)
* READ (44,*) (NHILAY(I),I=1,ILAYER)
*
* RETURN
*
*-----in case a read error has occurred      2300
*
100 WRITE (IOUT, '(A,A/A)')
    & ' Error in data or comment line at',
    & ' illegal position on soil data file',
    & ' Run deleted!'
* STOP
*
* END
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
*
* ITEXT < 1, ITEXT > 3
* ISMTB1 > 30, ISMTB2 > 30, ISMTB3 > 30
* ILAYER < 1, ILAYER > 10
* RDMSOL < 0
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned)
* condition
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : FOPEN, MOFILP, RERROR
*
* FILE usage : a soil data file opened with unit = 43
*
*-----initial data types

```

```

* SUBROUTINE SOILPR
* Author : Niek van Duivenbooden
* based on an earlier version by Daniel van Kraalingen (van
* Kraalingen & van Keulen, 1988)
* Date : 09-05-1988
* Purpose: This subroutine reads data from a soil data file,
* comment lines are ignored
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
* -----
* RSOILP Requested soil data file - I
* ISMTB1 Number of data for soil moisture curve 0
* of texture class 1
* ISMTB2 Idem texture class 2 0
* ISMTB3 Idem texture class 3 0
* SMTB1 Array of data for soil moisture curve 1 pf, cm3/cm3
* SMTB2 Idem curve 2 pf, cm3/cm3
* SMTB3 Idem curve 3 pf, cm3/cm3
* THCKN Array of thicknesses per layer cm
* RHOD Bulk density of layer g/cm3
* ITEXCL Array of texture classes 0
* ILAYER Number of defined soil layers 0
* RDMSOL Maximum rootable depth cm
* PROP Proportionality factor for soil moisture 0
* extinction
* WCINI Array with initial amounts of soil moisture cm3/cm3
* per soil layer
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
*
* ITEXT < 1, ITEXT > 3
* ISMTB1 > 30, ISMTB2 > 30, ISMTB3 > 30
* ILAYER < 1, ILAYER > 10
* RDMSOL < 0
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned)
* condition returned IWAR value
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : FOPEN, MOFILP, RERROR
*
* FILE usage : a soil data file opened with unit = 43
*
*-----initial data types

```

```

* SUBROUTINE SOILPR (RSOILP,
* ISMTB1, ISMTB2, ISMTB3, SMTB1, SMTB2, SMTB3,
* THCKN, RHOD, ITEXCL, ILAYER, RDMSOL, PROP, WCINI)
*
*-----initial data types

```

```

IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)
CHARACTER*(*) RSOILP
CHARACTER SFILEP*80

LOGICAL TERMNL,DEBUG,WATER
COMMON /SIM/ STTIME,STCROP,TIME,DELT,FUNTIM,
& DAY,STYEAR,YEAR,
& TERMNL,DEBUG,WATER,
& IIN,IOUT,IDEBUG,IWATER,INITRO

*-----data initialization
INTEGER ITEXCL(10)
REAL SMTB1(30), SMTB2(30), SMTB3(30)
REAL RHOD(10), THCKN(10), WCINI(10)

*-----the soil data file is opened, comment lines are skipped,
* soil name is read and the number of texture classes, (maximum 3)
CALL FOPEN (43,RSOILP,'OLD','NVT')
CALL MOFILP (43)
READ (43,*(A),ERR=100) SFILEP

WRITE (IOUT,'(//A//LX,A//)')
& ' The following soil data file is read and checked: ', SFILEP
READ (43,*,ERR=100) ITEXT

*-----the number of soil texture classes is checked
IF (ITEXT.LT.1.OR.ITEXT.GT.3) THEN
  WRITE (IOUT,'(A/A)')
  & ' Number of soil textures incorrect!',
  & ' Run deleted!'
  STOP
END IF

*-----the data of the first texture class are read
CALL MOFILP (43)
READ (43,*,ERR=100) ISMTB1
IF (ISMTB1.GT.30) CALL ERROR (1,'ISMTB1',1.0*ISMTB1,'SOILR')
READ (43,*,ERR=100) (SMTB1(I),I=1,ISMTB1-1,2)

*-----in case there are two texture classes, the second set of
* data is read
IF (ITEXT.GE.2) THEN
  CALL MOFILP (43)
  READ (43,*,ERR=100) ISMTB2
  IF (ISMTB2.GT.30) CALL ERROR (1,'ISMTB2',1.0*ISMTB2,'SOILR')
  READ (43,*,ERR=100) (SMTB2(I),I=1,ISMTB2-1,2)

*-----in case there are three texture classes, the third set of
* data is read
IF (ITEXT.GE.3) THEN
  CALL MOFILP (43)
  READ (43,*,ERR=100) ISMTB3
  IF (ISMTB3.GT.30) CALL ERROR (1,'ISMTB3',1.0*ISMTB3,'SOILR')
  READ (43,*,ERR=100) (SMTB3(I),I=1,ISMTB3-1,2)
END IF

*-----number of soil layers is read
CALL MOFILP (43)
READ (43,*,ERR=100) ILLAYER

*-----number of soil layers is checked
IF (ILLAYER.LT.1.OR.ILLAYER.GT.10) THEN
  WRITE (IOUT,'(A/A)')
  & ' Number of soil layers incorrect!',
  & ' Run deleted!'
  STOP
END IF

*-----thickness of the soil compartment and bulk density are read
CALL MOFILP (43)
READ (43,*,ERR=100) (THCKN(I),I=1,ILLAYER)

*-----bulk density are read
CALL MOFILP (43)
READ (43,*,ERR=100) (RHOD(I),I=1,ILLAYER)

*-----maximum rooting depth of soil and proportionality factor are read
CALL MOFILP (43)
READ (43,*,ERR=100) RDM SOL
CALL MOFILP (43)
READ (43,*,ERR=100) PROP

IF (RDM SOL.LT.0.) CALL ERROR (2,'RDM SOL',RDM SOL,'SOILR')

*-----initial water contents as function and soil texture class
CALL MOFILP (43)
READ (43,*,ERR=100) (WCINI(I),I=1,ILLAYER)

RETURN

*-----in case a read error has occurred

```

```

100 WRITE (IOUT, '(//A,A//)')
& ' Error in data or comment line at',
& ' illegal position on soil data file',
& ' Run deleted!'
STOP
END

*-----* SOLTMP
* SUBROUTINE SOLTMP
* Author : Niek van Duivenbooden
* based on an earlier version by Rob Groot (1987)
* Date : 09-05-1988
* Purpose: This subroutine generates temperatures of different soil
* compartments, based on the assumption that the temperature
* fluctuations are smaller in deeper soil compartments, and
* that the temperature of a compartment can be described by
* a delay-function of the average daily air temperature
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
* ----
* STEMP Logical, to indicate whether detailed
* information is wanted - I
* ISTEMP Integer, auxiliary variable for file usage - I
* TMIN Minimum air temperature C I
* TMAX Maximum air temperature C I
* ILayer Number of soil compartments - I
* SOILTP Array with generated temperature per
* compartment C O
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* none
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned)
* condition returned IWAR value
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : with unit ISTEMP and IDEBUG
*-----*
SUBROUTINE SOLTMP (ISTMP,STEMP,TMIN,TMAX,ILAYER,SOILTP) 100
*-----initial data types
IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)
LOGICAL INIT, TERMNL, DEBUG, WATER, STEMP
COMMON /SIM/ STTIME,STCROP,TIME,DELT,FINTIM,
& DAY,SYEAR,YEAR,
& TERMNL,DEBUG,WATER,
& IIN,IOUT,IDEBUG,IWATER,INITRO
*-----declaration of soiltemperature, temperature delay and average
* soil temperature 300

```

```

REAL SOILTP(10), AVTMP(365)
INTEGER ILAG(10)

DATA INIT /.TRUE./

*-----delay for temperature response of soil compartment I
400
DATA ILAG /1,4,8,16,26,38,52,68,84,100/

*-----variable initialization
500
IF (TERML) THEN
  RETURN
END IF

IF (.NOT. INIT) GOTO 10
INIT = .FALSE.

