



HAL
open science

Devenir de l'azote sous irrigation gravitaire. Application au cas d'un périmètre irrigué au Mexique

I. Nemeth

► **To cite this version:**

I. Nemeth. Devenir de l'azote sous irrigation gravitaire. Application au cas d'un périmètre irrigué au Mexique. Sciences de l'environnement. Doctorat Sciences de la terre et de l'eau, Université Montpellier II, 2001. Français. NNT: . tel-02579897

HAL Id: tel-02579897

<https://hal.inrae.fr/tel-02579897>

Submitted on 14 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**UNIVERSITE DE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC**

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

Formation Doctorale : Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental
Ecole Doctorale : Sciences de la Terre et de l'Eau

présentée et soutenue publiquement le 14 juin 2001 par

Idiko NEMETH

**DEVENIR DE L'AZOTE SOUS IRRIGATION
GRAVITAIRE. APPLICATION AU CAS D'UN PERIMETRE IRRIGUE
AU MEXIQUE**

JURY

M. François BRISSAUD
M. Claude CHEVERRY
M. Michel VAUCLIN
M. Luis RENDON
M. Florent MARAUX
M. Jean-Claude MAILHOL

Président
Rapporteur
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

RESUME

L'évaluation de l'impact environnemental des pratiques d'irrigation et de fertilisation des grandes cultures constitue un enjeu croissant dans la protection du milieu. Elle doit être associée à la recherche de solutions alternatives maîtrisables par les agriculteurs. Au niveau scientifique, cela implique d'une part l'analyse des phénomènes en cause à partir d'une approche expérimentale, d'autre part leur représentation à l'aide de modèles opérationnels pour des diagnostics et des études de scénarios alternatifs à l'échelle de la campagne agricole et ensuite de séries climatiques. Ce travail s'appuie sur une telle démarche pour traiter le cas d'une culture de maïs en irrigation à la raie avec une application dans un périmètre irrigué mexicain, dans le cadre d'une action à laquelle ont participé le Cemagref (France) et l'IMTA (Mexique).

Trois années d'études expérimentales à Lavalette (Montpellier, France) ont été mises à profit pour caractériser le comportement d'une culture de maïs et les bilans d'eau et d'azote sous irrigation par aspersion. Lors de la dernière campagne, des traitements irrigués en raie bouchée ont permis d'accéder à la variabilité des apports au sein des blocs de raies et de la répartition de l'eau et de l'azote minéral. Bien que les transferts hydriques locaux soient bidimensionnels, les bilans sont possibles à certaines périodes de la campagne.

L'ensemble de ces données a été utilisé pour modéliser les apports d'eau en irrigation à la raie à l'aide du modèle RAIEOPT et simuler les bilans d'eau, d'azote et la production à l'aide du modèle STICS. L'utilisation couplée, à l'échelle de la station expérimentale, des modèles RAIEOPT et STICS permet d'accéder, en tout point d'une parcelle aux bilans d'eau, de carbone et d'azote, dans la mesure où le calage des modèles est satisfaisant.

La méthodologie établie sur le site français a été mise en œuvre pour des diagnostics des pratiques agricoles sur le périmètre d'El Carrizo (Mexique). Les scénarios construits à partir de données expérimentales disponibles et d'enquêtes font apparaître le rôle positif du pilotage de l'irrigation tout comme des excès de fertilisation et d'irrigation dans un nombre important d'exploitations. Des pratiques améliorées adaptées aux contextes locaux ont pu être identifiées et sont à valider par des tests intégrant l'ensemble des contraintes agropédo-climatiques des agriculteurs.

Fate of nitrogen under surface irrigation: Application's case to a Mexican Irrigation District

SUMMARY

The assessment of environmental impact of irrigation and fertilization practices for extensive agriculture constitutes an increasing stake in the protection of the environment. It must be associated in searching controllable alternative solutions for growers. At scientific level, it implies at first the analysis of phenomena from a tentative approach, and after their representation using operational models for diagnoses and alternative scenarios studies of a season cycle scale and then of climatic sets. This work supported by such a procedure to treat the case of a furrow irrigation corn crop with an application in a Mexican irrigation district, in an action including Cemagref (France) and IMTA (Mexico) collaboration.

To characterize the behavior of a corn crop and water and nitrogen balances under sprinkler irrigation, three experimental years studies were carried in Lavalette (Montpellier, France). During the last crop cycle, the study of closed furrow irrigation treatments, allowed to understand the furrow blocks application as well as mineral nitrogen and water distribution. Although local hydrologic transfers are bi-dimensional, the balances were possible for some periods of the growing cycle.

The whole data sets has been used to modelise the water application in furrow irrigation using RAIEOPT model; and with STICS model simulating water and nitrogen balances and production. The linked models, STICS and RAIEOPT allowed at each plot point, the understanding of the water, the carbon and the nitrogen balances in because of the model calibration is satisfactory.

The methodology established on the French site has been used for agricultural practice diagnoses on El Carrizo (Mexico) irrigation district. The proposed scenarios elaborated from experimental disposable data and from enquiries towards growers, showed the importance of scheduling irrigation whereas excess of fertilization or irrigation in a great number of exploitations. The improved practices adapted to the local context could have been identified and may be validated by tests integrating the whole agro-pedo-climatic constraints.

MOTS-CLEFS

Irrigation à la raie, pollution azotée, expérimentation, modélisation, maïs, bilan hydrique, bilan azoté, Mexique

Furrow irrigation, nitrogen pollution, experimentation, modelisation, corn, water balance, nitrogen balance, Mexico

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION	1
<u>CHAPITRE 1 TRANSFERT D'EAU ET DE SOLUTÉS EN CULTURE IRRIGUÉE</u>	6
1.1 LE SYSTÈME SOL-PLANTE-ATMOSPHÈRE	6
1.1.1 La culture: le maïs	6
1.1.1.1 Besoin en chaleur de la plante	7
1.1.1.2 Effets du stress hydrique sur la plante	7
1.1.2 Le sol et ses caractéristiques	8
1.2 BILAN ET TRANSFERT HYDRIQUE	9
1.2.1 Equations fondamentales	9
1.2.1.1 Equation de conservation de la masse	9
1.2.1.2 La loi de Darcy	9
1.2.1.3 Equation de Richards	10
1.2.2 Variables descriptives et méthodes de mesure	10
1.2.2.1 Relation pression effective – teneur en eau	11
1.2.2.2 Relation conductivité – teneur en eau ou tension	12
1.2.2.2.1 Modèles de calculs de $K(h)$ et $K(\theta)$	12
1.2.2.2.2 Méthodes de détermination de $K(\theta)$ au champ	13
1.2.2.2.2.1 Méthode du plan de flux nul	13
1.2.2.2.2.2 Méthode du drainage interne	14
1.2.2.2.3 Limites d'utilisation des fonctions de pédo-transfert	14
1.2.3 Bilan hydrique « mesuré » au champ	14
1.2.3.1 ETP, ETM et ETR: rappel des définitions utilisées en agronomie	14
1.2.3.2 Calcul du bilan hydrique	15
1.2.3.3 Coefficient cultural k_c	16
1.2.3.4 Limites du bilan hydrique mesuré au champ	17
1.2.4 Bilan hydrique simulé selon le concept RU	17
1.2.4.1 Réserve utile	17
1.2.4.2 Limites du bilan hydrique simulé	18
1.3 BILAN ET TRANSFERT D'AZOTE	19
1.3.1 Cycle de l'azote dans les sols cultivés	19
1.3.1.1 Apports	20
1.3.1.1.1 Apports météoriques	20
1.3.1.1.2 Fixation symbiotique et non symbiotique	20
1.3.1.1.3 Fertilisation	20
1.3.1.2 Transformations	21
1.3.1.2.1 Minéralisation	21
1.3.1.2.2 Immobilisation (ou organisation)	22
1.3.1.3 Pertes	22
1.3.1.3.1 Adsorption par les plantes	22
1.3.1.3.2 Pertes par voies gazeuses: volatilisation et dénitrification	23
1.3.1.3.3 Pertes par voies hydriques	24
1.3.2 Lois du transfert d'azote	24
1.3.2.1 Equation de conservation de la masse	25
1.3.2.2 Equation de convection-dispersion	25
1.3.2.3 Calcul du stock d'azote dans le sol	26
1.3.2.3.1 Cas des bougies poreuses	26
1.3.2.3.2 Cas des prélèvements de sol	26
1.4 PRATIQUES CULTURALES	27
1.4.1 Fertilisation azotée	27
1.4.1.1 Quelle quantité d'azote apporter?	27
1.4.1.2 Date des apports de fertilisant	28
1.4.1.2.1 Pourquoi le fractionnement des apports d'engrais?	28
1.4.1.2.2 Difficultés pour le fractionnement des apports	29
1.4.1.3 Forme des apports	29
1.4.2 L'irrigation	30
1.4.2.1 Irrigation et risques environnementaux	30
1.4.2.2 Irrigation à la raie	31
1.4.2.2.1 Principe du fonctionnement de l'irrigation à la raie	31
1.4.2.2.2 Phases d'irrigation à la raie	32
1.4.2.2.3 Efficacité de l'arrosage gravitaire	32
1.4.2.2.4 Couple débit - temps d'arrosage	33
1.4.2.3 Variabilité de l'infiltration en irrigation à la raie	33
1.4.2.3.1 Variabilité spatiale à l'échelle de la raie	33

1.4.2.3.1.1 Hétérogénéité le long de la raie	33
1.4.2.3.1.2 Hétérogénéité entre le billon et la raie	34
1.4.2.3.2 Variabilité spatiale à l'échelle de la parcelle	34
1.4.2.3.3 La variabilité temporelle	35
1.5 CONCLUSIONS DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	35
CHAPITRE 2 EXPÉRIMENTATION	36
2.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'EXPÉRIMENTATION SUR LAVALETTE	36
2.1.1 Situation géographique	36
2.1.2 Caractéristiques du sol	36
2.1.3 Climat	37
2.1.4 La plante: maïs, variété Samsara	38
2.1.5 Description des traitements	39
2.1.5.1 Expérimentation en 1997 et 1998	39
2.1.5.2 Expérimentation en 1999	39
2.1.5.2.1 Traitements sous irrigation par aspersion	39
2.1.5.2.2 Traitements sous irrigation gravitaire	40
2.1.5.2.3 Sites de suivi en 1999	40
2.2 MATÉRIEL ET MESURES	41
2.2.1 Suivi des cinétiques et des bilans hydriques	41
2.2.1.1 Mesure de l'humidité	41
2.2.1.1.1 Mesure de l'humidité par sonde à neutrons	41
2.2.1.1.2 Mesure de l'humidité par méthode gravimétrique	41
2.2.1.1.3 Mesure de l'humidité par réflectométrie dans le domaine temporel (TDR)	42
2.2.1.2 Mesure de la charge hydraulique par les tensiomètres	42
2.2.2 Mesure des caractéristiques du déroulement de l'irrigation	43
2.2.2.1 Mesure de l'avancement	43
2.2.2.2 Mesure des débit en tête	43
2.2.3 Déterminations agronomiques	43
2.2.3.1 Suivi des stades phénologiques	43
2.2.3.2 Etude de l'indice foliaire (LAI)	43
2.2.3.2.1 Mesure manuelle de LAI	43
2.2.3.2.2 Mesure par Picqhélios	44
2.2.3.3 Détermination de la production de MS et du rendement final	44
2.2.3.4 Température de surface du couvert	45
2.2.4 Suivi des bilans et des flux d'azote	46
2.2.4.1 Prélèvement des échantillons du sol pour l'analyse d'azote	46
2.2.4.2 Mesure d'azote minéral du sol par bougie poreuse	46
2.2.4.3 Mesures des autres éléments du bilan d'azote	47
2.2.5 Critique des méthodes expérimentales: représentativité des échantillons et précision des mesures	47
2.2.6 Description des campagnes d'irrigation	48
2.3 RÉSULTATS AGRONOMIQUES	51
2.3.1 Conduite de la culture	51
2.3.2 Croissance-développement	51
2.3.3 Mesure du LAI	52
2.3.3.1 Calage du Picqhélios	52
2.3.3.2 Analyse des résultats de LAI	53
2.3.4 Température de surface du couvert	55
2.3.5 Enracinement	56
2.3.6 Rendement	57
2.3.6.1 Rendement en 1997	57
2.3.6.2 Rendement en 1998	58
2.3.6.3 Rendement en 1999	59
2.3.7 Conclusions partielles et critique des résultats	61
2.4 SUIVI DES BILANS ET FLUX D'EAU	62
2.4.1 Humidités caractéristiques et densités des parties Nord et Sud	62
2.4.1.1 Humidités caractéristiques	62
2.4.1.2 Densité apparente du sol	64
2.4.2 Cas des sites en aspersion	65
2.4.2.1 Evolution de l'état hydrique du sol en fonction des apports et de la fertilisation	65
2.4.2.1.1 Evolution des charges et gradients hydrauliques	65
2.4.2.1.2 Teneur en eau et stock	66
2.4.2.2 Evolution du plan de flux nul	67
2.4.2.3 Bilans hydriques sur les sites en aspersion	68
2.4.2.3.1 Evapotranspiration	68
2.4.2.3.2 Drainage	69
2.4.3 Cas de sites en irrigation gravitaire	70
2.4.3.1 Comparaison des humidités et des charges sous la raie et le billon	70
2.4.3.1.1 Comparaison des profils hydriques	71
2.4.3.1.2 Comparaison des humidités	72

2.4.3.1.3 Comparaison des charges	74
2.4.3.2 Bilan hydrique sur les sites gravitaires	76
2.4.3.2.1 Drainage et remontées capillaires à 140 cm	76
2.4.3.2.1.1 Flux a 140 cm sur le site Ta-moyen	78
2.4.3.2.1.2 Flux a 140 cm sur le site Ta-aval	79
2.4.3.2.1.3 Flux a 140 cm sur le site Te-aval	80
2.4.3.2.1.4 Flux a 140 cm sur le site Te-moyen	81
2.4.3.2.2 Evapotranspiration	81
2.4.3.2.2.1 Cas du site Ta-moyen	81
2.4.3.2.2.2 Cas des autres sites	83
2.4.4 Analyse de l'hétérogénéité d'apport d'eau en irrigation à la raie bouchée	83
2.4.4.1 Variabilité à l'échelle parcellaire	83
2.4.4.1.1 Variabilité des débits	84
2.4.4.1.2 Variabilité des temps d'arrivée entre blocs	84
2.4.4.1.3 Variabilité des temps d'arrivée entre raies d'un même bloc	85
2.4.4.2 Variabilité à l'échelle de la raie	87
2.4.4.2.1 Variabilité de la vitesse d'avancement le long de la raie	87
2.4.5 Estimation de l'apport d'eau à partir des mesures d'humidité	87
2.4.5.1 Apport mesuré par la sonde TDR Campbell	88
2.4.5.2 Apport mesuré par la sonde TDR Trase	88
2.4.5.3 Apport mesuré par la sonde à neutron	88
2.4.5.4 Variabilité d'apports observée le long de raie	89
2.4.5.5 Conclusion partielle	90
2.5 SUIVI DES BILANS ET FLUX D'AZOTE	91
2.5.1 Résumé des résultats de 1997 et 1998	91
2.5.1.1 Azote dans la plante	91
2.5.1.2 Bilan d'azote: Estimation de la minéralisation en 1998	92
2.5.2 Résultats de l'année 1999	93
2.5.2.1 Fertilisation	93
2.5.2.2 Teneur en azote de la plante	94
2.5.2.3 Analyse du stock d'azote du sol	95
2.5.2.3.1 Evolution du stock d'azote du sol sur les sites en aspersion	95
2.5.2.3.2 Hétérogénéité des stocks entre le billon et la raie	97
2.5.2.4 Concentration en azote de la solution des bougies poreuses	99
2.5.2.5 Comparaison des stocks d'azote obtenus par différentes méthodes	100
2.5.2.6 Calcul du lessivage à l'aide des bougies poreuses placées sous le billon	101
2.5.2.7 Bilan d'azote sur les sites de référence en aspersion et estimation de la minéralisation	102
2.5.2.7.1 Bilan d'azote jusqu'en août et estimation de la minéralisation	102
2.5.2.7.2 Bilan d'azote sur l'ensemble du cycle	103
2.5.2.8 Estimation des bilans d'azote sur les sites en irrigation gravitaire	104
2.5.3 Conclusions partielles sur les bilans d'azote	107
CHAPITRE 3 MODELISATION	109
3.1 GÉNÉRALITÉS SUR LA MODÉLISATION	109
3.1.1 Pourquoi le recours à la modélisation ?	109
3.1.2 Etapes principales de la modélisation	110
3.1.2.1 Calage du modèle	110
3.1.2.2 Validation du modèle	111
3.2 MODÉLISATION DE L'IRRIGATION À LA RAIE	111
3.2.1 Approche mécaniste: modèle hydrodynamique complet	112
3.2.2 Modélisation empirique	112
3.2.2.1 Approche hydrodynamique	112
3.2.2.2 Approche hydrologique ou "bilan-volume"	113
3.3 MODÈLE RAIEOPT	114
3.3.1 Objectifs du modèle	114
3.3.2 Fonctionnement du modèle	115
3.3.3 Calage du modèle	117
3.3.4 Validation du modèle Raieopt, ses limites	117
3.3.4.1 Validation de la phase prédictive de l'approche « temps réel »	117
3.3.4.2 Validation de la phase optimisation	118
3.3.4.3 Application du modèle dans le cas de raies bouchées	118
3.3.4.4 Variabilité spatiale et temporelle des paramètres du modèle	118
3.3.5 Options « prédictive » de Raieopt	119
3.3.5.1 Option M2P du modèle Raieopt	119
3.3.5.2 Option M3P du modèle RAIEOPT	119
3.4 LES MODÈLES DE CULTURES EN BREF	121
3.4.1 Simulation du transfert de l'azote dans les modèles de cultures	121
3.5 PRÉSENTATION DU MODÈLE STICS	122
3.5.1 Objectifs de STICS	123
3.5.2 Caractéristiques du modèle STICS	123

3.5.3 Rapport entre les modules de STICS.....	124
3.5.4 Bilan de carbone ou développement de la culture.....	125
3.5.4.1 Levée et développement post-levée.....	125
3.5.4.2 Phases de croissance et sénescence des feuilles.....	126
3.5.4.3 Croissance en biomasse des parties aériennes.....	127
3.5.4.4 Elaboration du rendement.....	127
3.5.4.5 Croissance racinaire.....	128
3.5.5 Bilan hydrique.....	129
3.5.5.1 Apports d'eau par irrigation.....	129
3.5.5.2 Evapotranspiration.....	130
3.5.5.2.1 Evaporation du sol.....	130
3.5.5.2.2 Besoins en eau des plantes - approche k_c * ETP.....	130
3.5.5.3 Drainage.....	131
3.5.6 Bilan d'azote.....	132
3.5.6.1 Apports d'engrais minéraux.....	132
3.5.6.2 Minéralisation.....	132
3.5.6.2.1 Minéralisation de l'humus.....	133
3.5.6.2.2 Minéralisation des résidus organiques.....	133
3.5.6.3 Prélèvement d'azote par la culture.....	133
3.5.6.3.1 Demande d'azote par la plante.....	134
3.5.6.3.2 Offre d'azote du sol.....	134
3.5.6.3.3 Indice de nutrition azotée.....	135
3.5.6.4 Lessivage de l'azote.....	135
3.6 RESULTATS DE LA SIMULATION PAR RAIEOPT.....	136
3.6.1 Calage du modèle.....	136
3.6.1.1 Calcul des coefficients B et Cs.....	136
3.6.1.2 Simulation de l'avancement de l'irrigation.....	137
3.6.2 Simulation de l'apport d'eau par le modèle Raieopt.....	137
3.6.2.1 Comparaison des doses observées et simulées sur les sites TDR.....	138
3.6.2.2 Comparaison des doses simulées et calculées à partir des mesures neutroniques.....	138
3.6.2.3 Hétérogénéité des doses simulées.....	139
3.6.3 Conclusion des simulations avec Raieopt.....	140
3.7 RESULTATS DU CALAGE ET VALIDATION DU STICS.....	141
3.7.1 Préparation des fichiers d'entrée du modèle.....	141
3.7.1.1 Fichier sol.....	141
3.7.1.2 Fichier climat.....	142
3.7.1.3 Fichier technique.....	142
3.7.1.4 Fichier plante.....	142
3.7.2 Calage du modèle STICS.....	143
3.7.2.1 Simulation avec le modèle sans calage.....	143
3.7.2.2 Développement de la culture.....	144
3.7.2.2.1 Croissance du LAI.....	144
3.7.2.2.2 Croissance en biomasse des parties aériennes.....	145
3.7.2.2.3 Elaboration du rendement.....	145
3.7.2.2.4 Croissance racinaire.....	146
3.7.2.3 Calage du bilan d'azote.....	146
3.7.2.3.1 Analyse d'absorption d'azote par la plante.....	146
3.7.2.4 Réajustement du bilan de culture.....	148
3.7.2.5 Conclusions sur la partie calage du STICS.....	149
3.7.3 Validation du modèle STICS sur les sites « en aspersion » en 1997, 1998 et 1999.....	149
3.7.3.1 Développement de la plante et rendement.....	150
3.7.3.1.1 Production de la MS et rendement.....	150
3.7.3.1.2 Evolution de l'indice foliaire (LAI).....	151
3.7.3.2 Bilan hydrique.....	151
3.7.3.3 Bilan d'azote.....	152
3.7.4 Test du modèle sur les sites gravitaires.....	153
3.7.4.1 Simulation du rendement.....	153
3.7.4.2 Simulation du drainage et du lessivage.....	154
3.7.5 Conclusions de la partie validation.....	155
3.7.6 Possibilités et limites de l'utilisation du modèle STICS.....	155
CHAPITRE 4 APPLICATION AU CAS DU MEXIQUE.....	157
4.1 LE MEXIQUE FACE AU DÉFI DE L'EAU.....	157
4.1.1 Ressources hydriques du Mexique.....	157
4.1.2 Agriculture irriguée au Mexique.....	158
4.1.3 Problèmes de pollution liés à l'agriculture.....	158
4.2 PRÉSENTATION DU PERIMÈTRE IRRIGUÉ «EL CARRIZO».....	159
4.2.1 Les raisons du choix de ce site expérimental.....	159
4.2.2 Climat de «El Carrizo».....	160
4.2.3 Type du sol.....	161

4.2.4 Occupation du sol.....	161
4.2.5 L'irrigation et fertilisation à «El Carrizo».....	161
4.2.6 Grandes lignes de la recherche sur le périmètre.....	163
4.2.6.1 Système de prévision des irrigations.....	163
4.2.6.2 Le programme de ferti-irrigation.....	163
4.3 EXPÉRIMENTATION EN «EL CARRIZO» EN 1998.....	164
4.3.1 Objectifs de l'expérimentation.....	164
4.3.2 Pratiques agricoles sur le site expérimental.....	164
4.3.2.1 Comment irriguer de manière optimale?.....	164
4.3.2.1.1 Doses et itinéraire des irrigations.....	164
4.3.2.1.2 Type d'arrosage.....	165
4.3.2.2 Comment fertiliser selon les pratiques améliorées?.....	165
4.3.2.2.1 Calcul de la dose d'azote minéral à apporter.....	165
4.3.2.2.2 Itinéraire de fertilisation.....	167
4.3.2.2.3 Formes des apports d'azote.....	167
4.3.2.3 Conduite de la culture.....	168
4.3.3 Résultats du suivi expérimental à «El Carrizo».....	168
4.3.3.1 Analyse du climat.....	168
4.3.3.2 Analyse du rendement.....	169
4.3.3.3 Analyse des irrigations à la raie.....	169
4.3.3.3.1 Analyse des débits.....	169
4.3.3.3.2 Analyse de l'avancement.....	170
4.3.3.3.3 Calculs des doses apportées.....	171
4.3.3.4 Suivi du fonctionnement hydrique.....	172
4.3.3.4.1 Humidité du sol.....	172
4.3.3.4.2 Analyse de la dynamique des écoulements.....	173
4.3.3.5 Suivi du bilan d'azote.....	174
4.3.3.5.1 Analyse de l'hétérogénéité du stock initial d'azote.....	174
4.3.3.5.2 Evolution du stock d'azote sur le site non fertilisé.....	175
4.3.3.5.3 Cas des sites fertilisés.....	176
4.3.4 Conclusion de la partie expérimentale.....	176
4.3.5 Calage des modèles Raiopt et STICS à partir d'expérimentations sur maïs d'hiver (Rosano, 1999).....	177
4.3.5.1 Préparation des fichiers d'entrée.....	177
4.3.5.2 Calage et validation du modèle Raiopt.....	178
4.3.5.3 Résultats des simulations avec STICS non calé.....	179
4.3.5.4 Résultats des simulations avec calage.....	179
4.4 RÉSULTATS DES ENQUÊTES ET DE L'ANALYSE DE BASES DE DONNÉES.....	180
4.4.1 Caractéristiques du maïs.....	180
4.4.2 Date de semis, taille des parcelles.....	180
4.4.3 Irrigations.....	181
4.4.4 Fertilisations.....	183
4.4.5 Rendements.....	184
4.4.6 Définition de scénarios types de maïs irrigué sur le périmètre.....	184
4.4.6.1 L'itinéraire technique.....	184
4.4.6.1.1 Identification des pratiques d'irrigation.....	184
4.4.6.1.2 Le climat.....	185
4.4.6.1.3 Le sol.....	186
4.4.6.1.4 Les conditions initiales.....	186
4.5 SIMULATIONS DES SCÉNARIOS.....	187
4.5.1 Scénarios des pratiques actuelles.....	187
4.5.1.1 Simulation des profils de dose infiltrée.....	187
4.5.1.2 Simulation du développement de la culture et effet des hétérogénéités d'apport.....	189
4.5.1.2.1 Effets des apports hétérogènes.....	189
4.5.2 Scénarios de pratiques alternatives.....	190
4.5.3 Conclusions.....	192
CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	193

INTRODUCTION

L'homme utilise son environnement comme une ressource inépuisable. Cependant, l'eau, une de ces ressources, est de plus en plus rare et précieuse. La rareté croissante de l'eau douce et le mauvais usage que l'on en fait menacent le développement durable. Malgré la pénurie, le gaspillage de l'eau est généralisé.

A première vue, la plupart des problèmes liés à l'eau ne semblent pas être directement liés au secteur agricole. Pourtant, c'est l'agriculture, qui est la plus forte consommatrice d'eau. Plus de 2/3 de l'eau tirée des cours d'eau, des lacs et des couches aquifères sert à l'irrigation. L'agriculture est non seulement la principale consommatrice d'eau dans le monde, mais elle en fait aussi un usage relativement peu valorisant et peu efficace.

Plus de 90 % de la surface irriguée dans le monde (et 92 % au Mexique) fait appel à l'irrigation gravitaire. Même s'il existe des méthodes plus ou moins sophistiquées permettant d'atteindre une excellente distribution de l'eau d'irrigation, seule une très faible proportion des usagers utilise ces techniques. Dans beaucoup de pays, l'application non contrôlée de l'irrigation gravitaire est la raison principale de la perte de l'eau en agriculture¹.

Malgré des investissements et des subventions considérables, les résultats concernant l'irrigation ne sont pas satisfaisants en matière d'accroissement des rendements et d'efficacité technique d'utilisation de l'eau. L'eau dérivée ou pompée à des fins d'irrigation peut être gaspillée dans une proportion atteignant 60 % (FAO, 1990). Quoique certaines pertes soient inévitables, bien trop souvent l'eau excédentaire s'infiltré dans le sol, donnant lieu aux phénomènes d'engorgement, de salinisation et de pollution des eaux et des sols.

L'intensification inconsidérée des activités agricoles a eu pour résultats la pollution des eaux souterraines par les engrais et autres produits chimiques. Les nitrates dégradent le milieu naturel et menacent la santé humaine. Si la pollution des nappes est essentiellement liée aux pollutions diffuses d'origine agricole, celle des cours d'eau subit les effets conjugués de pollutions ponctuelles (industrielle et domestique) et du ruissellement de pollutions agricoles. Les nitrates sont issus d'excès d'azote dans un compartiment du cycle de cet élément, et lorsqu'ils ne sont pas éliminés ou assimilés par la biomasse terrestre, ils conduisent à une dégradation du milieu naturel qu'il convient d'enrayer.

¹ Certains cas de conduites traditionnelles très performantes de l'irrigation de surface existent cependant (Vodicka, 2000), mais ils se rencontrent dans des régions présentant une longue tradition d'irrigation et avec une main d'œuvre abondante supportant de dures conditions de travail.

Les concentrations élevées de nitrates observés en Europe occidentale et dans les périmètres irrigués de la plupart des pays, sont imputables à l'utilisation excessive d'engrais azotés et de déjections animales en agriculture intensive. On peut aussi observer un accroissement spectaculaire de l'utilisation d'engrais dans les pays en développement, en particulier lorsque l'irrigation intensive permet d'effectuer deux, voire trois campagnes agricoles annuelles.

Les engrais azotés épandus sur les sols contiennent des nitrates ou des composés qui seront transformés en nitrates par la faune microbienne du sol. Même s'ils sont indispensables aux productions végétales, leur excès est néfaste car, très solubles dans l'eau, ils sont facilement entraînés.

L'irrigation est mise en cause pour sa contribution directe ou indirecte à la pollution. La nécessité d'un raisonnement conjoint de la fertilisation et de l'irrigation rend l'exercice de maîtrise des pollutions diffuses dues aux nitrates plus difficile (Mérillon et Evain-Bousquet, 1996). En culture irriguée, les facteurs affectant l'efficacité de l'absorption d'azote et pouvant être maîtrisés sont: ❶ la conduite de la fertilisation azotée: dose, forme et période d'application et ❷ la conduite de l'irrigation: équipement à la parcelle, gestion de l'apport d'eau. Les sols et le climat interviennent également sur la gestion d'azote, mais ne peuvent être maîtrisés par l'homme, qui doit les prendre en compte dans la conduite des cultures.

Pour éviter aux nitrates d'atteindre les nappes, il faut donc à la fois diminuer les apports, si ceux-ci sont excessifs (maîtrise de la fertilisation azotée), limiter les flux d'eau en apportant des doses inférieures à la capacité de rétention en eau du sol augmentée de l'évapotranspiration afin de ne pas déclencher de drainage, et favoriser le développement d'un couvert végétal capable de les absorber (culture, piège à nitrate).

Le lessivage d'azote est important dans les zones sur-irriguées (pertes pendant la campagne d'irrigation), et dans les zones sous-irriguées (déficit de consommation par la plante, entraînant un reliquat qui contribuera aux pertes après la campagne). L'amélioration de l'uniformité de l'irrigation permet une diminution significative de ces lessivages. Il est donc indispensable d'adapter les apports d'eau et d'azote aux besoins de la culture au cours du temps, en tenant compte également de l'hétérogénéité du sol.

Le degré actuel de pollution de l'eau justifie que l'on prenne des mesures pour prévenir tout accroissement de cette pollution. Or une protection adaptée de la ressource hydrique, notamment au regard des pollutions imputables à l'agriculture intensive, passe par une compréhension des mécanismes qui déterminent ces pollutions à l'échelle de la parcelle.

Les bilans hydriques et azotés s'avérant fortement dépendants des conditions pédoclimatiques, un recours à la modélisation est donc nécessaire pour pouvoir extrapoler des résultats expérimentaux obtenus dans une situation donnée, et appréhender les risques environnementaux liés aux aléas climatiques. La modélisation est alors indispensable pour disposer de capacités de simulation et de prévision,

permettant des diagnostics et des études de scénarios alternatifs pour aider à la protection de la ressource en eau.

Le présent travail traite de la pollution azotée en irrigation gravitaire, avec une application au Mexique pour le périmètre irrigué « El Carrizo », en s'appuyant sur le cas du maïs, culture avec des besoins en eau importants. De façon plus cruciale que dans les autres systèmes d'irrigation, le problème principal en irrigation gravitaire est la mauvaise uniformité des apports, qui se superpose et interfère avec celui du calendrier ou pilotage des irrigations. En effet l'intervalle de temps entre apports influe sur l'état de dessèchement du sol et la répartition de l'eau.

Ce thème qui concerne de nombreux pays et tout particulièrement le Mexique et les pays Méditerranéens, a pu être abordé grâce à une action de recherche à laquelle ont participé directement pour la France, le Cemagref, et pour le Mexique l'IMTA², la CNA³, le CONACYT⁴ et AUVC⁵. Elle est inscrite en France dans le cadre d'une ASS⁶ Cemagref – INRA et de collaborations avec le CNRS LTHE⁷ et le CIRAD-AMIS⁸ en liaison avec le PCSI⁹.

L'étude réalisée analyse les conséquences des pratiques (actuelles et proposées) conjuguées d'irrigation gravitaire et de fertilisation azotée sur le risque de pollution des nappes et sur le rendement de la culture. Les objectifs de la thèse sont:

- ❶ Mettre en évidence et caractériser l'hétérogénéité d'apport d'eau en irrigation gravitaire - le long d'une raie et entre raies - et leur importance à l'échelle de la parcelle.
- ❷ Analyser l'impact de l'hétérogénéité des apports sur le rendement et les pertes d'azote en prenant en compte les spécificités de l'irrigation à la raie (notamment des conséquences des transferts bidimensionnels).
- ❸ Élaborer une méthodologie de diagnostic des pratiques des irriguants et d'étude de scénarios alternatifs.
- ❹ Réaliser une première application de la méthode proposée sur un cas au Mexique.

Afin d'être cohérent avec l'objectif final, il importe donc d'aboutir à des approches opérationnelles qui puissent être utilisées sur des parcelles d'agriculteurs. Aussi, plutôt que de définir de manière fine les transferts d'eau et d'azote et le fonctionnement de la plante à l'échelle locale, il a été retenu de caractériser les différences rencontrées le long des raies afin d'appréhender les phénomènes à l'échelle de la parcelle et sur l'ensemble d'une saison de culture.

² IMTA Institut Mexicain de Technologie de l'Eau

³ CNA Commission Nationale de l'Eau

⁴ CONACYT Conseil National pour la Science et la Technologie (financement de la thèse)

⁵ AUVC Association des Usagers de Valle del Carrizo

⁶ ASS Action Scientifique Structurante – INRA Sciences du Sol et Bioclimatologie d'Avignon, Agronomie de Laon

⁷ LTHE de Grenoble

⁸ AMIS SOLEMI de Montpellier

⁹ PCSI Programme Commun Systèmes Irrigués Cemagref-Cirad-IRD

Les aspects méthodologiques sont abordés à partir d'une expérimentation conduite sur une parcelle de la station expérimentale de Lavalette du Cemagref Montpellier. Une partie seulement des données expérimentales acquises, compte tenu du temps disponible pour cette thèse, est mise à contribution dans le travail présenté. La démarche validée sur ce site est ensuite utilisée pour le cas-type retenu du Mexique. Des enquêtes et une expérimentation ont été réalisés en parallèle à « El Carrizo » afin de caractériser les pratiques d'irrigation et de fertilisation, ainsi que les conditions pédo-climatiques locales.

Il convient de noter qu'afin de se placer dans les conditions exigées pour économiser l'eau (en cas de pénurie), mais les plus défavorables au niveau de la maîtrise des apports, une partie de l'étude est conduite selon la technique de la raie bouchée (absence d'évacuation d'eau en bout de raie). D'autre part, des pratiques culturales appliquées sur le périmètre irrigué « El Carrizo » ont été partiellement mises en œuvre sur le site de Lavalette.

Deux modèles de simulation déjà disponibles sont utilisés dans ce travail. Le modèle Raieopt (Mailhol, 1992) nous permet d'estimer les doses apportées par les irrigations gravitaires, à partir des caractéristiques du sol et des irrigations (couple débit - temps d'irrigation). Le modèle STICS (Brisson et al, 1998) est utilisé pour simuler les effets des différentes pratiques d'irrigation et de fertilisation sur le rendement et le lessivage d'azote. Ce modèle de type capacitif est à priori mal adapté au caractère bi-dimensionnel des transferts d'eau et de solutés caractérisant l'irrigation à la raie, une attention particulière a donc été portée aux conditions dans lesquelles il peut cependant être utilisé avec ce type d'irrigation.

Le calage et la validation du modèle sont d'abord réalisés à partir d'observations en irrigation par aspersion dans un contexte mono-dimensionnel. Ces conditions permettent d'analyser la pertinence du modèle dans le contexte étudié.

La démarche de modélisation est ensuite appliquée en cas d'irrigation à la raie en couplant les deux modèles; les prédictions et « mesures » des bilans environnementaux et culturaux seront confrontés. Enfin un exemple illustre sur un cas du Mexique les possibilités d'étude, à l'aide du modèle couplant Raieopt et STICS, des risques de lessivage et de leur impact sur le rendement en liaison de paramètres techniques (date de semis, dose de fertilisation, calendrier des irrigations).

Ce document s'organise de la manière suivante:

Dans le **premier chapitre** sont rappelés brièvement les concepts et connaissances de base nécessaires à la compréhension du problème traité. Son rôle est de rendre ce travail plus facilement accessible aux non spécialistes, en rassemblant des informations concernant plusieurs disciplines.

Le **deuxième chapitre** est consacré à la partie expérimentale. Il décrit les suivis des processus de transfert dans le continuum eau-sol-plante-atmosphère pour différents traitements de références ou représentatifs de pratiques d'irrigation et de fertilisation. Les résultats agronomiques de trois années de

maïs irrigué par aspersion (1997, 1998 et 1999), sont présentés et discutés en vue de leur utilisation pour effectuer des comparaisons avec le modèle de culture. Les traitements en irrigation à la raie de la campagne 1999 sont analysés en détaillant les données obtenus au droit de la raie et sur le billon, et aux différents points le long de la raie.

Le **troisième chapitre** est consacré à la modélisation. Une première partie détaille les spécificités des modèles Raieopt et STICS à l'aide d'une description succincte des bases sur lesquelles ils s'appuient. Ensuite la paramétrisation puis le calage est abordé pour chacun d'eux pour les expérimentations décrites dans le chapitre précédent. Enfin la confrontation des sorties des modèles à d'autres observations permet de préciser l'intérêt et les limites d'une méthodologie reposant sur le couplage des deux modèles pour représenter les pratiques d'irrigation à la raie.

Le **quatrième chapitre** est consacré à l'étude de cas du Mexique. Il rassemble les résultats obtenus lors d'étude expérimentale, ainsi que ceux issues d'enquêtes ou de la base de données du périmètre irrigué de « El Carrizo », au Mexique. Ces observations sont replacées dans le contexte local afin de mettre en évidence les problèmes liés à l'utilisation de l'eau et des fertilisants et l'acuité du problème abordé. Elles ont été utilisées pour définir des scénarios à El Carrizo et analyser à partir de simulations les risques liés aux pratiques actuelles de fertilisation et d'irrigation. Des scénarios alternatifs ont ensuite été construits pour proposer des pratiques compatibles avec le développement d'une agriculture durable dans le contexte mexicain.

CHAPITRE 1 TRANSFERT D'EAU ET DE SOLUTES EN CULTURE IRRIGUEE

Ce chapitre reprend certaines notions de base qui sont utilisées soit pour traiter les données expérimentales soit dans la modélisation et en particulier dans le modèle de culture.

1.1 LE SYSTEME SOL-PLANTE-ATMOSPHERE

L'étude de l'impact environnemental lié à une d'une culture peut s'aborder à l'aide de bilans effectués aux limites d'un système sol-plante, en vue de quantifier les flux entrants et sortants d'eau et d'azote. La dynamique de l'azote est soumise aux interactions complexes entre le sol, le climat, les techniques culturales et le peuplement cultivé (Turpin et al., 1997).

1.1.1 La culture: le maïs

Le maïs, *Zea mays*, est une céréale annuelle de grande taille (1 à 4 m), originaire d'Amérique centrale. Etant originaire de régions chaudes et humides, les deux facteurs principaux limitants pour le développement du maïs sont donc la température et l'humidité (FAO, 1979). Le cycle de développement du maïs comporte trois phases principales (Tableau 1).

Tableau 1 Phases principales du développement du maïs (d'après AGPM, 1998)

Phase de préfloraison	Phase de floraison et de latence	Phase de remplissage du grain
du stade 7-8 feuilles jusqu'à la sortie des panicules males croissance importante mise en place des pièces florales	émission de pollen fécondation puis formation du grain pendant 10-15 jours après la fécondation le nombre de grains est quasiment définitif	du stade laiteux à la maturité physiologique

Le maïs peut se développer dans tous les types de sols, pourvu qu'ils soient profonds. Il semble, cependant, préférer les sols riches en éléments fins et en matière organique, à pH compris entre 5,5 et 6,5. Le maïs est modérément sensible à la salinité du sol (Tableau 2).

Tableau 2 Tolérance du maïs à la salinité en fonction du rendement espéré (d'après FAO, 1979 et Ojeda et al, 1999)

rendement	100 %	90 %	80 %	50 %
Conductivité (dS/m)	1.7	2.3	3.3	4.8

La période de consommation importante d'éléments minéraux coïncide sensiblement avec la période de besoins importants en eau. C'est en effet à ce moment que se situe l'accumulation de la matière sèche dans la plante et la croissance du grain. En conditions favorables, le gain journalier de matière sèche varie de 140 à 200 kg/ha pour les variétés précoces. En moyenne, la production maximale de matière sèche est atteinte de 50 à 70 jours après la floraison femelle.

1.1.1.1 Besoin en chaleur de la plante

Le maïs est très sensible à la gelée, mais il tolère les conditions atmosphériques chaudes et sèches, si l'eau est disponible en quantité suffisante pour son développement (FAO, 1996). Pour les maïs utilisés en Europe, on considère que le limite de germination est voisin de 6°C (Tableau 3), et entre 6 et 10°C, la germination est lente. La somme de température semis-levée considérée est de 150 à 180 °C, soit 6 à

Tableau 3 Sommes de températures en différentes régions pour différentes variétés (FAO, 1996)

	Europe	Mexique
Température base	6	10
Variétés précoces	1500	1800
Variétés semi-tardives	1800	2500 - 3000
Variétés tardives	2000	3700 ou plus

20 jours. Les maïs précoces (les moins exigeants en chaleur) requièrent pour accomplir leur cycle une somme des températures de 1500°C en base 6°C, tandis que les maïs tardifs ont besoin de 2000°C, d'après les références européennes (Tableau 3).

Par contre, les valeurs données par la FAO pour les régions du Mexique sont différentes (Tableau 3) et les valeurs en somme de températures sont calculées en base 10°C. Si la température moyenne journalière est plus de 20°C, les variétés précoces ont une durée de cycle de 80 à 110 jours, et les variétés intermédiaires de 110 à 140 jours, du semis à la récolte. D'une façon générale, la température définit, au niveau spécifique et variétal, l'aire géographique de la culture du maïs.