*-----writes header to file ISTEP for printing of variables in case
600
* STEMP logical is true

IF (STEP) WRITE (ISTMP, '(A,A,A)')
& , TIME'
& , SOILTP1 SOILTP2 SOILTP3 SOILTP4 SOILTP5'
& , SOILTP6 SOILTP7 SOILTP8 SOILTP9 SOILTP10'

*-----
700
* DYNAMIC PART
*-----

10 CONTINUE

*-----calculation of average air temperature
800
TMPA = (TMIN +TMAX) / 2.

*-----temperature delay for soil compartments
900
IDAY = IDAY + 1
AVTMP(IDAY) = TMPA

*-----when the delay is one day, compartment-temperature equals
1000
* average air temperature

DO 20 IL=1, ILLAYER
  IF (ILAG(IL).EQ.1) THEN
    SOILTP(IL) = AVTMP(IDAY)
  ELSE

*-----calculate temperature of compartment IL. For days prior
1100
* to initialization, average daily air temperatures are not
* available. Therefore the temperature of all soil compart-
* ments at the start of the simulation is assumed to be
* equal to the air temperature

```

```

19
  ISTART = MAX (IDAY-ILAG(IL)+1,1)
  INIDAY = MAX (ILAG(IL)-IDAY,0)
  SUMTMP = 0.
  DO 19 I=ISTART, IDAY
    SUMTMP = SUMTMP + AVTMP(I)
  CONTINUE

  SOILTP(IL) = ((INIDAY*AVTMP(1)+SUMTMP)/ILAG(IL))
  ENDIF
20 CONTINUE

*-----debug information is written to file in case the DEBUG logical
* is true
1200
IF (DEBUG) THEN
  WRITE (IDEBUG, '(A,F4.0,11(A12,F4.1,/)')')
& , TIME,
& , TMPA
& , SOILTP1 = , SOILTP(1),
& , SOILTP2 = , SOILTP(2),
& , SOILTP3 = , SOILTP(3),
& , SOILTP4 = , SOILTP(4),
& , SOILTP5 = , SOILTP(5),
& , SOILTP6 = , SOILTP(6),
& , SOILTP7 = , SOILTP(7),
& , SOILTP8 = , SOILTP(8),
& , SOILTP9 = , SOILTP(9),
& , SOILTP10 = , SOILTP(10)
  END IF

*-----information on the soil temperature status is written to file
* each time step in case the STEMP logical is true
1300
IF (STEP) WRITE (ISTMP, '(IX,F4.0,11(F7.1))')
& TIME, TMPA, (SOILTP(I), I=1, ILLAYER)

RETURN
END

```

```

*-----TIMER
* SUBROUTINE TIMER
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 28-JAN-1987
* Purpose: This subroutine updates TIME, each time the dynamic loop
* is executed.
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=Input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning
* ----
* none
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* DELT < 0
* FINTIM < 0
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : a file opened with unit = IOUT
*-----

```

100

SUBROUTINE TIMER

```

*-----initial data types
IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)

LOGICAL TERML,DEBUG,WATER
COMMON /SIM/ STTIME,STCROP,TIME,DELT,FINTIM,
& DAY,SYEAR,YEAR,
& TERML,DEBUG,WATER,
& IIN,IOUT,IDEBUG,IWATER,INITRO

*-----check on value of DELT

```

200

```

IF (DELT.LE.0.) THEN
WRITE (IOUT,*) ' DELT not set, run deleted!!'
STOP
END IF

```

300

```

*-----check on value of FINTIM
IF (FINTIM.LE.0.) THEN
WRITE (IOUT,*) ' FINTIM not set, run deleted!!'
STOP
END IF

```

*-----end of simulation is induced when finish time is reached

400

```

IF (TIME.GT.FINTIM) TERML=.TRUE.

TIME = TIME+DELT

*-----January 1st is defined as DAY=111

DAY = 1+MOD (TIME-1,365.)
YEAR = SYEAR + FLOAT(INI((TIME-1.)/365.))

RETURN
END

```

500

600

* WATER1

```

* SUBROUTINE WATER1
* Author : Niek van Duivenbooden
* based on an earlier version by Daniel van Kraalingen (van
* Kraalingen & van Keulen, 1988)
* Date : 10-05-1988
* Purpose: This subroutine is a water balance for production level 1.
* It keeps track of all kind of statistics and keeps the
* soil at field capacity.
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
* ----
* RSOILP Name of requested soil file I
* EO Potential evaporation cm/d I
* LAITOT Total leaf area index (including dead I
* leaves) ha/ha I
* TRTOT Total crop transpiration cm/d I
* WCREL Array containing the relative water
* contents (0 - wilting point, 1 - field
* capacity), per layer 0
* RDMSOL Maximum rootable depth cm 0
* THCKN Array containing the thickness of each layer cm 0
* DEPTH Array containing the depths of the middle of
* each layer cm 0
* ILAYER Number of soil layers used 0
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* none
*
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : WATOU1, SOILPR, AFGEN,
* EVSOIL, INTGRL
*
* FILE usage : files with unit IWATER and IDEBUG
*
* SUBROUTINE WATER1 (RSOILP,EO,LAITOT,TRTOT,
* & WCREL,RDMOSOL,THCKN,DEPTH,ILAYER,
* & WCACT,WCACTO,FLOW,RHOD,WCFLDC,WCWILT)
*
* -----initial data types
*
* IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
* IMPLICIT INTEGER (I)
* REAL INTGRL
*
* LOGICAL INIT,TERMNL,DEBUG,WATER

```

200

```

COMMON /SIM/ STTIME,STCROP,TIME,DELT,FINTIM,
& DAY,STYEAR,YEAR,
& TERMNL,DEBUG,WATER,
& IIN,IOUT,IDEBUG,IWATER,INITRO
CHARACTER*(*) RSOILP
*-----data initialization of soil water balance
300

```

```

REAL WCMAX(10) , WCFLDC(10) , WCWILT(10) , WCAIR(10)
REAL WCACT(10) , WCREL(10) , WCINI(10) , WCACTO(10)
REAL RSOIL(10) , THCKN(10) , DEPTH(10) , FLOW(11)
REAL SMTB1(30) , SMTB2(30) , SMTB3(30) , RHOD(10)
INTEGER ITEXCL(10)
DATA INIT /.TRUE./
300

```

```

*-----when terminal stage is reached output to the screen is given
IF (TERMNL) THEN
CALL WATOU1 (TRTRANS,TESOIL,TRMAX,TRMXTM,EMAX,EMAXTM,
& EMIN,EMINTM)
RETURN
END IF
300

```

```

*-----variable initialization of soil water balance
IF (.NOT.INIT) GOTO 30
INIT = .FALSE.
400

```

```

*-----writes header to file WATER.DAT for printing of variables
IF (WATER) WRITE (IWATER,'(A)')
& TIME EO LAITOT ESOIL TESOIL TRTOT TTRANS'
500

```

```

CALL SOILPR (RSOILP,
& ISMTB1,ISMTB2,ISMTB3,SMTB1,SMTB2,SMTB3,
& THCKN,RHOD,ITEXCL,ILAYER,RDMOSOL,PROP,WCINI)
*-----pf characteristics of the boundary water contents
600

```

```

PFMAX = 0.
PFFLDC = 2.
PFWILT = 4.2

```

```

*-----initialisation of water balance
*-----
700

```

```

*-----for the soil, the water holding characteristics are
* computed, as a function of texture class.
DO 10 I=1,ILAYER

```



```

700
*-----
* INITIALISATION of water balance
*-----
*-----for the soil, the water holding characteristics are
* computed, as a function of the texture class.
DO 10 I-1, ILAYER
  IF (ITEXGL(I).EQ.1) THEN
    WCMAX(I) = AFGEN (ISMTB1,SMTB1,PFMAX)
    WCFLLDC(I) = AFGEN (ISMTB1,SMTB1,PFLLDC)
    WCVILT(I) = AFGEN (ISMTB1,SMTB1,PFVILT)
    WCAIR(I) = WCVILT(I)/3.
  ELSE IF (ITEXGL(I).EQ.2) THEN
    WCMAX(I) = AFGEN (ISMTB2,SMTB2,PFMAX)
    WCFLLDC(I) = AFGEN (ISMTB2,SMTB2,PFLLDC)
    WCVILT(I) = AFGEN (ISMTB2,SMTB2,PFVILT)
    WCAIR(I) = WCVILT(I)/3.
  ELSE IF (ITEXGL(I).EQ.3) THEN
    WCMAX(I) = AFGEN (ISMTB3,SMTB3,PFMAX)
    WCFLLDC(I) = AFGEN (ISMTB3,SMTB3,PFLLDC)
    WCVILT(I) = AFGEN (ISMTB3,SMTB3,PFVILT)
    WCAIR(I) = WCVILT(I)/3.
  END IF
10 CONTINUE
*-----check on range of pore space of soil profile
DO 20 I-1, ILAYER
  IF (WCMAX(I).GT.0.55) CALL RERROR (1,'WCMAX',WCMAX(I),'WATER2')
  IF (WCMAX(I).LT.0.25) CALL RERROR (2,'WCMAX',WCMAX(I),'WATER2')
20 CONTINUE
*-----calculation of depth of subsequent layers
DEPTH(I)=0.5*THCKN(I)
DO 30 I-2, ILAYER
  DEPTH(I)=DEPTH(I-1)+0.5*THCKN(I-1)+0.5*THCKN(I)
30 CONTINUE
*-----
* initialization of water contents
*-----
*-----initialisation of actual water contents cm3/cm3
DO 40 I-1, ILAYER
  WCACT(I) = WCINI(I)
  IF (WCACT(I).GT.WCFLLDC(I)) THEN
    WRITE (IOUT, '(A,A/A)')
    ' initialization of soil moisture more than field',
    ' capacity!',
    ' Run deleted!'
40 CONTINUE
STOP

```

```

1100
END IF
CONTINUE
*-----variables to calculate minima and maxima
TRMAX = -1000.
EMAX = -1000.
EMIN = 1000.
RMAX = -1000.
DMAX = -1000.
*-----
* DYNAMIC SECTION of water balance
*-----
50 CONTINUE
*-----amount of water in soil before calculations
TWATI = 0.
DO 60 I-1, ILAYER
  TWATI = TWATI+WCACT(I)*THCKN(I)
60 CONTINUE
*-----save actual water contents in array WCACTO for use in soil
* nitrogen routine NITBAL
DO 70 I-1, ILAYER
  WCACTO(I) = WCACT(I)
70 CONTINUE
*-----subroutine is called to compute the soil evaporation per layer
CALL EVSOIL (LAIOTOT,EO,ILAYER,WCACT,WCMAX,WCFLLDC,WCAIR,THCKN,
& PROP,DEPTH,ESOIL,RESOIL)
*-----reset of daily flow between the various soil compartments,
* 'waterfall' infiltration of infiltrated rain is calculated
* under the assumption that all rain infiltrates.
*ON CERTAIN SOILS THIS IS NOT TRUE, NEED TO BE IMPROVED
DO 80 I-1, ILAYER+1
  FLOW(I) = 0.
80 CONTINUE
IF (RAIN.GT.0.) THEN
  FLOW(I) = RAIN
*-----water holding capacity of each layer (cm) is calculated
DO 90 I-1, ILAYER
  CAP = (WCFLLDC(I)-WCACT(I))*THCKN(I)
*-----if the capacity of the layer is smaller than the

```

```

* * * * * infiltration, the layer is filled up to field capacity,
* * * * * if not the layer is filled with all that is left of the
* * * * * infiltration
IF (CAP.LE.FLOW(I)) THEN
  WCACT(I) = WCFDLC(I)
  FLOW(I+1) = FLOW(I) - CAP
ELSE
  WCACT(I) = WCACT(I)+DELT*FLOW(I)/THCRN(I)
  FLOW(I+1) = 0.
END IF
END IF
90 CONTINUE
* * * * * evaporation and transpiration are subtracted from
* * * * * soil water status
DO 100 I=1,ILAYER
  WCACT(I) = WCACT(I)-DELT*RESOIL(I)-DELT*TRR(I)
  WREL(I) = MAX(0.,(WCACT(I)-WCWILT(I))/(WCFDLC(I)-WCWILT(I)))
100 CONTINUE
* * * * * maximum and minimum of soil evaporation, crop transpiration
* * * * * infiltration and drainage
IF (TRTOT.GT.TRMX) THEN
  TRMAX = TRTOT
  TRMXM = TIME
END IF
IF (ESOIL.GT.EMAX) THEN
  EMAX = ESOIL
  EMAXM = TIME
END IF
IF (ESOIL.LT.EMIN) THEN
  EMIN = ESOIL
  EMINM = TIME
END IF
IF (RAIN.GT.RMAX) THEN
  RMAX = RAIN
  RMAXM = TIME
END IF
IF (FLOW(11).GT.DMAX) THEN
  DMAX = FLOW(11)
  DMAXM = TIME
END IF
* * * * * integrals of soil water balance
TTRANS = INTGRL (TRTOT,TRANS)
TDRAIN = INTGRL (FLOW(11),TDRAIN)

```

```

TRAIN = INTGRL (RAIN,TRAIN)
TESOIL = INTGRL (ESOIL,TESOIL)
* * * * * total amount of water in profile after calculations
1800

```

```

TWAT2 = 0.
DO 110 I=1,ILAYER
  TWAT2 = TWAT2+WCACT(I)*THCRN(I)
110 CONTINUE

```

```

* * * * * debug information is written to file when DEBUG logical is true
1900

```

```

IF (DEBUG) WRITE (IDBUG,'(A,F8.2/,11(A,F8.2/))')
& ' Debug of WATER? at time=',TIME,
& ' WCACT(1) =',WCACT(1),
& ' WCACT(2) =',WCACT(2),
& ' WCACT(3) =',WCACT(3),
& ' WCACT(4) =',WCACT(4),
& ' WCACT(5) =',WCACT(5),
& ' WCACT(6) =',WCACT(6),
& ' WCACT(7) =',WCACT(7),
& ' WCACT(8) =',WCACT(8),
& ' WCACT(9) =',WCACT(9),
& ' WCACT(10) =',WCACT(10),
& ' TDRAIN =',TDRAIN

```

```

* * * * * detailed information on soil water status is written
* * * * * when WATER is true
2000

```

```

IF (WATER) WRITE (IWATER,'(4X,F4.0,F7.2,F10.2,4F8.2)')
& TIME,E0,LAIOT,ESOIL,TESOIL,TRTOT,TRANS

```

```

* * * * * check on soil water balance is performed, this must
* * * * * be done after writing debug information
2100

```

```

WATBAL = RAIN - (TWAT2-TWAT1) - FLOW(11) - ESOIL - TRTOT
IF (WATBAL.GT.0.001.OR.WATBAL.LT.-0.001) THEN
  WRITE (IOUT,'(A,F8.2/A)')
& ' Error in water balance at TIME=',TIME,
& ' Run deleted!'
STOP
END IF

```

```

* * * * * check on water contents
2200

```

```

DO 120 I=1,ILAYER
  IF (WCACT(I).LT.WCAIR(I)*0.75) THEN
    WRITE (IOUT,'(A/,A,I3,A,F8.2/,A)')
& ' Actual water content dropped below air dry',
& ' in compartment=',I,' at TIME=',TIME,
& ' Run deleted!'
STOP
END IF

```