1.1.1.2 Effets du stress hydrique sur la plante

La croissance et la production d'une culture diminuent rapidement si l'état hydrique, ou plus précisément le potentiel hydrique foliaire s'écarte d'une valeur critique (Katerji, 1987). Le poids des récoltes sera fonction de la quantité d'eau dont dispose le sol, mais il n'existe pas de loi précise liant ces deux quantités.

Il paraît utile de rappeler que si la matière végétale contient de 60 à 95 % d'eau (eau constitutive et eau circulant dans les vaisseaux), soit 0.9 kg d'eau par kg de matière sèche (MS), c'est 400 à 1000 kg d'eau que la plante utilisera pour chaque kg de MS qu'elle produira (Ollier, 1983).

Les périodes critiques de déficit hydrique pour le maïs sont la floraison et la formation des grains. De nombreux auteurs (Lacroix, 1987; Ouattar et al., 1987, Robelin, 1987; Deumier, 1987; Otegui et al., 1995) ont rapporté l'effet du stress hydrique aux différentes phases du cycle du maïs (Tableau 4). Entre ces différentes phases il n'y a pas indépendance: l'évolution de la surface foliaire, l'importance des réserves accumulées réutilisables et les relations source - puits (appareil foliaire - grains) sont des éléments d'interdépendance. Par ailleurs, tout au long du cycle, une des premières réactions au stress hydrique s'observe par le flétrissement des feuilles puis la perte de surface foliaire (sénescence).

D'une manière globale, la période de sensibilité du maïs à la sécheresse va du stade 8-10 feuilles visibles, jusqu'au stade grain pâteux avec une sensibilité maximale de 15-20 jours avant la floraison mâle à 15 jours après (stade laiteux). Un manque d'eau durant cette période peut entraîner une réduction très importante du rendement (jusqu'à 50 %).

Le déficit hydrique réduit la hauteur de la plante, l'indice foliaire maximal, et la biomasse des bourgeons.

Tableau 4 Effet de stress hydrique sur l'élaboration du rendement du maïs (d'après Lacroix, 1987, Deumier, 1991)

Phase	effet du stress hydrique
Végétative	ralentissement de la croissance de la surface foliaire incidence sur la croissance racinaire
Montaison	Diminution de la croissance racinaire et foliaire (incidence sur l'interception lumineuse) Réduction de l'activité photosynthétique, de la croissance de la tige et du stockage d'assimilants Incidence possible sur le nombre d'ovules fécondés (nombre de grains potentiels)
Floraison et fécondation	Abaissement du nombre de grains (défaut de fécondation, absence d'épi, avortement)
Latence	ralentissement de la photosynthèse réduction du stockage d'assimilants dans la tige, les grains et les racines diminution du nombre de grains (avortement) et son poids potentiel
Remplissage du grain	arrêt de photosynthèse remobilisation vers le grain d'assimilants précédemment stockés abaissement du poids de 1000 grains

La dose apportée a un effet significatif sur le rendement, le nombre de grain par épi et la hauteur des plantes; et un léger effet non significatif sur le poids de 1000 grains (Lacroix, 1987; Ouattar, 1987). Quand le grain atteint 45 % de matière sèche, l'eau apportée n'est plus valorisée. Cependant aucun indice visuel ne permet d'identifier ce stade. La mesure de l'humidité des épis à mi-août

permet de calculer celle des grains. A partir de 50 % d'humidité, et quelles que soient les années, le maïs se dessèche de la même façon, il est donc possible d'évaluer la date à laquelle le maïs atteindra le stade 45 % (Vallin, 1999).

La réponse de l'enracinement à l'humidité est parfois complexe à analyser: des teneurs en eau soit excessives soit insuffisantes ont également pour effet de limiter l'extension des racines. Dans le premier cas c'est surtout par défaut d'aération du milieu, dans le second surtout par élévation de la résistance à la mécanique opposée par le sol.

1.1.2 Le sol et ses caractéristiques

Les interactions entre les propriétés du milieu et la croissance de la plante ont plusieurs origines principales (Foth, 1978): les propriétés physiques du sol, sa teneur en eau et en éléments minéraux. Nous n'aborderons pas ici le rôle de la salinité qui n'intervenait pas dans le travail réalisé.

Le rôle du sol dans le risque de pollution est important, car c'est le lieu de production et de stockage de substances chimiques (Van Diest, 1994), et également la voie principale de transfert des polluants de la parcelle cultivée vers les milieux susceptibles d'être contaminés comme: l'air, l'eau et le sol. Etant lui-même constitué par un mélange de trois phases (gaz, liquide, matrice solide), le sol a la capacité de redistribuer les polluants entre ces trois phases, en fonction des propriétés d'adsorption ou des capacités d'échange et de l'action des micro-organismes (Verrel, 1995). Selon sa structure et son humidité, le sol oppose une résistance (plus ou moins variable selon les directions) à la progression des racines (Caillot et al., 1983).

Du point de vue des propriétés physiques, hydriques et mécaniques, le sol est considéré comme un milieu poreux (Hillel, 1980). La redistribution de l'eau arrivant au sol est largement conditionnée par

les propriétés hydriques (rétention hydrique, conductivité hydraulique) des sols. Ces propriétés sont contrôlées par la structure et la texture des milieux poreux, très variables tant verticalement (selon les horizons dans les profils de sol) que latéralement (suivant les formations superficielles).

Le comportement hydrique du sol est régi par: ❶ la quantité des eaux d'infiltration pénétrant dans le sol, ❷ la dynamique de l'eau dans les horizons et les phénomènes de remontées capillaires et ❸ l'importance de la succion racinaire et l'évapotranspiration de la plante.

Les analyses du sol démontrent l'extrême hétérogénéité et complexité du sol et les variations rapides des structures qui peuvent exister à quelques mètres de distance, à travers lesquels la dynamique de l'eau est souvent complexe, ce qui explique l'irrégularité de développement du couvert végétal (Caillet et al., 1983, Ruelle, 1995). Les hétérogénéités sont considérablement atténuées dans les horizons de culture et dans les couches organiques où l'activité biologique est très intense. Par contre, dans les horizons sous-cultureux et les couches profondes, ces hétérogénéités sont très fréquentes.

L'analyse de différents paramètres hydrodynamiques permet la description de la circulation de la phase liquide. Ces paramètres seront abordés à travers la présentation du bilan et du transfert hydriques.

1.2 BILAN ET TRANSFERT HYDRIQUE

1.2.1 Equations fondamentales

1.2.1.1 Equation de conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse, appliquée en-dehors de la zone racinaire, ou intégrée sur un profil de sol incluant totalement l'enracinement, s'écrit:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad \text{Équation 1}$$

θ	teneur en eau volumique densité volumique [mm ³ .mm ⁻³]
t	temps [s]
z	profondeur [cm]
q	densité volumique de flux d'eau [mm.s ⁻¹]

1.2.1.2 La loi de Darcy

La première des relations d'hydrodynamique, proposée par Darcy (1856) pour les milieux saturés et étendue aux milieux non saturés, traduit la proportionnalité entre les flux d'eau et le gradient de charge hydraulique. Dans le cas d'un flux vertical:

$$q = -K(h) \frac{dH}{dz} \quad \text{Équation 2}$$

q	flux d'eau ou vitesse de Darcy [mm.s ⁻¹]
$K(h)$	conductivité hydraulique [mm/s]
h	tension matricielle ou succion [mm]

La conductivité hydraulique exprime la capacité du sol à transmettre l'eau suivant son état de saturation exprimé en fonction de θ ou h (cf. 1.2.2.2), et elle atteint sa valeur maximale à saturation (K_s). Le gradient de charge hydraulique permet de déterminer le sens de déplacement des flux hydriques. Si la relation $K(h)$ est connue, les flux hydriques tels que les remontées capillaires et le drainage peuvent être déduits par application de la loi de Darcy en utilisant les données tensiométriques.

H est la charge hydraulique à la cote z , et s'exprime en fonction de la pression de l'eau dans le sol par: $H = h - z$. Toute différence de charge entre deux points à des profondeurs différentes induira un écoulement dans le sens des charges décroissantes. L'Équation 2 peut donc s'écrire:

$$q = -K(h) \left(\frac{dh}{dz} - 1 \right) \quad \text{Équation 3}$$

1.2.1.3 Equation de Richards

Richards (1931) a introduit le concept de capacité capillaire C_w (m^{-1}) qui exprime la facilité avec laquelle un sol libère ou emmagasine de l'eau quand il est soumis à une variation de pression:

$$C_w(h) = \frac{d\theta}{dh} \quad \text{Équation 4}$$

Cette valeur est aussi l'inverse de la pente de la courbe de rétention en eau. En utilisant les trois équations précédentes on obtient l'équation du mouvement:

$$C_w(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad \text{Équation 5}$$

Cette équation est connue comme étant l'équation de Richards (1931). La présence des fonctionnelles $K(h)$ et $C_w(h)$ et leurs fortes variations avec la pression (h) ou l'humidité (θ), confèrent à cette équation un caractère fortement non linéaire.

1.2.2 Variables descriptives et méthodes de mesure

L'écoulement de l'eau dans un sol agricole non saturé est un phénomène physique complexe où les phases présentes sont en interaction permanente, dans un domaine soumis à des contraintes thermiques et mécaniques (Rendon, 1987). A tout instant, l'état hydrique d'un milieu poreux non saturé peut être défini par ses variables d'état: ❶ la teneur en eau volumique (θ), définie comme le volume d'eau présent dans un volume unitaire du sol et ❷ la pression effective de l'eau (h), définie comme la différence entre la pression de l'eau dans le sol et la pression atmosphérique, et exprimé en terme de hauteur de colonne d'eau. Dans la zone saturée, ce terme est négatif.

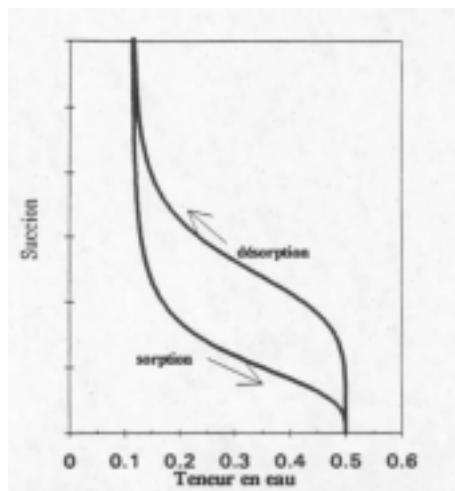
Il est possible, pour un sol donné de relier la pression à la teneur en eau par une relation phénoménologique, $h(\theta)$, appelé courbe de rétention en eau.

1.2.2.1 Relation pression effective - teneur en eau

La relation $h(\theta)$ est une caractéristique d'un sol donné, dépendant de l'organisation géométrique de ses particules, de leur agrégation, et d'autres données chimiques ou biologiques (Kutilek et Nielsen, 1994). La courbe de rétention $h(\theta)$ lie la teneur en eau volumique à la pression effective et exprime la capacité du sol à retenir l'eau en fonction de la succion exercée. La relation fonctionnelle entre la teneur en eau du sol et la succion est déterminée soit in situ, soit au laboratoire.

La relation entre le potentiel matriciel (h) et la teneur en eau (θ) du sol n'est pas unique et monotone (Figure 1) pour un sol donné (Thony, 1970, Hillel, 1974), car cette relation peut être obtenue de deux façons: par désorption et par sorption. Lors de la désorption, on commence avec un échantillon initia-

Figure 1 Courbes caractéristiques de l'humidité du sol en sorption et désorption



lement saturé et on applique des succions croissantes afin de sécher le sol graduellement tout en mesurant successivement la teneur en eau en fonction de la succion.

L'autre méthode utilise la sorption, en mouillant graduellement un échantillon de sol initialement sec en réduisant la succion. Les courbes obtenues en drainage et en humification sont différentes, et d'autant plus significativement que le sol est argileux. Il importe donc de bien spécifier les conditions de l'écoulement: humectation ou dessèchement. Cette dépendance entre la teneur en eau et l'état de l'eau du sol à l'équilibre selon la direction du processus y conduisant est appelé hystérésis.

A l'aide de mesures de potentiel $h(z, t)$ et de la reconstitution des profils de teneur en eau $\theta(z, t)$, il est possible de reconstituer la courbe de rétention $h(\theta)$ et $\theta(h)$ selon par exemple le modèle de van Genuchten (1980):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (-\alpha \cdot h)^n\right)^m} \quad \text{Équation 6}$$

θ_r teneur en eau résiduelle [$m^3 m^{-3}$]
 θ_s teneur en eau à saturation [$m^3 m^{-3}$]
 α, n paramètres de forme
 $m=(1-1/n)$ avec le modèle de Maulem ou $m=(1-2/n)$ avec celui de Burdine

D'autres expressions sont proposées par la littérature, comme par exemple le modèle de Campbell (1985):

$$h(\theta) = h_e \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b} \quad \text{Équation 7}$$

h_e potentiel d'entrée d'air [cm]
 b paramètres de forme

Le modèle précédent est proche de celui de Brooks et Corey (1964):

$$\hat{e}_e = \left(\frac{h_e}{h} \right)^{\lambda_p} \quad \text{Équation 8}$$

$$\hat{e}_e = \frac{\hat{e} - \hat{e}_r}{\hat{e}_s - \hat{e}_r} \quad \text{Équation 9}$$

λ_p paramètre de distribution des pores

1.2.2.2 Relation conductivité - teneur en eau ou tension

La connaissance de la conductivité hydraulique $K(\theta)$ ou $K(h)$ est un préalable au calcul du flux de drainage par la loi de Darcy et pour la mise en œuvre de la modélisation des transferts hydriques et de solutés selon l'approche mécaniste.

La courbe de conductivité hydraulique $K(h)$ ou $K(\theta)$ caractérise la capacité du milieu à transmettre l'eau en fonction de son état énergétique ou de son état de saturation. L'importance que revêt la conductivité hydraulique pour la description de la dynamique de la phase liquide font de sa détermination un aspect essentiel de l'évaluation des processus de transfert.

1.2.2.2.1 Modèles de calculs de $K(h)$ et $K(\theta)$

Nous disposons de plusieurs formules pour calculer $K(h)$ ou $K(\theta)$, par exemple celle de Mualem (1976):

$$K(\hat{e}) = K_s \cdot \Theta^\lambda \left[1 - \left(1 - \Theta^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad \text{Équation 10}$$

$$\Theta = \frac{\hat{e} - \hat{e}_r}{\hat{e}_s - \hat{e}_r} \quad \text{Équation 11}$$

n, λ
 m paramètres de forme
= $1-1/n$

Le modèle de Brooks et Corey (1964) estime la conductivité en fonction de l'humidité:

$$K(\hat{e}) = K_s \cdot \left(\frac{\hat{e} - \hat{e}_r}{\hat{e}_s - \hat{e}_r} \right)^m \quad \text{Équation 12}$$

m paramètre de forme et $m=2b+3$ selon Campbell (1985)
 b paramètre obtenu lors du calcul de la relation $h(\theta)$ avec la formule de Campbell (1995)

Le modèle de Gardner (1964) calcule la conductivité en fonction de la longueur capillaire λ_c et de la tension:

$$K(\hat{e}) = K_s \cdot e^{-\frac{h}{\lambda_c}} \quad \text{Équation 13}$$

Dans le modèle de Campbell la conductivité est estimée à partir de la tension:

$$K(h) = K_s \left(\frac{h_e}{h} \right)^n$$

n paramètre de forme et $n=2+3/b$
 h_e paramètre obtenu lors du calcul de la relation $h(\theta)$ avec la formule de Campbell (1995)

Stolte et al. (1994) comparent six méthodes de laboratoire pour la détermination de la conductivité non-saturée. Selon ses observations, la conductivité estimée est influencée par la méthode utilisée. Nous n'allons pas détailler ses méthodes, par contre nous décrivons de manière résumée les méthodes de détermination de $K(\theta)$ au champ.

1.2.2.2 Méthodes de détermination de $K(\theta)$ au champ

Dans l'hypothèse d'un écoulement essentiellement vertical, deux méthodes permettent de déterminer au champ sous culture et sur sol nu la relation $K(\theta)$: ❶ la méthode du plan de flux nul et ❷ la méthode du drainage interne.

1.2.2.2.1 Méthode du plan de flux nul

La méthode du plan de flux nul (PFN) consiste à suivre l'évolution naturelle, sous culture ou en sol nu, des teneurs en eau et des pressions entre deux épisodes pluvieux relativement éloignés. Dans cette situation, quelques jours après la pluie, le sol présente une zone supérieure soumise à l'évaporation (écoulement ascendant) et une zone en profondeur soumise au drainage (écoulement descendant). Par continuité, il existe entre ces deux zones un niveau où le flux est nul (plan de flux nul), qui correspond d'après la loi de Darcy à un maximum du profil de charge $H(z)$ avec $dH/dz=0$. La position de ce plan peut être aisément repérée sur les profils de charge hydrauliques, et la cote de ce plan, z_0 , évolue dans le temps (Vachaud et al., 1978; Kutilek et Nielsen, 1994). La variation de stock entre deux instants ($t_2 - t_1 = \Delta t$), compris entre z_0 et un niveau de référence Z correspond au flux (q), et la conductivité hydraulique est calculée par la loi de Darcy:

$$K_z(\hat{e}) = - \frac{q}{dH / dz} \quad \text{Équation 15}$$

Cette méthode présente l'avantage de conduire à l'estimation simultanée du drainage et de l'évaporation: la variation de stock entre la surface du sol et le plan de flux nul moyen entre deux dates représente l'évaporation, tandis que celle au-dessous correspond au drainage.

Par contre, la méthode est tributaire de la présence d'un plan de flux nul dans le profil, qui doit de plus être situé au delà de la profondeur maximale d'enracinement si une culture est en place. Il convient en outre de disposer d'une période de ressuyage assez longue pour couvrir une gamme d'humidité conséquente. Enfin, cette méthode est quelque peu délicate à mettre en œuvre en raison de la difficulté à faire apparaître le PFN et à suivre son évolution. Pour raison de précision, durant le pas de mesure (Δt), les variations de teneur en eau et le gradient de charge doivent être faibles.

1.2.2.2.2 Méthode du drainage interne

La méthode de détermination in situ la plus utilisée est celle du drainage interne. Elle repose sur l'analyse de la redistribution de l'eau dans un profil vertical du sol, après une humification par un apport d'eau à sa surface à l'aide d'infiltromètres simples ou double-anneaux ou de simulateurs de pluie. La mesure simultanée des variations d'humidité et de charge hydraulique dans le profil de sol permet alors d'obtenir, à différentes profondeurs, les caractéristiques hydrodynamiques du sol considéré: relation entre la pression, la teneur volumique en eau et la conductivité hydraulique (Vauclin et Vachaud, 1987).

On fait habituellement se succéder deux phases: l'une où l'on maintient un flux nul en surface en couvrant le sol, qui consiste la phase de drainage interne proprement dite, et une seconde où l'on ramène au cas précédent en découvrant la surface du sol.

1.2.2.3 Limites d'utilisation des fonctions de pédo-transfert

Les propriétés hydrodynamiques des sols sont difficiles à mesurer en raison de la lourdeur des protocoles de mesure. Des études ayant pour objet l'établissement de relations permettant de les estimer à partir de caractéristiques du sol aisément accessibles se sont alors développées au cours des deux dernières décennies (Campbell, 1985; Verreken et al., 1990).

Ces fonctions de pédotransfert (FPT) constituent un ensemble hétérogène d'outils d'estimation des propriétés de rétention en eau et de façon plus large, de propriétés physiques et chimiques des sols. Dans leur grande majorité, les FPT utilisables pour les propriétés hydrodynamiques du sol sont des relations statistiques établies entre un ensemble de caractéristiques du sol (composition granulométrique, densité sèche, teneur en matière organique, etc.) et une teneur en eau et une valeur de potentiel. Elles sont par conséquent autant de modèles empiriques de la relation liant les propriétés hydrodynamiques d'un sol à sa composition. (Bruand et al., 2000).

1.2.3 Bilan hydrique « mesuré » au champ

1.2.3.1 ETP, ETM et ETR: rappel des définitions utilisées en agronomie

Les besoins de la plante sont fixés par la demande évaporative de l'air: l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'ETP est définie comme « la quantité d'eau transpirée par unité de temps par un gazon bien alimenté en eau, recouvrant complètement le sol et de hauteur uniforme » (Penmann, 1948).

La consommation en eau d'une plante au cours de son cycle végétatif est irrégulière, et sa traduction graphique est d'allure approximativement parabolique. Le maximum survient au moment de la floraison, le minimum en fin de maturation. Les facteurs qui déterminent la transpiration sont d'une part des facteurs climatiques (lumière, chaleur et humidité atmosphériques); et d'autre part les facteurs phy-

siologiques, comme la nature du végétal, le développement foliaire (caractérisé par la LAI) et l'activité d'assimilation et de synthèse de la plante.

L'ETM (évapotranspiration maximale) est définie comme la consommation en eau maximale d'un couvert végétal bien alimenté en eau. Elle peut être soit mesurée directement, soit calculée à partir de l'ETP par la relation $ETM = k_c \times ETP$, où k_c représente le coefficient cultural, qui dépend du stade de développement de la culture.

L'ETR (évapotranspiration réelle) est la consommation en eau réelle de la culture. Elle dépend des conditions climatiques, du type de culture, du stade phénologique de la plante et des conditions d'humidité du sol. Ainsi, suivant que le sol peut fournir toute l'eau demandée par la plante ou non, l'ETR sera égale ou inférieure à l'ETM. L'ETR peut être calculée à l'aide du bilan hydrique réalisé à partir de suivi du stock de l'eau dans le sol.

Il convient de remarquer que l'ETM et l'ETR prennent en compte à la fois l'eau transpirée par les plantes et évaporée par le sol.

1.2.3.2 Calcul du bilan hydrique

Le bilan hydrique fondé sur le principe de conservation de la masse (*Équation 1*) est habituellement utilisé par les agronomes (Maraux et al., 1998) pour un intervalle de temps Δt entre deux mesures. Il correspond à la variation du stock d'eau dans une tranche de sol limitée par la surface du sol et une cote z , en fonction de données liées au continuum sol-plante-atmosphère. En prenant en compte apports et les pertes d'eau du système pour un intervalle de temps donné (Musy et Soutter, 1991), nous avons la relation suivante:

$$\Delta S = P + I - ETR - D \pm R + RC \quad \text{Équation 16}$$

ΔS	variation du stock d'eau dans le sol [mm]
P	pluie [mm]
ETR	évapotranspiration réelle [mm]
D	drainage [mm]
R	ruissellement [mm]
RC	remontées capillaires [mm]

Les données sur la **précipitation (P)** sont obtenues par le relevé automatique ou manuel des pluviomètres. L'**irrigation (I)** sera abordé de manière détaillée au incise 1.4.2.

Les apports d'eau par **remontées capillaires (RC)** sont difficiles à estimer avec précision (Maraux et al., 1998 ; Choparte et Vauclin, 1990). Dans notre cas, l'absence de nappe à proximité du front racinaire et le suivi des flux par mesures tensiométriques nous permettent de retenir une couche de sol d'une épaisseur suffisante pour que le flux soit nul à la face inférieur de cette couche.

Quant au **ruissellement (R)**, il peut s'agir d'un flux entrant ou d'un flux sortant selon que l'eau provient d'une parcelle en amont ou est évacuée vers une parcelle elle même. Il était négligeable dans les conditions étudiées.

Le **drainage (D)** correspond à une partie des précipitations et/ou d'irrigation non stockable dans la tranche de sol correspondante. Dans certains sols l'eau apportée peut s'infiltrer dans les macro-fissures du sol et atteindre rapidement les couches profondes du sol ou le réseau de drainage. Le drainage (D) peut être calculé à l'aide du bilan hydrique (si tous les autres termes sont connus par ailleurs), ou à partir de la loi de Darcy (effet macro-pores négligeable):

$$D = q\Delta t = K(\hat{e}) \frac{dH}{dz} \Delta t = K(\hat{e}) \frac{d(h-z)}{dz} \Delta t \quad \text{Équation 17}$$

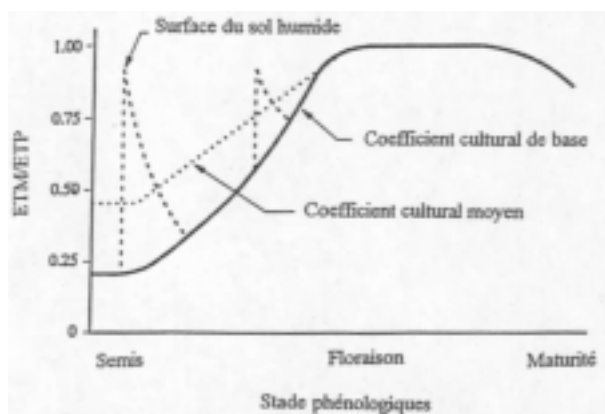
L'Évapotranspiration (ETR) comporte deux phénomènes. L'évaporation (ES) concerne la restitution de l'eau par le sol. Elle est surtout manifeste après apport d'eau lorsque la culture est encore peu développée. La transpiration (TR) est la restitution de l'eau à l'atmosphère par la plante. Ce dernier phénomène est donc lié aux facteurs climatiques et physiologiques. Il s'agit d'un flux sortant que l'on peut estimer dans certains cas à l'aide de la méthode du flux de sève. La méthode du bilan hydrique permet donc d'estimer l'ETR (évaporation du sol et transpiration).

1.2.3.3 Coefficient cultural k_c

Le coefficient cultural peut être établi empiriquement, par mesure de l'ETM au champ et la valeur de l'ETP donnée par la station climatologique. K_c peut également être empiriquement relié à l'indice foliaire LAI (Leaf Area Index), lorsque celui-ci est mesuré, ou simulé par un modèle de culture. Sa détermination en début de cycle (ES prépondérant) est délicate.

L'évapotranspiration maximale doit être déterminée pour un sol sec, ce qui donne, d'après certains auteurs, le coefficient cultural de base, indépendant du régime hydrique. Lors d'apports par la pluie ou par l'irrigation, la surface du sol humide entraîne une brusque augmentation du rapport ETM/ETP

Figure 2 Evolution type du k_c (d'après Martin et al., 1990)



pendant quelques jours. Ce phénomène était observé sur notre parcelle expérimentale et était pris en compte dans nos calculs des bilans hydriques (Figure 2).

L'évolution de k_c au cours du cycle est pratiquement identique pour toutes les cultures. En début de cycle de la culture (pendant la formation et développement des feuilles), k_c augmente rapidement, puis un palier est atteint, on observe enfin la sénescence de feuilles, qui induit une

diminution de k_c . Le coefficient cultural dépend fortement des conditions environnementales du milieu dans lequel il a été obtenu (date de semis, peuplement, climat, sol, etc.) (Scandella et Mecella, 1994). On perçoit donc ici l'intérêt de pouvoir relier le k_c au LAI.

Traditionnellement, k_c est relié au nombre de jours après semis ou aux stades phénologiques, ou encore à la somme de degrés-jours depuis le semis. Les valeurs de k_c maximales citées pour la culture de maïs dans la littérature vont de 1.0 à 1.35 (Scandella et Mecella, 1994), mais Fernandez et al. (1994), en zone méditerranéenne pour un maïs irrigué rapporte une valeur de 1.56, il s'agit dans ce cas-là d'une situation avec une forte convection pendant une période particulière.

1.2.3.4 Limites du bilan hydrique mesuré au champ

L'estimation du bilan hydrique au champ peut être assez imprécise en raison des difficultés pour connaître certains flux, comme le ruissellement, les remontées capillaires ou encore le drainage. De plus, si l'ETR est déterminée à l'aide de l'ETM, à partir de l'ETP, via la valeur de k_c utilisée, constitue une source d'erreur supplémentaire.

Comme nous l'avons indiqué, la valeur moyenne de K_c dépend fortement des conditions d'obtention; il faut ajouter les incertitudes sur le drainage et les remontées capillaires, sous réserve d'un ruissellement nul. La mesure est obtenue avec une meilleure précision si l'on peut utiliser la méthode du plan de flux nul.

1.2.4 Bilan hydrique simulé selon le concept RU

Dans certains modèles, le sol par simplification est assimilé à un réservoir (ou une succession de réservoirs).

1.2.4.1 Réserve utile

La capacité du réservoir en eau d'eau du sol, appelée réserve utile (RU), est définie par rapport à deux seuils qui dépendent des caractéristiques du sol:

$$RU = (H_{cc} - H_{pf})z \quad \text{Équation 18}$$

H_{cc}	teneur en eau à la capacité au champ [$cm^3.cm^{-3}$]
H_{pf}	teneur en eau au point de flétrissement [$cm^3.cm^{-3}$]
z	profondeur estimée du système racinaire [cm]

Les termes H_{cc} et H_{pf} sont des caractéristiques du sol, z dépend du sol et de la plante. La notion de capacité au champ représente le seuil de remplissage maximum et correspond à l'humidité du sol après un ressuyage théorique de 24 ou 48 heures suivant la texture quand, après drainage de l'eau gravitaire, l'écoulement de l'eau devient lent (Marcesse, 1967). Le point de flétrissement permanent est atteint lorsque l'eau du sol n'est plus extractible par la plante et correspond à la capacité maximale de succion par la plante, voisine de 15 bars, valeur déterminée au laboratoire. Cette grandeur dépend non seulement du sol, mais aussi des interactions sol-plante-conditions climatiques.

Le terme z est une estimation qui doit prendre en compte le sol, et en particulier la présence d'horizons limitants, ainsi que la plante avec l'évolution de son système racinaire vers la profondeur au cours de

la croissance. La teneur en eau volumique d'un sol varie entre une valeur minimale (teneur en eau résiduelle θ_r) et une valeur maximale (teneur en eau à saturation θ_s) (Tableau 5).

Tableau 5 Valeurs moyennes de l'humidité et du potentiel des sols (d'après Hénin, 1977)

dénomination	symbole	valeurs moyennes de l'humidité et du potentiel de l'eau			
			sol sableux	sol limoneux	sol argileux
capacité au champ	Hcc	humidité	5 à 15 %	15 à 30 %	30 à 45 %
		potentiel	0.2 atm. ou pF2.3		2 atm. ou pF 3.3
point de flétrissement	Hf	humidité	1 à 3 %	5 à 15 %	15 à 30 %
		potentiel	15 atm. ou pF 4.2		
humidité équivalente	He	potentiel	1 atm. ou pF 3		
teneur en eau à saturation	θ_s	humidité	35 à 50 %	40 à 60 %	30 à 65 %

Il faut noter que, généralement, il y a une grosse différence entre les résultats obtenus au laboratoire et au champ, due au fait que les mesures de laboratoire sont réalisées sur échantillons remaniés. Si l'on utilise des fonctions de pédo-transfert issues de la littérature internationale (qu'elles aient vocation à être universelles ou régionales), celles produisant les estimations les plus précises conduisent à des erreurs moyennes voisines de 0.03 cm.cm^{-3} pour la capacité au champ et 0.01 cm.cm^{-3} pour le point de flétrissement (Bastet et al., 1998).

La réserve utile reste un critère synthétique utile, permettant de comparer des types de sols quant à leur capacité à stocker puis à céder de l'eau. Cependant, il serait dangereux de l'utiliser sans précaution pour raisonner l'alimentation en eau d'une culture: la profondeur du sol est loin d'être la seule caractéristique de l'enracinement qui détermine l'apparition de stress (Tardieu, 1987).

1.2.4.2 Limites du bilan hydrique simulé

Le bilan simulé est très sensible à l'estimation de la réserve initiale du sol. D'autre part, RU est difficile à estimer car la notion de point de flétrissement permanent surestime l'eau disponible pour la plante, étant donné qu'elle ne tient pas compte de la densité racinaire ni de la capacité de transpiration de la plante. Certains modèles fondés sur ce concept (modèles dites capacitifs) utilisent des fonctions de simulation du profil racinaire pour pallier à cette difficulté.

Des améliorations sont obtenues en effectuant des contrôles au cours de la campagne, pour recalculer certaines grandeurs utilisées pour le calcul comme la réserve en eau initiale et l'enracinement. La prise en compte séparément de l'évaporation du sol et la transpiration de la plante, calculables à partir de l'ETP et du LAI (Wery et al., 1996), constitue une source d'amélioration du bilan hydrique simulé.

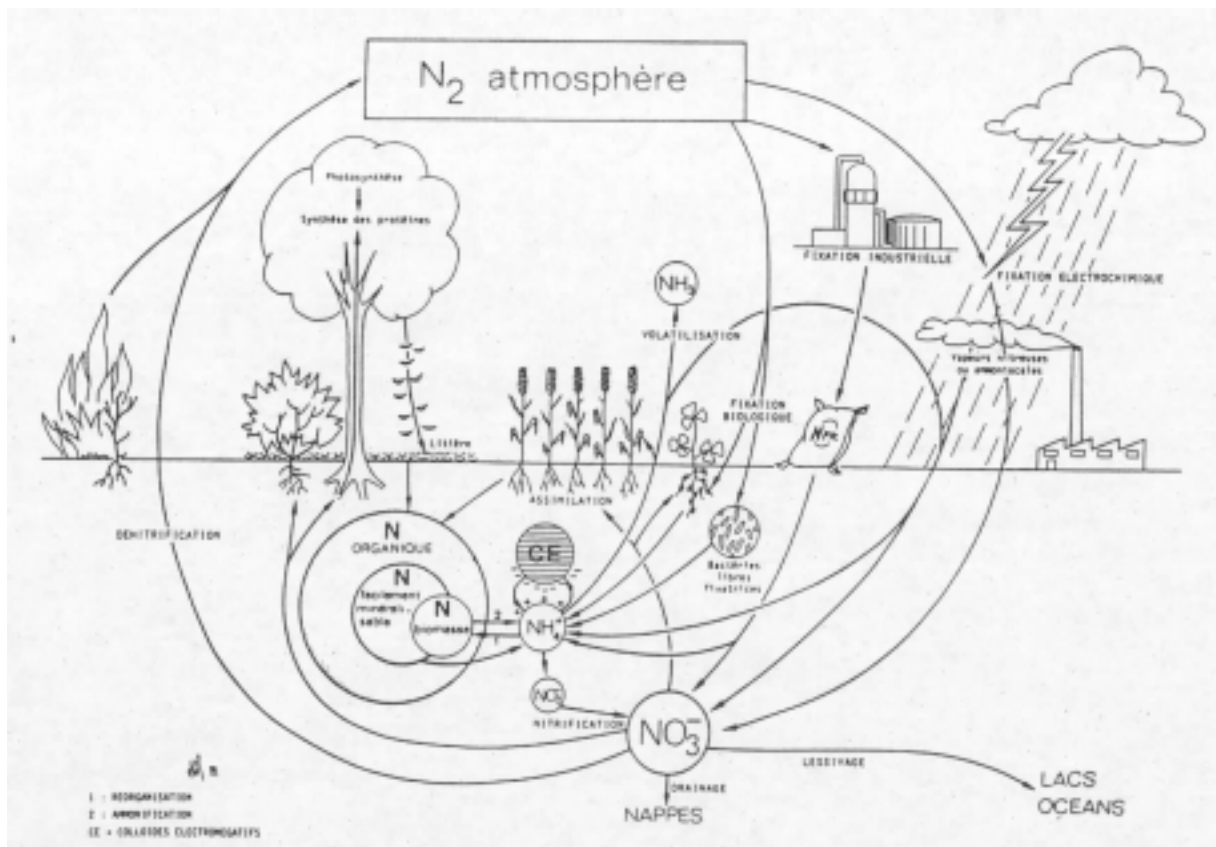
La détermination des flux (et des bilans de consommation sous culture) d'eau et d'azote en fonction de l'occupation des sols et des divers traitements passe par l'établissement d'un bilan hydrique, définissant notamment les pertes par drainage ou par évaporation/évapotranspiration. La précision du bilan dépend de la précision avec laquelle est obtenue l'évapotranspiration ou surtout le drainage.

1.3 BILAN ET TRANSFERT D'AZOTE

1.3.1 Cycle de l'azote dans les sols cultivés

On appelle cycle de l'azote les diverses transformations que subit l'azote dans la biosphère (Figure 3). La plupart d'entre elles sont d'origine microbienne et leur importance agronomique est considérable car elles régissent le bilan d'azote du sol et la mise à la disposition de la plante des formes minérales seules utilisables (Henin, 1981). Pour une circulation effective des nutriments dans le cycle de l'azote, chaque composant du cycle doit servir comme récepteur et comme source (Van Diest, 1994).

Figure 3 Schéma simplifié du cycle de l'azote (d'après Mariotti, 1982)



L'azote est essentiel à la vie car c'est un élément de base des protéines, composés indispensables aux êtres vivants. L'azote est présent dans les minéraux, dans l'atmosphère et dans le sol. Dans ce dernier il se trouve sous forme organique (labile et stable) et inorganique (azote ammoniacal, nitrites et nitrates). La fraction organique représente 95 % de l'azote du sol. La fraction minérale, la seule assimilable directement par les plantes, se compose de l'azote ammoniacal (NH_4^+ , NH_3), de l'azote nitreux (NO_2^-) et de l'azote nitrique (NO_3^-). La forte proportion d'azote organique est une des causes des difficultés rencontrées pour établir les bilans d'azote.

Les nitrates sont très solubles dans l'eau, donc très mobiles. Il suffit qu'ils soient en excédent par rapport aux besoins des plantes pour qu'ils soient lessivés vers les nappes souterraines ou qu'ils ruissellent vers les cours d'eau (Le Clech, 1995).

1.3.1.1 Apports

Les apports d'azote sont de plusieurs origines: l'apport atmosphérique par la pluie (ou météorique), la fixation symbiotique et non-symbiotique, et la fertilisation (sous forme organique, ammoniacale et nitrique).

1.3.1.1.1 Apports météoriques

Ces apports sont le produit de décharges électriques (lors des orages), entraînés par les pluies qui enrichissent le sol à raison de 5 à 20 kg/ha/an. Ces apports sont d'autant plus importants que les bassins se trouvent à proximité de grandes villes et de sites industriels où la pollution de l'air devient importante.

1.3.1.1.2 Fixation symbiotique et non symbiotique

Un hectare de légumineuses fixe de 100 à 400 kg d'azote par an. Par décomposition des tissus végétaux, cet azote se transforme en engrais utilisable pour les cultures ultérieures. La fixation dépend de l'espèce et des conditions du milieu; ainsi les conditions favorables correspondent à des températures comprises entre 6 et 30 °C, un pH de 3 à 9 et une humidité élevée. L'abondance relative d'un substrat carboné métabolisable dans le sol favorise la fixation, tandis que la disponibilité de l'azote minéral la défavorise (phénomène de compétition) (Prat, 1982).

La fixation non symbiotique correspond à la réduction de l'azote gazeux de l'atmosphère en ammoniac par les bactéries anaérobies (*Clostridium*) ou aérobies (*Azotobacter*) ou bien des micro-organismes photosynthétiques (algues). Pour la fixation non symbiotique l'oxygène est indispensable, donc une humidité élevée est défavorable.

1.3.1.1.3 Fertilisation

En culture intensive, le niveau de fertilité naturelle établi par fixation de l'azote de l'air par les bactéries n'est pas suffisant pour assurer un rendement élevé. Un apport important d'azote doit être réalisé afin de mettre à la disposition de la plante les éléments nécessaires à sa croissance et assurer ainsi un rendement élevé (Addiscott et al., 1991). Au niveau de la production agricole, l'azote constitue le principal facteur de rendement sur lequel l'homme peut agir, lorsque il ne peut pas maîtriser le facteur eau (culture pluviale). Nous traiterons de façon plus détaillée la fertilisation dans le incise 1.4.1.

1.3.1.2 Transformations

La minéralisation et la réorganisation sont deux phénomènes simultanés, qu'il est difficile, sinon impossible de séparer lors des observations au champ (Muller et Mary, 1981; Mary et Recous, 1994). Ces phénomènes dépendent des conditions édaphiques du système climat-sol-plante (Mary, 1987). C'est la biomasse microbienne qui permet la transformation des produits organiques et inorganiques.

1.3.1.2.1 Minéralisation

La minéralisation comporte deux étapes: l'ammonification et la nitrification. L'**ammonification** de l'azote organique est le processus de dégradation des protéines, d'amino-sucre et d'acides nucléiques en ammoniac (NH_4^+) par les micro-organismes, en particulier les bactéries et les champignons. L'azote ammoniacal n'est qu'un état transitoire entre l'azote organique et l'azote nitrique.

La **nitrification** transforme l'azote ammoniacal relativement immobile en nitrates plus facilement lessivés, dénitrifiés ou absorbés par la plante. Cette transformation ou nitrification comprend deux phases successives: ❶ Nitrosation: oxydation de l'azote ammoniacal en azote nitreux: $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$ par des bactéries aérobies, en particulier les nitrosomonas et ❷ Nitratation: oxydation des nitrites en nitrates: $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ par les bactéries aérobies du type nitrobacter.

La minéralisation a lieu principalement dans la couche arable du sol, où se trouve l'essentiel de l'humus et des résidus des précédentes cultures (Stanford et Smith, 1972). Les conditions requises sont la bonne diffusion de l'oxygène et l'aération, contrôlées par la teneur en eau et la structure du sol. Les interactions entre la température, l'humidité, l'aération et d'autres facteurs établissent des effets de saison (Leiros et al., 1999; Reynolds et al., 2000). Ainsi, dans les régions tempérées, la nitrification est maximale au printemps et à l'automne, et s'affaiblit l'été et l'hiver (Normand, 1996). L'alternance des périodes de dessiccation et de réhumectation d'un sol peut provoquer une stimulation de la minéralisation. Ce phénomène est lié aux effets relatifs à la structure du sol (fissuration pendant la dessiccation) et au renouvellement des populations microbiennes.

En sol sec, la nitrification est plus ralentie que l'ammonification, et la prolifération bactérienne est retardée par un manque d'eau. Dans un sol imbibé d'eau, par contre, la nitrification disparaît. Ces deux situations suggèrent l'existence d'un optimum d'humidité variant selon les auteurs (Stanford et Epstein, 1974), de 2/3 jusqu'au voisinage de la capacité au champ.

De nombreux auteurs relèvent l'effet de la température sur la minéralisation (Stanford et al., 1973, De Neve et Hofman, 1998; Savin et al., 2001). L'activité des populations nitrifiantes étant dépendante de la température (Schmidt et al, 1999), le processus de minéralisation est très lent au-dessous de 5°C et au-dessus de 40°C, l'optimum se situant autour de 25-35°C.