```

*-----*
* SUBROUTINE WATOU1
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 28-JAN-1987
* Purpose: This subroutine writes output from the water balance
* (production level 1) when the end of the simulation has
* been reached.
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=Input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* name meaning units class
* -----
* TTRANS Total crop transpiration cm I
* TESOIL Total soil evaporation cm I
* TRMAX Maximum value of crop transpiration cm/d I
* TRMXIM Time at which maximum crop transpiration
* occurred d I
* EMAXM Maximum value of soil evaporation cm/d I
* EMAXTM Time at which maximum soil evaporation
* occurred d I
* EMIN Minimum value of soil evaporation cm/d I
* EMINIM Time at which minimum soil evaporation
* occurred d I
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* condition
* -----
* WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* condition
* -----
* none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : a file opened with unit IOU7
*-----*

```

```

SUBROUTINE WATOU1 (TTRANS, TESOIL,
& TRMAX, TRMXIM,
& EMAX, EMAXTM, EMIN, EMINIM)

*-----initial data types
IMPLICIT REAL (A-H, J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)

LOGICAL TERNML, DEBUG, WATER
COMMON /SIM/ STTIME, STCROP, TIME, DELT, FINTIN,
& DAY, STYEAR, YEAR,
& TERNML, DEBUG, WATER,
& IIN, IOU7, IDEBUG, IWATER, INITRO

*-----statistics are written to output device

```

```

120 CONTINUE
*-----check on water contents
DO 130 I=1, ILAYER
IF (WGACT(I).GT.WCMAX(I)) THEN
WRITE (IOU7, '(A/,A,13,A,F8.2/,A)')
& , Actual water content more than pore space, '
& , in compartment-', I, ' at TIME=', TIME,
& , Run deleted!'
STOP
END IF
130 CONTINUE
RETURN
END

```

```

WRITE (IOU7, '(//A//,2(A,F8.2/),3(A,F8.2/.,A,F8.2/))')

```

```

& ' Statistics of water balance at production level 1',
& ' Total crop transpiration during environment period:',TRANS,
& ' Total soil evaporation',TESOIL,
& ' Maximum crop transpiration',TRMAX,
& ' at time =',TRMXTM,
& ' Maximum soil evaporation',EMAX,
& ' at time =',EMAXTM,
& ' Minimum soil evaporation',EMIN,
& ' at time =',EMINTM

```

300

```

RETURN
END

```

WATOU2

```

*-----*
* SUBROUTINE WATOU2
* Authors: Daniel van Kraalingen
* Date : 28-JAN-1987
* Purpose: This subroutine writes output from the water balance
* (production level 2) when the end of the simulation has
* been reached.
*
* FORMAL PARAMETERS: (I=input,O=output,C=control,IN=init,T=time)
* * name meaning units class
* *-----*
* * TTRANS Total crop transpiration cm I
* * TDRAIN Total drainage cm I
* * TRAIN Total rainfall cm I
* * TESOIL Total soil evaporation cm I
* * TRMAX Maximum value of crop transpiration cm/d I
* * TRMXTM Time at which maximum crop transpiration
* * occurred d I
* * EMAX Maximum value of soil evaporation cm/d I
* * EMAXTM Time at which maximum soil evaporation
* * occurred d I
* * EMIN Minimum value of soil evaporation cm/d I
* * EMINTM Time at which minimum soil evaporation
* * occurred d I
* * RMAX Maximum value of rainfall cm/d I
* * RMAXTM Time at which maximum rainfall occurred d I
* * DMAX Maximum drainage cm/d I
* * DMAXTM Time at which maximum drainage occurred d I
*
* FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* * condition
* *-----*
* * WARNINGS (nonzero value of IWAR returned) returned IWAR value
* * condition
* *-----*
* * none
*
* SUBROUTINES and FUNCTIONS called : none
*
* FILE usage : a file opened with unit IOU2
*-----*

```

100

```

SUBROUTINE WATOU2 (TTRANS,TDRAIN,TRAIN,TESOIL,
& TRMAX,TRMXTM,
& EMAX,EMAXTM,EMIN,EMINTM,
& RMAX,RMAXTM,
& DMAX,DMAXTM)

```

```

*-----initial data types
IMPLICIT REAL (A-H,J-Z)
IMPLICIT INTEGER (I)
LOGICAL TERMINL,DEBUG,WATER

```

```

* * * * *
* * LAJIN Latitude of the weather station,
* * (North is positive)
* * ALTI Altitude of the weather station,
* * TMIN Minimum temperature
* * TMAX Maximum temperature
* * AVRAD Daily total radiation
* * RAIN Rainfall
* * WIND Average wind speed
* * VAP Vapour pressure at 9:00 in the morning
* *
* * FATAL ERROR CHECKS (execution terminated, message)
* * -----
* * condition
* * IDAYR < 1, IDAYR > 365
* * IDAYR < day of first weather record
* * IDAYR > day of last weather record
* *
* * WARNINGS (nonzero value of IWAR returned)
* * condition -----
* * returned IWAR value
* *
* * If difference in days between weather records
* * is larger than ICAP 1
* *
* * SUBROUTINES and FUNCTIONS called : MOPILP, ILEN
* *
* * FILE usage : A weather data file opened with UNIT-IUNIT
* * -----

```

```

* * SUBROUTINE WEATHER (IUNIT, IWAR
* * & STATR, IYEARR, IDAYR, ICAP,
* * & LONGIE, LATIN, ALTI,
* * & TMIN, TMAX, AVRAD, RAIN, WIND, VAP)
* *
* * IMPLICIT REAL (A-Z)
* *
* * LOGICAL TERMNL, DEBUG, WATER
* * INTEGER IIN, IOUT, IDEBUG, IWATER
* * COMMON /SIM/ STTIME, STCROP, TIME, DELT, FINTIM,
* * & DAY, STYEAR, YEAR,
* * & TERMNL, DEBUG, WATER,
* * & IIN, IOUT, IDEBUG, IWATER, INITRO
* *
* * CHARACTER*(*) STATR
* * CHARACTER HULP*2, FILE*80, STATO*80
* * INTEGER IUNIT, ISR, ISO, ICAP, ILEN, IWAR,
* * & IYEARR, IYEARR, IYEARN,
* * & IDAYO, IDAYR, IDAYN
* * LOGICAL OPENED
* *
* * DATA OPENED / FALSE /
* * DATA ISO /1/, STATO /'X' /
* * DATA IYEARRO /-1/
* *
* * the requested day should be between 1 and 365

```

```

COMMON /SIM/ STTIME, STCROP, TIME, DELT, FINTIM,
& DAY, STYEAR, YEAR,
& TERMNL, DEBUG, WATER,
& IIN, IOUT, IDEBUG, IWATER, INITRO
*-----water use statistics of production level 2 are printed to IOUT 200
WRITE (IOUT, '(//A//,4(A,F8.2/),5(A,F8.2/),A,F8.2/))' )
& ' Statistics of water balance at production level 2',
& ' Total crop transpiration during environment period :', TTRANS,
& ' Total drainage :', TDRAIN,
& ' Total rainfall :', TRAIN,
& ' Total soil evaporation :', TESOIL,
& ' Maximum crop transpiration :', TRMAX,
& ' at time =', TMAXTM,
& ' Maximum soil evaporation :', EMAX,
& ' at time =', EMAXTM,
& ' Minimum soil evaporation :', EMIN,
& ' at time =', EMINTM,
& ' Maximum rainfall :', RMAX,
& ' at time =', RMAXTM,
& ' Maximum drainage :', DMAX,
& ' at time =', DMAXTM

```

```

RETURN
END
*-----*
* * SUBROUTINE WEATHR
* * Authors: Daniel van Kraalingen
* * Date : 4-Jan-1988
* * Purpose: This subroutine returns weather data from a standard
* * weather data file. This subroutine is made transparent
* * in the sense that subsequent calls to this subroutine
* * may contain different station names, years or days for
* * which weather data are to be returned. No initialization
* * is to be carried out by the calling program.
* *
* * FORMAL PARAMETERS: (I=Input, O=output, C=control, IN=init, T=time)
* * name meaning units class
* * ----
* * IUNIT Unit number that can be used to open weather I
* * data file C, I
* * IWAR warning variable C, O
* * STATR Station name of weather data file I
* * IYEARR Year for which weather data are requested I
* * (do not use 19 as a prefix, i.e. 86 is a
* * valid year, 1986 is not!)
* * IDAYR Day for which weather data are requested I
* * (1 <- IDAYR <- 365)
* * ICAP The maximum difference in days that is allowed
* * between subsequent data file records. (if
* * this is exceeded IWAR is set to '1'
* * LONGIE Longitude of the weather station, Degrees O
* * (East is positive)

```

```

IF (IDAYR.LT.1.OR.IDAYR.GT.365)
& STOP 'ERROR IN WEATHER: DAY < 1 OR DAY > 365'

ISR = ILEN (STATR)

* if a new station name is requested and/or a new year is requested, 300
* a new weather data file will be opened, if a weather data file
* was already opened is first closed.

IF (STATO(1:ISO).NE.STATR(1:ISR).OR.IYEARO.NE.IYEARR) THEN

* construction of file name from station name and year number
* by making use of an 'internal write' on the string: HULP

WRITE (HULP,'(12)') IYEARR
IF (HULP(1:1).EQ.' ') HULP(1:1) = '0'
FILE = STATR(1:ISR)//HULP//'.DAT'

* before opening a weather data file, it is checked if a file was
* already open, if true, it is closed

IF (OPENED) CLOSE (IUNIT)
CALL FOPEN (IUNIT,FILE(1:ISR+6),'OLD','NVT')
OPENED = .TRUE.

* comment lines (coded with '**') are skipped and longitude,
* latitude and altitude are read
CALL MOPILP (IUNIT)
READ (IUNIT,*) LONGIE, LATIN, ALTI

STATO(1:ISR) = STATR(1:ISR)
ISO = ISR
IYEARO = IYEARR
IDAYN = 0
IDAYO = 0
END IF

* if the requested station name and year remain the same, but the
* requested day is less than where the file pointer currently is
* located, the file is rewind.

IF (IDAYR.LT.IDAYO) THEN
REWIND (IUNIT)

* comment lines (coded with '**') are skipped and longitude,
* latitude and altitude are read
CALL MOPILP (IUNIT)
READ (IUNIT,*,ERR=200) LONGIE, LATIN, ALTI

IDAYN = 0
IDAYO = 0
END IF

* in this loop, the file is read until the requested day is reached 800

```

```

* or exceeded, each weather variable is saved to allow interpolation
* later

10 IF (IDAYN.LT.IDAYR) THEN
IDAYO = IDAYN
TMINO = TMINN
TMAXO = TMAXN
AVRADO = AVRADN
RAINO = RAINN
WINDO = WINDN
VAPO = VAPN
READ (IUNIT,*,END=100,ERR=200) IYEARN, IDAYN, THINN, THAXN,
& AVRADN, RAINN, WINDN, VAPN
& GOTO 10
ELSE
IF (IDAYO.EQ.0.AND.IDAYN.GT.IDAYR) STOP
'ERROR IN WEATHR: interpolation attempted below data'
& IF (IDAYN.GT.IDAYR.AND.(IDAYN-IDAYO).GT.IGAP) IWAR = 1
& END IF

* intermediate variable used for interpolation 900
FRACT = FLOAT (IDAYR-IDAYO)/FLOAT (IDAYN-IDAYO)

* actual interpolation of weather data
TMIN = TMINO + FRACT*(TMINN-TMINO)
TMAX = TMAXO + FRACT*(TMAXN-TMAXO)
AVRAD = AVRADO + FRACT*(AVRADN -AVRADO)

IF (IDAYR.EQ.IDAYN) THEN
RAIN = RAINN
ELSE
RAIN = 0.
END IF

WIND = WINDO + FRACT*(WINDN-WINDO)
VAP = VAPO + FRACT*(VAPN -VAPO)

*-----debug information is written to file when DEBUG logical is true 1000

IF (DEBUG) WRITE (IDEBUG,'(A,F8.2/,6(A,G14.6/))')
& ' Debug of WEATHR at time=',TIME,
& ' TMIN -',TMIN,
& ' THAX -',THAX,
& ' AVRAD -',AVRAD,
& ' RAIN -',RAIN,
& ' WIND -',WIND,
& ' VAP -',VAP

RETURN

* fatal error is reached at an unexpected end of file 1100
100 STOP 'ERROR IN WEATHR: interpolation attempted above data'
200 STOP 'ERROR IN WEATHR: unable to read from data file'