L'acidité du milieu ralentit la dégradation de la matière organique et en particulier l'ammonification. Pour le processus de nitrification le pH optimal est au voisinage de la neutralité, entre 6.9 et 8. En sols

très acides ou très calcaires la nitrification se fait difficilement, sans être cependant interrompue (Clément, 1981). Verberne et al. (1990) ont reporté que la minéralisation en sols légers est plus rapide qu'en sols lourds. Stenberg et al. (1999) ont constaté que le lessivage est supérieur en cas du labour précoce par rapport à un labour tardif, certainement par l'augmentation de la minéralisation.

D'après Recous et al. (1999), dans un sol nu non fertilisé, la minéralisation brute dans la couche superficielle de 0 à 20 cm de profondeur varie entre 0.23 mg N/kg sol/jour en décembre, et 0.81 mg N/kg sol/jour en juillet. Le taux d'immobilisation varie de manière similaire et représente environ 1/3 de la minéralisation brute. Ainsi la minéralisation nette moyenne annuelle est environ 0.29 mg N/kg sol/jour.

1.3.1.2.2 Immobilisation (ou organisation)

C'est le processus biologique inverse de la minéralisation, par lequel l'azote minéral se transforme en azote organique à l'aide des micro-organismes hétérotrophes du sol. L'immobilisation est favorisée dans un sol de pH neutre ou basique, et lorsque le rapport C/N (carbone/azote organique) est supérieur à 20, auquel cas il y a consommation de l'azote minéral pour la dégradation du substrat. Cependant, l'azote réorganisé reste facilement reminéralisable. Le rapport N immobilisé – C minéralisé décroît avec le temps (Recous, et al., 1995). L'immobilisation est accélérée dans le cas de dessiccation du sol (conditions aérobies), et comme dans de nombreux processus biologiques, les températures basses ralentissent l'immobilisation (Andersen et Jensen, 2001). D'autre part les microorganismes immobilisent beaucoup mieux l'azote ammoniacal que l'azote nitrique.

1.3.1.3 Pertes

Les pertes en azote minéral du sol sont liées à des phénomènes d'origines diverses: physique (entraînement par ruissellement ou lessivage), biologique (adsorption par les plantes sous forme de nitrates et dénitrification biologique) ou chimique (dénitrification chimique et volatilisation).

1.3.1.3.1 Adsorption par les plantes

Pendant la phase de croissance, les végétaux extraient l'azote minéral du sol. Cet azote favorise la formation de la biomasse et la composition de diverses molécules organiques (acides aminés, protéines), il est donc un des facteurs prépondérants du rendement (quantité de matières sèches) et de la qualité (teneur en protéines).

Les besoins en azote d'une plante sont fonction de l'état de développement des systèmes racinaire et aérien, c'est-à-dire de son état végétatif, lui-même influencé par les conditions édaphiques (texture, densité apparente du sol) et le climat (notamment la température et l'humidité du sol) (Pinheiro et al., 1996; Lemaire et al., 1996). Chez le maïs, par exemple, la majorité des éléments minéraux est prélevée durant une période critique de 5 semaines, allant de 10 jours avant l'apparition des panicules mâ-

les, à 25-30 jours après. Durant cette période, la plante prélève de 70 à 75 % de l'azote nécessaire. Pendant la période de grosse consommation d'éléments minéraux qui coïncide sensiblement avec la période de besoins importants en eau, le maïs peut absorber 2,5 kg d'azote/ha/jour.

La teneur en azote des plantes, rapportées au poids sec, est de l'ordre de 1 à 3 % à la récolte. Le *Tableau 6* présente, la variation de teneur en azote d'un maïs au cours de sa croissance et montre

Tableau 6 Variation de teneur en azote du maïs au cours de sa croissance (Duthil, 1973)

hauteur des tiges (cm)	teneur en azote (% MS)
20	5.59
30	5.62
60	4.51
80	2.67
100	1.37

l'effet classique de dilution. Une récolte de 65 q/ha de grain sec exporte, par ses organes aériens, 150-180 kg d'azote. Si les tiges sont enfouies après la récolte, il peut y avoir une restitution du tiers de l'azote.

C'est surtout sous forme nitrique (NO_3^-) que l'azote minéral est assimilé par la majorité des végétaux supérieurs, car l'ammoniac peut être toxique. L'absorption des nitrates par les plantes dépend de deux facteurs (Frere, 1977): ❶ la concentration des nitrates en solution dans le sol et ❷ la transpiration.

1.3.1.3.2 Pertes par voies gazeuses : volatilisation et dénitrification

Les pertes de l'azote du sol par voie gazeuse se situent à trois niveaux (Catroux et Germon, 1981): ❶ la volatilisation d'ammoniac (NH_3) produit lors de la minéralisation de l'azote organique ou apporté sous forme d'engrais, ❷ la dénitrification qui transforme les nitrates en nitrites puis successivement en oxyde nitrique, oxyde nitreux et azote, et ❸ une production possible d'oxyde nitreux par oxydation de l'ammonium.

La **volatilisation** est favorisée par un pH supérieur à 7,5 et elle peut atteindre 20 à 30 % de l'azote ammoniacal lorsqu'il est apporté sous forme d'engrais en sol basique (Prat, 1982). Toutefois, les pertes par volatilisation peuvent être beaucoup plus importantes dans le cas des apports organiques (fumiers, lisiers, etc.) (Olesen et al., 1997). Pour que le processus de volatilisation s'entretienne, l'azote ammoniacal soluble ou gazeux doit diffuser vers la surface du sol (Moral et Martinez, 1995).

La **dénitrification** est le processus de transformation (réduction) des nitrates en produits gazeux (azote et oxyde nitreux), réalisé en condition anaérobie par des bactéries hétérotrophes anaérobies facultatives. La dénitrification en sols in situ montre une dépendance complexe de plusieurs facteurs comme la disponibilité en azote et en carbone du sol, la teneur en oxygène et en eau, la valeur du pH et la température (Wendland, 1994).

L'aération du sol par labour diminue les pertes par voie gazeuse, car la présence d'oxygène diminue la réduction des nitrates par les bactéries dénitrifiantes. Pour la même raison, la dénitrification est favorisée dans les sols engorgés (quand l'humidité du sol excède la capacité au champ) et mal drainés (Stanford et al., 1974).

La dénitrification biologique nécessitant une source d'énergie (carbone), est fortement corrélée à la présence de matière organique facilement décomposable. La dénitrification a lieu quand la température du sol dépasse 8°C, son optimum étant entre 35 et 45°C, et le pH optimum se situe entre 6 et 8. La dénitrification apparaît généralement au printemps après les apports d'engrais et lorsque le sol se réchauffe. Elle se manifeste également après une période sèche quand le sol redevient humide et la température élevée (Dorge, 1994). Wendland (1994) a estimé la dénitrification à 5 à 35 kg N/ha/an pour les différentes conditions du sol en Allemagne.

1.3.1.3.3 Pertes par voies hydriques

Les pertes par voies hydriques sont les plus courantes dans les sols agricoles. Elles concernent essentiellement la forme nitrique, qui ne peut pas être adsorbée sur le complexe argilo-humique (aussi chargé négativement) constituant ainsi la forme d'azote la plus mobile. Les pertes pendant la période de drainage dépendent du stock en nitrates du sol, qui correspond généralement à la partie non absorbée par les cultures, provenant d'une fertilisation tardive ou d'une minéralisation après la récolte (Olson, 1980; Desvignes, 1992; Webster et al., 1999).

Si le ruissellement et l'écoulement sous-superficiel peuvent être une voie de pertes importantes de l'azote dans certains sols (Beusen et al., 1995), la perte la plus habituelle est le lessivage des nitrates vers les eaux souterraines (Sweeten et Reddell, 1978). L'écoulement de l'eau à travers la matrice poreuse non saturée du sol joue un rôle essentiel: c'est parce qu'il y a écoulement de l'eau qu'il y a transfert de polluants. Le lessivage des nitrates dans les sols sans macrofissuration commence, lorsque la couche du sol ayant atteint l'humidité à la capacité au champ, le drainage reprend (Santos et al., 1997). Du fait de leur grande solubilité, les nitrates vont en effet se déplacer très facilement dans le sol presque au même rythme que l'eau. Cependant, on se heurte à la difficulté d'estimer le terme de lessivage en raison de la grande hétérogénéité de la répartition de l'ion nitrate dans les sols.

Des facteurs de lessivage liés au drainage sont donc la capacité de rétention en eau, l'importance du déficit hydrique en début de réhumectation, la pluviométrie et la quantité d'eau infiltrée (Antil et al., 1992; Vanderborght et al., 1997). Une faible profondeur de sol, la présence de fissures accentuent aussi la probabilité du lessivage.

1.3.2 Lois du transfert d'azote

Les différentes formes de l'azote se déplacent dans la solution du sol sous l'influence des mécanismes de transport classique (Hillel, 1980; Jury, 1982; Jury et Flühler, 1992): ● la convection (entraînement direct de l'azote nitrique à l'état dissous dans l'eau), ● la diffusion (due au gradient de concentration en azote nitrique et ● la dispersion mécanique (la vitesse de migration de l'eau et des nitrates varie à l'intérieur de chaque pore et entre les différents pores en raison de l'architecture interne du sol), ces deux derniers processus étant généralement regroupés sous le terme de dispersion hydrodynamique.

1.3.2.1 Equation de conservation de la masse

La conservation de la masse de l'azote minéral dans un profil de sol est décrite par l'équation:

$$\Delta S_N = (P + I) + E + F + MH + MR - A - L - O - D - V \quad \text{Équation 19}$$

ΔS	variation du stock de l'azote dans sol [kg/ha]	A	absorption par la plante [kg/ha]
P	azote apporté par la pluie [kg/ha]	L	lessivage [kg/ha]
I	azote apporté par l'irrigation [kg/ha]	O	organisation [kg/ha]
E	engrais [kg/ha]	D	dénitrification [kg/ha]
F	fixation [kg/ha]	V	volatilisation [kg/ha]
MH	minéralisation de l'humus [kg/ha]		
MR	minéralisation de résidu cultural [kg/ha]		

Le profil de sol auquel s'applique en général ce bilan est délimité en haut par la surface du sol, et à la base par la limite de la zone racinaire.

Selon les conditions rencontrées sur un site d'étude, il est possible de simplifier l'équation précédente. Par exemple sur un sol très filtrant la dénitrification est rarement observée. De plus, si les apports de fertilisants sont réalisées sous forme de granulés, nous pouvons aussi négliger la volatilisation. Enfin, en l'absence de précédents culturaux nous ne prenons pas en compte non plus la minéralisation des résidus (Équation 19).

1.3.2.2 Equation de convection-dispersion

En l'absence de tout gradient de température, le mouvement des nitrates dans un milieu poreux se fait par diffusion moléculaire (ou ionique) ou par convection, les deux pouvant s'effectuer simultanément. Le schéma classique est donc celui du couple convection-dispersion, basé sur l'équation de conservation de masse monodimensionnelle verticale:

$$\frac{\partial(C\theta)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial(qC)}{\partial z} \quad \text{Équation 20}$$

θ	teneur en eau [cm^3/cm^3]
C	concentration en azote de la solution du sol [mg/l]
D	coefficient de dispersion [cm^2/h]
z	profondeur [cm]
q	flux d'eau [cm/h]
t	temps [h]

Le premier terme représente le transport par dispersion hydrodynamique, avec D , coefficient de dispersion, une grandeur non mesurable directement, et le second terme le transport par convection, avec $C(z,t)$, concentration en azote de la solution du sol.

Du point de vue hydrodynamique, la quantité des nitrates lessivés peut être estimée par l'expression:

$$q_N = q_w \cdot C_N - \theta D \frac{\partial C_N}{\partial z} \quad \text{Équation 21}$$

q_N	pertes d'azote [kg]
q_w	flux d'eau drainant à la cote z [m^3]
C_N	concentration en azote à la cote z [kg/m^3]

D'un point de vue pratique, pour le calcul du flux de nitrates, la dispersion hydrodynamique est considérée négligeable, si bien que l'Équation 21 se réduit en:

$$q_N = q_w \cdot C_N \quad \text{Équation 22}$$

La concentration de soluté est une concentration moyenne pour un volume donné, et peut être mesurée à l'aide des bougies poreuses ou par des mesures de résistances électriques, comme la Reflectométrie dans le Domaine Temporel (TDR).

1.3.2.3 Calcul du stock d'azote dans le sol

1.3.2.3.1 Cas des bougies poreuses

L'analyse de la solution du sol prélevée par bougies poreuses permet d'avoir des profils de concentration en azote nitrique et ammoniacal présent dans la solution du sol. Ces valeurs peuvent être transformées en quantité d'azote par unité de surface, système largement utilisé en agronomie pour l'expression des résultats ou bilans. Pour cela, le stock d'azote dans une tranche de sol est estimé par l'équation:

$$Q_N = \left(\frac{[NO_3^-]}{4.42 \times 100} + \frac{[NH_4^+]}{1.29 \times 100} \right) \theta \Delta Z \quad \text{Équation 23}$$

Q_N	quantité d'azote par unité de surface [$kg \cdot ha^{-1}$]
$[NO_3^-]$	concentration de nitrate dans la solution du sol de la tranche ΔZ [ppm]
$[NH_4^+]$	concentration d'ammoniaque dans la solution du sol de la tranche ΔZ [ppm]
θ	teneur en eau de la tranche du sol autour de la bougie [$cm^3 \cdot cm^{-3}$]
ΔZ	épaisseur de la tranche [m]
100	facteur d'échelle, permettant d'exprimer Q_N en kgN/ha à partir de la concentration en ppm et du stock d'eau en mm
1.29	rapport molaire entre NH_4^+ ($M=18$) et N ($M=14$)
4.42	rapport molaire entre NO_3^- ($M=62$) et N ($M=14$)

Ainsi, la notion de stock d'azote minéral désigne la quantité totale d'azote à l'état minéral, rapportée à une surface unitaire, exprimé en kg/ha . Ce calcul suppose que l'ensemble de l'azote minéral se trouve dans la solution du sol, ce qui peut être faux pour l'azote ammoniacal en particulier.

Cette évaluation est de plus critiquable par le fait que les teneurs en eau et en azote ne sont pas constantes pour une tranche de sol donnée, sur les tranches délimitées. Il est donc difficile d'accéder à des valeurs moyennes sans multiplier les mesures sur un site.

1.3.2.3.2 Cas des prélèvements de sol

De façon à avoir une information sur la distribution spatiale verticale de l'azote dans le sol, on constitue généralement des échantillons différents par tranche de sol. Dans chacun de ces échantillons, les deux formes minérales (nitrate et ammonium) sont analysées séparément. Les résultats d'analyses sont fournis en teneur massique (mg/kg) du sol et la quantité d'azote par unité de surface ($kg N/ha$) est calculée par la formule:

$$Q_N = \omega_N d_a \cdot e \cdot 10$$

Q_N teneur en azote du sol [kgN.ha⁻¹]
 ω_N concentration en azote dans la couche du sol [ppm]
 d_a densité apparente [kg.m⁻³]
 e épaisseur de la tranche de sol prélevée [m]
facteur d'échelle, permettant d'exprimer Q_N en kgN/ha

1.4 PRATIQUES CULTURALES

Différents aspects de l'activité agricole contribuent à la contamination nitrique: la difficulté d'ajustement de la fumure azotée (Kucke et Kleeberg, 1997), la non utilisation des intercultures (sol laissé nu en hiver) (Webster et al., 1999), application du tillage traditionnel (Mehdi et Madramootoo, 1999), les effets d'aménagements hydro-agricoles, entre autres.

Les pratiques agricoles doivent donc être adaptées de façon à limiter la quantité de nitrates qui risque d'être émise du compartiment sol vers d'autres compartiments du milieu, dont les milieux hydriques récepteurs (Stepherd et al., 1993; Ramos, 1996; Moller-Hansen et Djurhuus, 1997; Hadas et al., 1999).

La gestion des apports consiste à bien définir l'époque, la quantité d'eau et fertilisants apportés, ainsi que la forme de ce dernier, afin de diminuer la disponibilité des nitrates pour le lessivage (Rejesus et Hornbaker, 1999). Les principales techniques utilisées sont: ❶ élimination des excès d'eau d'irrigation, ❷ élimination des excès d'application de fertilisants, ❸ optimisation du moment du semis et des applications de fertilisants et ❹ enfouissement des fertilisants, entre autres.

1.4.1 Fertilisation azotée

Afin de critiquer les doses utilisées dans les pratiques agricoles classiques et préciser les doses à utiliser lors des expérimentations au Mexique et en France, il est apparu nécessaire de préciser les besoins de la culture et les modalités d'apport.

1.4.1.1 Quelle quantité d'azote apporter?

Prévoir correctement la dose d'azote nécessaire pour une culture est très difficile. Les méthodes de calcul actuellement préconisées, lorsqu'elles visent à assurer de forts rendements, conduisent nécessairement à des doses le plus souvent excessives. Ajuster la fertilisation azotée aux besoins des cultures, représente donc un enjeu important pour l'environnement.

Dans le choix de la dose d'engrais à apporter à une culture du maïs, on est confronté à un double risque (Longuenne et al., 1991): ❶ le risque d'apporter une quantité d'azote insuffisante qui pénaliserait le rendement, sachant qu'un excès est sans grande conséquence sur le rendement et ❷ le risque d'apporter trop de fertilisants et de laisser dans le sol après la récolte un reliquat de nitrates trop important et par conséquent préjudiciable pour l'environnement.

Les expériences montrent que la limitation de la pollution exige une grande précision dans la gestion de l'azote. Les risques associés à une erreur sur la dose d'azote sont élevés, particulièrement sur maïs (Le Clech, 1995). Corbeels (1998) a démontré que même dans le cas du maintien de l'azote minéral dans la zone racinaire d'une saison à l'autre, le taux d'utilisation de cet azote par la culture suivante est bas. Cela signifie que l'engrais azoté doit être appliqué sur une base annuelle, en accord avec les besoins de la culture.

Selon les résultats de Desvignes (1993) la quantité d'azote fournie par le sol, pour les différents types de sol et pratiques culturales varie de 90 à 200 kg/ha/an (Annexes). Dans les sols cultivés, les hauts rendements actuels supposent des disponibilités de l'ordre de 200 à 250 kg N/ha/an suivant les types de sol et les conditions climatiques de l'année. Aussi, compte tenu de pertes inévitables de l'ordre de 30 kg N/ha, la fertilisation moyenne pour le maïs peut se situer, selon Kauark Leite (1990), entre 100 à 180 kg N/ha/an, les apports étant adaptés en ce qui concerne la dose, le fractionnement et l'époque d'apport en fonction de la culture, du type de sol et des conditions climatiques.

La méthode du bilan d'azote, outil à caractère à la fois opérationnel et explicatif, est très couramment utilisée pour déterminer la quantité d'azote nécessaire à la culture. Elle est présentée au incise 4.1.

1.4.1.2 Date des apports de fertilisant

Les études des facteurs de variation de coefficients réels d'utilisation (dose, date et forme de l'apport d'azote) permettent de confirmer et de proposer des techniques de fertilisation azotée adaptées à chaque culture. En pratique, on peut améliorer ce coefficient en modifiant la date des apports: plus l'engrais est apporté près du moment d'absorption intense, mieux il est utilisé (Duwing et al., 1998). Le pilotage de la fertilisation azotée assure d'une part un meilleur taux de protéines, grâce au fractionnement en plusieurs apports, et il permet d'autre part de limiter les fuites d'azote.

1.4.1.2.1 Pourquoi le fractionnement des apport d'engrais?

Les apports précoces correspondent à des immobilisations supérieures dans le sol et leur rentabilité ultérieure n'est absolument pas assurée. Selon Carlotti (1992), le rythme d'absorption de l'azote par le maïs présente trois phases d'intensité différente: faible jusqu'au stade 10 feuilles (moins de 10 % du total absorbé), très forte du stade 10 feuilles à la floraison (60 à 70 % du total absorbé), modéré pendant le remplissage du grain (20 à 30 % du total). Ce constat ouvre la voie à deux solutions: retarder le plus possible la nitrification en utilisant des engrais ammoniacaux ou uréique, ou fractionner le plus possible les apports d'engrais (Lacroix, 1995).

Dans tous les cas, le fractionnement des apports reste nécessaire, car le premier apport induit généralement une valorisation supérieure des apports d'azote ultérieurs. Le fractionnement des apports a donc pour objectif de réduire la durée d'exposition de l'azote à l'action des pluies ou à celle de

l'irrigation, et donc de fournir l'azote à la culture lorsqu'elle en a besoin (Hubbard et al., 1991; Prunty et Greenland, 1997).

Desvignes (1993) recommande d'effectuer au moins deux apports d'azote: l'un faible au moment du semis et l'autre à 8-10 feuilles. Ce fractionnement est pratiqué par la majorité des agriculteurs français. Le premier apport, même mal utilisé par la plante, permet de fournir aux micro-organismes l'azote minéral nécessaire à la réorganisation et rend ainsi le second apport plus disponible pour la plante. Le second apport peut, sans conséquences préjudiciable au rendement, être effectué entre le stade 6 feuilles et le stade 14 feuilles de maïs. Cet apport effectué en pleine période de croissance, limite un éventuel lessivage.

Des travaux sur le fractionnement des apports d'azote pour le maïs (Castillon, 1994) ont montré l'efficacité des apports d'engrais azotés différés à des stades assez tardifs du développement des plantes. Ils confirment ceux de Silvertooth et al. (1992)

1.4.1.2.2 Difficultés pour le fractionnement des apports

Les principaux obstacles susceptibles de s'opposer à telles pratiques sont d'ordre climatique et d'organisation. Pour que l'engrais soit efficace il faut en effet que les racines puissent y accéder, ce qui suppose une humidité suffisante du sol au moment de l'épandage. Mais il faut avant tout pouvoir l'épandre, ce qui implique chez certaines espèces, comme le maïs à développement végétatif important, une logistique d'apport adaptée (fertigation, enjambeurs) qui n'est pas toujours compatible avec la précision recherchée en matière de gestion de l'azote (hétérogénéité de répartition de l'eau d'irrigation) ou avec les contraintes d'organisation du travail. Retarder les apports d'azote au-delà du stade 6/8 feuilles implique d'injecter l'azote dans le circuit d'irrigation pour le répartir sur les cultures lors d'une fertigation (ou irrigation fertilisante) (Cossierat, 1991).

Les maïsiculteurs qui doivent commencer l'irrigation dès le début du cycle de la culture, comme dans les conditions climatiques très sèches (cas de notre site d'expérimentation au Mexique), ils retardent plus aisément la fertilisation et l'appliquent comme fertigation, même en irrigation de surface.

1.4.1.3 Forme des apports

Les engrais minéraux azotés se présentent sous différentes formes : nitrique, ammoniacale, uréique, mixte (Annexe). Les apports de nitrate d'ammonium sont globalement mieux valorisés que ceux d'urée, à cause d'une meilleure utilisation de la forme nitrique par rapport à la forme ammoniacale sous laquelle l'urée doit se transformer en totalité. Des essais (Machet et al., 1987) ont montré que la moindre efficacité de l'ammonium (nitrate d'ammonium) ou de l'urée correspond à une utilisation de l'azote par d'autres organismes; cela est dû à la volatilisation éventuelle dans des conditions pédo-climatiques particulières, mais surtout à la réorganisation par les micro-organismes qui assimilent l'ammonium préférentiellement au nitrates.

La forme nitrique est immédiatement assimilable par la plante, mais peut être aussi facilement entraînée par lixiviation. Selon les conditions pédo-climatiques et les périodes d'apport, l'efficacité des différentes formes d'engrais sera différente, comme l'indiquent Lindermann et al. (1976), Adriaanse (1993), Ritter (1996), par exemple. Cependant, Cartagena et al. (1995) et Diez et al. (1997) ont observé que le type de fertilisant n'affecte pas le rendement du maïs.

Le régime hydrique peut introduire des effets antagonistes sur les transformations de l'azote et la disponibilité pour la plante. Ainsi la fourniture d'azote sous la seule forme nitrique ne garantit pas le

Tableau 7 Effet du type de fertilisant sur le rendement

Rapport $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$	1:1	1:0	0:1
Rendement en maïs grains (t/ha)	6.097	5.415	5.328

meilleur rendement (Tableau 7) et une cohérence entre l'itinéraire technique et le contexte pédo-climatique est nécessaire pour obtenir de bons résultats.

1.4.2 L'irrigation

L'irrigation est le moyen de remédier à la sécheresse. Son importance dépend des contraintes pédoclimatiques et de la culture elle-même (Abu-Awwad, 1999).

1.4.2.1 Irrigation et risques environnementaux

La mauvaise gestion de l'irrigation (volumes et/ou systèmes d'irrigation inadaptés aux conditions pédoclimatiques ou de culture) est un facteur de risque pour l'environnement (Pang et al., 1999 ; Raghunwansi et al., 1998b). En se limitant aux effets sur la nappe, il convient de noter le rôle du mode d'apport et du pilotage de l'irrigation influencent les lames d'eau infiltrées, et donc l'entraînement des substances dissoutes, hors de la zone racinaire (Ritter et al., 1991). Pour évaluer le risque de pollution liée à l'irrigation il convient de prendre en compte deux paramètres: la dose apportée et la fréquence des apports.

Une irrigation correctement conduite permet de subvenir aux besoins de la plante en limitant le drainage et en particulier le lessivage d'azote. Au contraire, des régimes élevés d'irrigations peuvent diminuer le rendement en entraînant les éléments nutritifs vers les couches plus profondes du sol. Bien souvent, en irrigation gravitaire, la saturation totale du sol est obtenue au premier apport, pour les irrigations suivantes les doses fournies sont plus faibles. Mais cette technique simple pour l'exploitant est préjudiciable à la qualité chimique des nappes. En effet plusieurs effets négatifs se cumulent suite aux récents travaux du sol, cette irrigation est peu performante; localement les doses importantes peuvent favoriser les pertes d'azote et ce d'autant que l'apport d'eau intervient en général après les apports d'engrais. L'azote, quelque soit sa forme, est peu lié à la matrice du sol et migre facilement. Au contraire, un premier apport d'eau limité après fertilisation limite les pertes.

1.4.2.2 Irrigation à la raie

L'irrigation gravitaire (ou irrigation de surface) est la méthode d'irrigation la plus ancienne. Contrairement aux autres techniques, c'est le sol lui-même qui assure la distribution de l'eau dans la parcelle grâce à la gravité. L'irrigation de surface comprend l'irrigation par bassin à fond plat (submersion), à la planche et à la raie où le sol a une faible pente (Pereira, 1999). Dans ce travail, nous analyserons seulement les caractéristiques de l'irrigation à la raie, qui est une des techniques d'arrosage les plus largement employées dans le monde. Elle se prête bien à l'irrigation de culture en ligne et convient particulièrement aux plantes craignant une submersion du collet ou de la tige, puisque les cultures poussent sur les buttes (ou billons) entre les raies. Par rapport au bassin (de grande maille) elle nécessite d'une main d'eau¹⁰ plus faible, mais le nombre limité de raies irriguées en même temps exigera un temps plus élevé pour irriguer une parcelle donnée. Cette technique d'irrigation convient le mieux aux sols de texture moyenne à modérément fine, ayant une réserve utile relativement élevée et une conductivité hydraulique suffisante, assurant une bonne mobilité de l'eau aussi bien horizontalement que verticalement.

Même si les frais d'aménagement sont réduits, le calcul et la mise au point de la procédure d'arrosage à la raie sont délicats et le besoin en main d'œuvre est important durant toute la saison d'arrosage dans le cas de l'irrigation traditionnelle (Hlavec, 1996). L'utilisation de distributeurs en tête a contribué à réduire considérablement la pénibilité du travail. Il existe aussi des contraintes d'aménagement parcellaire, en matière de planage et établissement des pentes d'écoulement (Tiercelin, 1998). Le grief majeur formulé à l'encontre de l'irrigation à la raie est la difficulté d'avoir une répartition très homogène de l'eau et d'engendrer des pertes d'eau quelquefois importantes (en bout de raie ou par infiltration profonde), lorsqu'elle est mal maîtrisée.

1.4.2.2.1 Principe du fonctionnement de l'irrigation à la raie

Ce mode d'irrigation consiste à humidifier le sol au moyen de sillons plus ou moins espacés dans lesquels l'eau s'écoule gravitairement. L'eau ruisselle et s'infiltré à travers l¹¹a section mouillée des raies verticalement et latéralement, en direction des billons où la culture est implantée (Renault, 1993). La géométrie de la section confère un caractère bidimensionnel à l'infiltration. En raison de cette infiltration, le débit et le tirant d'eau diminuent de l'amont vers l'aval. D'autre part la vitesse de déplacement du front d'avancée de l'eau décroît avec le temps et la distance. Elle dépend du débit en tête, de l'infiltration dans le sol et des conditions de l'écoulement en surface (rugosité, géométrie). Le front d'avancée se déplace jusqu'à ce qu'il atteigne l'extrémité de la raie, si celle-ci n'est pas bouchée, l'eau est collectée par un petit canal en terre appelé colature. L'alimentation en tête est coupée lorsque la dose utile apporté à la culture est considérée suffisante.

¹⁰ Main d'eau ou module d'arrosage: débit disponible pour l'irrigation d'une parcelle.

¹¹

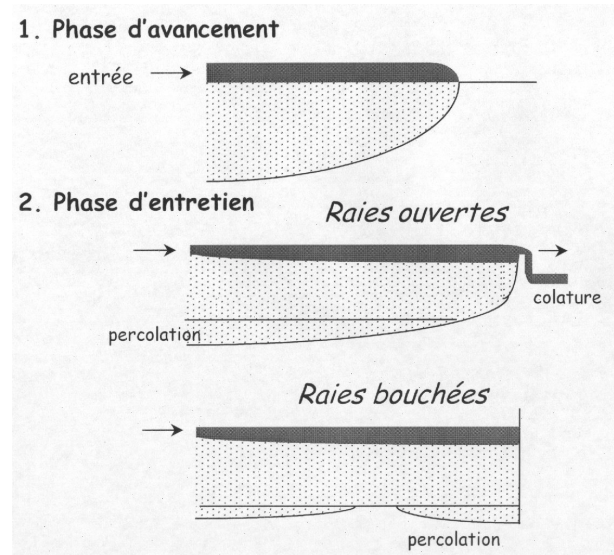
1.4.2.2.2 Phases d'irrigation à la raie

La **phase d'avancement** de l'irrigation (*Figure 4*) se définit comme la période pendant laquelle le front avance jusqu'à l'extrémité aval de la raie et le temps correspondant est le temps d'arrivée (t_1).

La **phase entretien** est la période comprise entre la fin de la phase d'avancement et la coupure de l'alimentation en tête de raie.

La **phase de récession** débute à l'arrêt de l'alimentation. L'écoulement en surface continue, la vitesse et le tirant d'eau observés en un point diminuent au cours du temps jusqu'à la disparition totale de l'eau sur l'ensemble de la raie. Ce phénomène se propage de l'amont vers l'aval. La topographie d'un raie n'étant jamais parfaite, de l'eau peut demeurer piégée en surface, et finir par s'infiltrer.

Figure 4 Phases de l'irrigation à la raie



1.4.2.2.3 Efficacité de l'arrosage gravitaire

Les paramètres caractérisant les performances d'une irrigation à la raie sont le rendement net (R_n), aussi appelé efficacité et l'uniformité (CU) (Rendon et Fuentes, 1997):

$$R_n = \frac{D_n}{D_b} \quad \text{Équation 25}$$

$$CU = \frac{D_n}{D_i} \quad \text{Équation 26}$$

D_i	dose infiltrée, dose brute diminuée des pertes en colature
D_n	dose nette, dose brute diminuée des pertes en colature et par percolation
D_b	dose brute

L'efficacité de l'arrosage gravitaire peut être médiocre. Lorsque les paramètres d'arrosage sont mal adaptés aux conditions de la parcelle, les pertes peuvent dépasser 30 % du volume prélevé en tête du réseau de distribution. Ces pertes résultent de la percolation, par le fait d'une répartition généralement assez inégale de l'eau dans le sens amont-aval sur la surface de la parcelle et du ruissellement en colatures, lorsque l'irrigation se fait avec colature.

Pour les conditions données, différentes précautions peuvent être prises pour assurer une efficacité correcte de l'irrigation: une pente régulière (le planage laser est recommandé), un écartement des raies bien choisi (selon la culture), un débit régulier et adapté à la longueur des raies, et enfin un arrosage adapté: un bon choix du couple débit-temps d'arrosage.

1.4.2.2.4 Couple débit - temps d'arrosage

Pour améliorer les critères de qualité, il s'agit de bien choisir le couple débit-temps d'irrigation (Santos, 1996; Feyen et Zerihun, 1999). Le choix du débit est le facteur primordial conditionnant la qualité du résultat d'un arrosage et les conséquences de sa modification sont contradictoires. Une valeur forte de débit accroît l'uniformité mais accroît également les pertes au colature et donc réduit l'efficacité. Le débit doit être aussi uniforme que possible (ce que permet des matériels modernes comme les rampes à vanne), supérieur à l'infiltration totale le long de la raie et inférieur au débit érosif. Le débit qu'utilise l'agriculteur diminue en général au cours de la campagne en raison d'une diminution de la perméabilité. Le sol se compacte sous l'effet des irrigations successives: il se produit un colmatage de la micro-porosité pour certains sols (Berthome, 1991, Mailhol, 1999). La première irrigation se distingue donc des autres: elle requiert souvent un débit double de celui des irrigations suivantes.

D'autre part, les sols à argiles gonflantes provoquent en séchant des fissures importantes, ainsi le temps requis par l'eau pour parvenir au bout des raies peut être très élevé lorsque le débit est trop faible. En sols argileux macro-fissurés, les débits de l'ordre de 1 à 1.5 l/s par raie permettent d'irriguer avec de bonnes efficacités (70 à 80 %), des parcelles de 150 à 200 m de long (Mailhol et al, 1999), et ce, avec des intervalles d'irrigation variant de 10 à 15 jours. A l'inverse, certains sols limoneux ont la particularité de former en surface une couche peu perméable à l'eau lorsque elles subissent un fort déficit hydrique. Si on tarde trop pour déclencher l'irrigation, il devient impossible d'apporter une dose élevée, et une partie importante de l'eau apportée peut être perdue en colature (DDAF et al., 1989). Les débits unitaires sur ces sols qu'adoptent les agriculteurs sont très faibles : 0.2 l/s/100 m (Berthome, 1985).

1.4.2.3 Variabilité de l'infiltration en irrigation à la raie

De nombreuses sources d'hétérogénéité affectent le processus d'infiltration, régi par les propriétés du sol, ces dernières présentant une variabilité spatio-temporelle (Childs et al, 1993). Au niveau de la parcelle cela se traduit par une variabilité plus ou moins forte de l'avancement qui pour un temps donné d'irrigation aura des conséquences localement différentes sur les risques de lessivage d'azote.

1.4.2.3.1 Variabilité spatiale à l'échelle de la raie

En irrigation à la raie, la répartition des quantités d'eau infiltrées n'est pas uniforme car la durée de présence de la lame d'eau en un point donné est variable en fonction de la distance qui le sépare du point d'alimentation (Berthome, 1991). En outre le caractère bi-dimensionnel de l'infiltration confère une géométrie particulière au « bulbe » humide.

1.4.2.3.1.1 Hétérogénéité le long de la raie

Le mode de conduite induit une hétérogénéité des apports entre l'amont et l'aval. En raies ouvertes, un temps de présence de l'eau plus important à l'amont qu'à l'aval, est responsable de l'hétérogénéité de

la dose. En raies bouchées, le phénomène est différent selon la durée d'entretien, car il s'établit une zone de submersion à l'aval. En conséquence et selon l'importance du temps d'irrigation, les apports seront plus ou moins variables entre l'amont et l'aval de la raie et la dose la plus faible peut être apportée juste en amont de la zone aval échappant à l'effet de l'endiguement. Il peut exister aussi une variabilité des conditions d'infiltration liées à la nature du sol ou à son niveau d'humidité dont les conséquences sur la vitesse de l'avancement du front d'avancement sont perceptibles: chute ou accroissement de la vitesse (Izadi et al., 1996a)

Selon la conduite traditionnelle à débit unique avec colature, le temps nécessaire pour que la dose d'eau requise soit appliquée à l'extrémité de la raie, conduit à une durée d'infiltration plus élevée en amont de la raie. Le souci d'améliorer la répartition de l'eau sur la parcelle et de réduire les pertes en colature ou par percolation profonde a suscité des recherches sur l'arrosage alterné ou par vagues. Cette technique a été développée aux USA où les parcelles peuvent atteindre des longueurs de plus de 500 m. Les recherches montrent que le gain d'efficacité est surtout manifeste lors de la première irrigation (Izuno et al., 1984 b).

1.4.2.3.1.2 Hétérogénéité entre le billon et la raie

En raison de la géométrie du domaine, l'infiltration en irrigation à la raie est un phénomène bidimensionnel. Selon le type du sol et la durée d'irrigation la forme de « bulbe humide » peut être plus ou moins allongée en fin d'arrosage. Il en résulte à l'issue de l'arrosage une différence de stock d'eau entre le billon et la raie, notamment dans la partie supérieure du billon. Cependant on constate que peu de temps après l'arrosage (un à quelques jours) l'humidité se redistribue entre la raie et le billon, et les prélèvements par la culture contribuent à réduire les différences entre les stocks d'eau.

1.4.2.3.2 Variabilité spatiale à l'échelle de la parcelle

La variabilité d'avancement entre les raies est une des caractéristiques de l'irrigation à la raie. Comme déjà évoqué, elle résulte des conditions de sol auxquelles se combinent la variabilité des débits d'entrée. Cette variabilité d'avancement, et par conséquent la variabilité d'infiltration, peut décroître le long de la campagne d'irrigation, par le fait que la forme de la raie et les conditions du sol deviennent plus uniformes (Izadi, 1996).

Malgré l'usage de matériel moderne de distribution en tête, les débits accusent toujours une certaine variabilité dépendante des conditions d'infiltration. Des expérimentations (Mailhol et al., 1999) ont montré, que cette variabilité est plus ou moins importante selon le matériel utilisé (*Tableau 8*). On

Tableau 8 Coefficients de variation du débit en fonction du matériel de distribution (d'après Mailhol et al., 1999)

Matériel de distribution	Gaine souple	Rampe à vannettes	Siphons
Coefficient de variation du débit (en %)	15-35 %	5-10 %	5 %-15 %

notera que cette variabilité existe aussi en aspersion.

La variabilité spatiale de l'infiltration résulte d'une hétérogénéité des conditions d'infiltration à l'échelle parcellaire. Les

travaux du sol et leur impact sur la confection des raies et la distribution (aléatoire) des fentes de retrait dans le cas des sols argileux constituent également aussi des sources de variabilité de l'infiltration (Mailhol et Gonzales, 1993).

1.4.2.3.3 La variabilité temporelle

Il existe aussi une variabilité temporelle de l'infiltration au cours de la saison d'irrigation. Elle est due à deux facteurs: la modification de la teneur en eau, qui dépend de la demande climatique, et la variation des propriétés du sol due aux effets alternés du dessèchement et de l'humidification. En effet, humidification et submersion peuvent induire des modifications de la structure du sol (Collis-Georges et al., 1979; Kemper et al., 1988) pouvant entraîner une évolution des propriétés de l'infiltration d'une irrigation à l'autre même pour des conditions d'humidité du sol équivalentes (Mailhol et al., 1999). La conductivité hydraulique diminue au delà de la 1^{ère} irrigation (Berthome, 1991), avec l'accroissement du compactage du sol. Sur les sols argileux gonflants les fentes de retrait apparaissent et leur amplitude évolue selon le niveau de dessèchement du sol (Mailhol et al, 1999). Tous ces facteurs induisent des modifications de l'infiltration différentes selon les types de sol.

1.5 CONCLUSIONS DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

La quantité d'azote minéral présente dans le sol résulte des diverses transformations de l'azote, en fonction d'un certain nombre de paramètres variables (texture du sol, teneur en matière organique, température, pH, conditions d'oxygénation...), eux-mêmes dépendant étroitement du pédoclimat et des conditions culturales.

Le transfert d'azote a lieu surtout sous forme de nitrate, qui est très soluble. Les pratiques agricoles influent sur les quantités de l'azote transférées (fertilisation) et sur les conditions du transfert (irrigation). Le sol a un rôle central dans tous les mécanismes de transfert de l'azote et sa prise en compte est indispensable pour évaluer les risques de lessivage de l'azote, pour raisonner la fertilisation ou adapter une irrigation.

La variabilité temporelle de l'infiltration et l'hétérogénéité des apports entre raies, entre l'amont et l'aval de la raie, entre le billon et la raie, aura certainement de conséquences sur les flux d'eau et de solutés. Pour cette raison, nous avons tenu compte de cette variabilité lors de la conduite de l'expérimentation et lors de l'utilisation des modèles.

Les phénomènes en jeu dans les transferts de l'azote dans le sol sont complexes. Leur compréhension relève encore dans de nombreux cas du domaine de la recherche et implique plusieurs disciplines scientifiques (agronomie, bio-chimie, hydrologie, etc.). La coopération de ces disciplines devrait permettre de trouver les solutions contre la pollution azoté d'origine agricole.

CHAPITRE 2 EXPERIMENTATION

Dans cette partie du travail nous présentons l'expérimentation menée pendant trois ans sur la station expérimentale de Lavalette avec pour but de collecter les données nécessaires à la réalisation des bilans hydrique et azoté sous culture de maïs irrigué. Les deux premières années d'expérimentation avaient pour objectif le calage du modèle STICS pour la variété Samsara en irrigation par aspersion. La dernière année d'expérimentation, avec une partie d'irrigation par aspersion et une autre par irrigation gravitaire, avait pour objectif d'analyser les processus de transfert d'eau et d'azote sous irrigation à la raie et d'identifier les conditions requises pour que le modèle de culture STICS, couplé à un modèle d'irrigation à la raie, puisse simuler les conséquences de l'irrigation gravitaire sur le rendement de la culture et sur les flux d'azote.

2.1 PRESENTATION GENERALE DE L'EXPERIMENTATION SUR LAVALETTE

Chaque année des traitements de référence ont été mis en place, à savoir: traitement « *ETM* » sans stress hydrique et azoté, traitement « *sec* », traitement « *ON* » sans apport d'azote, parallèlement aux autres traitements avec différents niveaux d'irrigation. La troisième année d'expérimentation, le protocole a été aménagé pour se rapprocher des pratiques d'irrigation et de fertilisation des agriculteurs mexicains. Ainsi, l'irrigation a été conduite à la raie, en raies bouchées, conformément aux pratiques conseillées à «El Carrizo» (Hernandez, communication personnelle). Quant à la fertilisation, deux traitements ont été différenciés par la dose d'azote apportée. Les apports, sous forme d'ammonitrate avant réalisation des raies, puis sous forme d'ammoniaque anhydre dissous dans l'eau d'irrigation, sont proches à ces pratiques (apport d'urée et d'ammoniaque anhydre avant buttage et apport d'ammoniaque anhydre dans l'eau d'irrigation).

2.1.1 Situation géographique

L'expérimentation a été réalisée sur la parcelle expérimentale de Lavalette, située au Nord de Montpellier (latitude 48.49° N, longitude 4.32° E, altitude: 50 m), à 15 km environ de la mer, au bord de la rivière le Lez.

2.1.2 Caractéristiques du sol

La parcelle expérimentale est constituée par des sols d'origine colluvio-alluviale très profonds. Ce sont des sols de type bruns peu évolué (Ruelle, 1995) et ils ne présentent pas d'éléments grossiers. La tex-

ture est limono-argilo-sableuse et la qualité agronomique, favorable. Les analyses granulométriques (*Tableau 9*) mettent en évidence une faible hétérogénéité entre la partie Nord et la partie Sud de la parcelle expérimentale sur laquelle sont implantés respectivement les traitements *Ta* et *Te* (*Figure 7*).

Tableau 9 Caractéristiques du sol de Lavalette par couche

Profondeur	argile (%)		limon (%)		sable (%)		C org. (%)		N total (%)	
	Ta	Te	Ta	Te	Ta	Te	Ta	Te	Ta	Te
0-30	18.4	22.2	42.0	48.7	39.3	29.1	0.70	0.88	0.73	1.16
30-60	17.6	23.7	43.6	48.6	38.8	27.8	0.47	0.74	0.48	0.95
60-90	20.2		47.4		32.4					
90-120	20.2		54.6		22.2					
120-150	26.7	24.0	48.0	44.0	25.2	32.0	0.37	0.48	0.43	0.45

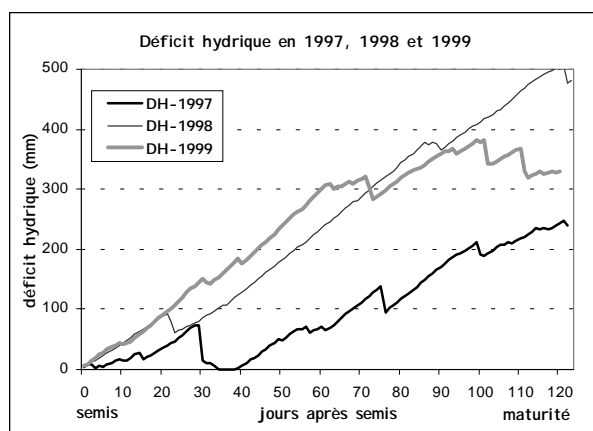
Ainsi le site moyen du traitement *Te* a un sol avec une teneur plus forte en éléments fins en surface que *Ta*. Cette proportion plus élevée d'argile et de limons a eu des conséquences pour l'irrigation à la raie, comme nous le mettrons en évidence. L'origine de cette différence est probablement à imputer à la rivière: cette parcelle est située dans le lit majeur et la proportion de sable augmente lorsqu'on se rapproche de la rivière.

2.1.3 Climat

Le climat est de type méditerranéen. Les précipitations moyennes annuelles pour une période de 30 ans (1951-80) sont de 750 mm à la station météorologique de Montpellier-Fréjorgues située au bord de la mer. Cependant un important déficit climatique (pluie-ETP) estival existe puisque la pluviométrie moyenne n'est que 110 mm, pour des ETP Penman cumulées de 490 mm du mois de mai à fin août.

Le site expérimental de Lavalette est pourvu d'une station météorologique du type Cimel-Enerco 411. Les situations climatiques relevées pendant les années d'expérimentation sont très différents des va-

Figure 5 Déficit hydrique pendant les trois campagnes expérimentales

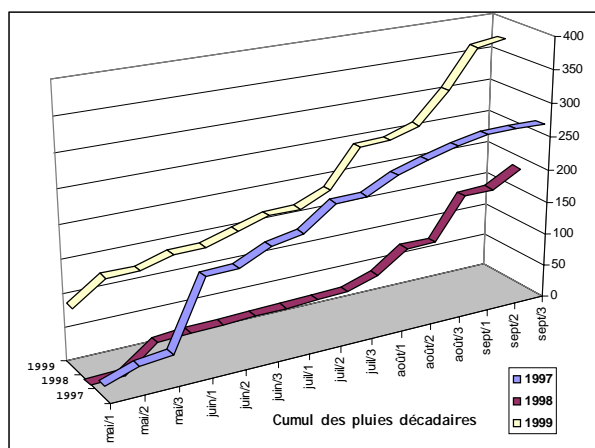


leurs moyennes de 30 ans, et même entre elles, puisque le cumul des précipitations de mai à août (les irrigations sont habituellement arrêtées fin août) est de 256 mm en 1997, 259 mm en 1999, et seulement 94 mm en 1998. Ainsi, nous avons la possibilité de comparer une année sèche et deux années humides. Le déficit climatique pour les mêmes périodes atteint 339 mm en 1999, 267 mm en 1997 et 484 mm en 1998 (*Figure 5*). La répartition décadaire des pluies précise ce contraste sur l'ensemble des campagnes (*Figure 6*).

En 1999 les conditions pluviométriques de la campagne ont été caractérisées par des pluies fortes. Pendant les deux premiers décades du mois de mai il est tombé 124 mm, ce qui a eu pour effet de re-

tarder le semis par rapport à la date prévue (de début mai à fin mai). Le début août a été aussi pluvieux, ce qui nous a conduit à supprimer des irrigations. Les pluies fortes d'automne ont provoqué un drainage important après la récolte.

Figure 6 Cumules des pluies décadaires de 1997 à 1999 à Lavalette



En 1998, avant le semis, pendant le mois d'avril, la pluviométrie a été importante avec un total de 122 mm qui a saturé le sol. Par contre, pendant la campagne agricole, la pluviométrie a été particulièrement faible (Figure 6). Le fort déficit hydrique du semis à la maturité a engendré un stress hydrique important sur le traitement en sec.

Le printemps de 1997 a été très sec, et l'été relativement pluvieux. Au début du moins de juin, un important épisode pluvieux (106 mm

en une semaine) a rechargé partiellement le sol. Le déficit hydrique pendant la campagne n'étant pas élevé (235 mm), (Figure 5) le stress hydrique maximal (traitement en sec) n'a pas été très important.

2.1.4 La plante: maïs, variété Samsara

Comme évoqué dans le *Chapitre 1*, la température définit, au niveau variétal, l'aire géographique d'extension de la culture. Ainsi la variété Samsara, hybride simple demi-tardive, est adaptée aux conditions pédo-climatiques du sud de la France; et de plus, elle valorise particulièrement bien les situations irriguées. Le peuplement maximal conseillé en irrigué est de 85000 plantes/ha pour les sols sableux et 82000 plantes/ha pour les sols argileux et limono-argileux (AGPM, 1994), mais il apparaît insuffisant en zone méditerranéenne pour cette variété.

On considère que le besoin en somme de température semis-maturité de cette variété est de 1870°C (grain à 32 % d'humidité) et la phase semis-floraison nécessite de 980°C, en base de 6 °C. La précision de la référence est de l'ordre de 25 degrés-jours, ce qui équivaut à 2 jours à la floraison ou 1.2 point de teneur en eau à la récolte. Le zéro de germination est voisin de 6°C, et selon nos expériences, la somme de température semis-levée est environ 95°C, soit 7 à 11 jours après le semis, selon l'année.

Le potentiel de rendement en grain est de 145 quintaux/ha environ, avec un record de 157 quintaux/ha (Maïsador, 1996). Les grains sont dentés, et le poids moyen de mille grains à 15 % d'humidité est de 380 grammes. Le nombre de rangs par épis varie de 12 à 14, et le nombre de grains par rang est de 36 en moyenne.

2.1.5 Description des traitements

2.1.5.1 Expérimentation en 1997 et 1998

La campagne réalisée en 1997 comportait d'une part un traitement sans stress (*ETM*) et un traitement en sec, et d'autre part différents sites sur un traitement avec une alimentation restrictive en eau (*Tableau 10*). En 1998 des traitements complémentaires ont été mis en place pour prendre en compte des excès d'eau, ainsi qu'une référence sans azote (*0N*).

Tableau 10 Traitements réalisés en 1997 et 1998

1997	Dose totale par rapport à ETM	1998	Dose totale par rapport à ETM
ETM	100 %	ETM	100 %
Nord	50 %	SOE	110 %
Centre	40 %	Nord	160 %
Sud	40 %	SE	40 %
Sec	sans apport	Sec	apport au semis
		ON	90 % ETM

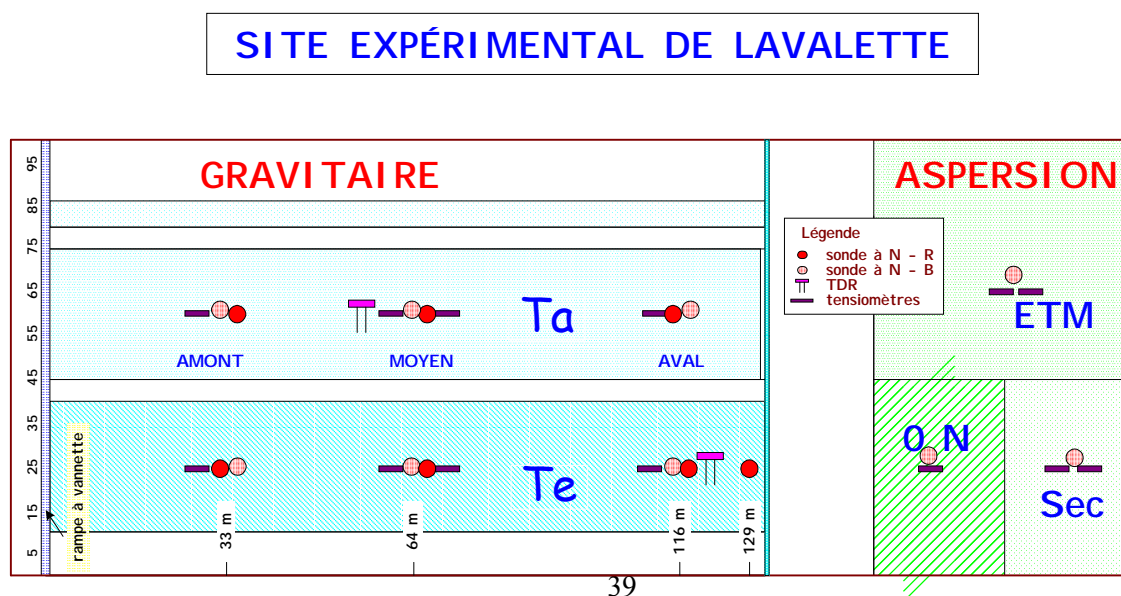
2.1.5.2 Expérimentation en 1999

2.1.5.2.1 Traitements sous irrigation par aspersion

Le traitement "à l'*ETM*" (*ETM*) sert de référence pour déterminer le potentiel de rendement de la variété sous les conditions climatiques de l'année 1999. Sur 0.25 ha environ, conduit en conditions d'azote non limitantes, il a reçu une fertilisation de 150 kg N/ha. Pour éviter le stress hydrique, l'irrigation a été déclenchée en tenant compte du suivi hydrique du sol et les apports ont été calculés selon des consommations de la semaine précédente (à partir de $k_c \cdot ETP$) et vérifiés par bilan hydrique et suivi tensiométrique.

Le traitement **sans azote** (*0N*) a été utilisé pour déterminer la minéralisation du sol pendant le cycle cultural, cette donnée étant indispensable pour établir les bilans d'azote. Ce traitement a été réalisé sur une partie de la parcelle Est (0.12 ha environ), irriguée par aspersion (pour éviter le lessivage) en couverture intégrale et à *ETM* (c'est-à-dire en condition de l'eau non limitante).

Figure 7 Parcelle expérimentale à Lavalette en 1999



Un traitement "**sec ou pluvial**" (*Sec*), a été réalisé à l'extrémité Sud-Est de la parcelle (0.12 ha environ) afin d'élargir les observations disponibles pour le calage et la validation de modèle STICS. Cependant pour assurer la levée, une irrigation de semis à été réalisé par aspersion (canon et enrouleur).

2.1.5.2.2 Traitements sous irrigation gravitaire

L'expérimentation a été réalisée sur la parcelle Nord, de 130 m de long (1.5 ha environ), de forme trapézoïdale, avec une pente de 0.25 %. Nous avons suivi environ 100 raies, espacées de 80 cm. L'irrigation a été conduite à l'aide d'une rampe à vannettes et réalisées en raies bouchées. Deux traitements (séparés par 5 raies) ont été différenciés par la quantité de fertilisant appliquée.

Le traitement "**amélioré**" (*Ta*) a été réalisé sur 30 raies. La fertilisation utilisée correspond aux pratiques agricoles « raisonnables » en France. La quantité totale d'azote apportée a été de 180 kgN/ha, fractionnée de la manière suivante : 50 %¹² au semis et 50 % au stade 6/7 feuilles (36 jours après semis), avant la réalisation des raies. Elle a été appliquée sous forme d'ammonitrate dans les deux cas.

Le traitement "**excédentaire**" (*Te*) (effectué sur 30 raies) devait correspondre à un apport excédentaire d'azote, proche de celui réalisé au Mexique, mais en réalité il n'est pas très différent de celui apporté sur l'autre traitement, dite "amélioré", par suite de problèmes techniques rencontrés lors de la fertigation. La quantité totale d'azote apportée a été environ 210 UN, avec 3 apports: 40 % au semis, 35 % au stade 6/7 feuilles (36 jours après semis) et 25 % sous forme de fertigation lors de la 2^{ème} irrigation (58 jours après semis).

2.1.5.2.3 Sites de suivi en 1999

Afin de pouvoir comparer différents scénarios (différent soit en apport d'eau, soit en apport d'azote), nous avons suivi les bilans hydriques et azotés sur 9 sites (*Tableau 11*). Sous **irrigation gravitaire** 6 sites ont été mis en place, en distinguant les sites amont (au 1/4 de la longueur), moyen (au centre de la

raie) et aval (à 7/8 de la longueur): *Ta-amont*, *Ta-moyen*, *Ta-aval*, *Te-amont*, *Te-moyen* et *Te-aval*. Sous **irrigation par aspersion** un seul site par traitement

Tableau 11 Récapitulatif des sites de mesures pour les trois années

	1997	1998	1999
Sans stress	ETM	ETM	ETM,
Stress hydrique	Sec, Nord, Centre, Sud	Sec, SE	Sec
Irrigation non optimisée		SOE, Nord	
Irrigation gravitaire			Ta-amo, Ta-moy, Ta-aval, Te-amo, Te-moy, Te-aval
Stress azoté		ON	ON

(*ETM*, *ON* et *Sec*) a été implanté.

¹² Habituellement l'apport au semis est limité à 50 kgN/ha, mais du fait du semis tardif imposé par les pluies en avril et mai, le fractionnement a été modifié.

2.2 MATERIEL ET MESURES

2.2.1 Suivi des cinétiques et des bilans hydriques

L'étude de l'évolution au cours du temps des flux d'eau nécessite la mesure à la fois des humidités et des charges hydrauliques.

2.2.1.1 Mesure de l'humidité

La mesure de l'humidité a été réalisée à l'aide d'un humidimètre neutronique et en complément, en 1999 sur le site *Ta-moyen* en utilisant la méthode TDR (réflectométrie dans le domaine temporel). De plus nous avons réalisé des mesures gravimétriques ponctuelles.

2.2.1.1.1 Mesure de l'humidité par sonde à neutrons

Tous les sites de suivi hydrique ont été équipés d'un tube d'accès neutronique. Dans le cas de l'irrigation à la raie, en 1999, les sites comportaient à la fois un tube au milieu du billon et un tube au milieu de la raie. Le tube dans la raie était situé à 1 m environ à l'aval du tube sur le billon pour éviter d'éventuelles interactions et permettre un accès plus facile pour réaliser les mesures. L'humidimètre utilisé est une sonde à neutron SOLO 25 (Nardeux, France). Les tubes d'accès utilisés étaient des tubes aluminium de diamètre de 41-45 mm.

Les mesures ont été effectuées avec un pas de 10 cm jusqu'à 220 ou 270 cm de profondeur, suivant les sites. La périodicité des mesures a été de 4 à 7 jours en essayant d'encadrer les irrigations. Sur les sites irrigués en gravitaire les mesures ont été réalisées après le ressuyage du sol pour des questions d'accès aux sites et afin d'éviter de perturber les raies et/ou les billons (alors qu'il est souvent recommandé de les effectuer 24 ou 48 h après l'arrosage). Certains traitements ont fait l'objet de plusieurs mesures par semaine après l'irrigation.

2.2.1.1.2 Mesure de l'humidité par méthode gravimétrique

Des mesures gravimétriques ont été réalisées en parallèle avec les analyses de stock d'azote du sol. Ainsi nous disposons, sur chaque site, une mesure de l'humidité du sol avant le semis, ces valeurs étant utilisées comme l'humidité initiale pour les simulations. De plus, lors de l'installation des tubes d'accès des sondes à neutron, des mesures gravimétriques ont été utilisées pour valider les mesures neutroniques.

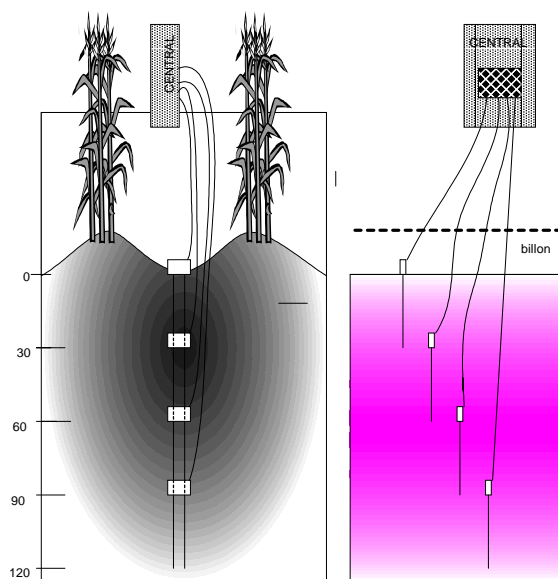
2.2.1.1.3 Mesure de l'humidité par réflectométrie dans le domaine temporel (TDR)

Les sondes TDR (time domain reflectometry) mesurent l'humidité volumique du sol à partir des propriétés des ondes électromagnétiques avec une incertitude inférieure à $\pm 2\%$ (Whalley, 1993) et avec une très bonne résolution spatiale et temporelle. C'est une méthode de mise en oeuvre simple, non destructive et complémentaire des méthodes habituelles de mesure de teneur en eau des sols surtout pour les horizons de surface. Le principe du fonctionnement, l'étalonnage et les caractéristiques des mesures à sonde TDR sont décrites en annexe.

Sur le site *Ta-moyen* quatre sondes Campbell CS615 ont été utilisées au fond de la raie à trois mètres de distances des tubes d'accès neutroniques. Après la première irrigation gravitaire, les tiges ont été installés verticalement (*Figure 8*), à partir de la surface du sol pour les mesures à 0-30 cm, et à partir des petites fosses réalisées à la tarière et à la bêche pour les mesures en profondeur (pour les couches de 30-60 cm, 60-90 cm et 90-120 cm).

Un contrôle des mesures obtenues lors de la mise en place a permis de vérifier que le contact avec le sol était satisfaisant. Ce dispositif a été automatisé sur une centrale Campbell CR 10. Le calcul des teneurs en eau a été effectué en utilisant un étalonnage établi au laboratoire pour le sol du site de mesure (Quinones et Ruelle, 2001).

Figure 8 Schéma d'installation des capteurs TDR sur le terrain



2.2.1.2 Mesure de la charge hydraulique par les tensiomètres

Le suivi des charges hydriques à l'aide de tensiomètres avait pour objectif de déterminer la position du plan de flux nul et le sens de l'écoulement. Afin de disposer d'une meilleure précision, les charges sont lues sur des multimanomètres à mercure. Leurs caractéristiques sont présentées en *Annexe 1.15*.

En 1999 cinq sites « complets » de tensiomètres ont été disposés sur les sites moyens des traitements en gravitaire (*Ta-moy*, *Te-moy*) et sur les sites *ETM* et *Sec*. Dix tensiomètres ont été placés sur le billon à 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 110, 130 et 150 cm de profondeur, avant la réalisation des raies. Cinq autres sites: 2 sites en amont et 2 autres en aval en «gravitaire» et le site *ON* ont été installés quelque jours après la réalisation des raies. Ces sites ont été équipés de 5 tensiomètres placés sur le billon aux profondeurs: 40, 70, 100, 130 et 150 cm. En 1997 et 1998 des dispositifs équivalents ont été utilisés. Les lectures des tensiomètres ont été effectuées quotidiennement (au moins 5 à 6 jours sur 7) entre 8 et 9 heures du matin pour que l'influence de la température soit limitée.

2.2.2 Mesure des caractéristiques du déroulement de l'irrigation

2.2.2.1 Mesure de l'avancement

Des mesures de l'**avancement** ont été effectués pour identifier les caractéristiques d'infiltration lors des arrosages. Des jalons ont été placés toutes 5 raies aux abscisses 20, 30, 50, 70, 90, 110 et 130 m. Le temps de passage du front de l'eau (t_n) au niveau de chaque jalon à partir du début de la mise en eau des raies est noté pour chaque raie, ainsi que le temps précis de la coupure d'eau et la durée totale de l'arrosage. En aval des raies bouchées, un suivi des tirants d'eau a également été réalisé lors certaines irrigations.

2.2.2.2 Mesure des débit en tête

La mesure des débits d'entrée est nécessaire à l'estimation des doses brutes apportées ainsi qu'à la modélisation. Elle s'effectue au moyen de seuils jaugeurs installés en tête de raie. Lors de notre expérimentation le débit entrant dans chaque raie à été mesuré à chaque irrigation.

2.2.3 Déterminations agronomiques

2.2.3.1 Suivi des stades phénologiques

Le suivi de l'évolution de la culture est d'importance capitale, puisqu'elle conditionne à la fois la consommation hydrique, l'absorption d'azote, les potentialités de la culture et la production finale. Pour cette raison, pendant la saison culturale, les **stades phénologiques** du maïs (nombre de feuilles, hauteur, floraison) ont été enregistrés régulièrement. Afin d'estimer le stade de maturation, l'humidité des grains a été déterminée plusieurs fois à la fin du cycle cultural.

2.2.3.2 Etude de l'indice foliaire (LAI)

L'indice foliaire caractérise la surface photosynthétiquement active de la culture, constituée principalement par l'ensemble des feuilles vertes. Le développement foliaire, caractéristique de l'espèce et qui peut varier avec la variété, est suivi par des mesures manuelles ou à l'aide de mesures automatiques (ici Picqhélios). Le suivi du LAI présente un intérêt dans la mesure où la surface foliaire conditionne directement les prélèvements hydriques de la plante et la production de matière sèche et que représente, avec la résistance stomatique, le paramètre le plus critique de la transpiration (Boulet et al., 1999).

2.2.3.2.1 Mesure manuelle de LAI

Le LAI est calculé à partir de la mesure de la longueur (L en m) et de la largeur (l en m) de chacune des feuilles, par la relation empirique suivante:

$$LAI = \frac{\sum_{\text{plantes}} \sum_{\text{feuilles}} L \cdot I \cdot 0.75}{S}$$

Équation 27

S surface de la placette[m²]

Une série de **mesures manuelles** de la surface foliaire a été effectuée sur des placettes de 2.14 x 0.8 mètres (1 rangée) en 1998 sur le site *ETM*, et sur des placettes de 2 x 1.6 mètres (2 rangées) sur les sites *ETM* et *Sec* en 1999 afin de valider et corriger les données du Picqhélios. La proportion du nombre de feuilles entièrement jaunes sur les placettes a été aussi notée. Toutefois le LAI déterminé par mesure directe doit tenir compte du peuplement et son utilisation dans certains traitements est délicate.

2.2.3.2 Mesure par Picqhélios

Il s'agit d'un appareil qui permet de caractériser un couvert végétal par la valeur de l'efficacité d'interception (ϵ_i) de l'énergie reçue par la culture dans le domaine des longueurs d'ondes photosynthétiquement actives (PAR). Elle est donc étroitement corrélée à l'indice foliaire, ainsi qu'aux propriétés des feuilles (dont le port et la forme géométrique).

L'appareil Picqhélios permet d'évaluer de façon rapide l'indice foliaire d'une culture, à travers la relation suivante, dérivée de la loi de Beer-Lambert:

$$LAI = \frac{1}{k} * \ln\left(1 - \frac{\epsilon_i}{0.95}\right)$$

Équation 28

ϵ_i efficacité de l'interception (compris entre 0 et 0.95)
 k coefficient d'extinction moyen du couvert considéré ($k = 0,7$ pour le maïs)

Les mesures effectuées en se déplaçant sur une longueur donnée permettent de mieux tenir compte de la variabilité spatiale. La précision de la mesure dépend du coefficient d'extinction K du couvert foliaire de l'espèce considérée. Lorsque l'efficacité atteint des valeurs supérieures à 90 %, la précision devient insuffisante pour discriminer des indices foliaires élevés. De plus, l'appareil comptabilise les feuilles en cours de dessèchement et n'est pas utilisable pendant la sénescence.

Le LAI a été mesuré environ une fois par semaine vers 10 h, sachant que le LAI peut diminuer fortement l'après-midi par suite de la modification du port des feuilles en cas de stress (Olufayo, 1994).

2.2.3.3 Détermination de la production de MS et du rendement final

Les prélèvements de culture ont été effectués à la récolte et, en complément, au début août en 1998 et 1999, pour chaque traitement. En général les placettes d'une surface de 5 m² environ incluent 3 rangées pour tenir compte des effets de compétition. Lors du prélèvement d'août seulement une placette par site a été échantillonnée. A la récolte 6 à 8 placettes par site sont récoltées afin de déterminer à la fois la quantité de **matière sèche** (MS) produite et le **rendement en grain**.

Les pieds et les épis ont été comptés par rangée et par placette, puis récoltés, pesés (poids humide) et séchés en étuve pendant 48 à 72 heures à 80 °C et pesés de nouveau (poids sec). Un contrôle a été effectué ensuite par un nouveau passage à l'étuve pour vérifier si le séchage était complet. Les épis ont été égrainés et un sous-échantillon a été choisi pour le comptage des grains et le calcul du poids de 1000 grains. Ensuite les tiges, grains et rafles ont été broyés séparément pour l'analyse de la teneur en azote de la culture.

Il nous semble important d'indiquer que la détermination du rendement en matière sèche totale (MST) est délicate. En effet la mesure de la matière verte des tiges (et feuilles) est aisée mais la détermination du taux de MS est laborieuse du fait que toutes les plantes ne présentent pas le même état de dessèchement (proportion de feuilles vertes variable) et que la grande masse végétale par placette impose un sous-échantillonnage difficile même en opérant sur des volumes importants.

Les modalités de détermination ont varié suivant les années: échantillonnage de quelques plantes par chaque placette en 1997 et 1998, et choix de 2 placettes dont on sèche l'ensemble des tiges et feuilles en 1999. L'absence de différences visuelles entre placettes en 1999 a conduit à retenir cette modalité pour avoir une meilleure estimation de la teneur en matière sèche. Par contre, la précision obtenue sur les grains est très bonne du fait que l'on peut sécher l'ensemble de l'échantillon.

2.2.3.4 Température de surface du couvert

Le Stress Degree Day, cumul des écarts entre la température de surface T_s et la température de l'air T_a , constitue un indicateur d'état de stress de la culture. Les mesures sont possibles à l'aide d'un radiothermomètre portable lorsque l'indice foliaire dépasse la valeur de 2 environ. Cet appareil mesure le rayonnement l'infra-rouge émis par les végétaux, qui varie avec la température. La différence avec la température de l'air (T_a , mesurée avec un thermohygromètre portatif CORECI à chaque mesure de T_s) permet de calculer le SDD (Idso et al., 1977).

Dans notre cas, le SDD n'a pas été utilisé pour le pilotage de l'irrigation mais pour valider la conduite à l'ETM (à contrôler que l'ETM n'était pas stressé), et à déterminer les niveaux du stress pour les autres sites. Les mesures ont été effectuées principalement à la veille des irrigations pour connaître l'état de stress avant les apports d'eau¹³.

¹³ Les mesures sont très sensibles aux conditions météorologiques instantanées, en particulier au vent et aux nuages, l'utilisation de cette méthode est donc préférable sous climat stable: les conditions requises correspondent à une journée à rayonnement stable et peu ventée.

2.2.4 Suivi des bilans et des flux d'azote

Les bilans d'azote ont été réalisés à partir de prélèvements de sols effectués sur l'ensemble des sites de mesures et des traitements, généralement à 3 dates (semis, début août et récolte), parallèlement à des mesures sur la culture. Dans le cas de l'irrigation à la raie, ils étaient complétés par une caractérisation des concentrations en azote de la solutions du sol en dessous de la zone racinaire (1,4 m) par prélèvements à l'aide de bougies poreuses implantées sous le billon.

2.2.4.1 Prélèvement des échantillons du sol pour l'analyse d'azote

Etant donné que dans les sols cultivés, c'est la profondeur maximale d'enracinement qui est à prendre en compte (Pansu et al, 1998): 120 cm pour le maïs dans les conditions données de notre parcelle, la profondeur maximale d'échantillonnage de 150 cm a été retenue pour pouvoir suivre l'évolution de la teneur en azote en dessous de la zone racinaire. L'épaisseur de chaque couche (30 cm) a été uniforme sur chaque site et répétée de manière identique de façon à pouvoir comparer des données provenant d'une même couche de sol. Sur les sites en irrigation par aspersion (tous les sites en 1997 et 1998 et les sites *ETM*, *ON* et *Sec* en 1999), les analyses ont été faites sur les horizons 0-30, 30-60, 60-90, 90-120 et 120-150 cm.

Sur chaque site «gravitaire» les prélèvements ont été réalisés sur le billon et au fond de la raie. Les profondeurs (à partir de la surface du sol) ont été les suivantes: 0-8, 8-38, 38-68, 68-98, 98-128 et 128-158 cm sur le billon et 0-22, 22-52, 52-82, 82-112 et 112-142 cm au fond de raie, en sachant que la cote 38 cm sous le billon et la cote 22 cm dans la raie correspondent à la profondeur 30 cm du niveau initial avant la confection des raies (niveau de référence). Des échantillonnages supplémentaires avant l'irrigation fertilisante sur le site *Te-moyen* ont été réalisés en position intermédiaire pour compléter les observations sur le billon et dans la raie.

Les prélèvements ont été effectués à l'aide de tarières manuelles. Sur Lavalette nous avons utilisé les tarières hélicoïdales de diamètre 4.5 cm (et au Mexique de 6 et de 13 cm). Nous avons exécuté un nombre important de prélèvements par site (7 en surface et 4 en profondeur), qui ont servi à la réalisation d'un échantillon moyen. L'homogénéisation de l'échantillon présente une importance particulière du fait de la faible quantité de sol utilisée pour l'analyse au laboratoire. Les échantillons humides n'ont été conservés que pendant une courte période, en double sac ou boîtes étanches, à l'abri de la lumière et à une température basse, dans un réfrigérateur.

2.2.4.2 Mesure d'azote minéral du sol par bougie poreuse

La concentration en azote de la solution du sol en dessous de l'enracinement a été mesurée à l'aide des bougies poreuses (*Annexe 1.16*). Des bougies poreuses de diamètre 63 mm ont été implantées à 140 cm de profondeur sur les sites moyen et aval de chaque traitement «gravitaire». Les prélèvements

de la solution du sol ont été réalisés systématiquement après les apports d'eau. Les bougies ont été mis en dépression juste avant les irrigations, avec une dépression supérieure de 50 cm d'eau à celle lue sur les tensiomètres implantées aux profondeurs voisines (à 130 et 150 cm). Pendant la période pluvieuse en septembre et octobre, nous avons réalisé un suivi pour appréhender la vitesse de remplissage de la bougie.

2.2.4.3 Mesures des autres éléments du bilan d'azote

Les apports par l'eau d'irrigation ont été évalués par analyse de la **concentration en azote de l'eau d'irrigation** à la sortie de la conduite de distribution. Lors de l'irrigation fertilisante, des échantillons de l'eau ont été prélevés au niveau des sites de mesures sur le traitement Te. Les **apports d'azote** réels effectués lors de l'épandage d'engrais ont été mesurés au moyen de cuvettes placées autour des sites de mesure. La teneur en azote des plantes a été obtenue sur les échantillons utilisés pour déterminer la MS (2.2.3.3).

2.2.5 Critique des méthodes expérimentales: représentativité des échantillons et précision des mesures

Les mesures de terrain sont toujours entachées d'imprécision, mais dans la plupart des cas, l'erreur de mesure est nettement plus faible que les variations spatiales enregistrées. La précision nécessaire lors de l'installation n'est pas la même pour tous les appareils et pour toutes les profondeurs. Par exemple, l'incertitude sur la position de la bougie a une incidence plus importante pour les tensiomètres situés à proximité de la surface que pour ceux installés en profondeur, sauf lorsque des gradients de charge sont calculés.

Concernant les mesures tensiométriques, en supposant qu'il n'existe pas d'air dans les capillaires, les causes d'erreur sur la mesure de la charge sont: ❶ La céramique poreuse a une longueur moyenne de 6 cm, ce qu'implique une incertitude de ± 3 cm sur Z. ❷ La lecture du niveau de mercure se fait au mieux à ± 0.1 cm, qui correspond à ± 1.26 cm d'eau sur H. ❸ En fin, la variation de niveau de mercure dans le flacon introduit une erreur relative de 2 %. L'imprécision totale est donc d'environ 7 cm pour une mesure de 126 cm d'eau (10 cm de colonne de mercure) (SDEC, 1999). On doit noter que si l'on veut faire une mesure relative au moyen de deux tensiomètres (estimation du gradient de charge à un niveau moyen de contrôle), il faut mettre les deux capillaires manométriques dans le même flacon de mercure.

La mesure de l'humidité à la sonde à neutron dépend de la fiabilité de la relation d'étalonnage. L'erreur de mesure d'un stock d'eau varie de 7 à 10 % selon Havercamp et al. (1984). La mesure par sonde à neutrons prend en compte un volume d'échantillon plus important que les prélèvements à la tarière, annulant ainsi l'effet de certaines micro-hétérogénéités du sol. Le rayon théorique de la sphère d'influence R peut varier dans une gamme allant de 7 à 10 cm pour un sol humide, et 10 à 25 cm pour

un sol sec (Hillel, 1974). Ce pouvoir de résolution spatial limite sa précision dans la couche de surface et rend l'instrument peu précise pour la détection de discontinuités dans la teneur en eau .

La précision de la mesure de l'humidité par les sondes TDR dépend également de la fiabilité d'étalonnage. La précision de la sonde CS-615 (Campbell) utilisée à Lavalette, est de $\pm 2.5 \%$ de l'humidité volumique en cas des sols typiques. La salinité affecte la précision de la sonde: si la conductivité électrique du sol dépasse le 20 dS/m, la sonde devient inutilisable. Les mesures TDR dépendent aussi de la température (Campbell, 1997).

L'inconvénient des mesures par les bougies poreuses est que la taille réduite du collecteur ne permet pas de prendre en compte la variabilité spatiale du milieu (Duwig, 1998) et les mesures sont soumises à la variabilité des propriétés physiques du sol (Addiscott, 1990).

Quant aux mesures de débit en irrigation à la raie, l'erreur sur les débits fournis par les tables est inférieure à 2 %. L'imprécision de la mesure du débit proviendra donc d'une imprécision de la mesure du niveau d'eau. Selon Berthome (1991), la charge à l'amont des seuils étant mesurée avec une règle en acier, l'erreur sur la lecture est de l'ordre de 1 mm. L'erreur d'horizontalité longitudinale est de 1 mm pour les seuils Parshall, et l'erreur due à la pose et à la lecture est de ± 0.04 l/s pour un débit moyen observé en tête de raie de 1 l/s. En ajoutant l'erreur de construction mentionné, l'erreur totale serait égale à ± 0.055 l/s pour les débits mesurés.

2.2.6 Description des campagnes d'irrigation

La quantité d'eau apportée par aspersion a été mesurée à l'aide des pluviomètres de diamètre 30 cm (4 autour de chaque site). Sur les sites d'irrigation gravitaire la dose apportée a été calculée à l'aide du modèle Raieopt (*Chapitre 4*). Le calendrier des apports est donné dans le *Tableau 12*, *Tableau 13* et *Tableau 14* pour les différentes années. L'irrigation par aspersion a été réalisée en période peu ventée en arrêtant les apports pour des vents supérieurs à 2 m/s.

En ce qui concerne le site *Sec* irrigué seulement pour assurer la levée, les apports ont été de 17 mm (le 14/5) et 19 mm (le 20/5) en 1998, et 22 mm (le 1/6) et 7 mm (le 15/6) en 1999.

En 1997 le traitement *ETM* a été irrigué à l'aide d'une couverture intégrale (de 12 x 12 m en triangle), tandis que sur les autres traitements l'irrigation a été faite par canon et enrouleur. La campagne d'irrigation a débuté le 27 mai, et l'apport suivant n'a été réalisé que début juillet, car les fortes pluies de la première semaine de juin ont permis de maintenir la culture dans un état hydrique relativement satisfaisant. Puis, les irrigations ont été menées en fonction d'un rythme prédéfini (une fois par semaine pour l'*ETM*, au tour d'eau pour les sites nord, centre et sud) et en tenant compte des pluies et de la disponibilité du matériel. La dernière irrigation (du 26/8) a été décidée en suivant l'humidité du grain (le maïs ne valorisant plus les apports d'eau en dessous de 40 % d'humidité). Le site conduit à l'*ETM* a reçu un apport de 221 mm de fin mai à fin août, en 9 irrigations, tandis que les sites *Nord*,

Centre et Sud ont reçu des apports totaux intermédiaires et plus ou moins différenciés, en 4 ou 5 apports (Tableau 12).

Tableau 12 Itinéraire de l'irrigation sur chaque site en 1997 (mm)

date	pluie	ETM	Nord	Centre	Sud
5-17/5	27				
27/5			17	29	27
28/5			5		
30/5		29			
31/5-5/6	108				
21/6-2/7	31				
3/7		25			
8/7		30			
17/7	45				
22/7			32		
23/7				24	20
25/7		19			

date	pluie	ETM	Nord	Centre	Sud
28/7		30			
1/8		30	24.		
4/8			33		
5/8				34	42
10-11/8	30				
14/8		12			
18/8	8.0	16			
21-25/8	5.				
26/8		30			
27/8-1/9	17				
% ETM	-	100	50	39	40
total	271	222	111	86	89

En 1998 les sites *ETM*, *ON* et *Nord* ont été équipés d'une couverture intégrale de 12 x 12 m. Les autres sites ont été irrigués au canon tracté par un enrouleur. Afin d'observer l'effet d'un apport d'eau important, le site *Nord* a reçu une irrigation de 102 mm le 27 juillet, et le site *SOE* un apport de 120 mm le 31 juillet (Tableau 13). Pendant le reste de la campagne le site *SOE* a été légèrement sous-irrigué, de la même manière que le site *SE*, qui a reçu un apport total de 130 mm. Le site *ON* a reçu un apport voisin à celui appliqué sur le site *ETM* (284 mm par rapport à 323 mm).

Tableau 13 Itinéraire de l'irrigation sur chaque site en 1998 (mm)

date	pluie	ETM	ON	Nord	SE	SOE
14/5		17	14	27		
15/5					21	21
19/5		17	14	18		
20/5					12	23
27-31/5	38					
03-11/6	4					
13/6					11	12
16/6		11	8	8		
17/6		18	6	41		
19/6						14
24/6		29	16	25		
25/6				30		
26/6		17	14	17		
29/6-2/7						
02/7		32	25	30		
03/7					24	25

date	pluie	ETM	ON	Nord	SE	SOE
09/7					28	45
10/7		24	26	34		
11-13/7	3					
15/7		30	36	31		
16/7				21		
17/7				18		
21/7		26	26			
24/7					34	58
27/7		26	27	102		
31/7		8	8	14		120
2-3/8	17					
05/8		13	7	27		
13/8	30	27	28	33		
16/8						40
20/8		28	29	30		
2-6/9	54					
total	146	323	284	506	130	358

En 1999 la campagne d'irrigation a débuté le 29 mai (Tableau 14), 3 jours après le semis pour obtenir des bonnes conditions d'humidité du sol pour la germination. Les deux premiers arrosages (fin mai et 15 juin), sur l'ensemble de la parcelle, ont été réalisés par canon et enrouleur. Ces arrosages ont été réalisés par deux passages sur la parcelle: d'abord sur la partie nord (traitements *ETM*, *Ta*), puis la partie sud (*Ta*, *Te*, *ON*, *Sec*). On peut noter qu'il y a eu un recouvrement entre passages sur une partie

du traitement *Ta*, notamment sur les sites de mesures. A partir du début juillet les sites *ETM* et *ON* ont été irrigués par couverture intégrale de 12 x 12 m, tandis que sur les autres sites (traitements *Ta* et *Te*), l'irrigation gravitaire était appliquée. Les problèmes de disponibilité du matériel ont retardé la réalisation des raies, ce qui a repoussé les irrigations gravitaires début juillet et infligé un stress modéré à la culture.

La sous-parcelle « gravitaire », planée au laser avec une pente de 0.25 %, comportait une centaine de raies de 130 m de long. Les raies, de forme trapézoïdale, ont été réalisées le 5 juillet, avec une profondeur moyenne de 15 cm, de largeur au fond de l'ordre de 10 cm et 40 cm de largeur maximale (il s'agit de valeurs moyennes). Les irrigations ont été réalisées par poste de 15 à 30 raies, en fonction des débits utilisés (0,7 à 1,2 l/s/raie). Comme matériel de distribution de l'eau nous avons utilisé la rampe à vannettes. Les conditions climatiques de la campagne ont été caractérisées par quelques pluies d'orage qui nous ont conduit à supprimer des irrigations. De ce fait seulement 3 irrigations gravitaires ont été réalisées, avec cependant une différenciation importante des doses apportées (calculées par le modèle Raieopt). Les doses (*Tableau 14*) importantes de la première irrigation gravitaire sur le traitement *Te* ont été imposées par le problème d'avancement de l'irrigation suite au choix d'un faible débit (sous-estimation des potentialités d'infiltration).