END

```

Annexe III.3. Liste des abréviations du modèle de simulation

ACRONYM	DEFINITION	UNITS
A	Regression constant for Angstrom formula	
A1	Auxiliary variable in equation of Verbruggen at prevailing temperature and soil moisture content	
A0	Auxiliary variable in equation of Verbruggen at reference temperature and soil moisture content	
AFER(1)	Amount of nitrogen applied in application 1	kg ha ⁻¹
AFEN	Arbitrary function generator (FORTRAN-function)	
ANAX	Maximum rate of CO ₂ assimilation for individual leaf blades, as a function of nitrogen content and temperature	kg ha ⁻¹ h ⁻¹
AMAXN	Maximum rate of CO ₂ assimilation for individual leaf blades at light saturation, as a function of nitrogen content	kg ha ⁻¹ h ⁻¹
AMAXRF	Reduction factor for photosynthesis, function of temperature	
AMINFM	Total amount of nitrogen mineralized from fresh organic matter	kg ha ⁻¹
AMINOH	Total amount of nitrogen mineralized from old organic matter	kg ha ⁻¹
AMNLAY(1)	Amount of mineral nitrogen in soil layer 1	kg ha ⁻¹
AMNTOT	Total amount of mineral nitrogen in the soil profile	kg ha ⁻¹
ANCO	Amount of nitrogen in combs	kg ha ⁻¹
ANCROP	Total amount of nitrogen in the crop	kg ha ⁻¹
ANGR	Amount of nitrogen in grains	kg ha ⁻¹
ANIMH	Total amount of nitrogen immobilized in biomass	kg ha ⁻¹
ANLAYM	Amount of nitrogen involved in mixing of water and nitrogen in a soil layer, auxiliary variable	kg ha ⁻¹
ANLOSS	Total soil nitrate nitrogen lost by immobilization	kg ha ⁻¹
ANLV	Amount of nitrogen in live leaf blades	kg ha ⁻¹
ANLVB	Amount of nitrogen in dead leaf blades	kg ha ⁻¹
ANRT	Amount of nitrogen in live roots	kg ha ⁻¹
ANRTD	Amount of nitrogen in dead roots	kg ha ⁻¹
ANST	Amount of nitrogen in live stems	kg ha ⁻¹
ANSTD	Amount of nitrogen in dead stems	kg ha ⁻¹
ANUPCR	Total nitrogen taken up by the crop	kg ha ⁻¹
ASRQ	Assimilate requirements for dry matter conversion of crop	kg kg ⁻¹
ASRQCO	Assimilate requirements for dry matter conversion of combs	kg kg ⁻¹
ASRQGR	Assimilate requirements for dry matter conversion of grains	kg kg ⁻¹
ASRQLV	Assimilate requirements for dry matter conversion of leaf blades	kg kg ⁻¹
ASRQST	Assimilate requirements for dry matter conversion of stems	kg kg ⁻¹
ASRQRT	Assimilate requirements for dry matter conversion of roots	kg kg ⁻¹
ATNCO	Amount of translocatable nitrogen in combs	kg ha ⁻¹
ATNTOT	Amount of translocatable nitrogen in the vegetative parts of the crop	kg ha ⁻¹
ATNLV	Amount of translocatable nitrogen in leaf blades	kg ha ⁻¹
ATNRT	Amount of translocatable nitrogen in roots	kg ha ⁻¹
ATNST	Amount of translocatable nitrogen in stems	kg ha ⁻¹
AVASS	Available assimilates (CH ₂ O) for crop growth (net assimilation rate)	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
AVRAD	Average daily radiation	J m ⁻² d ⁻¹
AVTMP	Average air temperature after a delay	°C
AWHIX	The amount of water involved in the process of mixing water and nitrogen	cm
AWGER	Total amount of soil moisture in potential germination zone, set to zero	cm
B	Regression constant for Angstrom formula	
B1	Auxiliary variable in equation of Verbruggen at prevailing temperature and soil moisture content	
B0	Auxiliary variable in equation of Verbruggen at reference temperature and soil moisture content	
CAP	Water holding capacity of soil layer	cm
CCRR	Carbon content of crop residues	kg kg ⁻¹
CCNR	Carbon content of manure	kg kg ⁻¹
CDENGR	Carbohydrate demand of grains	kg ha ⁻¹ d
COSLD	Auxiliary variable in subroutine ASTRO	kg ha ⁻¹
CROPR	Amount of crop residues of the previous year	kg ha ⁻¹
CRPNAM	Crop name	
CRRCM	Amount of crop residues cm ⁻¹ soil	kg ha ⁻¹
CRLAY(1)	Amount of crop residues in soil layer 1	kg ha ⁻¹
CSUPGR	Carbohydrate supply for grains	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
CVSS	Factor that increases ANAX	
CVSST	Function table of CVSS	
DAY	Day number according to Julian calendar	h
DAYL	Daylength	h
DAYLCR	Critical daylength, threshold for flowering	h
DAYLP	Photoperiodically active daylength	h
DAYTMP	Temporary day number	
DEBCHO	Debug choice	
DEBDC	Logical to indicate whether debug information is wanted	d
DELT	Time step of integration	cm
DEPT	Auxiliary variable	cm
DEPTR(1)	Distance from soil surface to middle of soil layer 1	cm
DISASS	Disassimilation:assimilation ratio for growth of microbial biomass	
DLV	Total death rate of leaf blades	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
DLVA	Death rate of leaf blades	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
DLVB	Death rate of leaf blades due to senescence	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
DLVT	Death rate of leaf blades to be distributed among leaf age classes	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
DLV1	Death rate of leaf blades due to water shortage	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
DLV2	Death rate of leaf blades due to a high LAI	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
DLV3	Death rate of leaf blades due to nitrogen shortage	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
DMAX	Maximum drainage rate from the lowest soil layer	cm d ⁻¹
DMAXTH	Time at which DMAX occurs	
DRT	Death rate of roots	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
DRT1	Death rate of roots due to water shortage	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
DRT2	Death rate of roots due to a high LAI	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
DRT3	Death rate of roots due to nitrogen shortage	kg ha ⁻¹ d ⁻¹

WTRCHO	Variable that determines use kind of rainfall data		
KDIF	Extinction coefficient for diffuse radiation		
LAI	Leaf area index of the crop	$m^2 m^{-2}$	
LAIANT	Leaf area index of the crop at anthesis	$m^2 m^{-2}$	
LAI1ST	Green area index of stems	$m^2 m^{-2}$	
LAI1STT	Function table LAI1ST, DVS		
LAI1TOT	Total leaf area index of crop	$m^2 m^{-2}$	
LAT	Latitude of the site	degrees	
LONGIE			
LSLBR			
LVAGE	Age of leaf blades	$^{\circ}C d$	
LVSLA	Specific leaf area of leaf blades	$m^2 kg^{-1}$	
LVSLAT	Function table SLAVL as a function of DVS		
LVTOTV			
LVWEIG			
MACNCO	Activity coefficient accounting for the effect of nitrogen content of combs on maintenance respiration		
MACNCR	Activity coefficient accounting for the effect of nitrogen content of grains on maintenance respiration		
MACNLV	Activity coefficient accounting for the effect of nitrogen content of leaf blades on maintenance respiration		
MACNRT	Activity coefficient accounting for the effect of nitrogen content of roots on maintenance respiration		
MACNST	Activity coefficient accounting for the effect of nitrogen content of stems on maintenance respiration		
MAICO	Maintenance respiration rate of combs	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
MAIGR	Maintenance respiration rate of grains	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
MAILV	Maintenance respiration rate of leaf blades	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
MAIRT	Maintenance respiration rate of roots	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
MAIST	Maintenance respiration rate of stems	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
MAITOT	Total maintenance respiration rate	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
MAINCO	Rate of maintenance respiration of combs	$kg CH_2O ha^{-1} d^{-1}$	
MAINCR	Rate of maintenance respiration of grains	$kg CH_2O ha^{-1} d^{-1}$	
MAINLV	Rate of maintenance respiration of leaf blades	$kg CH_2O ha^{-1} d^{-1}$	
MAINTR	Rate of maintenance respiration of roots	$kg CH_2O ha^{-1} d^{-1}$	
MAIRST	Reference temperature for maintenance of plant organs	$^{\circ}C$	
MAINTP	Rate of maintenance respiration of stems	$kg CH_2O ha^{-1} d^{-1}$	
MAINST	Amount of manure applied	$kg ha^{-1}$	
MANURE	Rate of mineralization of fresh organic matter	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
MINFOM(I)	In soil layer I	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
MINFMP	Rate of mineralization of fresh organic matter for whole soil profile	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
MINOON(I)	Rate of mineralization of old organic matter in soil layer I	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
MINOMP	Rate of mineralization of old organic matter for whole soil profile	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
MINRF1(I)	Reduction factor for mineralization in soil layer I, function of temperature and soil moisture content		
MINRF2(I)	Reduction factor for mineralization in soil layer I, function of cover of N-demand of crop by mineral N		
MINRTP	Reference temperature for mineralization	$^{\circ}C$	
MNRBM	Amount of manure cm^{-1} soil	$kg ha^{-1}$	
MNRLAY(I)	Amount of manure in soil layer I	$kg ha^{-1}$	
NR	Rate of soil respiration at prevailing soil temperature and moisture content	$mg g^{-1} d^{-1}$	
NRO	Rate of soil respiration at reference soil temperature and moisture content	$mg g^{-1} d^{-1}$	
NXNURP	Maximum rate of nitrogen uptake of the crop	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NACCO	Rate of nitrogen accumulation in the combs	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NACGR	Rate of nitrogen accumulation in the grains	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NAPDAY(I)	Dates of nitrogen application		
NCFM	Nitrogen concentration of fresh organic material	$kg kg^{-1}$	
NCSG(I)	Nitrogen concentration of water in soil layer I	$kg cm^{-1}$	
NCMIX	Nitrogen concentration of water, auxiliary variable	$kg cm^{-1}$	
NCRMB	Nitrogen:carbon ratio of microbial biomass		
NCRROOM	Nitrogen:carbon ratio of old organic matter (humus)		
NDEM	Total nitrogen demand of the crop	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NDEMB	Nitrogen demand of the soil biomass	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NDEMS	Nitrogen demand of the biomass that must be covered from soil mineral nitrogen	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NDEMCV	Nitrogen demand of the combs	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NDEMLV	Nitrogen demand of the leaf blades	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NDEMR1	Nitrogen demand of the roots	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NDEMR2	Nitrogen demand of the stems	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NDEMRV	Nitrogen demand of all vegetative material	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NFCO	Nitrogen content of the combs	$kg kg^{-1}$	
NFCR	Nitrogen content of the grains	$kg kg^{-1}$	
NFLV	Nitrogen content of live leaf blades	$kg kg^{-1}$	
NFLVD	Nitrogen content of dead leaf blades	$kg kg^{-1}$	
NFR1	Nitrogen content of roots	$kg kg^{-1}$	
NFR2	Nitrogen content of stems	$kg kg^{-1}$	
NFR3	Nitrogen content of dead stems	$kg kg^{-1}$	
NFR4	Nitrogen content on total stem weight basis (structural material + reserves)	$kg kg^{-1}$	
NFR5	Overall nitrogen content of above ground crop dry matter	$kg kg^{-1}$	
NFR6	Nitrogen application at each application date	$kg kg^{-1}$	
NFR7	Rate of nitrogen immobilization by biomass in soil layer I	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NFR8	Rate of nitrogen immobilization by biomass for the complete soil profile	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NFR9	Check on nitrogen balance	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NITBAL	Variable to indicate choice for soil-nitrogen information	$kg ha^{-1}$	
NITCHO	Logical to indicate choice for soil-nitrogen information		
NITRO	Rate of nitrogen loss by leaf death	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NLOLVD	Rate of nitrate nitrogen loss from soil layer I, as a result of immobilization in biomass	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NLOSS(I)	Rate of soil nitrogen loss as a result of immobilization in the biomass for the whole soil profile	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NLOSTD	Rate of nitrogen loss by root death	$kg ha^{-1} d^{-1}$	