Tableau 14 Calendrier des irrigations (et des précipitations) sur chaque site en 1999 (mm)

Date	pluie	ETM	ON	Sec	Ta-amo	Ta-moy	Ta-aval	Te-amo	Te-moy	Te-aval
29/05		24			23	19	18			
01/06			22	22	22	17	13	27	20	21
03-07/06	14									
15/06		31			14	16	16			
16/06			31	7	11	8	11	20	28	26
26-27/06	15									
05/07	13									
09/07								270	120	100
10/07			14		51	60	106			
12/07		43	35							
21/07		39	40							
22/07					64	61	93			
23/07								135	124	117
28/07	15	38	49							
30/07-04/08	17									
06-07/08	45									
19/08	3	29	51							
24/08								87	88	125
25/08					41	42	85			
26-28/08	13									
03/09	4	22	30							
05-06/09	42									
14-15/09	52									
19-24/09	13									
05/10-05/11	146									
TOTAL	392	236	272	29	226	223	342	539	380	389

2.3 RESULTATS AGRONOMIQUES

Dans cette partie nous présentons une analyse succincte des observations liées au développement de la culture qui fournira les éléments nécessaires aux simulations par le modèle STICS (calage et validation). La comparaison entre les différentes années n'est pas réalisée ici, les résultats sont influencés par les densités et des dates de semis, qui sont différentes et l'analyse de ces différences sort du champ de cette étude.

2.3.1 Conduite de la culture

Pour les différentes campagnes la date de semis du maïs a été imposée par les conditions climatiques et de contraintes d'organisation des chantiers. Les écartement entre les lignes de semis a été toujours de 0,80 m, avec une orientation des lignes est-ouest. Après chaque récolte du maïs précédent, 10 à 15

Tableau 15 Conduite de la culture sur les 3 années

	1997	1998	1999
Date de semis	2 mai	6 mai	26 mai
Densité* (grains/ha)	82 000	100 000	115 000
Date de récolte	15 septembre	20 septembre	10 octobre
Densité* finale (plante/ha)	69 000	73 000	104 000

* valeurs moyennes sur l'ensemble de l'essai

La diminution importante du nombre de pieds de maïs entre la levée et la récolte en 1997 et 1998 est dû à la fois à des problèmes de techniques culturales sur une partie de l'essai et d'attaques de vers gris (surtout en 1998).

Toutes les interventions culturales et les apports d'eau et d'engrais ont été enregistrés et sont précisés en annexes.

2.3.2 Croissance-développement

Les dates d'observation des stades phénologiques de la culture en 1997 sont données, à titre d'exemple, dans le *Tableau 16*. La floraison a été observée le 14 juillet en 1997 ainsi qu'en 1998, et le 29 juillet en 1999. La somme de température nécessaire pour atteindre ce stade (980°C en base de 6°C, AGPM, 1996) est atteinte respectivement le 16 juillet en 1997 et à la date observée les autres années. La culture a donc suivi un développement très proche de celui espéré.

Tableau 16 Stades phénologiques en 1997

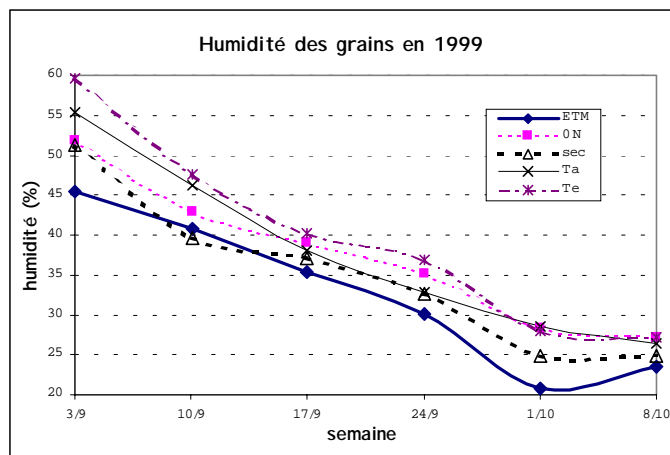
date	stade	date	stade
2 mai	semis	14 juil	floraison
13 mai	levée	29 juil	remplissage du grain
28 mai	4-5 f	7 août	grain laiteux
16 juin	10 f	13 août	grain pâteux
23 juin	11-12 f	22 août	grain pâteux dur
30 juin	14 f	28 août	grain vitreux
7 juil	16 f	8 sept	maturité

t/ha de résidus selon les traitements ont été enfouies après broyage au cours de l'hiver.

On notera que la densité au semis a été augmentée afin de se rapprocher des potentialités de rendement de la variété.

En fin de cycle, la maturité a été suivie à partir de la détermination de l'humidité (*Figure 9*). En 1999

Figure 9 Evolution de l'humidité du grain en fin de campagne 1999



l'humidité du grain a été analysé de manière hebdomadaire pendant le dernier mois de la campagne. Un échantillon comportant cinq épis, provenant de chaque traitement a été analysé. La vitesse de dessèchement calculé en fonction de la température moyenne journalière a été de 0.033 à 0.038 % par unité de température (°C) selon le traitement. Le 1 octobre, l'humidité est inférieure à 30 % sur tous les traitements. L'échantillon restreint ne permet pas

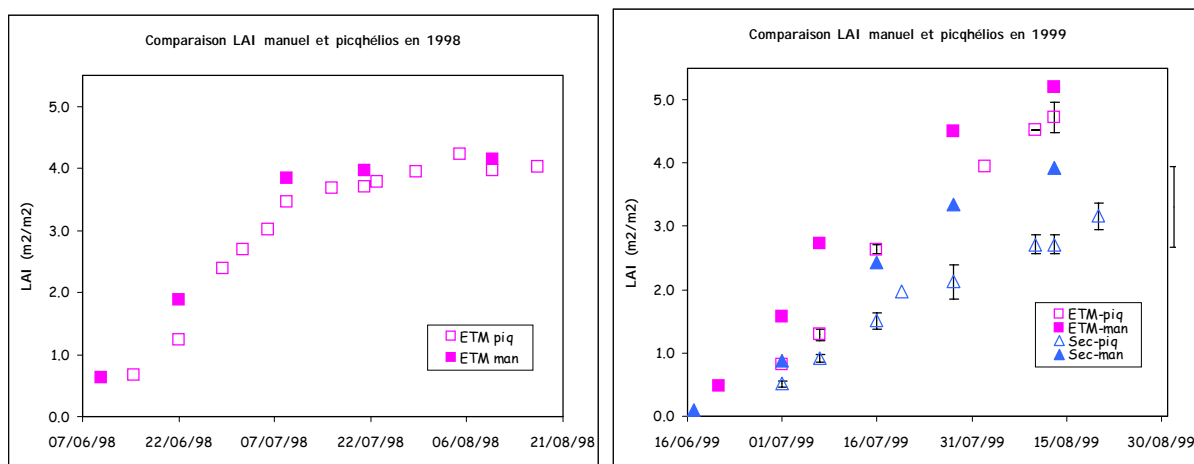
d'analyser les différences observées; cependant la dessiccation du grain est plus rapide sur *ETM*.

2.3.3 Mesure du LAI

2.3.3.1 Calage du Picqhélios

En 1998 et 1999 où nous disposons d'un suivi manuel assez complet, nous avons constaté un écart entre les valeurs de LAI mesurées manuellement et celles obtenues par l'appareil Picqhélios, sur tous les sites suivis et sur les deux années (*Figure 10*). Nous proposons donc de corriger les valeurs des observations du Picqhélios (qui sous-estime le LAI), en utilisant une relation calée sur les sites de mesures manuelles.

Figure 10 Evolution de LAI mesurées manuellement et par Picqhélios



Etant donné que les écart entre les valeurs manuelles et Picqhélios diminuent au milieu du cycle, nous proposons un formule logarithmique pour l'ajustement. Une relation unique n'a pas pu être retenue, comme le montre la *Figure 11*. L'écart différent entre les deux années peut probablement être imputé au vieillissement de l'appareil et peut-être à un effet de la densité du maïs.

Nous proposons donc une formule de correction différente pour 1998 et 1999 (*Tableau 17* et *Figure 12*). La *Figure 12* illustre l'ajustement des valeurs mesurées par l'appareil Picqhélios par rapport aux mesures manuelles, sur le site *ETM* en 1999.

Tableau 17 Formules d'ajustement pour LAI

Sites prises en compte	Nb*	Formule d'ajustement	R ²
ETM99, Sec99	6	$1.928 * \ln(LAI_{picq}) + 2.024$	0.976
ETM98	4	$1.921 * \ln(LAI_{picq}) + 1.469$	0.999

* nombre d'échantillons

Figure 12 illustre l'ajustement des valeurs mesurées par l'appareil Picqhélios par rapport aux mesures manuelles, sur le site *ETM* en 1999.

Figure 11 Comparaison des valeurs de LAI mesurées manuellement et par Picqhélios

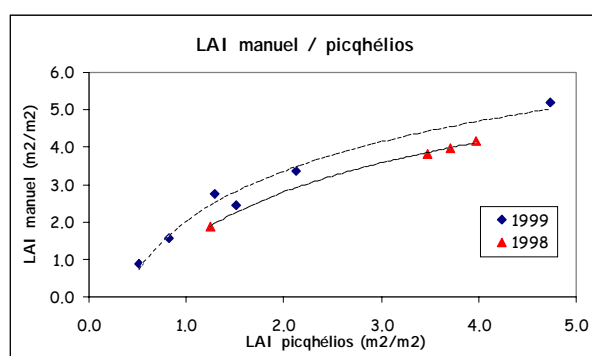
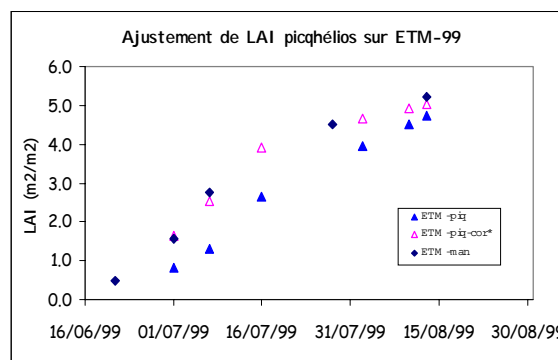


Figure 12 Ajustement des valeurs de LAI mesurées manuellement et par Picqhélios



En absence de mesures manuelles en 1997, les mesures brutes du Picqhélios ont été conservées. L'effet de la correction étant faible en 1998, on peut estimer qu'elle n'était pas nécessaire en 1997.

2.3.3.2 Analyse des résultats de LAI

En 1997 au début du cycle, la surface foliaire a été la même pour tous les sites (*Figure 13*). Ceci s'explique par le fait que les traitements n'étaient pas encore différenciés, en particulier en raison des fortes pluies de début juin. La valeur maximale de l'indice foliaire en 1997 s'est situé vers 4 m²/m². Les valeurs données par le Picqhélios ne montrent pas de différence significative entre le site *Sec* et les autres sites (sauf *ETM*), mais une sur-estimation du LAI sur le site *Sec* est possible fin août car de nombreuses feuilles sénescents sont encore dressées et comptabilisées avec le Picqhélios (Yen, 1997).

En 1998 on dispose de nombreuses valeurs de LAI. Contrairement aux deux autres années, les mesures de LAI ont été faite aussi en phase de sénescence, données qui nous seront utiles pour le calage du module de culture du modèle STICS.

Figure 13 Indices foliaires (LAI) mesurés par Picqhélios en 1997

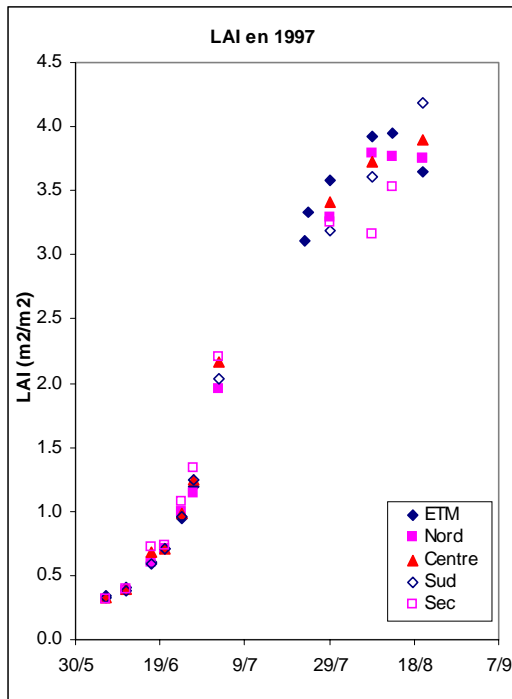
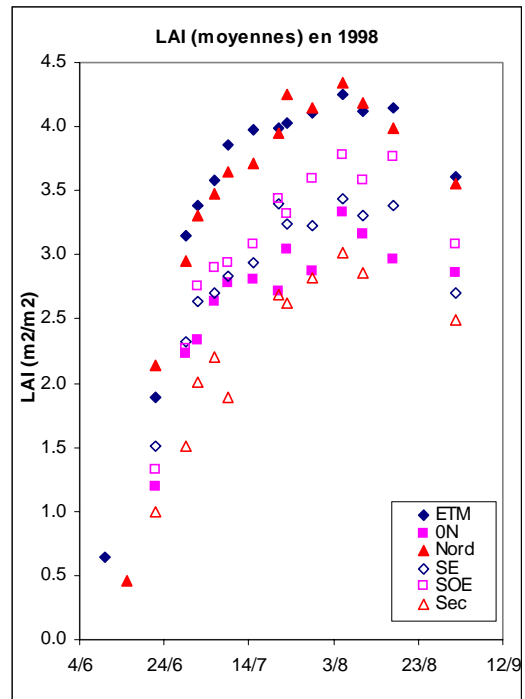


Figure 14 Indices foliaires (LAI) mesuré par Picqhélios en 1998



On peut noter que la croissance foliaire a été presque identique sur les sites *ETM* et *Nord* (Figure 14), qui ont par ailleurs reçu des doses d'eau similaires. Le site *ON* a subi un stress azoté, qui a eu un effet de diminution de LAI depuis du début du cycle par rapport aux autres sites sans stress (*ETM* et *Nord*). Les autres sites (*SE*, *SOE* et *Sec*) ont subi par contre un stress hydrique plus ou moins important, ce qui est confirmé par les mesures de température de surface (annexe 1.4).

En 1999 on peut observer un fort retard du développement foliaire sur le site *ON* depuis le début du cycle, dû au stress azoté (Figure 15).

Sur le site *Sec* l'écart par rapport au traitement sans stress (site *ETM*) est moins accentué, car l'été 1999 a été très humide. Les écarts types élevés sur le site *ETM* témoignent d'une certaine hétérogénéité dans la croissance de LAI du maïs sur ce site. Par contre, l'analyse visuelle des plantes ne confirme pas une hétérogénéité forte.

Les valeurs moyennes de LAI sont calculées à partir de 13 mesures en général: peut-être il faudrait augmenter le nombre de mesure pour avoir une meilleur précision. L'hétérogénéité de LAI sur le site *Sec* est moins forte, ce qui confirme aussi que la plante n'a pas souffert des forts stress hydriques, car le stress (hydrique ou azoté) augmente l'hétérogénéité du développement de la plante.

Figure 15 Indices foliaires obtenus par correction des mesures Picqhélios, sur les sites en aspersion

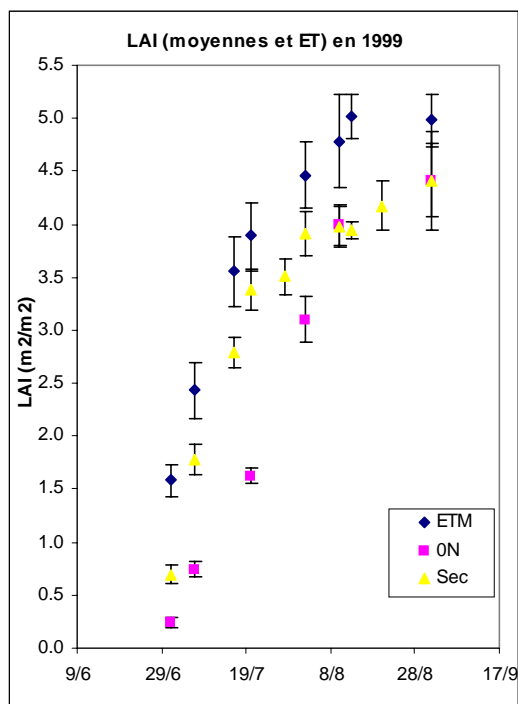
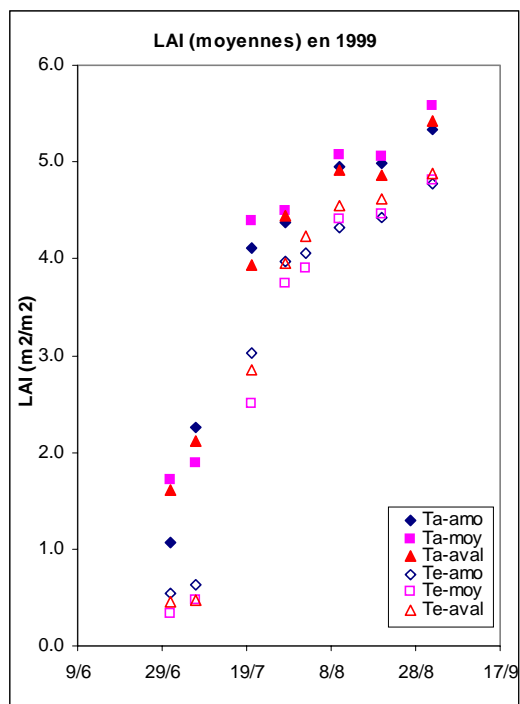


Figure 16 Indices foliaires (LAI) sur les sites en gravitaire



En comparant les sites sous irrigation gravitaire (Figure 16), on peut observer que le développement du LAI a été beaucoup moins rapide sur le traitement *Te* (partie Sud) que sur le traitement *Ta* (partie Nord). Cette différence peut être rapprochée de la texture légèrement plus riche en éléments argileux de l'horizon de surface, qui induit des conditions moins favorables à la croissance de la culture en début de cycle, comme l'ont fait apparaître les observations sur plusieurs années. En 1999, il faut y ajouter la présence d'un horizon du sol plus compacté résultant des travaux de planage qui a certainement ralenti la progression racinaire, et un retard de 3 jours de l'irrigation de semis par rapport au traitement *Ta*.

2.3.4 Température de surface du couvert

L'état hydrique du couvert a été suivi par les mesures de la température de surface des feuilles (T_s), à l'aide d'un radiothermomètre infrarouge portable.

A titre d'exemple nous présentons ici les résultats obtenus en 1999 (Tableau 18). Les résultats obtenus en 1997 et 1998 sont rassemblés en annexe. On note que le site *ETM* n'a pas eu de stress selon les données disponibles, mais les écart-types sont assez élevés, ce que l'on peut rapprocher des difficultés des mesures (passages nuageux et brise de mer). Sur le site *ON* on observe un stress plus ou moins fort le 27 juillet, mais les écart-types étant élevés, on ne peut pas affirmer qu'il y a eu un stress marqué. De plus il n'a pas eu de mesure sur le site *ETM* ce jour-là, qui pourrait confirmer le stress, étant donné que les deux sites ont reçu les mêmes apports d'eau. Par contre le stress hydrique sur le site *Sec* s'est ac-

centué vers la fin du mois de juillet, puis grâce aux pluies du début d'août, ce traitement est revenu en situation de confort hydrique (son effet sur le LAI a déjà été commenté).

D'autre part, le stress sur T_e en juillet, malgré des apports assez élevés, est à imputer à un problème de développement racinaire. Ce dernier peut être lié à la structure du sol, texture plus argileuse et au traumatisme dû à la réalisation des raies. Ensuite les mesures réalisées le 21 juillet, juste avant la deuxième irrigation, témoignent d'un début de stress, ce qui a motivé l'irrigation gravitaire du lendemain. Par contre les observations ne montrant pas de stress le 17 août, l'irrigation a été reporté à une semaine plus tard; la veille de l'arrosage le stress était alors plus ou moins apparent selon le site. En fin de cycle, grâce aux pluies du mois de septembre, aucun stress hydrique n'a pu être signalé sur la totalité de la parcelle.

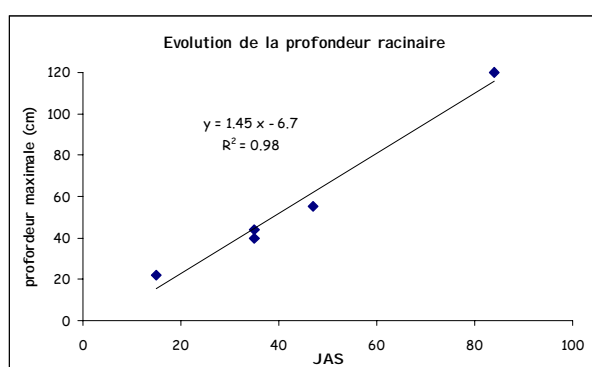
Tableau 18 Analyse du stress hydrique du maïs par mesure de la température de surface en 1999 (en SDD)

Date	sites en aspersion			sites en gravitaire					
	ETM	ON	Sec	Ta-amo	Ta-moy	Ta-aval	Te-amo	Te-moy	Te-aval
02/07/99	±		-0.4 ± 0.6		0.0 ± 0.5			1.0 ± 0.6	
09/07/99	0.0 ± 0.4		0.0 ± 0.4		0.0 ± 0.5	1.4 ± 0.7			
16/07/99	-0.1 ± 1.1	-1.6 ± 0.5	0.9 ± 0.9	-1.4 ± 1.4	-0.9 ± 0.6	-1.2 ± 0.6	1.2 ± 0.5	1.4 ± 1.2	1.6 ± 1.1
21/07/99				0.1 ± 0.7	0.1 ± 0.5	1.8 ± 0.4	2.8 ± 1.1	2.5 ± 0.9	
27/07/99		1.6 ± 1.3	2.8 ± 0.6						
17/08/99	-0.3 ± 0.7		0.0 ± 0.5	-1.4 ± 0.8	-1.0 ± 0.4	-1.0 ± 0.8	-1.7 ± 0.6	-0.2 ± 0.6	-0.2 ± 0.5
23/08/99				1.3 ± 0.2	0.8 ± 0.5	0.4 ± 0.7	0.2 ± 0.4	0.9 ± 0.3	0.4 ± 0.5

2.3.5 Enracinement

Seules quelques observations ont été réalisées (Figure 17). En 1997 l'enracinement a été observée en effectuant trois profils racinaires aux dates du 6 juin (35 JAS), 18 juin (47 JAS), 25 juillet (84 JAS) et

Figure 17 Evolution de la profondeur racinaire



à la récolte. La première observation donne un développement des racines jusqu'à 40 cm, tandis que la deuxième jusqu'à 55 cm, avec une zone de forte densité racinaire jusque à 29 cm. L'extension latérale était de 62 cm ce jour-là. A la floraison et en fin de cycle, l'enracinement maximum observé sur fosse atteint 120 cm.

En 1998, la profondeur maximale atteinte par les racines le 10 juin (35 JAS) était 44 cm, et la zone de forte densité racinaire se situait jusqu'à 28 cm de profondeur. En 1999 nous disposons seulement d'une mesure effectuée le 10 juin (15 JAS), selon laquelle la profondeur des racines s'est trouvée à 22 cm. La vitesse de progression racinaire en début de cycle est donc d'environ 1.5 cm/jour (Figure 17).

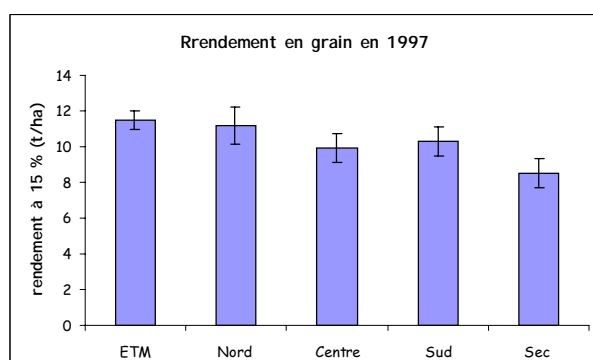
2.3.6 Rendement

Les résultats issus de l'analyse du rendement sont présentés année par année, par souci de clarté de la présentation.

2.3.6.1 Rendement en 1997

Les résultats pour la récolte en 1997, obtenus sur six placettes de taille de 4 à 6 m² par traitement, sont rassemblés par le *Tableau 19*.

Figure 18 Comparaison des rendements en grain en 1997



Le rendement potentiel de la variété Samsara (14.5 t/ha, pour le sol limono-argileux (AGPM, 1994)), n'a pas été atteint pour le traitement *ETM* qui plafonne à 11.5 t/ha (*Figure 18*). Les rendements des autres sites irrigués restent proches. Des irrigations supplémentaires apportées sur le site Nord conduisent à un rendement qui n'est pas significativement différents de *ETM*, si l'on tient compte de l'écart-type.

Les valeurs des composantes du rendement

Tableau 19 Rendement et composantes du rendement du maïs en 1997 (moyennes de 6 placettes de 4 à 6 m²)

		Rdt grain (t/ha) (h=15 %)	MS total (t/ha)	IR	Nb tiges /m ²	Nb épis /m ²	PMG (g) (h=0 %)	Nb grains /m ²	Nb grains /épi
ETM	moyenne	11.5	18.9	0.52	6.8	6.7	327	3057	456
	ET	0.5	1.0	0.01	0.3	0.3	9		
	CV (%)	5	5	2	4	4	3		
Nord	moyenne	11.2	17.9	0.53	6.7	6.7	314	3095	463
	ET	1.1	1.3	0.03	0.2	0.2	13		
	CV (%)	9	7	6	3	3	4		
Centre	moyenne	9.9	16.8	0.50	6.8	6.7	312	2767	413
	ET	0.8	0.9	0.01	0.3	0.5	19		
	CV (%)	8	5	2	4	7	6		
Sud	moyenne	9.5	15.6	*	7.0	6.8	303	2958	435
	ET	*	*	*	0.1	0.1	6		
	CV (%)	*	*	*	1	2	2		
Sec	moyenne	8.5	15.2	0.48	7.0	6.6	323	2289	346
	ET	0.8	1.2	0.01	0.2	0.03	36		
	CV (%)	9	8	3	2	<1	11		

* à cause de problèmes lors du séchage des grains, nous disposons seulement d'une valeur de rendement en grain obtenue à partir de deux échantillons, ce qui ne permet pas de calculer l'ET, le CV et l'IR

(*Tableau 19* et *Annexe 1.5*) font apparaître que le nombre de pied par m², et par suite le nombre d'épis, sont insuffisants. Pour cette raison la densité du semis a été augmentée lors de la campagne suivante. Le nombre de grains par épis et le nombre de grains par m² restent aussi insuffisant, il n'y a pas eu de compensation. Le poids de 1000 grains est assez bas pour cette variété à « gros grains » et il n'atteint

pas, sauf sur les traitements à *ETM* et *Sec*, la valeur donnée comme potentielle de 330 g (à 0 % H₂O) pour la variété Samsara. Par ailleurs, le nombre de rangs par épis est normal (entre 12 et 14).

Les résultats obtenus sur les autres sites sont à rapprocher des stress subis par la culture. On note que les sites Sud, Centre et *Sec* ont reçu une irrigation plus ou moins déficitaire depuis la floraison (*Tableau 20*).

Tableau 20 Apports et demande climatique sur les différents sites en 1997

1997	ETM	Nord	Centre	Sud	Sec	pluie	ETP
semis-7-8 feuilles	29	22	29	28	0	27	140
7-8 feuilles-floraison	54	0	0	0	0	140	160
floraison-remplissage	49	32	24	20	0	45	80
remplissage-maturité	89	57	34	42	0	43	110
TOTAL	221	111	87	89	0	254	490

L'effet du stress hydrique est accentué sur le traitement en *Sec*, mais le rendement reste bon à cause des fortes réserves du sol. Les restrictions hydriques ont entraîné une baisse du nombre de grains par épis assez sensible (346 en *Sec* contre 456 en *ETM*), mais par compensation le poids de 1000 grains est accru, mais avec une assez forte variabilité. On notera une légère baisse de l'indice de récolte dans les traitements avec stress (0.48 en *Sec* et 0.50 au Centre contre 0.52 en *ETM*).

2.3.6.2 Rendement en 1998

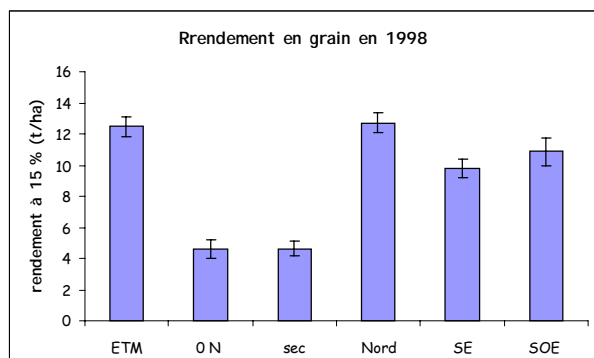
En 1998 la **récolte** manuelle a été réalisée entre le 15 et 29 septembre, sur sept à huit placettes d'une taille de 4.8 m² (2 mètres sur 3 rangs) par traitement.

Tableau 21 Rendement et composantes du rendement du maïs en 1998 (moyennes de 6 à 8 placettes de 4,8 m²)

		Rdt grain (t/ha) (h=15 %)	MS total (t/ha)	IR	Nb tiges /m ²	Nb épis /m ²	PMG (g) (h=0 %)	Nb grains /m ²	Nb grains /épis
ETM	moyenne	12.5	21.9	0.50	8.3	8.0	290	4175	523
	ET	0.6	0.7	0.01	0.5	0.6	33		
	CV (%)	5	3	3	6	7	11		
ON	moyenne	4.6	10.3	0.39	7.2	6.7	243	1284	192
	ET	0.6	1.1	0.02	0.5	0.6	17		
	CV (%)	13	11	4	7	10	7		
Sec	moyenne	4.6	9.6	0.42	5.9	5.3	241	1274	244
	ET	0.4	0.6	0.03	1.0	0.7	26		
	CV (%)	9	6	7	16	13	11		
Nord	moyenne	12.7	21.6	0.51	8.1	7.9	285	4160	524
	ET	0.7	0.9	0.01	0.4	0.5	17		
	CV (%)	5	4	3	5	6	6		
SE	moyenne	9.8	16.3	0.52	7.0	6.8	275	3095	454
	ET	0.6	1.2	0.01	0.6	0.5	33		
	CV (%)	6	7	2	8	7	0.12		
SOE	moyenne	10.6	18.6	0.49	7.5	7.3	259	3159	439
	ET	1.1	1.5	0.01	0.6	0.7	50		
	CV (%)	10	8	3	8	10	19		

L'augmentation du peuplement a permis une hausse du rendement sur les traitements bien irrigués grâce à l'accroissement du nombre de grain/m² (Tableau 21). Les rendements des sites *ETM* et *Nord* étaient très proches, l'apport excédentaire de 180 mm sur *Nord* n'a pas entraîné de baisse de rendement (Figure 19). Par contre, l'absence d'irrigation durant deux semaines en Juillet sur *SOE* et *SE* a fait chuter le rendement de 2 t/ha.

Figure 19 Comparaison des rendements en grain en 1998

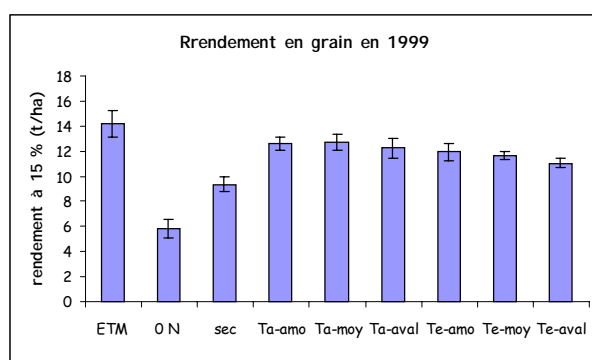


Sur le site *Sec* la baisse de rendement atteint 60 %. Cette baisse est occasionnée par la disparition de plantes de maïs au cours du cycle (30 % de réduction du nombre de tiges/m²). Le stress azoté (site *0N*) entraîne aussi une diminution du rendement de 60 % (Tableau 22) avec un effet sur toutes les composantes du rendement (diminution de la taille des épis: diminution du nombre de grains/épi et du poids de 1000 grains).

Le nombre de rangs par épis reste identique à celui de 1997 (annexe 1.5). Par contre le poids de 1000 grains est assez bas (de 241 à 290 g à 0 %) et inférieur à celui de 1997: son évolution est inverse de celle du nombre de grains par m² pour les traitements avec un niveau de stress modéré. L'indice de récolte reste voisin de 0.50 dans les cas peu ou pas stressés. Par contre il chute respectivement à 0.42 et 0.39 pour les traitements *Sec* et *0N*.

2.3.6.3 Rendement en 1999

Figure 20 Comparaison des rendements en grain en 1999



En 1999 la récolte pour l'analyse de rendement a été réalisée entre le 8 et 15 octobre. Cette année-là nous avons échantillonné 7 à 8 placettes par site, d'une taille de 4.8 m² (2 mètres sur 3 rangs). La totalité des épis de chaque placette (au total 64 placettes), mais les tiges de deux placettes seulement par site ont été séchées à l'étuve pour le calcul du rendement. Deux placettes par site ont été choisies pour le comptage des grains et pour le

calcul du poids de 1000 grains.

Le rendement potentiel de la variété a été atteint sur le site *ETM* (Tableau 22 et Figure 20), par contre sur les sites «gravitaires» les rendements obtenus ont été très proches, mais inférieurs au rendement potentiel.

Tableau 22 Rendement et composantes du rendement du maïs en 1999 (moyennes de 6 à 7 placettes de 4,8 m²)

		Rdt grain (t/ha) (15 %)	MS total (t/ha)	IR	Nb pieds /m ²	Nb épis /m ²	PMG (g) (h=0 %)	Nb grains /m ²	Nb grains /épis
<i>ETM</i>	moyenne	14.2	23.1	0.53	10.6	10.2	288	4048	409
	e.t.	1.1	1.4	0.01	0.2	0.3	24		
	cv (%)	8 %	6 %	2 %	2 %	3 %	8 %		
<i>0N</i>	moyenne	5.8	12.0	0.42	9.3	8.8	227	2243	267
	e.t.	0.8	1.2	0.02	0.6	0.4	15		
	cv (%)	13 %	11 %	4 %	7 %	4 %	7 %		
<i>Sec</i>	moyenne	9.4	15.2	0.54	10.3	9.8	228	3361	351
	e.t.	0.6	1.0	0.01	0.5	0.5	22		
	cv (%)	6 %	7 %	3 %	4 %	5 %	10 %		
<i>Ta-amo</i>	moyenne	12.6	20.7	0.53	10.8	10.4	299	3804	385
	e.t.	0.6	0.8	0.005	0.6	0.6	19		
	cv (%)	4 %	4 %	1 %	5 %	6 %	6 %		
<i>Ta-moy</i>	moyenne	12.7	20.4	0.54	10.6	10.2	287	3694	380
	e.t.	0.6	0.8	0.01	0.6	0.8	18		
	cv (%)	5 %	6 %	2 %	5 %	8 %	6 %		
<i>Ta-aval</i>	moyenne	12.3	19.6	0.55	10.6	10.4	268	3841	376
	e.t.	0.8	1.1	0.01	0.4	0.4	19		
	cv (%)	6 %	6 %	2 %	4 %	4 %	7 %		
<i>Te-amo</i>	moyenne	11.9	18.5	0.56	10.2	10.0	296	3738	363
	e.t.	0.7	0.9	0.01	0.3	0.4	18		
	cv (%)	6 %	5 %	2 %	3 %	4 %	6 %		
<i>Te-moy</i>	moyenne	11.7	17.7	0.57	10.5	10.3	304	3790	375
	e.t.	0.4	0.5	0.01	0.6	0.5	25		
	cv (%)	3 %	3 %	1 %	5 %	5 %	8 %		
<i>Te-aval</i>	moyenne	11.1	17.3	0.55	10.9	10.4	273	3638	360
	e.t.	0.4	0.6	0.01	0.4	0.4	25		
	cv (%)	3 %	3 %	2 %	4 %	4 %	9 %		

Pendant le cycle cultural nous avons observé une différence assez nette sur le développement de la culture entre les différents traitements, ainsi que le long des raies des traitements en gravitaire. Au milieu de la parcelle (sites moyens) le maïs était moins développé qu'en aval, et la hauteur de la plante était plus élevée sur *Ta* que sur *Te*. Cependant, à la récolte ces différences apparaissent beaucoup moins perceptibles, car les sites moins développés ont «rattrapé le retard» grâce aux pluies de fin de campagne. Il faut signaler de plus que la hauteur du maïs était plus grande en bout de raie, mais le rendement sur cette petite partie n'a pas pu être mesuré faute du temps disponible à la récolte, étant donné les conditions climatiques de l'année particulièrement défavorables.

Sur le site *Sec* le rendement est proche de 10 t/ha, mais la baisse de rendement est de 34 % par rapport à *ETM*. Cette diminution est due principalement à la chute du poids de mille grains (20 % de réduction), mais aussi à celle du nombre d'épis (4 %) et à celle du nombre de grains/épi (15 %).

Le stress azoté (site *0N*) est la cause d'une diminution du rendement de 60 %. Cette baisse est occasionnée d'une part par la diminution du peuplement (12 % de réduction du nombre de tiges/m²),

d'autre part par la diminution de la taille des épis: diminution du nombre de grains/épi et du poids de 1000 grains (35 % et 20 % de réduction, respectivement) (Tableau 22 et Annexe 1.5).

Le poids de 1000 grains est assez bas même pour les traitements sans stress: entre 260 et 320 g (valeurs moyenne par placette). Par ailleurs, l'indice de récolte est assez élevé pour les sites irrigués: de 0.53 à 0.57, ce qui est supérieur aux valeurs des années antérieures. Le stress hydrique étant resté modéré, il a peu modifié l'IR sur le traitement en *Sec* (IR=0.53), tandis que le stress azoté a réduit l'IR à 0.42 sur le site *ON*.

2.3.7 Conclusions partielles et critique des résultats

Les résultats de l'indice de récolte nous amènent à nous examiner quant la représentativité des échantillons. Une tendance à sélectionner des échantillons appartenant à des « jolies » rangées, serait-il la cause de valeurs élevées de l'indice de récolte ? La taille des placettes échantillonnées détermine la précision des résultats: plus les placettes sont grandes, plus les plantes échantillonnées seront représentatives de la parcelle entière. Selon une analyse, réalisée sur les données du rendement, si à l'extrémité de chaque rangée échantillonnée on déplace un peu la placette pour prendre un épis plus grand à place d'un moins développé, on peut augmenter l'indice de récolte de 6 %. Sur l'exemple du site *Sec*, cette hausse se traduit par une augmentation de l'indice de récolte de 0.51 à 0.54. Ceci est un majorant de l'erreur. Dans les autres cas où le développement des plantes est plus homogène, l'erreur due à l'échantillonnage est plus faible.

On peut aussi s'interroger sur l'effet de la récolte tardive qui entraîne la perte de quelques feuilles. Cependant il ne semble pas que cet effet soit important, des précautions particulières ayant été prises pour éviter une sous-estimation de la production en feuilles. Par contre on peut émettre l'hypothèse que le déficit hydrique subit tôt dans le cycle, et sur lequel nous reviendrons, a eu un rôle sur la réduction de la production de tiges et des feuilles.

Tableau 23 Analyse de l'hausse du rendement à l'ETM par rapport à l'augmentation de la densité

	98/97	99/98	99/97
Augmentation de la densité (%)	23	25	56
Hausse du rendement (%)	9	13	23

La confrontation des résultats des différentes campagnes montre que l'effet de densité sur le rendement n'est pas linéaire alors qu'il est souvent modélisé de cette manière. Ainsi

le peuplement final a augmenté de 25 % entre 1998 et 1999, mais la hausse du rendement a été seulement 13 % (Tableau 23). Cependant, l'augmentation de la densité a été nécessaire pour mieux utiliser les potentialités de la parcelle et de la culture. C'est donc un facteur important à prendre en compte.

2.4 SUIVI DES BILANS ET FLUX D'EAU

2.4.1 Humidités caractéristiques et densités des parties Nord et Sud

Le modèle STICS décrit dans le *Chapitre 3.5* représente les transferts dans le sol, qui est découpé en couches homogènes, caractérisées par les humidités caractéristiques du point de flétrissement (HPF) et de la capacité au champ (HCC). Des couches d'épaisseur de 30 cm paraissent bien adaptées au cas étudié, d'autant que le premier horizon correspond alors approximativement à la couche labourée et que ce découpage facilite ensuite les comparaisons avec les observations concernant l'azote.

2.4.1.1 Humidités caractéristiques

Des essais d'infiltration contrôlés par double anneau, effectués en 2000 sur deux sites (*Ta* et *Sec*) représentant respectivement la partie Nord (*Ta*) et la partie Sud (*Te*), ont permis de définir les valeurs

Tableau 24 Humidités volumiques caractéristiques pour les traitements *Ta* et *Te* en 1999

couche	<i>Ta</i>		<i>Te</i>	
	HPF	HCC	HPF	HCC
0-30	0.13	0.27	0.13	0.31
30-60	0.13	0.27	0.14	0.32
60-90	0.15	0.30	0.15	0.34
90-120	0.15	0.30	0.16	0.34
120-150	0.18	0.33	0.19	0.36

caractéristiques correspondant à la capacité au champ par suivi du ressuyage (Tableau 24). Il semble difficile de déduire HCC des campagnes d'expérimentation sur maïs, ainsi nous proposons de la déduire des déterminations effectuées par Ruelle (1995) sur le même site¹⁴ où des conduites restrictives d'alimentation en eau ont été appliqués au sorgho. Les valeurs les plus faibles obtenues

près de la rivière correspondent à *Ta*, partie la plus sableuse, alors que les plus élevées sont représentatives de *Te* où le sol est plus argileux.

Afin de valider les données retenues, nous proposons, en utilisant la même démarche que Kengni (1993), de les comparer aux valeurs observées sur le site *Sec*, implanté pendant les trois années d'expérimentation dans la même partie de la parcelle. Ce site présente une texture voisine de *Te* et il correspond au traitement sur lequel on observe le plus fort épuisement des réserves hydriques du sol.

Le Tableau 25 rassemble les humidités maximales et minimales observées chaque campagne, par couche de 30 cm. Des valeurs inférieures à

Tableau 25 Comparaison d'humidité volumique maximale et minimale par couche sur le site *Sec* de 1997 à 1999

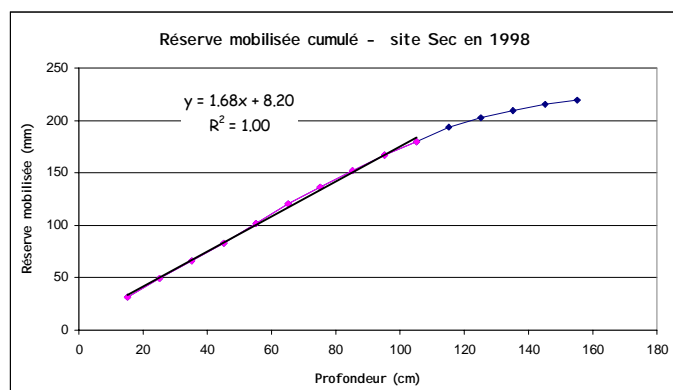
couche	Humidité maximale			Humidité minimale		
	1997	1998	1999	1997	1998	1999
0-30	0.30	0.34	0.27	0.11	0.14	0.16
30-60	0.30	0.32	0.30	0.13	0.14	0.15
60-90	0.32	0.35	0.30	0.15	0.18	0.18
90-120	0.35	0.35	0.30	0.23	0.22	0.22
120-150	0.38	0.37	0.32	0.29	0.30	0.27

HPF sont mesurées en été lors du dessèchement du sol en surface, alors que des importantes fissures se développent. Par contre les couches profondes ne sont jamais totalement épuisées.

¹⁴ Il s'agit des mesure des sites T_{5E} et T_{5N} de la campagne 1990.

Quant aux valeurs maximales, elles font apparaître que la recharge du profil n'est pas complète en 1997 et 1999 (seule la dernière couche draine en 1997), par contre en 1998, comme indiqué précédemment, les pluies d'avril conduisent sur la plupart des couches à dépasser HCC en début de cycle. L'analyse des valeurs extrêmes n'est donc pas suffisante: elle permet seulement de vérifier que les

Figure 21 Réserve mobilisée cumulée pour le maïs en 1998 sur le traitement Sec



ordres de grandeur sont respectés (Tableau 26). L'année 1998, qui correspond à une forte sollicitation des réserves du sol par la culture, permet de mieux approcher les réserves mobilisées par une culture de maïs. Selon la méthode proposée par Ruelle (1995), la Figure 21 représente la réserve mobilisée cumulée en fonction de la profondeur (calculée par différence entre les humidités maximales après

Tableau 26 Comparaison du stock minimal, maximal et RU sur 1 mètre sur le site Sec entre 1997 et 1999

	1997	1998	1999
Stock max	310	337	295
Stock min	139	159	166
Réserve mobilisée	172	178	128

Tableau 27 Humidités caractéristiques moyennes du sol estimées par Barral (1997)

Horizon	HCC	HPF
0-30	0.26	0.13
30-60	0.26	0.13
60-90	0.29	0.13
90-120	0.31	0.18
120-150	0.34	0.20

ressuyages et les humidités minimales mesurées au cours de cette même campagne). Une régression peut être ajustée pour le premier mètre du sol pour lequel le prélèvement par la culture croit de manière linéaire, tandis que les réserves plus profondes sont moins bien mobilisées. Cet ajustement conduit à une estimation de la réserve utile de 178 mm/m. Cette valeur est très proche de celle déduite du Tableau 24 qui est de 184 mm/m pour T_e alors qu'elle atteint 145 mm/m pour T_a .

Pour 1997, sur la base des valeurs des humidités volumiques mesurées une semaine après la fin de l'épisode pluvieux (maximum) et en période sèche (minimum) (en Annexe 1.2), Barral (1997) a proposé des valeurs moyennes de HCC et HPF en regroupant l'ensemble des sites de cette campagne (Tableau 27). Avec ces valeurs on obtient une réserve utile de 160 mm pour le premier mètre. Ce résultat est à rapprocher de celui de Ruelle (1995) qui rapporte une valeur moyenne de 160 mm (n=7, CV=4 %) pour la variation maximale de stock cumulée en 1990 et 1992 pour un ensemble de sept sites mesurés.

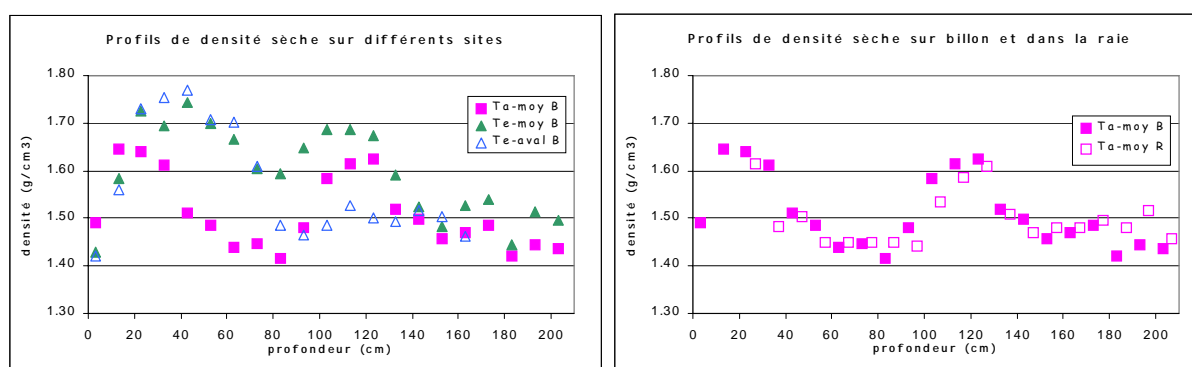
Ces différentes estimations permettent donc de retenir les humidités proposées dans le Tableau 24 pour les traitements en irrigation gravitaire.

2.4.1.2 Densité apparente du sol

La densité sèche du sol a été déterminée à partir des mesures simultanées de la densité du sol par un gammadensimètre¹⁵ et de l'humidité pondérale par des mesures gravimétriques. Les profils de densité ont été mesurés tous les 10 cm, jusqu'à 2 mètres environ. Sur la parcelle en irrigation gravitaire des mesures ont été faites sur les sites *Ta-moyen*, *Te-moyen* et *Te-aval*. Sur la parcelle en irrigation en aspersion nous avons réalisé des mesures sur le site *Sec*.

La densité est variable en fonction de la profondeur et des sites, et les valeurs les plus élevées sont obtenues dans les couches de surface (entre 20 et 40 cm surtout) (Figure 22). Elles confirment l'existence d'une semelle en particulier sur *Te*, qui est due au planage réalisé tardivement par suite de problème de disponibilité du matériel. A partir d'environ 130 cm la densité se stabilise à 1.5 environ. Si l'aspect des profils est similaire sur les sites *Te-moyen* et *Ta-moyen*, les valeurs sont toujours plus élevées sur *Te* en surface. Entre les valeurs estimées aux mêmes profondeurs sur le billon et dans la raie sur les mêmes sites il n'y a pratiquement pas de différence. A noter qu'afin de pouvoir comparer les valeurs obtenues sur le billon et dans la raie, le niveau 0 a été choisi par rapport au niveau du sol avant la réalisation des raies.

Figure 22 Densité sèche du sol mesurée après la récolte 1999



La densité estimée par couche de 30 cm est un peu plus forte que celle reportée par Revol (1990) (Tableau 28) sur un site proche des traitements en aspersion. Ce résultat peut être expliqué probablement par la position de la couche de sol qui a une forte porosité et se situe au delà de 70 cm à une profondeur variable.

Le Tableau 28 présente les valeurs de densité calculées par couches de 30 cm de profondeur, utilisées dans le fichier du sol pour les simulations avec STICS.

Tableau 28 Densité du sol aux différents sites de mesures

profondeur	Ta	Te	Sec	(Revol, 1990)
0-30	1,55	1,6	1,55	1,5
30-60	1,6	1,7	1,6	1,6
60-90	1,5	1,6	1,5	1,45
90-120	1,55	1,65	1,45	1,35
120-150	1,5	1,6	1,45	1,35

¹⁵Gammadensimètre de surface Troxler 3222 pour la première couche et gammadensimètre CPN pour les autres couches.

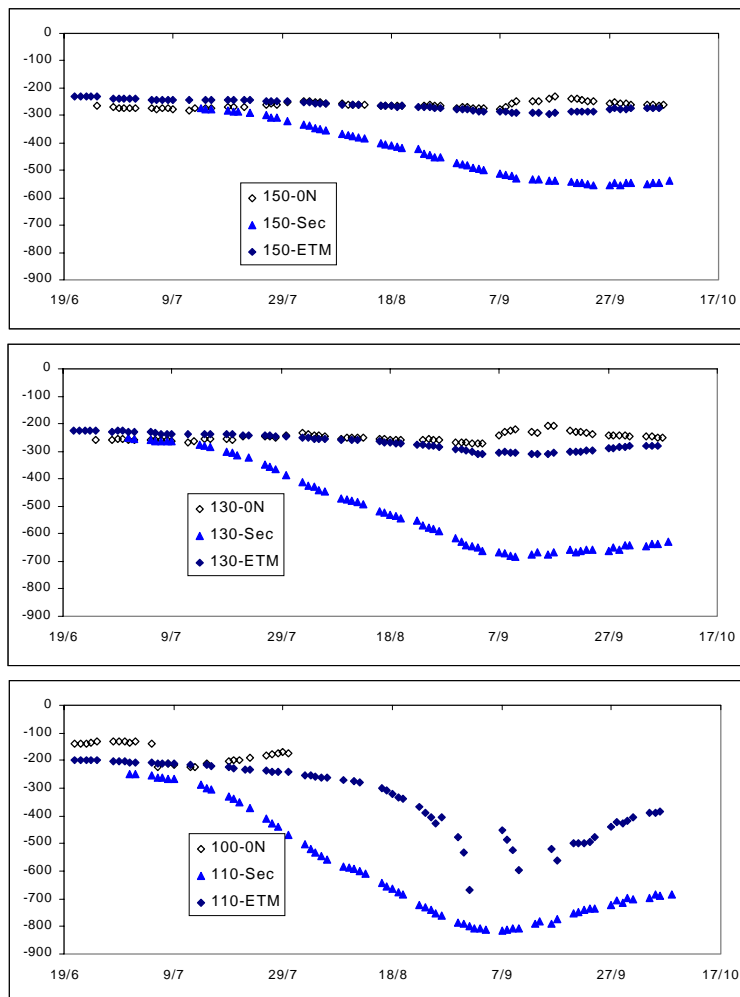
2.4.2 Cas des sites en aspersion

2.4.2.1 Evolution de l'état hydrique du sol en fonction des apports et de la fertilisation

Cette analyse est faite sur les sites irrigués en aspersion en 1999. Les sites *ETM* et *ON* ont bénéficié des apports en irrigation identiques et ils sont comparés avec le site *Sec* qui n'a pas été irrigué.

2.4.2.1.1 Evolution des charges et g gradients hydrauliques

Figure 23 Charges hydrauliques sur les sites en aspersion



Ces comparaisons sont effectuées sur les horizons successifs, pour faciliter l'analyse (Figure 23). Etant donné que sur le site *ON* les tensiomètres n'ont pas été installés aux mêmes profondeurs que sur les autres sites¹⁶, la comparaison entre les trois sites n'est possible qu'à certaines profondeurs. De plus le mauvais fonctionnement de quelques tensiomètres ne permet pas les comparaisons sur la campagne complète.

Les variations de charges hydrauliques sont voisines sur les trois sites jusqu'environ la première semaine de juillet (45 JAS), puis sur le site *Sec* les différences commencent à apparaître et deviennent de plus en plus importantes pendant le cycle culturel (Figure 23). D'abord localisées en

surface, elles se propagent ensuite en profondeur jusqu'à la profondeur maximale mesurée (150 cm) au fur et à mesure que se développe la culture. Ces résultats prouvent aussi la mobilisation rapide des réserves profondes sous une culture non-irriguée.

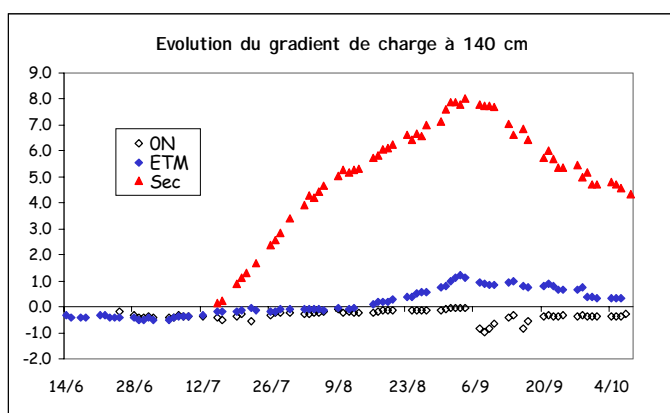
En comparant les sites *ETM* et *ON*, on note qu'à partir du début août les variations de charges sont plus importantes sur le site fertilisé par rapport au non fertilisé: la fertilisation a induit probablement une

exploration plus active des couches profondes. Au-delà de 100 cm, les différences entre ces sites deviennent faibles. La situation de stress azoté réduit le développement de la plante et donc aussi sa consommation hydrique, notamment en août.

Les pluies du mois de septembre n'ont rechargé les profils que jusqu'à 110 cm environ sur *ETM* et *Sec*. A cette époque on observe une forte diminution des prélèvements en profondeur sur le site *Sec* à 140 cm, comme le témoignent l'évolution du gradient de charge (*Figure 24*).

La forte disparité entre les gradients de charges sur les différents sites met en évidence l'influence des pratiques d'irrigation et de fertilisation sur la sollicitation des couches profondes par la culture. Sur le

Figure 24 Evolution du gradient de charge sur les sites en aspersion

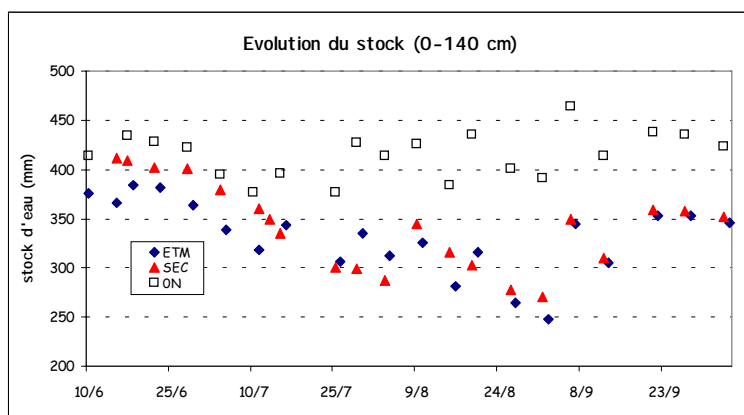


site *ETM* on observe un faible drainage jusqu'à la mi-août, puis il y a des remontées capillaires. Par contre, sur le site *ON* il y a un faible drainage sur l'ensemble de la campagne. Les sites *ETM* et *ON* ont reçu les mêmes apports, calculés selon les besoins de la plante sur le site *ETM*, mais le drainage n'est présent que sur le site *ON*. Sur le site *Sec* après un très faible drainage en début de campagne, les remontées capillaires sont importantes.

2.4.2.1.2 Teneur en eau et stock

Les sites *ETM* et *ON* se caractérisent par le fait que les stock sur 0-140 cm sont toujours plus élevés sur

Figure 25 Evolution du stock sur les sites en aspersion



ON que sur *ETM* (*Figure 25*). Etant donné que les apports sont pratiquement identiques (pluies + irrigation) sur ces deux sites, les variations de stock sont représentatives en majeure partie de la consommation hydrique pendant le cycle cultural; il faut évidemment tenir compte des flux à 140 cm (drainage et remontées capillaires), mais ils restent

¹⁶ pour des problèmes de disponibilité de matériel

faibles comme nous le verrons plus loin. Ainsi sur le site *Sec* la diminution du stock d'eau est forte, le stock minimal sur 0-140 cm se situant vers 230 mm, le premier septembre.

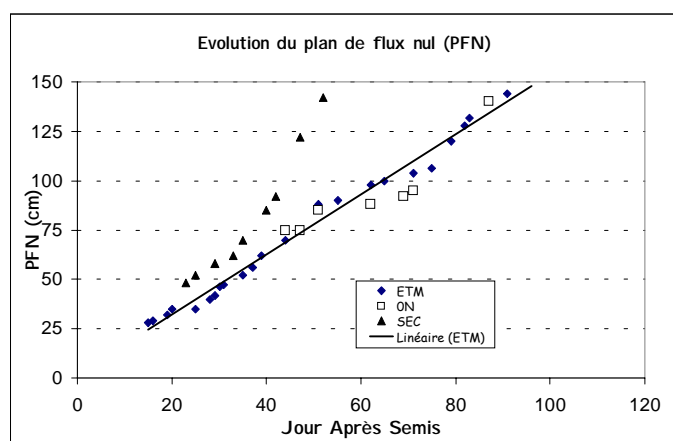
Après les pluies du début du mois de septembre, les stocks deviennent presque identiques sur les sites *ETM* et *Sec*, et le restent ensuite; cela suppose un fonctionnement hydrique très similaire sur ces sites à cette époque. Ainsi la culture retrouve un confort hydrique à partir de septembre, et la différence de production de matière sèche entre début août et mi-octobre, sur les sites *ETM* et *Sec* s'atténue fortement (*Annexe 1.5*).

2.4.2.2 Evolution du plan de flux nul

Le plan de flux nul (PFN) a été déterminé visuellement, à partir des profils de charges journalières établis systématiquement (*Figure 26*).

Il faut noter que lors de certaines périodes la détermination du plan de flux nul est difficile à cause des

Figure 26 Evolution de plan de flux nul



gradients de charge très faibles observés sur une partie du profil. De plus, le disfonctionnement temporel de certains tensiomètres n'a pas permis de tracer la courbe complète sur le site *ON*; les quelques points disponibles restent néanmoins proches de ceux du site *ETM*.

Le PFN peut être obtenu, à partir du nombre de jours après le semis (JAS) par un ajustement linéaire. Pour les sites *ETM* et *ON*, qui ont été irrigués de

manière similaire, la régression obtenue est la suivante (*Figure 26*): $PFN (cm) = 1.52 \cdot JAS + 1.6$ (avec l'axe z orienté vers le bas).

On note donc que la vitesse d'évolution du plan de flux nul est environ 1.5 cm par jour. Par ailleurs, cette valeur concorde avec les observations d'évolution du front racinaire, où nous avons estimé une vitesse de croissance racinaire de 1.4 cm/jour. Il est donc confirmé que le plan de flux nul précède le front racinaire, dans le cas d'un traitement convenablement irrigué.

Comme on pouvait le prévoir, l'évolution du PFN est différente selon les régimes hydriques: en cas d'alimentation déficitaire en eau, le PFN descend rapidement, les couches profondes sont fortement sollicitées et contribuent par des remontées capillaires à l'alimentation hydrique des couches supérieures et de la culture.

2.4.2.3 Bilans hydriques sur les sites en aspersion

2.4.2.3.1 Evapotranspiration

Il est important de décrire le mode de calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) qui est un élément important pour l'évaluation des modèles en le détaillant dans le cas des traitements en aspersion. L'ETR entre deux dates successives de mesures a été déterminée à l'aide du bilan hydrique calculé jusqu'à la profondeur limitée par le PFN. La variation de stock d'eau est obtenue à partir des mesures d'humidité effectuées à la sonde à neutron.

Figure 27 Evolution du rapport ETR/ETP sur les sites ETM et ON d'après le bilan hydrique calculé

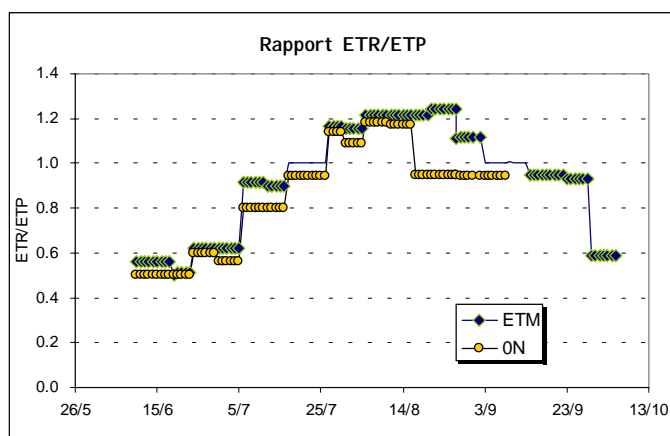
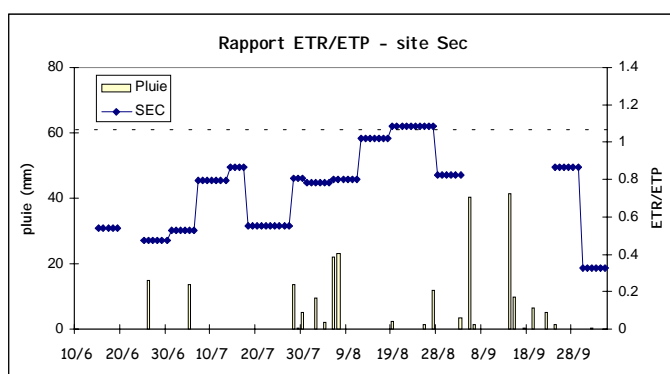


Figure 28 Evolution du rapport ETR/ETP en fonction des pluies sur le site Sec



Les valeurs de ETR/ETP calculées par période sur les sites ETM et ON sont présentées sur la Figure 27. On note que ce rapport dépasse 1.2, ce qui peut paraître un peu élevé, en comparaison avec les valeurs de ETR/ETP admises par les bioclimatologues (Itier, 1994). La végétation est assez haute (>3 m en août), et l'advection n'est pas à exclure sur le site, malgré les précautions prises. Les valeurs de k_c maximales rapportées pour le maïs en zone méditerranéenne varient de 1.0 à 1.35 (Scandella et Mecella, 1994) et vont jusqu'à 1.56 (Fernandez et al., 1994). Ces dernières valeurs paraissent tout à fait excessives et font apparaître un effet « d'oasis » : parcelle irriguée de petite dimension entourée de parcelles sèches.

Les calculs sont à prendre avec une certaine précaution sur les courtes périodes, en effet pour des intervalles de quelques jours il est nécessaire de tenir compte de

l'horaire des mesures et d'utiliser si nécessaire une ETP horaire. Par ailleurs, pour certaines périodes le plan de flux nul n'a pas pu être déterminé en raison d'une percolation ou d'une erreur de mesure, dans ce cas nous avons utilisé une interpolation du rapport ETR/ETP pour estimer ETR à partir de ETP. De même, nous avons cumulé certaines périodes quand le pas de temps des calculs était trop faible, pour assurer une précision suffisante.

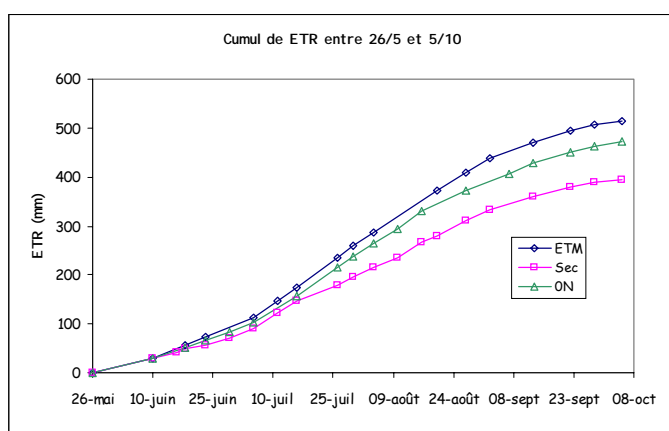
Les mesures du stock d'eau ayant commencé le 10 juin, l'ETR a dû être estimée pour la période du 26/5 (semis) au 10/6, en utilisant une valeur de $kc=0.4$. De même, au cours du dernier mois, par suite du drainage sur *ON*, l'ETR sur ce site a été prise identique à la valeur calculée pour le site *ETM*, en

Tableau 29 Valeurs de ETR sur les sites en aspersion

	ETM	ON	Sec
26/5-10/6	29*	29*	29*
10/6-5/10	486	443	366
Semis-récolte	515	472	395

* valeurs estimées en l'absence de mesures

Figure 29 Cumul de ETR sur les sites en aspersion



tenant compte du fait que l'évaporation du sol en période pluvieuse compense la baisse possible de transpiration de la culture. Ainsi l'ETR calculée pour le site *ETM* du semis à la récolte est 515 mm par rapport à 472 mm pour le site *ON* (Tableau 29).

On note des valeurs de ETR très voisines sur les sites *ETM* et *ON* (Figure 29) en début de cycle. Par contre à partir de la fin de mois de juin, la consommation hydrique de la culture avec un traitement sans azote est partiellement réduite par rapport à celle sans stress; l'écart s'accroît aussi en août, mais la diminution sur la valeur cumulé reste inférieure à 10 % du total.

L'ETR du traitement *Sec* est évidemment étroitement liée à la pluie, comme le montre la Figure 28. Après un démarrage un peu difficile, malgré les irrigations de semis, les pluies de fin juin et début juillet et la mobilisation des réserves du sol permettent de maintenir la consommation hydrique proche de l'ETM. L'ETR chute ensuite et reste limitée malgré les pluies du mois d'août. Sur l'ensemble du cycle la consommation en eau est évaluée à 75 % de l'ETM, ce qui est à rapprocher du bon rendement de ce traitement.

2.4.2.3.2 Drainage

Nous avons utilisé deux méthodes pour calculer le drainage à 140 cm de profondeur: ❶ le bilan hydrique calculé sur l'ensemble du cycle et ❷ le bilan hydrique calculé entre deux mesures (environ une semaine).

Tableau 30 Résumé du bilan hydrique calculé sur les sites en aspersion, entre le 10 juin et 5 octobre (valeurs en mm)

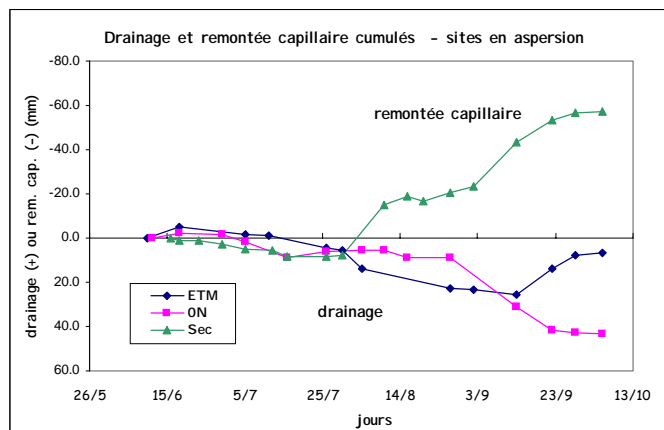
site	stock initial	stock final	pluie	irrigation	ETR	drainage (+) ou rem. cap. (-)
ETM	376	345	232	211	486	-12
ON	414	423	232	254	443	34
Sec	423	352	232	7	366	-55

Le bilan hydrique calculé depuis la première mesure d'humidité (15 JAS) jusqu'à la récolte (Tableau 30), permet d'obtenir une valeur

seulement approximative du flux à 140 cm et donc du bilan entre les remontées capillaires et le drainage sur l'ensemble du cycle. Selon ces résultats, il y a eu du drainage sur le site *ON* (34 mm) et des remontées capillaires sur le site *ETM* (12 mm) et sur le site *Sec* (55 mm), entre 10 juin et 5 octobre.

Les bilans hydriques estimés pour les périodes plus courtes donnent une meilleure connaissance de ces flux. La *Figure 30* présente le drainage estimé par le bilan hydrique périodique sur les différents sites en utilisant l'ETR déterminé en incise 2.4.2.3.1. Si on tient en compte de l'erreur de calcul liée à l'estimation du stock hydrique, on peut considérer qu'il n'a pas eu de drainage sur le site *Sec*, par contre les remontées capillaires y sont importantes. Les drainages sur les sites

Figure 30 Flux cumulés à 140 cm depuis le 10 juin sur les sites en aspersion



ETM et *ON* sont similaires jusqu'à la fin du mois d'août (22 et 17 mm, respectivement). Après cette date on observe du drainage sur le site *ON* (26 mm) et des remontées capillaires sur le site *ETM* (16 mm). Ces résultats sont cohérents avec les conclusions tirées de l'analyse des gradients de charge. Sur le site *Sec*, les remontées capillaires commencent dès le mois de juillet. Ce flux cumulé ne devient positif que fin août: les pluies de septembre ne remettent pas en cause le sens des transferts sur ce site, comme sur *ETM*.

2.4.3 Cas de sites en irrigation gravitaire

2.4.3.1 Comparaison des humidités et des charges sous la raie et le billon

Le contrôle des flux de drainage et de lixiviation étant prévu à partir de mesures réalisées sous le billon, il est apparu nécessaire de comparer l'évolution des humidités sous le billon et la raie à différentes profondeurs afin de faire apparaître sur les différents sites de mesures des écarts éventuels entre raie et billon.

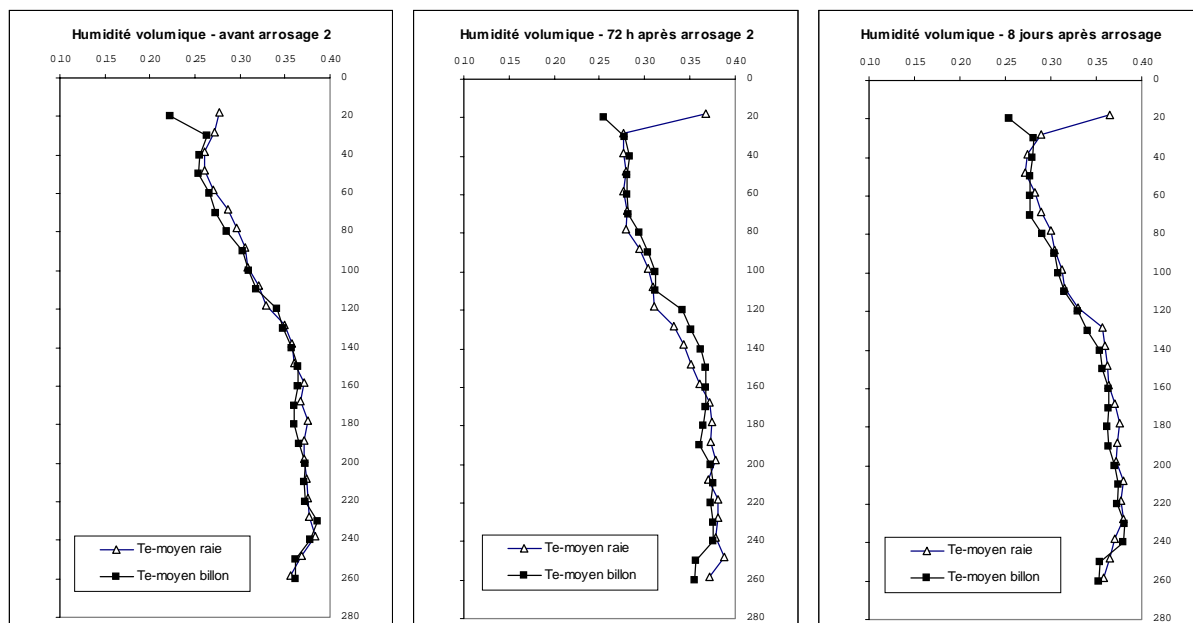
Pour tenir compte du changement du niveau de référence de la surface du sol, induit par la réalisation des raies, dans le repérage des cotes de mesures, nous rappelons que toutes les cotes de mesures ont été référencées par rapport à la surface du sol en l'absence des raies. Un contrôle de tous les sites a été effectué à la récolte. Le positionnement des tubes d'accès neutroniques par rapport au sommet du billon et l'affaissement partiel du billon, ou des petits écarts par rapport aux prévisions initiales lors de l'installation, ont conduit à des corrections qui font différer les cotes de mesures de quelques centimè-

tres entre raie et billon. Néanmoins, comme les comparaisons concernent l'évolution durant la campagne, il a été choisi d'utiliser les humidités mesurées sans interpolation.

2.4.3.1.1 Comparaison des profils hydriques

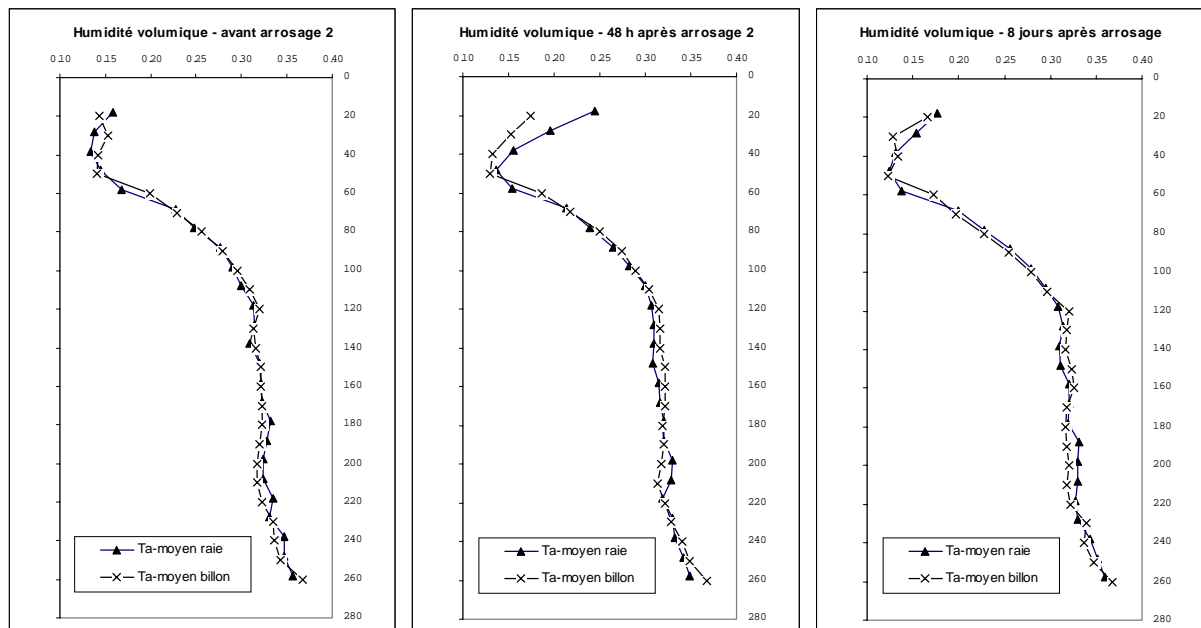
Les profils d'humidité pour le site *Te-moyen* (Figure 31) montrent que l'humidité est globalement la même au niveau du billon et de la raie avant arrosage (le 21 juillet), si l'on exclut les deux premières cote de mesure sous le billon. Le 26 juillet, après l'irrigation 2, l'humidité est la même jusqu'à la profondeur de 110 cm environ. Au-dessous de cette profondeur, les humidités sont très proches, les différences restent de l'ordre de grandeur des incertitudes des mesures. Trois jours après irrigation, les profils d'humidité sont très semblables entre le billon et la raie, ce qui témoigne d'une bonne redistribution de l'eau. Le profil d'humidité huit jours après l'arrosage confirme une redistribution homogène d'eau entre le billon et la raie.

Figure 31 Comparaison des profils d'humidité entre billon et raie avant et après la 2^{ème} irrigation sur le site *Te-moyen*



On peut observer la même tendance aussi sur la site *Ta-moyen* (Figure 32), après la deuxième irrigation: 48 heures après l'arrosage le sol est plus humide jusqu'à 40 cm dans la raie que sur le billon, puis 8 jours après l'arrosage les humidités deviennent homogènes. Ensuite l'eau se redistribue entre la raie et le billon (et est prélevée par la culture). On peut en conclure, que à l'échelle de plusieurs jours, l'infiltration en irrigation à la raie conduit à une humidité du sol proche d'un phénomène monodimensionnel lorsque le profil initial est assez humide. Des mesures réalisées à un pas de temps plus court permettraient d'affiner les observations concernant les transferts d'eau dans le billon et dans la raie et d'apprécier la bi-dimensionnalité du phénomène. En l'absence d'irrigation à la raie, début août, des différences d'humidités apparaissent entre raie et billon, comme nous le verrons ci-après.

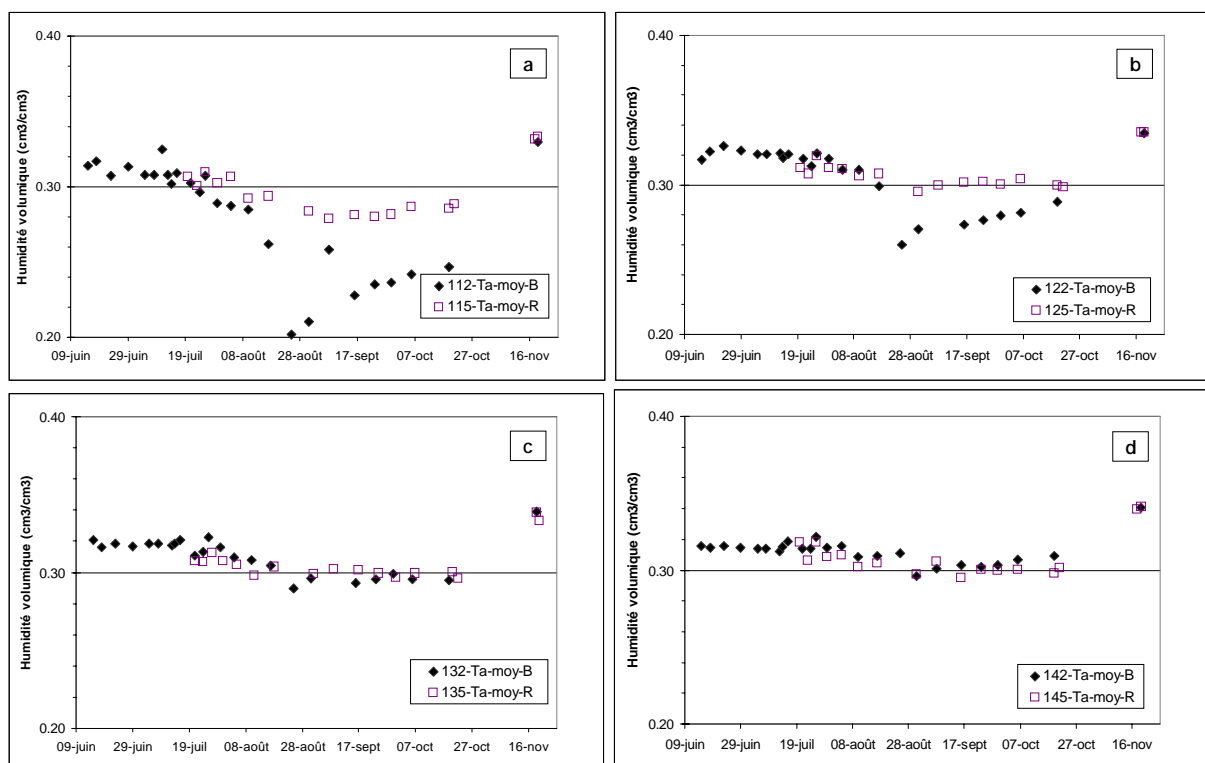
Figure 32 Comparaison des profils d'humidité entre billon et raie avant et après la 2^{ème} irrigation sur le site Ta-moyen



2.4.3.1.2 Comparaison des humidités

Sur le site *Ta-moyen*, les humidités présentent une évolution pratiquement identique sous la raie et le billon à partir de 135 cm (respectivement 135 et 132 cm) avec une faible diminution de l'humidité à partir de la mi-juillet jusqu'à la fin août, qui est due aux prélèvements par la culture (Figure 33 c). Le

Figure 33 Evolution de l'humidité sur le site Ta-moyen, aux différentes profondeurs



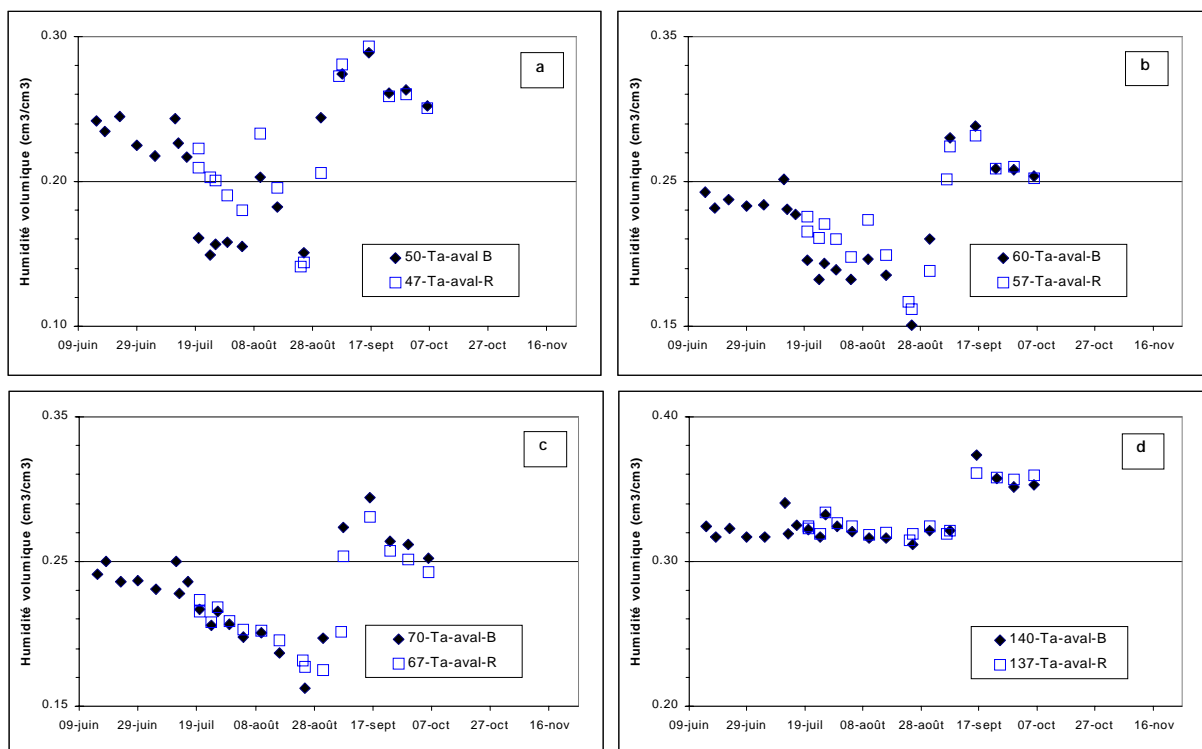
dessèchement est par contre plus marqué sous le billon à 125 cm et au dessus (*Figure 33 a et b*).

Deux raisons expliquent ce phénomène: d'une part cela correspond à des prélèvements directs de l'eau par les racines du maïs, l'enracinement s'arrêtant vers 120 cm; d'autre part les flux, lors de l'irrigation à la raie, ne sont probablement pas isotropes, surtout après un dessèchement important du sol, la percolation se faisant alors préférentiellement sous la raie. On remarque enfin un accroissement important de l'humidité qui apparaît seulement au moment des pluies du mois d'octobre, celles de septembre ayant été retenues dans le premier mètre de sol.