NMAXCO	Maximum nitrogen content in combs, function of crop development stage	$kg kg^{-1}$	
NMAXGR	Maximum nitrogen content in grains	$kg kg^{-1}$	
NMAXLV	Maximum nitrogen content in leaf blades, function of	$kg kg^{-1}$	

NMXXRT	crop development stage	kg kg ⁻¹
NMXXRT	Maximum nitrogen content in roots, function of crop development stage	kg kg ⁻¹
NMXXST	Maximum nitrogen content in stems, function of crop development stage	kg kg ⁻¹
NMXXCOT	Function table NMXXCO, DVS	
NMXXLVT	Function table NMXXLV, DVS	
NRKXSTT	Function table NMXXST, DVS	
NRKXRTT	Function table NMXXRT, DVS	
NRKXIN	Nitrogen content in precipitation	kg ₂ cm ⁻¹
NS	Nitrogen available for uptake by diffusion	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NSIUPGR	Rate of nitrogen supply to the grains	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NTRCO	Rate of nitrogen translocation from combs	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NTRLV	Rate of nitrogen translocation from leaf blades	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NTRRT	Rate of nitrogen translocation from roots	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NTRST	Rate of nitrogen translocation from stems	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NTRMGR	Number of grains	ha ⁻¹
NUPCO	Rate of nitrogen uptake by combs	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NUPDF	Rate of nitrogen uptake by diffusion	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NUPDFL(I)	Rate of nitrogen uptake by diffusion from layer I	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NUPLV	Rate of nitrogen uptake by leaf blades	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NUPRT	Rate of nitrogen uptake by roots	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NUPST	Rate of nitrogen uptake by stems	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NUPTOT	Total rate of nitrogen uptake by the crop (diffusion plus mass flow)	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NUPTR	Rate of nitrogen uptake in the transpiration stream	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
NUPTRL(I)	Rate of nitrogen uptake in the transpiration stream from soil layer I	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
OOHCO	Amount of old organic matter cm ⁻¹ soil depth	kg ha ⁻¹
OOHLV(I)	Amount of old organic matter in soil layer I	kg ha ⁻¹
PABDIF	Instantaneous flux of diffuse radiation	W m ⁻²
PABDIR	Instantaneous flux of direct radiation	W m ⁻²
PDRCR	Potential decomposition rate of crop residues	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
PDRMNR	Potential decomposition rate of manure	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
PERDLV	Relative death rate of leaf blades	d ⁻¹
PFMAX	Maximum PF-value	
PFILDC	PF-value at field capacity	
PFVILT	PF-value at wilting point	
PCRIGR	Potential growth rate of an individual grain	mg d ⁻¹
PCRIGR	Function table PCRIGR as a function of temperature	
PHOTRF	Reduction factor for photosynthesis due to water stress	
PLPDMR	Depth of the plough layer	cm
PLPDMR	Percentage old organic matter (humus) in plough layer	
PHINFM	Potential rate of nitrogen mineralization from fresh organic matter	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
PNARIC	Potential nitrogen accumulation rate of an individual grain	kg d ⁻¹
PNARIT	Function table PNARIC as function of temperature	
PNUPTR	Potential nitrogen uptake rate in transpiration stream	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
PNUPR	Potential nitrogen uptake rate of the crop	kg ha ⁻¹ d ⁻¹
PRCCO	Protein content of the combs	kg kg ⁻¹
PRCGR	Protein content of the grains	kg kg ⁻¹

PRCLV	Protein content of the leaf blades	kg kg ⁻¹
PRCRT	Protein content of the roots	kg kg ⁻¹
PRCST	Protein content of the stems	kg kg ⁻¹
PROP	Proportionality factor for distribution of soil evaporation over soil profile	
Q10	Q10 for maintenance respiration	
RAIN	Daily total precipitation	cm d ⁻¹
RD	Rooting depth	cm
RDINL	Root penetration in lowest layer	cm
RDMSDL	Maximum depth of soil profile	cm
RDMCGR	Maximum rooting depth of crop	cm
KDRFM	Relative decomposition rate of fresh organic matter	CF
RDRDOM	Relative decomposition rate of old organic matter	d ⁻¹
RESL	Reserve level; content of water soluble carbohydrates	kg kg ⁻¹
RESLAT	Function table RESL as a function of DVS	
RESOIL(I)	Evaporation rate per soil layer	cm d ⁻¹
RGM	Potential root extension rate	cm d ⁻¹
RGRRES	Relative growth rate of stem reserves	cm d ⁻¹
RHOD(I)	Bulk density of soil layer I	Er cm ⁻³
RLRT		
RMAX	Maximum daily precipitation	cm d ⁻¹
RMAXTN	Time at which RMAX occurs	
RNFPCO	Residual nitrogen content of combs	kg kg ⁻¹
RNFGR	Residual nitrogen content of grains	kg kg ⁻¹
RNFLV	Residual nitrogen content of leaf blades	kg kg ⁻¹
RNFRT	Residual nitrogen content of roots	kg kg ⁻¹
RNFST	Residual nitrogen content of stems	kg kg ⁻¹
RND	Rate of extension of roots	cm d ⁻¹
RSTAT	Name of rainfall station	
RSOILP	Requested soil data file with physical characteristics	
RSOILN	Requested soil data file with nitrogen characteristics	
SDDVPT	Counter for germinating seeds in unfavourable temperatures	d
SDDVYM	Counter for germinating seeds in a dry soil	d
SDGEXP	Counter for germinating seeds for emergence	d
SDTEMP	Temperature of seed	°C
SDWEIG	Weight of one seed	kg
SFILER	Name of file with soil physical characteristics	
SFILEN	Name of file with soil nitrogen balance data	
SINB	Sine of solar elevation	
SINLD	Auxiliary variable in radiation calculations	
SMTB1	Soil moisture content at given PF for soil texture class 1	cm ³ cm ⁻³
SMTB2	Soil moisture content at given PF for soil texture class 2	cm ³ cm ⁻³
SMTB3	Soil moisture content at given PF for soil texture class 3	cm ³ cm ⁻³
SOILTP(I)	Soil temperature of layer I	°C
SOMDAY	Day at which sowing takes place	
SOMDEN	Crop sowing density	kg ha ⁻¹
SOMFPC	Number of pockets in which crop is sown	ha ⁻¹
SPAN	Live span of leaf blades	°C d
STEMP	Logical to indicate whether decalied information on soil temperatures is wanted	
STSLA	Specific leaf area of stem	m ² kg ⁻¹

STPCHO	Choice whether detailed information on soil temperatures is wanted	-
STIME	Day on which simulation starts	-
STYEAR	Year in which simulation starts	-
SUMTRP	Auxiliary variable in calculation of soil temperature	*C
SUM1	Auxiliary variable	-
SUM2	Auxiliary variable	-
TCNDF	Time coefficient for nitrogen diffusion	d
TCNTR	Time coefficient for nitrogen translocation	d
TCRES	Time coefficient for translocation of stem reserves	d
TCBEST	Function table TCRES,	-
TDRAIN	Total amount of water drained from the lowest soil layer	cm
TEFF	Temperature effect on maintenance respiration	-
TERMNL	Logical to indicate final state of simulation	-
TESOIL	Total evaporation from the soil surface	cm
THCKN(I)	Thickness of soil layer I	cm
THIDAY	Day of seedling removal	-
THIRFL	Reduction factor of leaf blades during thinning	-
THIRFR	Reduction factor of roots during thinning	-
THIRFS	Reduction factor of stems during thinning	-
TIME	Running value for time	-
TINOM	Total initial nitrogen in fresh organic matter	kg ha ⁻¹
TINOMM	Total initial nitrogen in old organic matter	kg ha ⁻¹
TINLAY	Total initial mineral nitrogen	kg ha ⁻¹
TINTOT	Total initial nitrogen in the soil profile	kg ha ⁻¹
TMAX	Maximum daily temperature	*C
TMIN	Minimum daily temperature	*C
TMPA	Average daily temperature	*C
TMPTI	Function table TMPTI, AMAX	-
TNCIFT	Total amount of N-fertilizer applied	kg ha ⁻¹
TRACTP	Activity coefficient to account for the effects of soil temperature on root activity	-
TRACWA	Activity coefficient to account for the effects of soil water content on root activity	-
TRAIN	Total precipitation over the season	cm
TRMAX	Maximum transpiration rate of the crop	cm d ⁻¹
TRKXTM	Time at which TRMAX occurs	mm d ⁻¹
TRPMM	Transpiration rate expressed per cm soil depth	mm d ⁻¹
TRTOT	Total transpiration of the crop during one day	cm d ⁻¹
TRR(I)	Rate of moisture uptake for transpiration from soil layer I	mm d ⁻¹
TRWRD	Reduction factor for transpiration by reduced uptake of water as a function of soil water content	-
TRANS	Total amount of water transpired throughout the season	cm
TRAT1	Total amount of water in soil profile before execution of	cm
TRAT2	Total amount of water in soil profile after execution of	cm
TRATBAL	TRATBAL	cm
VAP	Check on water balance	cm
WATBAL	Choice for detailed information on water balance	-

WATER	Logical to indicate whether detailed information is wanted	-
WACT(I)	Actual water content in soil layer I	cm ³ cm ⁻³
WACTO(I)	Actual water content in soil layer I one time step ago	cm ³ cm ⁻³
WCAIR(I)	air dry water content in soil layer I	cm ³ cm ⁻³
WFLDC(I)	Water content at field capacity in soil layer I	cm ³ cm ⁻³
WCINI(I)	Initial water content of soil layer I	cm ³ cm ⁻³
WCREL(I)	Relative water content in soil layer I	cm ³ cm ⁻³
WCMAX	Volumetric soil moisture content at saturation point	cm ³ cm ⁻³
WCHILT(I)	Volumetric soil moisture content at wilting point in soil layer I	cm ³ cm ⁻³
WCO	Weight of comb dry matter	kg ha ⁻¹
WCROPT	Total weight of crop (including roots and dead material)	kg ha ⁻¹
WGR	Weight of grain dry matter	kg ha ⁻¹
WGRP	Weight of grain dry matter	kg ha ⁻¹
WIND	Average daily wind speed	m s ⁻¹
WLV	Weight of leaf blade dry matter	kg ha ⁻¹
WLVLD	Weight of dead leaf blade dry matter	kg ha ⁻¹
WREDT	Moisture reduction factor for root growth	-
WRBS	Weight of water soluble stem reserves (CH ₂ O)	kg ha ⁻¹
WRT	Weight of root dry matter	kg ha ⁻¹
WSHTOT	Total above ground dry matter	kg ha ⁻¹
WSHTOA	Total above ground dry matter at anthesis	kg ha ⁻¹
WST	Height of stem dry matter	kg ha ⁻¹
WSTAT	Code of weather station	-
WSTD	Weight of dead stem dry matter	kg ha ⁻¹
WSTOT	Total stem weight (live+dead+reserves) dry matter	kg ha ⁻¹
YEAR	Running value for the year of simulation	-

Annexe III.4. Fichier NIOROISP.DAT

*-----
* EXAMPLE FILE

* Comment lines can be included with an asterisk in the first column.
 * The following lines give the soil name and the number of different
 * soil texture classes. This number MUST be equal to the number of
 * tabulated pf curves. It must be at least equal to one with a maximum
 * of three.

* Location:
 Nioro du Rip

3

* PF curve of soil texture class 1
 * SOL ARGILLO-LIMONEUX ENTIRE 0 ET 20 CM DE PROFONDEUR
 * The first number is the total number of data of the pf curve.

20

0 0,0,0,274
 2,0,0,0,168
 2,2,0,0,108
 2,5,0,0,068
 2,8,0,0,046
 3,0,0,0,039
 3,3,0,0,033
 3,6,0,0,027
 4,2,0,0,023
 5,0,0,0,016

* PF curve of soil texture class 2
 * SOL ARGILLO-LIMONEUX ENTIRE 20 ET 60 CM
 * The first number is the total number of data of the pf curve.

20

0,0,0,0,290
 2,0,0,0,177
 2,2,0,0,138
 2,5,0,0,104
 2,8,0,0,081
 3,0,0,0,069
 3,3,0,0,058
 3,6,0,0,055
 4,2,0,0,050
 5,0,0,0,043

* PF curve of soil texture class 3
 * SOL ARGILLO-LIMONEUX ENTIRE 60 ET 230 CM
 * The first number is the total number of data of the pf curve.

20

0 0,0,0,0,311
 2,0,0,0,222
 2,2,0,0,177
 2,5,0,0,149
 2,8,0,0,128

3,3,0,0,108
 3,6,0,0,103
 4,2,0,0,098
 5,0,0,0,093

* Number of layers (1 < 10) and thickness (in cm)

10
 2.
 5.
 10.
 20.
 30.
 50.
 80.

* Bulk density of layers

1,63
 1,63
 1,63
 1,55
 1,48
 1,45
 1,45
 1,45
 1,45

* Maximum rooting depth and proportionality factor

240.
 15.

* Initial water contents and the texture class per soil layer

0,017,1
 0,017,1
 0,017,1
 0,031,1
 0,042,2
 0,053,2
 0,092,3
 0,114,3
 0,119,3
 0,137,3

Annexe III.5. Fichier NIOROISN.DAT

```

*-----*
* Data file NIOROISN.DAT: Contains soil nitrogen data *
* Location: *
* NIORO DU RIP *
*-----*
* NOT ALL VARIABLES HAVE A REALISTIC VALUE !!!!! *
*-----*
* Location:
Nioro du Rip
* depth of plough layer (PLAYER)
17.
* percentage organic material (humus) in ploughlayer (PLPOOM)
3.
* relative decomposition rate of old org.material (kg/kg/d) (RDRDOM)
7.0E-5
* amount of manure applied (MANURE, kg/ha)
5000.
* relative decomposition rate of manure (RDRMNR, kg/kg/d)
0.035
* carbon content of manure (CCMNR)
0.25
* nitrogen content of manure (NCMNR)
0.0135
* amount of crop residues of previous crop (CROPR, kg/ha)
100.
* relative decomposition rate of crop residues (RDRCRR, kg/kg/d)
0.015
* carbon content of crop residues (CCCR)
0.4
* nitrogen content of crop residues (NCCR)
0.0086
* nitrogen concentration in rainwater (NCRAIN, kg/cm)
* nitrogen concentration of 0.1 kg/cm (- 1 ppm), and 80 cm annual
* precipitation means a yearly input of ca. 8 kg/ha
0.056
* time constant for nitrogen diffusion (d) according to Johnsson
* (1987) (TCNDF)
10.
* dissimilation:assimilation ratio for growth of microbial biomass (DISASS)
2.

```

```

* N:C ratio of microbial biomass (NCRMB)
0.1
* timing of fertilizer (nitrogen) applications. Day number at
* which application is given needs to be specified for application
* 1, 2 and 3 (FERDAY)
190.
225.
243.
* the amounts of nitrogen in the applications need to be
* specified for application 1, 2 and 3 (AFER)
15.
23.
23.
* initial amounts of mineral nitrogen in soil compartments
* in kg(N)/ha/layer (NMILAY)
3.
4.5
7.5
13.
13.
9.
9.
15.
38.
54.

```