Le comportement est similaire pour les couches plus profondes (*Figure 33 d et Annexe 1.2*). La légère diminution d'humidité qui affecte en septembre et octobre ces couches est à imputer à la permanence des remontées capillaires à partir de 140 cm, comme nous le verrons dans l'étude des charges (cf. ci-dessous), la recharge de ces horizons ne commençant à se faire qu'à partir de fin octobre.

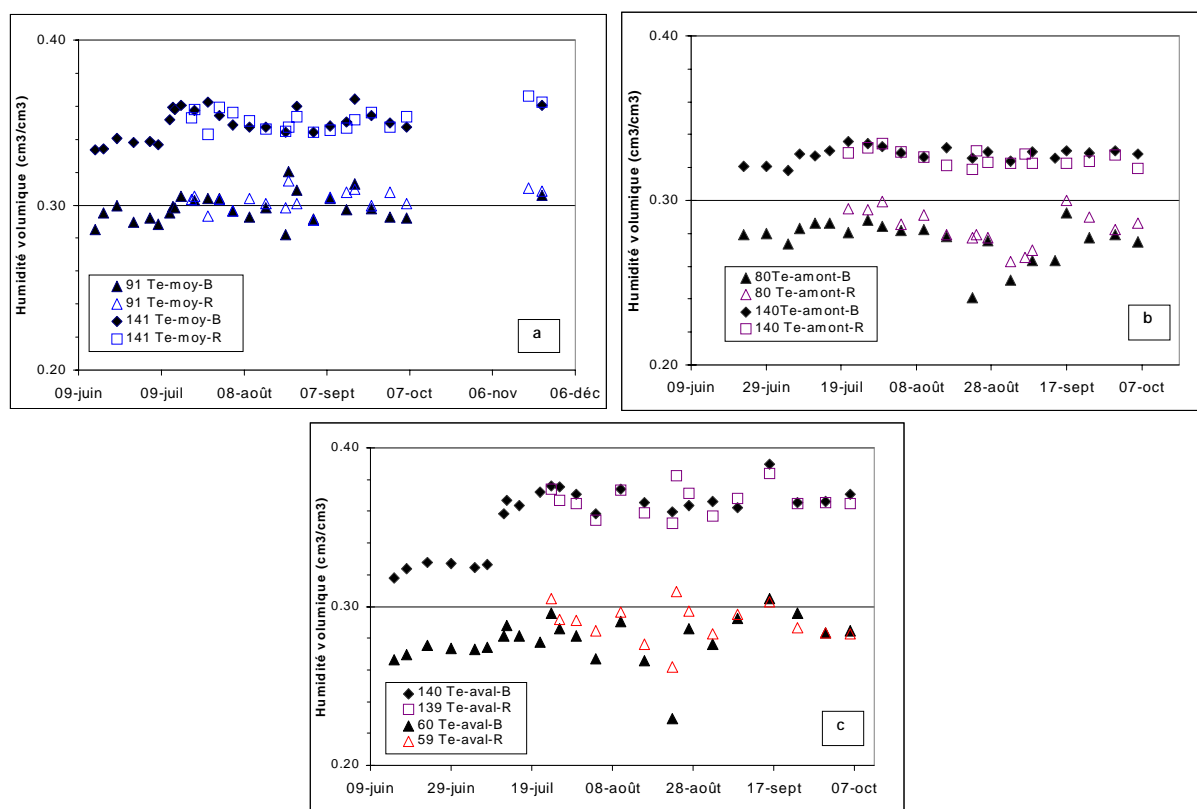
Sur le site *Ta-aval* les apports par irrigation sont plus élevés que sur *Ta-moyen*, aussi les différences entre raie et billons sont surtout visibles de la surface jusqu'à 60 cm (*Figure 34 a b et c*). A 140 cm, les courbes d'humidité sont superposées (*Figure 34 d*). Par contre l'endiguement provoque une accumulation des eaux qui ont ruisselé lors des pluies de septembre et la recharge du profil se fait sentir dès la mi-septembre. Sur le site *Ta-amont* les apports étant voisins de ceux de *Ta-moyen*, on peut attendre des comportements similaires à ceux de ce site, des observations incohérentes pour le tube situé dans la raie ont conduit à éliminer les mesures.

Figure 34 Evolution de l'humidité sur le site *Ta-aval*, aux différentes profondeurs



Le **traitement *Te*** a reçu des apports très supérieurs à ceux de *Ta* en particulier lors de la première irrigation gravitaire, aussi les humidités sous la raie et sous le billon sont très voisines dès que l'on dépasse 80 cm, pour *Te-moyen* et *Te-amont*, profondeur au dessus de laquelle on observe un écart avant l'irrigation du 25 août (Figure 35 a et b). La culture a moins utilisé les réserves du sol. Il en est de même pour *Te-aval*, mais dans ce cas les différences se limitent aux 60 premiers cm environ (Figure 35 c).

Figure 35 Evolution de l'humidité sur les sites *Te*, aux différentes profondeurs



Sur ce site, on doit aussi noter en septembre un effet de l'endiguement similaire à celui indiqué pour *Ta-aval*, par contre le sol étant proche de la saturation à 140 cm, les trois dernière mesures montrent un ressuyage à cette cote qui ramène l'humidité à sa valeur antérieure. Une nouvelle fois il apparaît donc que les humidités à 140 cm sont identiques, aux incertitudes de mesure près, sous la raie et sous le billon pendant l'ensemble de la campagne.

2.4.3.1.3 Comparaison des charges

Des tensiomètres ont été installés sous la raie et le billon seulement sur le site *Ta-moyen*, avec une différence de cote de 3 cm, pour les profondeurs 130 et 150 cm. La Figure 37 fait apparaître une assez bonne concordance entre les charges observées dans ces deux situations: la cinétique de décroissance des charges est la même pendant toute la période où l'on dispose de l'ensemble des données, soit de

mi-juillet à fin août, date à laquelle des problèmes de fonctionnement sont apparus pour les tensiomètres du billon.

Figure 37 Evolution des charge sur le site Ta-moyen aux différentes profondeurs

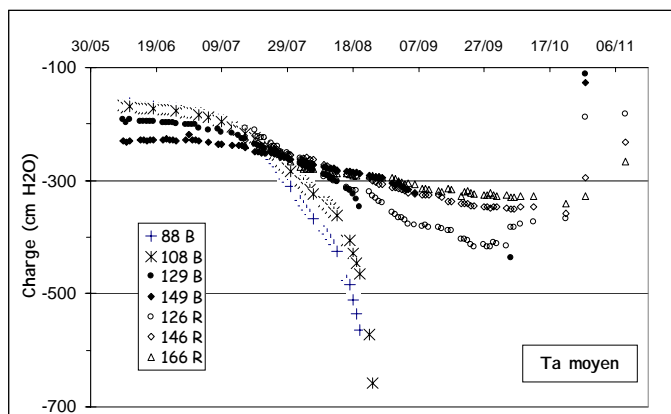
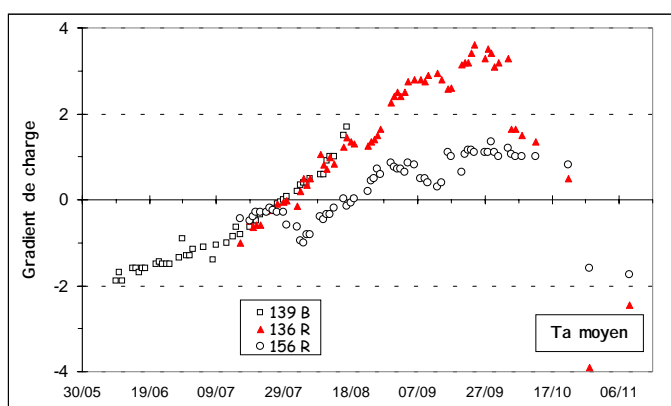


Figure 36 Evolution du gradient de charge sur le site Ta-moyen aux différentes profondeurs



Les gradients de charge (Figure 36) à 136 et 139 cm sont pratiquement confondus et le passage d'un flux descendant à un flux ascendant se fait aussi bien sous la raie que sous le billon, fin juillet. Les mesures sous la raie montrent que les remontés capillaires persistent jusque fin octobre. Les données disponibles sous la raie à 156 cm corroborent cette tendance. A cette cote l'inversion des flux se fait à la mi-août ; le front d'humectation n'atteint ces profondeurs que fin octobre lorsque le cumul de l'épisode pluvieux commencé le 18/10 dépasse les 110 mm. Ces observations sont en accord avec les remarques faites plus haut sur l'évolution des teneurs en eau.

La confrontation à la fois des humidités et des charges sous le billon et sous la raie atteste que les profils et les flux sont différents pour les premières couches de sol. Ces différences se maintiennent sur

des profondeurs différentes suivant l'emplacement des sites d'observation le long des raies (ainsi que suivant les traitements). Les différences sont plus marquées sur les sites recevant le moins d'eau (site moyen en raie bouchée), du fait que la recharge en profondeur se fait moins bien sous le billon, alors que la culture prélève de manière marquée sur l'ensemble de la profondeur racinaire.

Par contre et il s'agit d'un résultat important, il se confirme que dans toutes les situation étudiées dans cette expérimentation, les humidités sont identiques sur l'ensemble de la campagne dès 130 cm entre raie et billon et il est donc possible de considérer, sans faire d'hypothèse forte, que les humidités et les charges ne présentent pas d'hétérogénéité à 140 cm, cote retenue pour déterminer les flux sous la zone racinaire. Les doses apportées selon un processus d'infiltration bi-dimensionnel semblent donc bien se redistribuer dans le profil du sol et devoir profiter à la plante installée sur des billons espacés de 0,8 m. STICS qui est un modèle mono-dimensionnel au pas de temps journalier pourra donc être utilisé, avec en entrées des doses calculées par Raieopt, pour simuler l'impact d'apports d'eau sur le rendement.

2.4.3.2 Bilan hydrique sur les sites gravitaires

La distribution bi-dimensionnelle de l'eau entre le billon et la raie, après une irrigation à la raie, rend impossible le calcul du bilan hydrique selon la méthode employée pour les sites en aspersion. Par contre l'état hydrique du sol pouvant être considéré comme homogène à 140 cm sous la raie et le billon, comme établi ci-dessus, le bilan peut être envisagé pour la couche complète entre la surface du sol et cette cote à condition de connaître le flux à 140 cm.

2.4.3.2.1 Drainage et remontées capillaires à 140 cm

Le calcul du flux doit alors se faire suivant par la loi de Darcy. Il faut noter que la connaissance des flux hydriques à un pas journalier est intéressante pour pouvoir calculer les flux d'azote à cette cote pour tenir compte des variations de la concentration en azote de la solution du sol. Afin de comparer plus facilement les pertes d'azote à partir des variations de stocks d'azote du sol et les estimations à partir des flux de lessivage, les drainages sur les différents sites seront calculés pour les périodes séparant deux mesures d'azote du sol.

La relation $K(h)$ ou $K(\theta)$ utilisée dans la loi de Darcy a été ajustée selon différents modèles (cf. *Chapitre 1*). L'ajustement de la courbe $h(\theta)$ a été réalisé à partir des mesures effectuées lors de la campagne 1999 sur chaque site et à partir d'un essai de drainage interne en 2000 sur un site uniquement.

L'estimation des flux par la méthode de Darcy est réalisée à partir du suivi simultané des variations de teneur en eau et des charges hydrauliques. Il faut indiquer cependant, que nous disposons des mesures tensiométriques presque journalières, donc des gradients de charge journaliers, par contre le suivi neutronique étant hebdomadaire, nous avons une valeur moyenne de $K(\theta)$ pour une période d'environ une semaine. Or, les variations tensiométriques étant fortes après les apports, il apparaît nécessaire d'effectuer les bilans à l'échelle journalière pour mieux caractériser le drainage. En effet, la somme des flux journaliers peut conduire à une valeur de drainage nettement différente de celle obtenue en moyennant les termes de la loi de Darcy sur la même période. D'autre part, les valeurs de K_s utilisées ne sont pas obtenues directement sur les sites (sauf pour *Ta-moyen*), les ajustements à partir des grandeurs mesurées ont donc été recherchés.

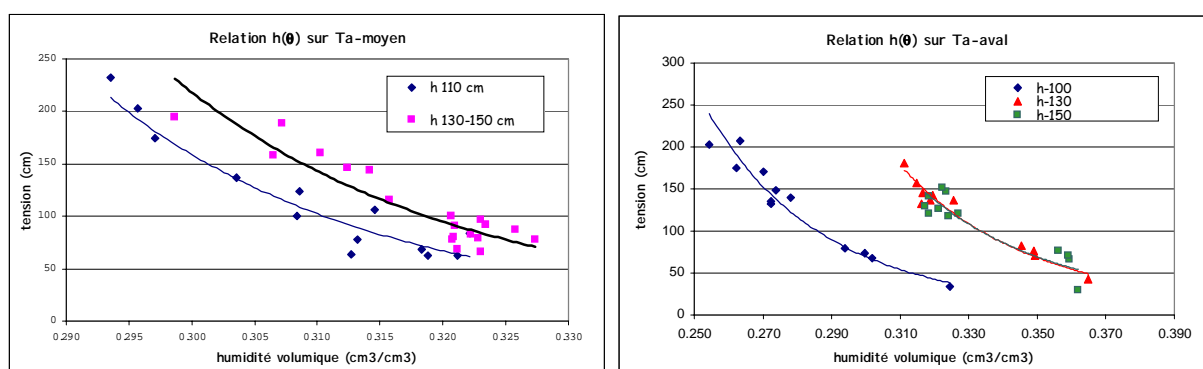
La gamme d'humidité et de tension à notre disposition est restreinte pour permettre un bon ajustement de la courbe de $h(\theta)$. De plus, à cause de la fréquence des mesures de l'humidité, nous ne disposons que d'un nombre limité de couple de $h-\theta$ par site de mesure. D'autre part l'effet d'hystérésis (quelque couples de valeurs ont été obtenus en phase d'humectation, d'autres en phase de dessiccation) accroît encore la difficulté d'ajustement des relations.

Seuls ont été traités les cas extrêmes: soit les sites *Ta-moyen* et *Ta-aval* pour le traitement *Ta* qui ont reçu respectivement les apports le plus faibles et les plus élevés. Les sites ayant les mêmes abscisses ont été retenus pour le traitement *Te*.

Un ajustement des courbes $h(\theta)$ a tout d'abord été recherché pour les profondeurs 130 et 150 cm. Les données correspondantes à la profondeur de 100 ou 110 cm (selon le site) ont été incluses dans le calcul, mais cette extension n'a pas augmenté considérablement la gamme d'humidité disponible, il en est même résulté une diminution sensible du coefficient de détermination ($R^2 = 0.6$ à 0.9 pour la couche entre 130 et 150 cm, selon le site).

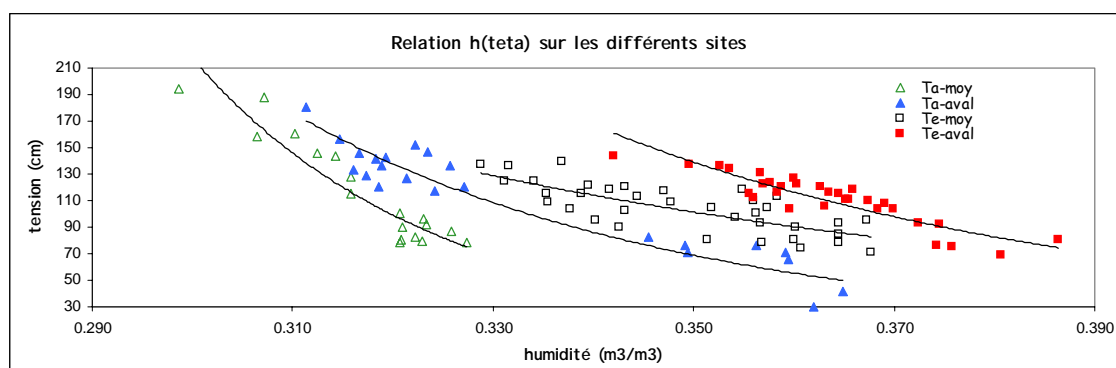
La *Figure 38* montre que les courbes $h(\theta)$ sont différentes à 100 et à 130-150 cm. Cette différence est très nette sur tous les sites, sauf sur *Ta-moyen*, et on peut en rechercher l'origine dans l'ajustement de l'humidité fournie par les mesures à la sonde à neutron et dans le fait que les changements d'horizons

Figure 38 Relation $h(\theta)$ sur les sites *Ta*, à différentes profondeurs



se produisent à des profondeurs variables sur la parcelle. En effet, sur tous les sites, il existe pour l'étalonnage de la sonde une formule d'ajustement jusqu'à 110 cm et une autre à partir de cette profondeur. Par contre, sur *Ta-moyen*, on utilise une formule jusqu'à 60 cm, et une autre pour les cotes au delà. Ces relations ont été ajustées à partir des mesures gravimétriques. Des compléments de déterminations à différentes humidités pourront résoudre ces problèmes.

Figure 39 Relation $h(\theta)$ sur les différents sites, entre les profondeurs 130 et 150 cm



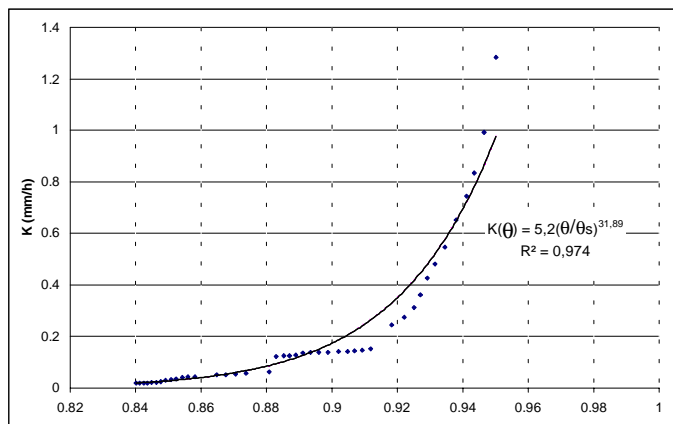
Pour les raisons évoquées, nous avons trouvé plus judicieux de réaliser les ajustements de la courbe de $h(\theta)$ seulement sur les valeurs mesurées à 130 et à 150 cm. Nous présentons ici les résultats obtenus

sur les sites moyens et avals. Les sites amont ont un comportement très voisins de celui des sites moyens.

Comme il apparaît sur la *Figure 39*, l'ajustement de la courbe $h(\theta)$ est différent sur chaque site, donc les paramètres des différents modèles de calcul de $K(\theta)$ ou $K(h)$ obtenus sur un site précis sont difficilement transposables sur les autres sites.

2.4.3.2.1.1 Flux a 140 cm sur le site Ta-moyen

Figure 40 $K(\theta)$ obtenu par drainage interne à 140 cm, sur le site Ta-moyen



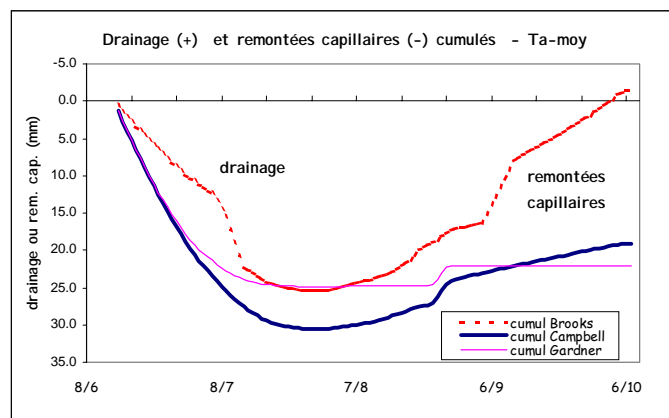
En 2000 un essai de drainage interne a été réalisé sur la partie *Ta-moyen* de la parcelle (Mercier, 2000). Les résultats issus de cette expérimentation ont été utilisés pour le calcul du drainage sur le site *Ta-moyen*. La formule de conductivité de Brooks-Corey obtenue a été: $K(\theta)=5.2.(\theta/0.38)^{32}$ (*Figure 40*). On considère donc que la conductivité à saturation (K_s) sur les sites *Ta* est 5.2 mm/h, soit 125 mm/jour.

Les paramètres ajustés pour le modèle Campbell (chapitre 1) sont: $b=14.5$ et $h_e=7.5$. La valeur du potentiel d'entrée d'air (h_e) est acceptable pour ce type de sol (environ 10 à 15 cm, selon Campbell (1985)).

Le modèle de Gardner avec une longueur capillaire = 14.5 cm, donne une valeur de conductivité $K(h)$ proche à celle trouvée par les autres formules, mais seulement en phase de drainage. Le drainage

cumulé estimé par les différents modèles varie de 25 à 30 mm, et les remontées capillaires de 3 à 27 mm (*Figure 41*).

Figure 41 Flux cumulé à 140 cm sur le site Ta-moyen



On remarque, d'après le calcul utilisant la relation de Brooks et Corey, une augmentation rapide des flux après les pluies de 5 septembre. Le front d'humectation arrive en effet à proximité de 140 cm à cette date. Une faible augmentation de l'humidité est mesurée par la sonde à neutron mais les mesures de charges ne mettent pas en évidence d'inversion du

gradient. Dans une telle situation l'utilisation de cette relation entraîne probablement une surestima-

tion des flux. On peut cependant conclure que pour toutes les approches utilisées, le flux à 140 cm apparaît donc faible et du même ordre que celui observé sur *ETM*.

2.4.3.2.1.2 Flux a 140 cm sur le site Ta-aval

Une première tentative de calcul du drainage a été faite avec les mêmes paramètres que sur le site *Ta-moyen*. Les différentes méthodes donnent un drainage pratiquement nul sur la période allant du 16/7 (date d'installation du site) au 19/8, et les remontées capillaires entre le 20/8 et le 5/9 sont aussi négligeables avec tous les modèles utilisés. Par contre, pendant le mois de septembre, les valeurs obtenues dépendent largement de la formule utilisées, et vont de 18 à 210 mm (Tableau 31).

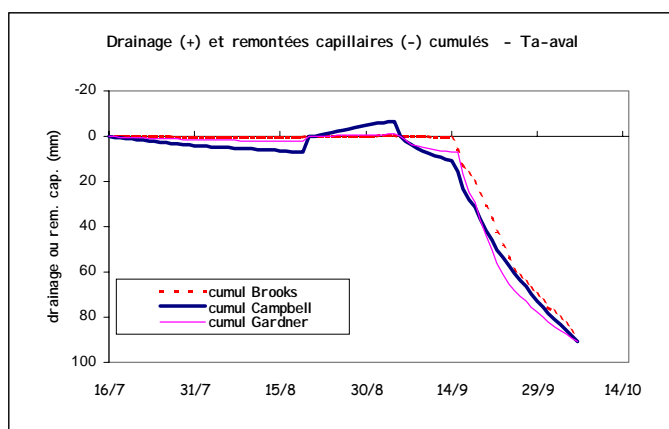
Tableau 31 Drainage estimé par les différentes formules sur Ta-aval du 7/9 au 5/10

	Brooks-Corey	Campbell	Gardner
avec formule utilisée sur Ta-moy	210	18	18
avec formule calée sur Ta-aval	90	89	89

Il faut souligner que dans la période du 5/9 au 5/10 la somme de précipitations est de 111 mm. A 10 jours d'intervalle deux orages se sont présentés, avec 45 mm et 52 mm

d'apport en quelques heures. En raison de ces précipitations le sol déjà plus humide à l'aval s'est rapproché de la saturation. De plus, les apports directs ont été complétés par du ruissellement issu de l'écoulement dans les raies; du fait que les raies sont restées bouchées, l'eau stockée s'est infiltrée sur les sites aval. La quantité d'eau apportée par la pluie ne peut pas être évaluée, mais elle est supérieure à 111 mm.

Figure 42 Flux cumulé à 140 cm sur le site Ta-aval



Afin de critiquer et d'améliorer les estimations obtenues, nous avons considéré nécessaire d'effectuer un ajustement des courbes de $h(\theta)$ et $K(\theta)$ sur le site *Ta-aval*. Avec les nouveaux paramètres obtenu par ajustement ($b=21$ et $h_e=15$), le drainage calculé est de 90 mm avec Brooks-Corey et 89 mm avec Campbell, pour la période de 7/9 à 5/10. Sur les autres périodes le drainage ou les remontées capillaires sont négligeables (Figure 42 et Tableau 31). Pour obtenir

le même drainage par la formule de Gardner, la longueur capillaire (λ_c) appliquée dans le calcul devrait être de 23 cm, valeur relativement forte pour le sol limoneux du traitement *Ta* de Lavalette (Revol, 1994).

Le *Tableau 32* récapitule les flux obtenus pour les périodes communes sur *Ta-moyen* et *Ta-aval*. Il montre que la lame d'eau drainée estimée sur *Ta-aval* est du même ordre de grandeur que l'excédent de 80 mm d'eau d'irrigation reçue par ce site, mais il faut prendre avec précaution ce rapprochement étant donné qu'il faut aussi tenir compte du ruissellement des pluies en septembre.

Tableau 32 Drainage (ou remontées capillaires (-)) estimé par les différents modèles sur Ta-moyen et Ta-aval (mm)¹⁷

	Période	Brooks-Corey	Campbell	Gardner	pluie	irrigation
Ta-moyen	10/6-15/7	27	37	33	29	84
	15/7-3/8	2	2	1	30	61
	3/8-5/10	-27	-10	-3	174*	42
Ta-aval	15/7-3/8	3	5	2	30	93
	3/8-5/10	89	85	90	174*	77

* ne tient pas compte du ruissellement en septembre

2.4.3.2.1.3 Flux a 140 cm sur le site Te-aval

L'utilisation des paramètres issus de la caractérisation hydrodynamiques effectuée sur le site *Sec* ayant conduit à des résultats peu réalistes, une démarche différente a été adaptée pour ce site en appliquant les modèles de Mualem et Campbell. Les paramètres de l'équation de Van Genuchten ont été estimés à partir des formules de pédo-transfert (Shaap et al., 1998), pour la couche 130 - 150 cm (*Tableau 33*).

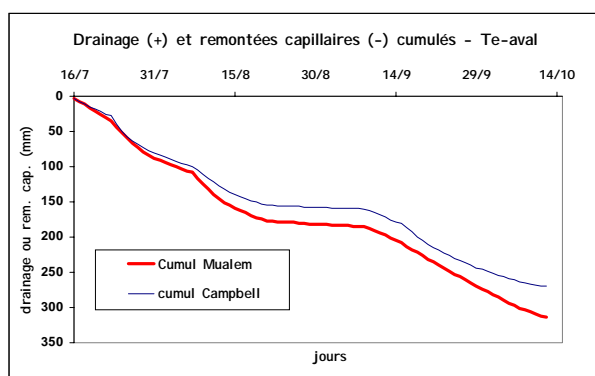
Tableau 33 Paramètres de l'équation de Van Genuchten calculés et ajustés pour les sites Te

d_s	θ_r	θ_s	α	n	K_s (mm/j)
1.5	0.067	0.391	0.009	1.51	70
-	0.099	0.408	0.006	1.49	

On note que la conductivité hydraulique à saturation (K_s) est estimé à 70 mm/j sur les sites *Te*. L'estimation de K_s par méthode inverse, appliquée aux essais

d'infiltration en double anneau sur la parcelle en 2000 donne une valeur très proche, d'environ 75 mm/jour pour la profondeur de 140 cm (Mailhol, 2001, communication personnelle).

Figure 43 Drainage sur le site Te-aval



Les drainages calculés pour la campagne d'irrigation et pendant le mois de septembre sont présentés au *Tableau 34* et à la *Figure 43*.

Comme déjà évoqué sur le site *Ta-aval*, à cause du ruissellement suite aux orages, les apports d'eau sur *Te-aval*, à partir du mois de septembre, sont supérieurs à ceux donnés par la station météorologique (108 mm). Le sol étant proche de la capacité au champ, il

est probable que la grande partie des apports par ruissellement percole au delà de 140 cm.

¹⁷ Le 3 août correspond à la date d'analyse du stock d'azote.

Les valeurs cumulées du drainage sont du même ordre de grandeur pour les deux modes de calcul utilisés. Elles atteignent près de 200 mm après les irrigations de juillet et les pluies de début août, ce qui paraît élevé. Plus de 100 mm s’y ajoutent en septembre.

2.4.3.2.1.4 Flux a 140 cm sur le site Te-moyen

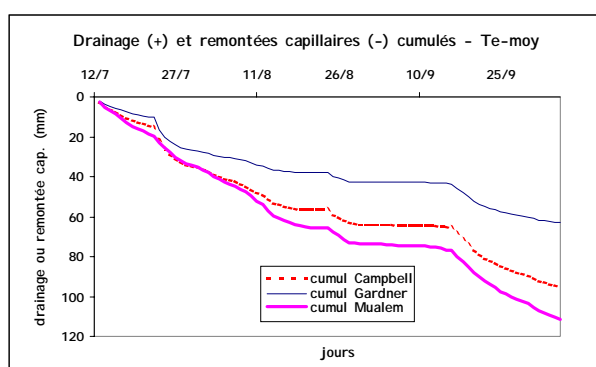
Pour l’estimation du drainage sur le site *Te-moyen*, nous avons appliqué la formule de Mualem avec les mêmes paramètres que sur le site *Te-aval*. Le modèle Campbell, ajusté sur les valeurs obtenues sur le site (avec $b=8.5$ et $h_c=24$) donne un drainage total de 95 mm entre 13/7 et 6/10, proche de celui obtenu selon le modèle de Mualem (112 mm) (*Tableau 34* et *Figure 44*).

Tableau 34 Drainage (ou remontées capillaires (-)) estimé par les différents modèles sur *Te-moyen* et *Te-aval* (mm)

	Période	Mualem	Campbell	Gardner	pluie	irrigation
Te-moyen	20/7-3/8	25	27	21	30	124
	3/8-5/10	73	57	34	174*	87
Te-aval	20/7-3/8	81	75	14	30	117
	3/8-5/10	200	171	26	174*	125

* le ruissellement en septembre n’est pas pris en compte

Figure 44 Drainage sur le site *Te-moyen*



Le modèle Gardner avec $\lambda_c=25$ estime un drainage de 78 mm entre 13/7 et 6/10, dont 36 mm en période des pluies en septembre.

Un stock hydrique en profondeur un peu plus faible sur *Te-moyen* que sur *Te-aval* a limité le drainage au cours de la première période. L’écart s’est accru au cours de la seconde période à cause du ruissellement. Les pertes en eau évoluées par la méthode de Gardner sont les plus faibles,

contrairement à ce qui était obtenu sur *Ta*. Par contre les deux autres estimations sont voisines, mais sont de l’ordre du tiers des valeurs obtenues sur *Te-aval*.

2.4.3.2.2 Evapotranspiration

2.4.3.2.2.1 Cas du site Ta-moyen

Comme cela a déjà été indiqué, le bilan hydrique sera effectué en prenant compte la couche 0-140 cm. Le cas du site *Ta-moyen* où le drainage à 140 cm est limité sera tout d’abord analysé.

Le cycle a été divisé en trois périodes: ❶ la première correspond à l’installation de la culture, de l’installation du site à la réalisation des raie début juillet; ❷ la seconde période couvre ensuite la pé-

riode de la croissance active et à la période reproductive jusqu'au 7/9, date précédant des pluies importantes; ③ la dernière se termine à la récolte.

Le *Tableau 35* rassemble les termes du bilan hydrique, et l'intervalle de variation du drainage correspond aux valeurs calculées précédemment et l'ETR est comparé à ETR_M mesurée sur le site *ETM*. Il fait apparaître que la culture était globalement en confort hydrique: ETR est un peu supérieure à ETR_M , avec des écarts acceptables, compte tenu de l'incertitude dans l'évaluation du drainage et des apports par irrigation, et au cours de la dernière période, des apports par les pluies, du fait du ruissellement au cours des orages. Un faible stress a pu apparaître en début de cycle, bien que les mesures de températures de surface (cf. 2.3.4) ne le fassent pas apparaître. Pour cette courte période de 20 jours, un calcul de l'ETR par la méthode du plan de flux nul donne une valeur de 64 mm, qui reste donc très proche du résultat trouvé.

Tableau 35 Composantes du bilan hydrique calculé sur la couche 0-140 cm pour le site Ta-moyen et ETM

période	ΔS	pluie	irrigation	drainage	ETR	ETR_M^{**}
15/6-5/7	-31	15	24	12/22	58/48	73
5/7-7/9	-24	152	163	1/3	338/336	326
7/9-5/10	-9	66	0	-15/0	90*/75*	66

*surestimation probable à cause du ruissellement des pluies

** ETR_M calculé sur le site *ETM*

Pour la seconde période, les seules intervalles où il est possible de faire un calcul avec un pas de temps court, correspondent à fin juillet et début août où il n'y a pas eu d'irrigation ni de fortes pluies. Ainsi les stocks d'eau sous la raie et le billon sont voisins et les termes du bilan hydrique peuvent être calculés en utilisant la variation de stock moyenne (*Tableau 36*).

Tableau 36 Bilan hydrique en période sans apport d'eau sur Ta-moyen, sur le billon et dans la raie (valeurs en mm)

		stock initial	stock final	variation de stock	ΔS moyen	pluie	ETR	ETM
24-30-juil	raie	339	317	-22	23	15	38	37
	billon	346	322	-24				
30-04-août	raie	317	308	-9	-10	15	25	28
	billon	322	311	-11				

A ces dates le drainage peut être considéré négligeable (comme le fait apparaître le suivi tensiométrique). Il apparaît donc que l'ETR est encore dans ce cas très voisine de la consommation hydrique du site *ETM*.

2.4.3.2.2 Cas des autres sites

Les mêmes calculs ont été effectués sur les sites sur lesquels le drainage a pu être calculé. Sur les différents sites, les tensiomètres n'étant pas tous en place, le drainage n'a pas pu être évalué pour la première période. Cependant, si on rapproche les variations de stock et les apports des données disponibles pour *Ta-moyen*, il apparaît très probable qu'un stress en début de cycle a touché *Te-moyen* et *Te-aval*, alors que *Ta-aval* était dans un état hydrique assez voisin de *Ta-moyen*

Tableau 37 Composantes du bilan hydrique calculé sur trois sites en irrigation gravitaire

	période	ΔS	pluie	irrigation	drainage*	ETR
Ta-aval	15/6-5/7	-36	15	27	**	**
	5/7-7/9	-84	152	284	6/8	350/352
	7/9-5/10	-16	66***	0	90	
Te-moyen	15/6-8/7	-10	28	28	**	**
	8/7-7/9	+30	139	331	50/80	(390/360)
	7/9-5/10	-15	66***	0	25/35	(66/56****)
Te-aval	15/6-8/7	-2	28	28	**	**
	8/7-7/9	+49	139	342	160/200	(272/232)
	7/9-5/10	-20	66***	0	110/130	

* le drainage est calculé par la méthode de Darcy (cf. 2.4.3.2.1)

** drainage non calculé à cause de la date d'installation de l'ensemble des tensiomètres

*** sous-estimation des apports par les pluies et le ruissellement

**** sur-estimation des apports à cause du ruissellement

(en faisant l'hypothèse que les flux à 140 cm était du même ordre).

Pendant la deuxième période la méthode de calcul proposée s'applique encore pour *Ta-aval* où la consommation hydrique reste encore une fois proche de *Ta-moyen*. Par contre, les valeurs d'ETR obtenues ne peuvent pas être validées sur *Te-moyen* et *Te-aval*. Dans un cas les valeurs apparaissent très fortes et dans l'autre, très faibles; ces résultats amènent à remettre en cause les valeurs obtenues pour le drainage. Il paraît nécessaire de disposer de mesures de conductivité hydraulique dans cette partie de la parcelle pour évaluer les flux.

Il n'est donc pas possible d'évaluer globalement le niveau de satisfaction des besoins en eau sur *Te*, alors qu'on peut considérer qu'il a été proche de *ETM* sur l'ensemble du cycle pour *Ta*.

2.4.4 Analyse de l'hétérogénéité d'apport d'eau en irrigation à la raie bouchée

2.4.4.1 Variabilité à l'échelle parcellaire

Le protocole expérimental permet d'étudier la variabilité des apports d'eau entre raies d'un même bloc puisque le débit de chaque raie est mesuré au moyen d'un seuil. Par contre, nous ne disposons de tubes d'accès neutroniques que sur une seule raie de chaque bloc. On ne peut donc pas connaître la variabilité de la dose infiltrée sur l'ensemble des raies par la mesure. Cependant, le suivi des irrigations peut nous donner des informations sur la variabilité de l'avancement entre raies et donc sur la variabilité de l'infiltration.

Le suivi des trois irrigations à la raie nous a fourni les temps d'arrivée et les débits pour presque 100 raies. La première irrigation a été conduite par blocs de 15 raies, alors que les autres, pour lesquelles le débit d'entrée était plus faible, ont été conduites par blocs de 25 raies à 30 raies.

2.4.4.1.1 Variabilité des débits

Pour la première irrigation, les coefficients de variation du débit (sur 15 raies) sont compris entre 4 et 7 % selon les blocs (*Annexe 1.10*). Ces valeurs semblent cohérentes avec d'autres expérimentations, pour lesquelles un coefficient de variation du débit de 8 % sur 25 raies a été atteint grâce à un matériel de distribution de type rampe à vannettes (Mailhol et al., 1999). Par contre, les coefficients de variation des débits de la deuxième irrigation (de 10 à 15 % selon les blocs) sont plus élevés, dû à un manque de soin apporté à l'ouverture des vannettes. Le *Tableau 38* présente la variation du débit et du temps d'arrivée sur des blocs dont les raies appartiennent au même traitement, mais qui ne sont pas forcément irriguées au même instant (15 ou 25 raies sont irriguées par bloc, selon irrigation, et le décalage est de quelques heures seulement entre les irrigations des différents blocs).

2.4.4.1.2 Variabilité des temps d'arrivée entre blocs

On peut remarquer qu'il existe des différences d'avancement entre les traitements *Te* (raies 11 à 40) et *Ta* (46 à 75) (*Tableau 38*). Pour la deuxième irrigation, la moyenne des temps d'arrivée des raies du traitement *Te* est d'environ 238 min alors qu'elle est de 113 min pour les raies du traitement *Ta* (avec

Tableau 38 Résultats du suivi des irrigations à Lavalette

1 ^{ère} irrigation (08-10 juillet) bloc (raies suivies)	Débit (l/s)		Temps d'arrivée (min)	
	Moyenne	CV (%)	Moyenne	CV (%)
31-40 (<i>Te</i>)	1.15	5 %	138	16 %
46-75 (<i>Ta</i>)	1.21	6 %	77	19 %
2 ^{ème} irrigation (22-23 juillet) bloc (raies suivies)	Débit (l/s)		Temps d'arrivée (min)	
	Moyenne	CV (%)	Moyenne	CV (%)
11-40 (<i>Te</i>)	0,75	11 %	238	17 %
46-75 (<i>Ta</i>)	0,76	13 %	113	20 %
3 ^{ème} irrigation (23-24 août) bloc (raies suivies)	Débit (l/s)		Temps d'arrivée (min)	
	Moyenne	CV (%)	Moyenne	CV (%)
11-40 (<i>Te</i>)	1,08	6 %	128	6 %
46-75 (<i>Ta</i>)	0,78	4 %	130	22 %

les mêmes débits). Ces différences d'avancement nous ont conduit à admettre l'existence de processus différents concernant l'infiltration entre ces deux parties de la parcelle. Le sol du traitement *Te* est caractérisé par un taux d'argile

plus important que sur *Ta*, à l'origine d'une fissuration observable, mais également d'effet capillaires plus prononcés, qui se traduisent visuellement par l'humectation du billon surtout à l'aval. Les vitesses d'avancement sur *Ta* dépourvu de fissuration sont largement supérieures à celle de *Te* (*Figure 46*).

2.4.4.1.3 Variabilité des temps d'arrivée entre raies d'un même bloc

L'avancement peut être très variable entre les raies, même si elles se trouvent à quelques mètres de

Figure 45 Exemple de la variabilité d'avancement

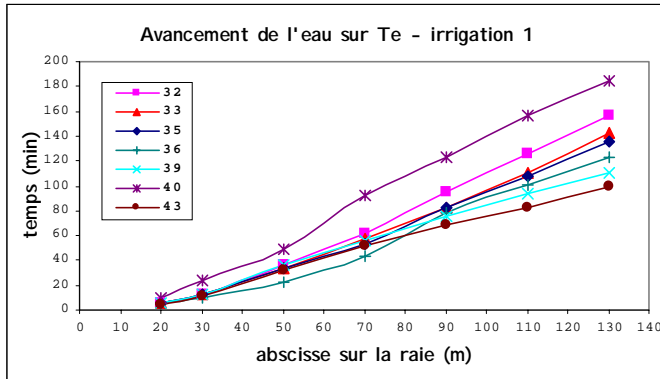
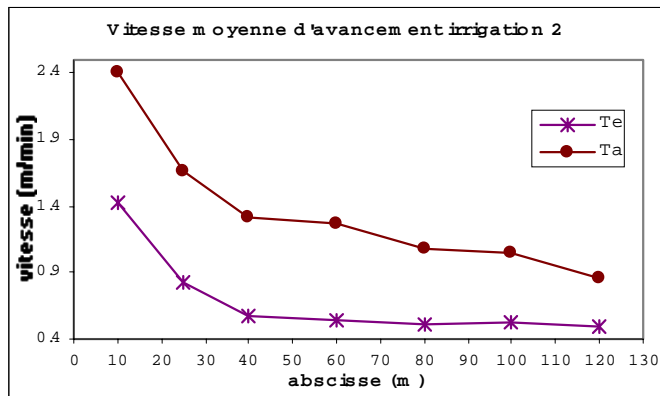


Figure 46 Comparaison de la vitesse d'avancement sur Te et Ta



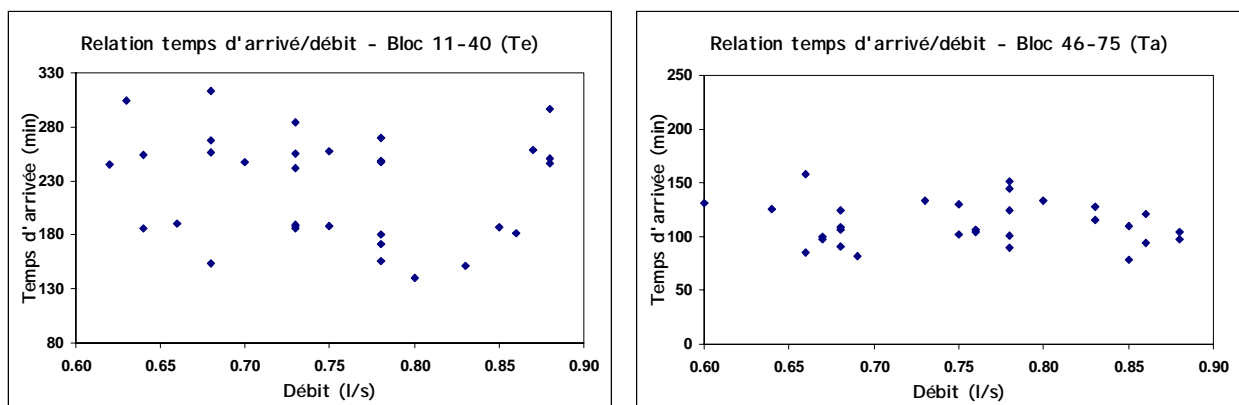
distances; et cette affirmation est valable pour toutes les irrigations suivies. La Figure 45 présente un exemple de cette variabilité d'avancement lors de la première irrigation, entre les raies appartenant au traitement Te. On a observé aussi que le coefficient de variation était plus important sur le traitement Ta que sur celui de Te.

L'analyse des vitesses d'avancement pour quelques raies représentatives encadrant les sites de mesures (Figure 46), confirme que les raies de Ta ont un comportement différent de celui des raies appartenant à Te.

Sur la plupart des blocs et notamment ceux relatifs au traitement Ta (raies 45 à 75), les coefficients de variation des temps d'arrivée (Tableau 38) sont largement supérieurs aux coefficients de varia-

tion des débits. Sans préjuger du caractère plus ou moins linéaire de la relation avancement/débit, on peut donc supposer que le débit n'est pas la seule cause de variabilité des temps d'arrivée. En outre la corrélation avancement-débit (pour différentes abscisses) est inexistante, pour les niveaux de variabilités des débits d'entrée obtenus, comme l'illustre la Figure 47.

Figure 47 Relation temps d'arrivée-débit, irrigation n°2



L'origine de la variabilité d'avancement peut être recherchée dans les différents niveaux de tassement des raies, relevages intempestifs du soc lors de la confection des raies, géométrie, etc. Ces facteurs qui ont un impact sur l'infiltration, constituent des sources d'hétérogénéité qu'il est difficile d'identifier. L'analyse de l'effet conjugué de tous ces facteurs est conduite de façon opérationnelle par le suivi et l'analyse de l'avancement.

Le coefficient de variation des temps d'arrivée varie entre 8 et 22 % pour les différents traitements et irrigations. Notons qu'il suffit quelquefois d'éliminer de l'échantillon de 30 raies 3 ou 4 raies anormalement lentes pour faire chuter le CV de T_L de 21 % à 13 % comme c'est le cas pour le 3^{ème} arrosage de Ta (Tableau 39 et Annexe 1.10).

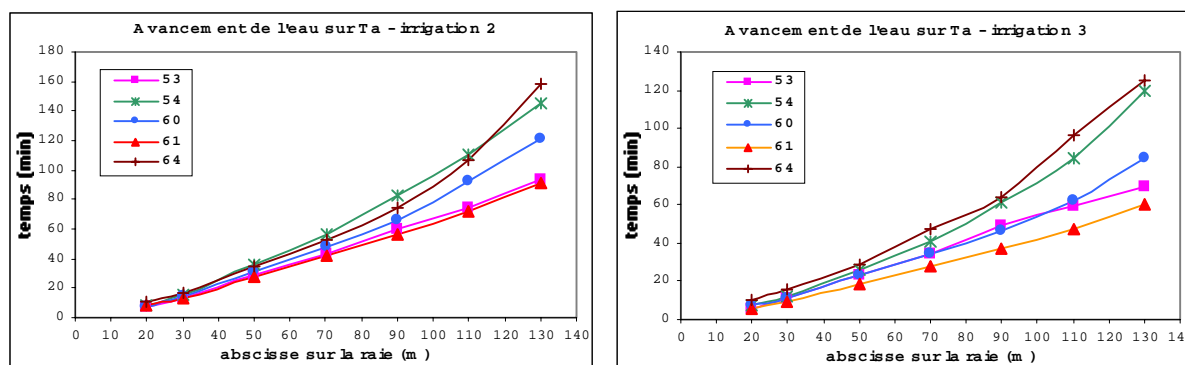
Tableau 39 Exemple d'avancement de la 3^{ème} irrigation sur le traitement Ta

	Q (l/s)	20 m	30 m	50 m	70 m	90 m	110 m	130 m
Valeurs moyennes (et CV) des temps d'avancement sur 30 raies								
moyenne	0.78	7	12	23	34	48	62	85
CV (%)	4	13	11	10	13	14	18	21
Valeurs moyennes après d'élimination des raies singulières (54, 64, 74)								
moyenne	0.78	7	12	22	33	46	59	79
CV (%)	4	11	10	7	8	9	9	13

Cette variabilité importante peut induire des profils de dose assez variables d'une raie à l'autre selon leur temps d'arrivée et le temps d'arrêt de l'irrigation; la variabilité du profil de la dose étant d'autant plus prononcé que l'on pratique la raie bouchée. L'effet de cette variabilité de l'avancement peut être plus ou moins atténuée selon la forme de la loi d'infiltration et la variabilité du débit d'entrée. De plus, cette variabilité induit une variabilité des apports d'eau plus importante sur l'ensemble du cycle cultural, car il s'avère que les raies lentes pour l'arrosage i le sont aussi pour l'arrosage $i+1$, pour peu que le coefficient de variation des débits ne varie pas trop d'un arrosage à l'autre. Ce phénomène n'est pas bien sûr sans conséquences sur le rendement et sa variabilité.

La permanence de comportement des raies au cours des différentes irrigations, déjà observée sur d'autres sites expérimentaux, se confirme ici (Figure 48). Les raies les plus « rapides » restent les plus rapides et inversement.

Figure 48 Effet de la permanence du comportement des raies



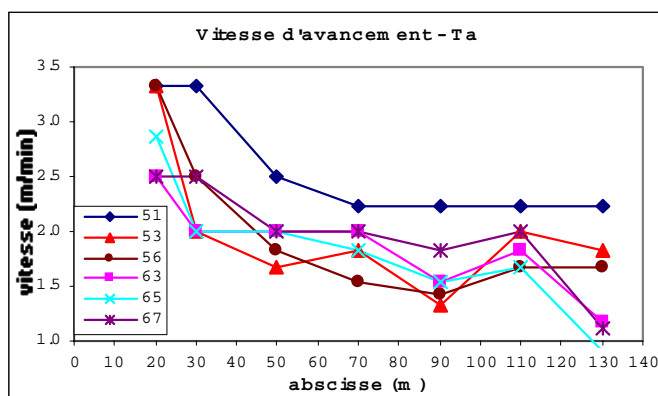
2.4.4.2 Variabilité à l'échelle de la raie

Au niveau d'une raie, une anomalie constatée dans le graphe représentant la vitesse d'avancement en fonction de l'abscisse permet de détecter un éventuel changement des conditions d'infiltrations. Pour apprécier la variabilité de l'infiltration le long de la raie nous disposons d'une méthode indirecte: l'analyse de la vitesse d'avancement du front d'eau, même si la pertinence de cette analyse est tributaire du pas d'espace choisi. D'autre part, les humidimètres à neutrons et les sondes TDR nous permettent de mesurer l'humidité volumique à chaque profondeur et ainsi d'évaluer l'évolution du stock d'eau dans le sol dans le sens amont-aval.

2.4.4.2.1 Variabilité de la vitesse d'avancement le long de la raie

La décroissance quelque peu chaotique de la vitesse d'avancement $V(x)$ témoigne de certaines types

Figure 49 Variabilité de la vitesse d'avancement le long de raie (Ta, 3^{ème} arrosage)



d'hétérogénéité sur l'avancement de l'eau

(Figure 49). Cependant ces hétérogénéités ne sont pas imputables à la pratique de la raie bouchée comme cela était le cas sur les vertisols au Maroc (Mailhol et al., 1999). En effet si tel était le cas, on constaterait une augmentation significative de la vitesse au delà d'une certaine abscisse.

Le comportement singulier de la vitesse en fin de parcelle semble donc plutôt résulter d'un problème de traçage des raies

(relevage du soc en fin de parcelle générant une contre-pente sur certaines raies).

2.4.5 Estimation de l'apport d'eau à partir des mesures d'humidité

Pour estimer avec une certaine précision la variation de stock en eau, on doit disposer de mesures d'humidité avant et après l'arrosage. Selon la méthode neutronique, généralement on effectue les mesures 24 h après l'arrosage, le risque étant toutefois de ne pas boucler le bilan lorsqu'il y a eu du drainage au delà de la profondeur maximale du tube d'accès.

Sur le site *Ta-moyen*, dans la raie nous avons installé des sondes TDR pour la mesure automatique de l'humidité par 30 cm de tranche du sol. Sur le site *Te-aval* nous disposons de mesures manuelles pendant la deuxième et troisième irrigation. Sur les autres sites, où l'humidité a été mesurée manuellement par des sondes à neutron, ces mesures, juste après irrigation, ont été difficiles à effectuer, compte tenu de la praticabilité de la parcelle. Si les mesures effectuées en fin d'arrosages limitent le risque de sous-estimer le drainage éventuel, elle peuvent en outre conduire à une sous-estimation de la dose apportée,

compte tenu que le bulbe humide est encore insuffisamment développé au regard de la sphère d'influence de la sonde à neutron (20 cm).

2.4.5.1 Apport mesuré par la sonde TDR Campbell

Sur le site *Ta-moyen* nous disposons des mesures d'humidité horaires pendant la deuxième et troisième irrigation, jusqu'à 120 cm de profondeur, dans la raie N°60. On a ainsi calculé le changement du stock d'eau de la couche 0-120 cm, induit par l'irrigation (Tableau 40).

2.4.5.2 Apport mesuré par la sonde TDR Trase

Tableau 40 Doses d'eau apportées mesurées par les sondes (mm)

Site	Ta-moy (Campbell)	Te-aval (Trase)	Te-sup (S neutron)
localisation	R60, 62 m	R24, 118 m	R25, 129 m
2 ^{ème} irrigation	72	109	102
3 ^{ème} irrigation	44	158	111

Sur le site *Te-aval*, l'humidité a été mesurée manuellement dans la raie N° 24, par couche de sol de 20 cm jusqu'à 160 cm, pendant la deuxième et troisième irrigation. Nous disposons ainsi

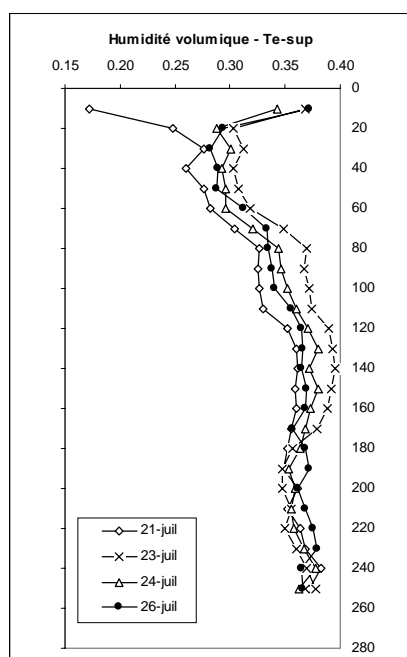
des valeurs du stock d'eau de la couche 0-160 cm, juste avant l'arrosage et juste après que la lame d'eau ait disparu de la surface du sol (2^{ème} irrigation), et une valeur de stock quand il y avait encore une lame d'eau en la surface (3^{ème} irrigation). Donc pour le calcul de la 3^{ème} irrigation il faut ajouter la lame d'eau mesurée (35 mm, en tenant compte du profil de la raie) à la valeur du changement du stock (123 mm) pour obtenir la quantité totale d'eau apportée (Tableau 40).

2.4.5.3 Apport mesuré par la sonde à neutron

Nous avons effectué les mesures de l'humidité par la sonde à neutron sur tous les sites avant et après chaque irrigation, un calcul de la dose apportée lors chaque arrosage peut donc être envisagé. Dans un premier temps, il sera effectué à partir des mesures effectuées dans la raie, selon l'approche classique. Etant donné que les mesures après l'irrigation n'ont pas été faite immédiatement dans la plupart des cas, nous avons dû prendre en compte dans notre calcul l'évapotranspiration par la plante et les éventuelles pluies. De plus, sur les sites où à l'heure de la mesure l'eau n'était pas encore complètement infiltrée (lame d'eau présente sur la surface du sol), cette lame mesurée a été ajoutée lors du calcul. Ces détails montrent les difficultés particulières rencontrées pour effectuer des mesures en irrigation à la raie pour allier rigueur des horaires de mesures et préservation des sites de mesure.

Dans ce qui suit, le mode de calcul des apports est détaillé à titre d'exemple, sur le site Te-sup, situé en bout de raie, à 129 m. Sur ce site des mesures d'humidité volumique ont été effectuées juste après la 2^{ème} irrigation, le 23 juillet à 18 h (Figure 50), l'irrigation ayant été réalisée de 10 h à 15 h. La mesure avant l'irrigation a été effectuée le 21 juillet à 16 h. Entre ces deux dates la variation de stock d'eau a été de 87 mm, sur une profondeur de 2,55 m.

Figure 50 Profil d'humidité volumique avant et après l'arrosage sur site Te-sup

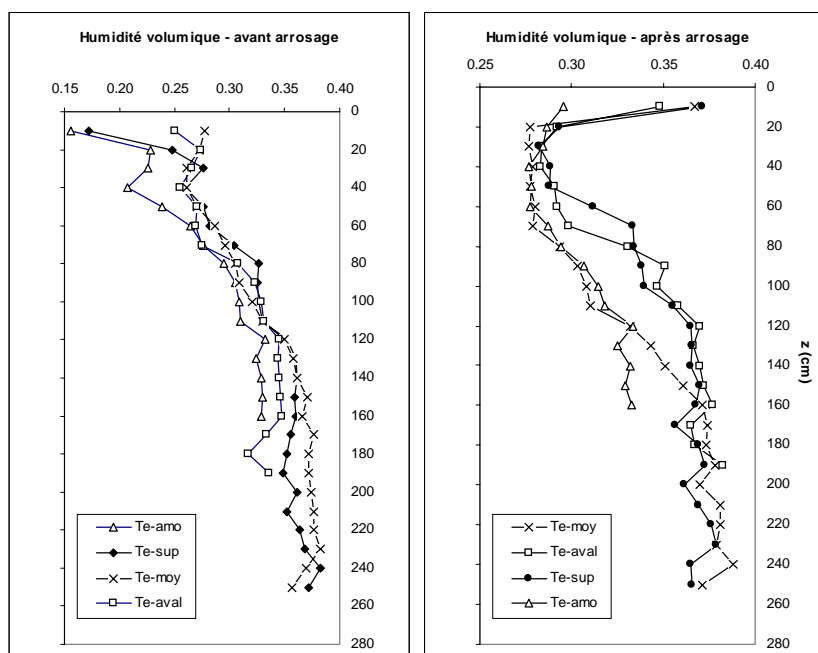


Pour calculer l'apport d'eau à partir de la variation du stock, on doit connaître les autres éléments du bilan hydrique. Selon les données disponibles, on peut estimer la consommation de la culture à 15 mm durant cette période (du 21 à 23 juillet). Le ruissellement et les remontées capillaires peuvent être négligés dans notre situation. Le drainage est supposé nul dans un premier temps. On peut donc calculer l'apport d'eau par l'irrigation qui est $I = \Delta S + ETR$. L'apport d'eau par la deuxième irrigation est ainsi estimé à 102 mm sur le site de mesure Te-sup. En admettant une imprécision de la mesure d'humidité à la sonde de 10 % (Haverkamp et al., 1984) sur le calcul de la variation du stock d'eau, l'apport d'eau estimé est compris entre 93 et 111 mm (en l'absence de drainage).

Lors de la 3^{ème} irrigation, déroulée le 24 août de 12 h à 14 h 30, les mesures ont été effectuées le 23 août à 10 h et le 24 août à 18 h, sur le site Te-sup. La même procédure conduit à un apport d'eau estimé à 111 mm, et en tenant compte des erreurs des mesures, on peut dire que l'apport par la troisième irrigation se situe entre 100 et 122 mm, à l'abscisse considérée.

2.4.5.4 Variabilité d'apports observée le long de raie

Figure 51 Suivi du profil d'humidité volumique avant et après l'arrosage sur les sites de traitement Te



Nous disposons pour la troisième irrigation des valeurs de stocks avant et après irrigation pour la raie numéro 25 (située dans le traitement *Te*). Les mesures ont été effectuées pour tous les sites de *Te* le 23 et le 24 août, l'irrigation ayant eu lieu le 23 août. Nous disposons ainsi des mesures de stock juste avant l'arrosage et après le ressuyage du sol. Les profils d'humidité avant et après l'irrigation pour les sites *Te* sont représentés sur

la Figure 51.

On peut noter que sur le site *Te-amont*, l'eau s'est infiltrée jusqu'à environ 70 cm, sur le site *Te-moyen* jusqu'à à 110 cm, et sur *Te-aval* on observe un drainage à la profondeur maximale mesurée (180 cm). Il faut ajouter que les conditions d'humidité du sol avant l'arrosage n'étaient pas significativement différentes entre les sites, excepté par le site en amont (plus sec sur les 50 premiers centimètres en particulier). Cette différence d'humidité induit une modification de la vitesse d'infiltration, qui a son tour modifie l'avancement. Ces observations sont en accord avec la variabilité de la vitesse d'avancement observée (Figure 49)

2.4.5.5 Conclusion partielle

L'expérimentation nous a permis d'apprécier l'hétérogénéité des apports d'eau à différents niveaux. A l'échelle de la parcelle, la variabilité des temps d'arrivée est telle qu'elle entraînera une hétérogénéité relativement importante de la dose apportée à l'aval des raies (surtout en ce qui concerne Ta) compte tenu de la pratique de la raie bouchée.

Le suivi de l'avancement du front de l'eau dans les raies a mis en évidence, dès la première irrigation, une forte différence de comportement entre les parties Sud et Nord de la parcelle. Le temps moyen d'arrivée en bout de raie varie de près de 40 % pour des blocs de raies alimentées avec le même débit et la même tendance se confirme pour les irrigations suivantes. Ces différences sont à rapprocher des caractéristiques hydrodynamiques du sol de la parcelle expérimentale.

Compte tenu de la longueur modeste de la parcelle, la variabilité des temps d'opportunité ne sera pas la cause majeure d'hétérogénéité de la dose apportée entre raies et au sein d'une même raie pour les abscisses échappant à l'influence de l'endiguement aval. Il n'en sera par contre pas de même pour les points susceptibles d'appartenir à la zone endiguée (aval de la parcelle).

2.5 SUIVI DES BILANS ET FLUX D'AZOTE

Malgré les précautions prises, de nombreuses difficultés sont apparues lors de l'établissement des bilans d'azote, qui reste une opération délicate. Compte tenu de la fréquence des problèmes rencontrés lors de ce type d'expérimentation, et dans un souci de rigueur scientifique, il a été choisi de présenter et de discuter les résultats bruts plutôt que d'éliminer systématiquement certaines observations. L'objectif est que le temps passé dans cette analyse soit profitable à quelques débutants sur ce thème moins connu que celui de l'eau.

Le but étant le suivi de l'évolution des formes minérales d'azote dans le sol et la détermination du bilan, des prélèvements de sols ont été réalisés sur l'ensemble des sites, à plusieurs dates pendant la campagne, parallèlement à des mesures sur la culture. En cours du cycle, une seule placette de maïs de 3.2 m² est prélevée, tandis qu'à la récolte, l'analyse d'azote porte sur un échantillon confectionné de plantes provenant de plusieurs placettes.

2.5.1 Résumé des résultats de 1997 et 1998

2.5.1.1 Azote dans la plante

En 1997 la teneur en azote de la plante est disponible uniquement à la récolte (Tableau 41). Selon le

Tableau 41 Teneur en azote de la plante en % MS et en Kg N/ha à la récolte en 1997

	grains N %	tiges N %	MST N %	kg N/ha	NT/rdt (%)*
ETM	1.40	0.58	0.99	187	1.91
Centre	1.64	0.91	1.24	208	2.47
Sud	1.57	0.76	1.16	190	2.17
Sec	1.79	0.76	1.23	187	2.59

* kg N/ha par quintal de grain récolté (rapport entre la masse d'azote de la MST en kg N/ha et le rendement en grain en q/ha à l'humidité standard de 15 %)

phénomène bien connu de « dilution », le teneur en azote chute sur l'ETM, du fait de l'augmentation de la production de la matière sèche totale. L'azote consommé par unité de rendement en grain est plus élevé que pendant les autres années analysées.

On note que l'azote total consommé par la plante sur les différents sites à été très similaire, le stress hydrique est resté modéré et n'a pas affecté le rendement d'azote par la plante.

En 1998 la teneur en azote de la plante a été estimée le 12 août (Tableau 42) et à la récolte. D'après les

Tableau 42 Teneur en azote de la plante le 12/8/1998 (kg N/ha)

	ETM	ON	Nord	Sec
NT (kg N/ha)	247	91	248	104

résultats obtenus il y aurait plus d'azote dans la plante en août que à la récolte. Ces valeurs sont de plus incohérentes avec celles des autres années. Les déterminations des teneurs en azote à la récolte sont donc à rejeter.

2.5.1.2 Bilan d'azote: Estimation de la minéralisation en 1998

En 1998 il y a eu un seul apport de fertilisant: 200 unités sous forme d'ammonitrate (33.3 % d'azote), un mois après le semis (le 5 juin) sur toute la parcelle (sauf sur le site *0N*). Bien qu'il soit recommandé de fractionner des apports, la dose totale d'azote a été apportée en une seule fois, pour des raisons d'organisation du travail. La quantité d'azote réellement apportée sur chaque site n'a pas été mesurée, donc la quantité de 200 kg N/ha d'azote doit être prise comme une valeur seulement approximative.

Le bilan d'azote sur le site *0N* donne une estimation de la **fourniture du sol par minéralisation**. Dans l'hypothèse où il n'y a pas eu ni lessivage, ni pertes par voie gazeuse sur ce site, on peut calculer la minéralisation, si l'on connaît tous les autres termes du bilan (N initial, prélèvements par la plante, N final).

Nous avons donc estimé la minéralisation entre le 13/5 et le 12/8 à 68 kg N/ha. Cette valeur, environ 0.74 kg N/ha/jour, est similaire à celle reportée par Houot et al. (1989) qui va de 0.6 à 0.9 kg N/ha pour un sol cultivé.

Tableau 43 Bilan d'azote en 1998

Site	stock initial	stock final	apport	minéralisation	plante	pertes**
ETM	108	86	(200)	68	247	(42)
0 N	100	77	0	68*	91	0
Nord	143	83	(200)	68	248	(79)
Sec	127	436	(200)	68	104	-146

() estimation

* valeur calculée par différence

** pertes calculés par différence, sauf pour *0N*

Sur le site *ETM*, en supposant que la minéralisation est identique à celle du site *0N* (conditions de température et d'humidité très proches), le bilan donne une perte de 42 kg

N/ha d'azote. Etant donné que le site a été arrosé à *ETM* sans drainage, d'après le suivi hydrique cette perte ne peut pas être due au lessivage. Quant à la dénitrification, les conditions d'humidité n'ont pas été favorables à ce type de réaction, puisque le sol n'a jamais été engorgé pendant le cycle. Cette situation nous conduit à rechercher les erreurs possibles dans le calcul du bilan d'azote. La volatilisation est estimée par Maruejols (1994) à 8 % de la quantité d'azote apporté sous forme d'ammonitrate, ce qui donne environ 16 kg N/ha dans notre cas.

Tableau 44 Sensibilité du stock en azote du sol à l'humidité et à la densité apparente

	$\theta \pm 10\%$	$d_a \pm 5\%$	θ et d_a
Δ stock (%)	± 2	± 5	± 7
Δ stock (kg N/ha)	± 1	± 3	± 4

Pour retrouver les autres sources d'erreur dans le calcul du bilan, nous avons réalisé une analyse d'erreur des valeurs du stock d'azote par rapport aux valeurs d'humidité et de densité apparente (Tableau 44). En retenant une incertitude relative de 10 % sur les humidités et 5 % sur les densités, les différences peuvent être importantes au niveau des stocks à certaines dates (4 à 25 kg N/ha), mais au niveau de la variation du stock, les incertitudes restent faibles (1 à 4 kg N/ha).

Enfin, étant donné le nombre réduit d'échantillons de sol et de plante prélevé, l'incertitude de mesure induite sur le stock dans le sol et dans la plante est de l'ordre de 5 % (Plénet, 1995), soit 20 kg N/ha.

Le cumul de l'ensemble de ces incertitudes conduit à une incertitude absolue sur le bilan supérieur à 40 kg N/ha. Cet ordre de grandeur paraît important à retenir.

Remarquons que si l'on admet une efficacité de l'engrais de 80 %, ce qui est souvent retenu, les apports sont diminués du 40 kg N/ha et le résultat est identique. L'hypothèse la plus vraisemblable néanmoins reste une surestimation des apports d'azote, qui, comme nous l'avons indiqué, n'ont pas été mesurés in situ au cours de cette campagne. Après cette analyse, on peut donc considérer un lessivage nul sur le site *ETM*.

Sur le site *Nord* la quantité d'azote utilisée par la plante (Tableau 43) a été identique à celle sur le site *ETM*, donc les « pertes supplémentaires » du site *Nord* (37 kg N/ha) sont dues à la dénitrification et au lessivage. Entre les deux prélèvements de sol et analyse d'azote, du 1/7 et du 12/8, le stock de la couche 60-150 cm du site Nord diminue de 35 kg N/ha de plus que sur le site *ETM* (*Annexe 1.8*) pour un drainage (au-delà de 150 cm) estimé de 86 mm. Cette quantité d'azote a donc pu être soumise au lessivage. La dénitrification ne peut pas être écartée, car le sol sur ce site a été proche de la capacité au champ (condition favorable à la dénitrification) pendant 35 jours (de 19/6 à 29/6 et de 17/7 à 6/8).

Les données intermédiaires du stock d'azote sur le site Sec: 359 kg N/ha (le 1/7) et 359 kg N/ha (le 12/8), que nous pouvons rapprocher des 436 kg N à la récolte, nous indiquent que probablement il a été apporté plus de 200 kg N/ha d'engrais sur ce site, qui était proche de l'extrémité de la parcelle et a sans doute bénéficié d'un recouvrement de deux passages d'épandeur d'engrais¹⁸. Pour la dernière analyse du sol, les échantillons ont été prélevés en évitant les bordures, ainsi le stock calculé à cette date a diminué considérablement par rapport aux stocks aux dates antérieures. Étant donné ces circonstances, nous ne pouvons pas expliquer de manière satisfaisante le bilan d'azote sur le site Sec.

2.5.2 Résultats de l'année 1999

2.5.2.1 Fertilisation

En 1999 les doses apportées sur les différents sites n'ont pas été homogènes (Tableau 45). Le premier

Tableau 45 Calendrier et apport de fertilisation en 1999

date	25/05/99	01/07/99	23/07/99	Total
ETM	71	79	0	150
Sec	88	0	0	88
Ta-amo	109	89	0	198
Ta-moy	93	93	0	186
Ta-aval	89	82	0	171
Te-amo	91	72	50	213
Te-moy	98	71	50	219
Te-aval	90	66	50	206

apport de 90 unités (en moyenne et sauf sur le site *0N*) sous forme d'ammonitrate (33.3 % d'azote) a été effectué un jour avant le semis (le 25 mai). Le deuxième apport, réalisé le 1 et 2 juillet (35 jours après-semis), a été de 80 unités d'azote en moyenne, sous forme d'ammonitrate. Le traitement *Te* a bénéficié d'un troisième apport d'environ 50 unités (sous forme d'azote gazeux),

¹⁸ Ceci est confirmé par le stock initial en 1999 qui reste supérieur à celui des autres sites (Tableau 49).

par irrigation fertilisante. Il est important de noter que le 2^{ème} apport à été effectué juste avant la confection des raies.

La dose d'azote délivrée pendant les deux premières fertilisations a été mesurée à l'aide des cuvettes, placées autour de chaque site de mesure (de 4 à 6 cuvettes par sites). La dose apportée lors de l'irrigation fertilisante a été calculée à partir de la lame d'eau apportée et de sa concentration en azote.

2.5.2.2 Teneur en azote de la plante

En 1999 nous disposons des valeurs de la teneur en azote de la plante en début août et à la récolte (du 7 au 15 octobre), sur tous les sites, et le 20 juillet sur les sites *Te-moyen* et *Te-aval* (Tableau 46).

Le rapport NT/Rdt entre l'azote total de la plante et le rendement varie entre 2.0 et 2.3 % sur les sites

fertilisés et il est de

1.6 % sur le site *0N*. A

noter que sur les sites

fertilisés cette valeur

concorde avec les va-

leurs rapportées par la

littérature: 2.2-2.3 %

(Desvignes, 1993).

Il y a une légère diffé-

rence entre la concen-

Tableau 46 Teneur en azote de la plante en % MS et en Kg N/ha à la récolte et au début août

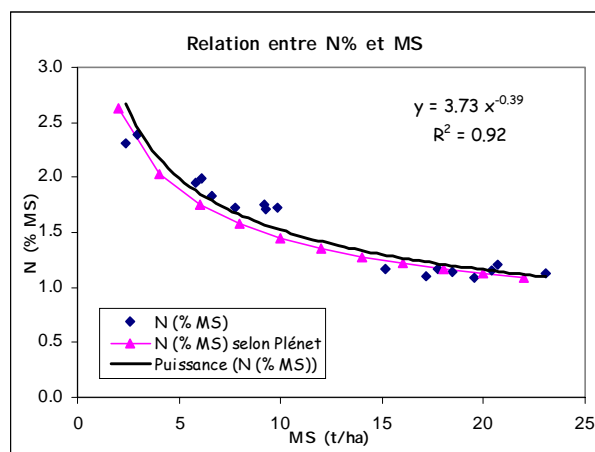
	Plante à la récolte					Plante entière en août	
	grains N %	tiges N %	MST N %	NT kg N/ha	NT/rdt (%)	MST N %	NT kg N/ha
ETM	1.47	0.80	1.13	262	2.1	1.91	208
0 N	1.04	0.37	0.66	79	1.6	1.08	78
Sec	1.50	0.84	1.16	166	2.2	1.72	134
Ta-amo	1.53	0.91	1.20	249	2.3	1.73	171
Ta-moy	1.51	0.80	1.16	237	2.1	1.75	161
Ta-aval	1.39	0.76	1.08	212	2.0	1.71	158
Te-amo	1.45	0.78	1.14	211	2.0	1.83	121
Te-moy	1.47	0.82	1.16	206	2.0	1.95	113
Te-aval	1.46	0.69	1.11	189	2.0	1.99	122

tration en azote de la plante le long de la raie pour toutes les composantes du rendement: en amont cette concentration est plus élevée par rapport à celle observée en aval. Même si il a été appliqué plus d'azote sur les sites *Te* par rapport aux sites *Ta*, on observe un prélèvement plus fort par la plante sur les sites *Ta*. Ce n'est donc pas seulement la pratique de fertilisation, mais un ensemble de facteurs

incluant l'irrigation et l'interaction avec les caractéristiques du sol qui détermine la répartition de l'azote entre le prélèvement par la plante, le lessivage et le reliquat d'azote dans le sol.

Avec les données sur la quantité de matière sèche (MST) produite et le taux d'azote total dans la culture (N %) mesurés à plusieurs dates pendant la campagne de 1999, nous avons établi la relation entre ces variables (Figure 52). Cette relation est très peu différente de celle donnée par Plénet (1995), la différence pouvant

Figure 52 Relation entre la teneur en azote des partie aériennes et la biomasse aérienne accumulée



être expliquée par les erreurs lors de l'estimation de la matière sèche totale produite. Le même auteur a observé que du stade 10-11 feuilles à la floraison femelle, la teneur en azote passe de 3.4 % à 1.4 %.

2.5.2.3 Analyse du stock d'azote du sol

Nous devons d'abord rappeler que les prélèvements n'ont pas été réalisés toujours à la même date sur chaque site, rendant ainsi plus difficile la comparaison. Les pluies d'avril ont retardé le semis d'un mois et il n'a pas été possible de reprendre tous les prélèvements fin mai.

2.5.2.3.1 Evolution du stock d'azote du sol sur les sites en aspersion

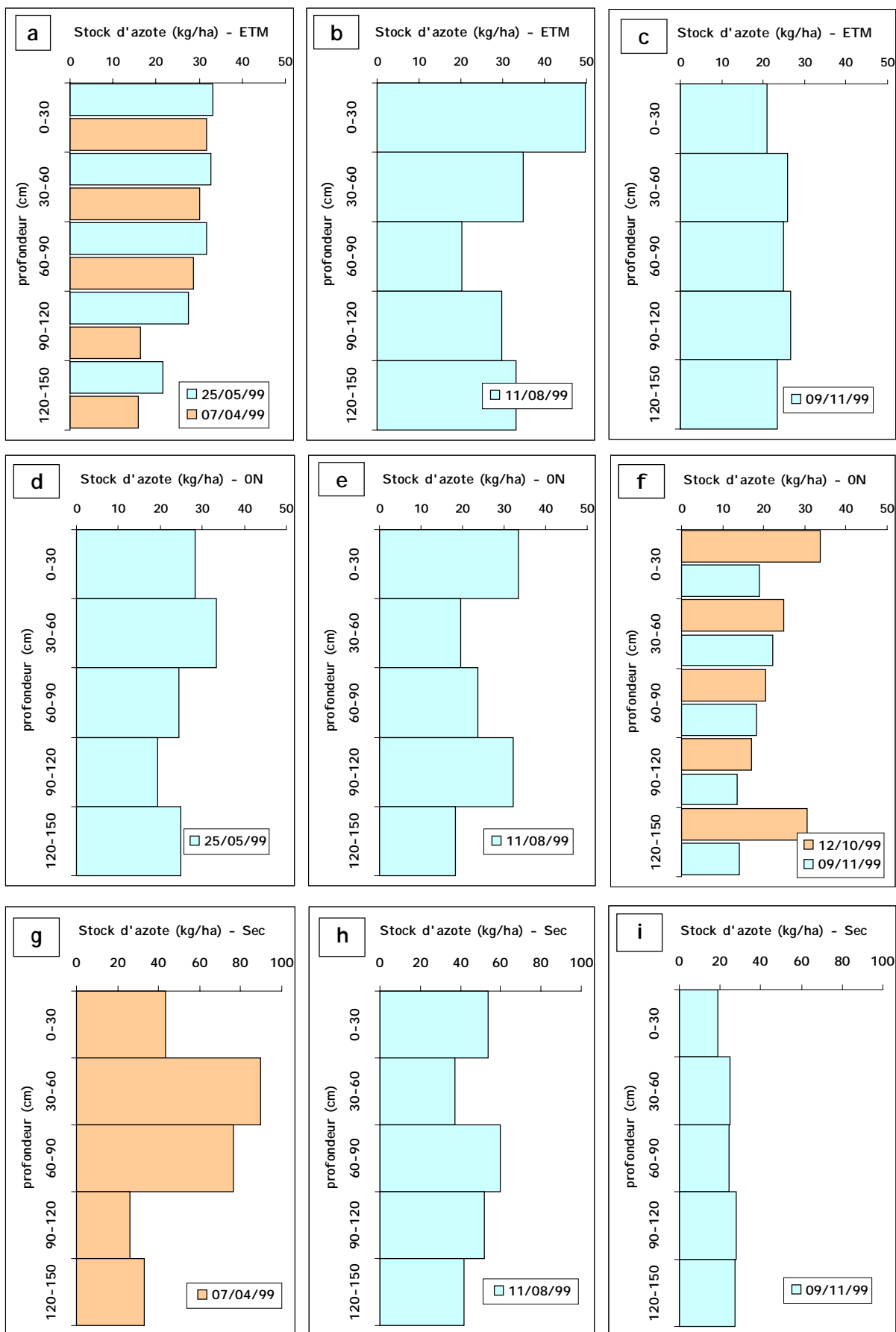
La Figure 53 rassemble les stocks d'azote par couche sur la campagne. L'analyse de l'évolution des stocks entre le début d'avril et le semis sur le site *ETM* montre l'augmentation du stock dans toutes les couches. La minéralisation s'effectuant principalement dans la couche labourée (environ 0-30 cm), l'augmentation du stock dans les couches inférieures provient du lessivage depuis des couches supérieures. En effet, les 125 mm tombés en mois de mai ont entraîné du drainage.

L'augmentation de stock (24 kg N/ha) entre ces deux dates représente la minéralisation diminuée par le lessivage. La diminution du stock dans la couche 60-90 le 11/8 témoigne du prélèvement d'azote par la plante à cette profondeur et du transfert d'azote vers les couches inférieures. Le flux hydrique cumulé à 140 cm étant globalement très faiblement négatif (cf. 2.4.2.3.2), le flux d'azote peut être considéré négligeable à cette cote. Par contre, le lessivage apparaît après la récolte.

Sur le site *ON* par contre, un drainage limité (34 mm) qui s'est produit à 140 cm, surtout à partir de fin août, a entraîné des faibles pertes sur les deux dernières couches. Le flux était ascendant à partir de 100 cm en moyenne sur cette période et le cumul des deux dernières couches est pratiquement constant. Par contre, après le 12/10, le lessivage est nettement visible (Figure 53 f).

L'évolution du stock sur le site *Sec* est plus difficile à analyser en raison de nombre réduit de mesure. En avril, l'important reliquat d'azote de la campagne précédente a diminué de moitié et la plus grande partie est concentrée entre 30 et 90 cm, suite au lessivage par les pluies hivernales. Les pluies avant semis ont probablement contribué, comme sur les autres sites, au transfert d'une partie de l'azote vers les couches plus profondes. Cependant les flux ascendants qui apparaissent très tôt sur ce site, conduisent à émettre l'hypothèse que les pertes par lessivage depuis avril jusqu'à la récolte sont probablement très faibles. Par contre, ensuite le lessivage jusqu'en novembre uniformise le profil de ce site avec ceux de *ETM* et *ON*.

Figure 53 Evolution du stock d'azote minéral par couche sur les sites ETM, Sec et ON



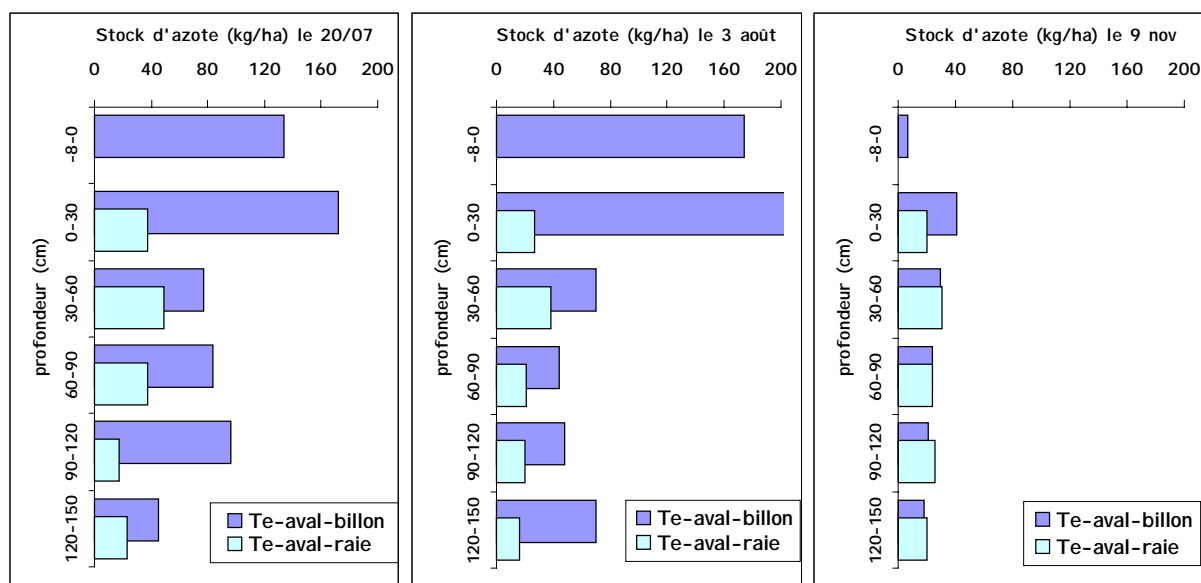
2.5.2.3.2 Hétérogénéité des stocks entre le billon et la raie

Pour tenir compte de l'hétérogénéité de teneur en azote du sol entre le billon et la raie, selon Benjamin et al. (1998), il paraît nécessaire, lors des analyses d'azote dans le sol, de mélanger plusieurs échantillons prélevés perpendiculairement à la raie pour chaque couche de sol. L'originalité de notre étude porte sur l'analyse de l'hétérogénéité du stock d'azote entre la raie et le billon, et nos échantillons proviennent d'une part du fond de la raie, et d'autre part du billon.

Pour l'analyse de l'évolution du stock d'azote sur le billon et dans la raie, nous avons calculé les stocks séparément pour ces deux compartiments pour pouvoir apprécier la différence. L'unité utilisée, kg N/ha est discutable, mais nous semble cependant plus démonstrative que les valeurs en concentration et permet de tenir compte de l'épaisseur de la couche considérée. La référence étant la surface du sol avant la réalisation des raies, une couche supplémentaire de 8 cm est prise en compte pour le billon (cf. 2.4.3.1.1), et pour la raie la première couche comporte seulement 22 cm, bien qu'elle soit représentée avec la couche 0-30 du billon.

Les deux apports sous forme solide ont eu lieu avant la réalisation des raies (le 25 mai et le 01 juillet). Les analyses d'azote du sol réalisées le 20 juillet sur les sites *Te* (Figure 54) montrent que le stock d'azote minéral est plus important sous le billon que sous la raie et notamment dans les premières couches de sol. La technique culturale qui consiste à effectuer le deuxième apport d'azote peu avant la réalisation des raies induit donc une forte hétérogénéité de la répartition de l'azote dans les premières couches du sol perpendiculairement à l'axe de la raie. En effet, lors de la réalisation des raies, une couche de sol de 8 cm environ, qui contient la majeure partie de l'engrais, est enlevée pour creuser la raie et placée contre les pieds de maïs pour constituer le billon; de ce fait l'azote est accumulé sur le billon.

Figure 54 Evolution du stock d'azote minéral sur le site *Te-aval*

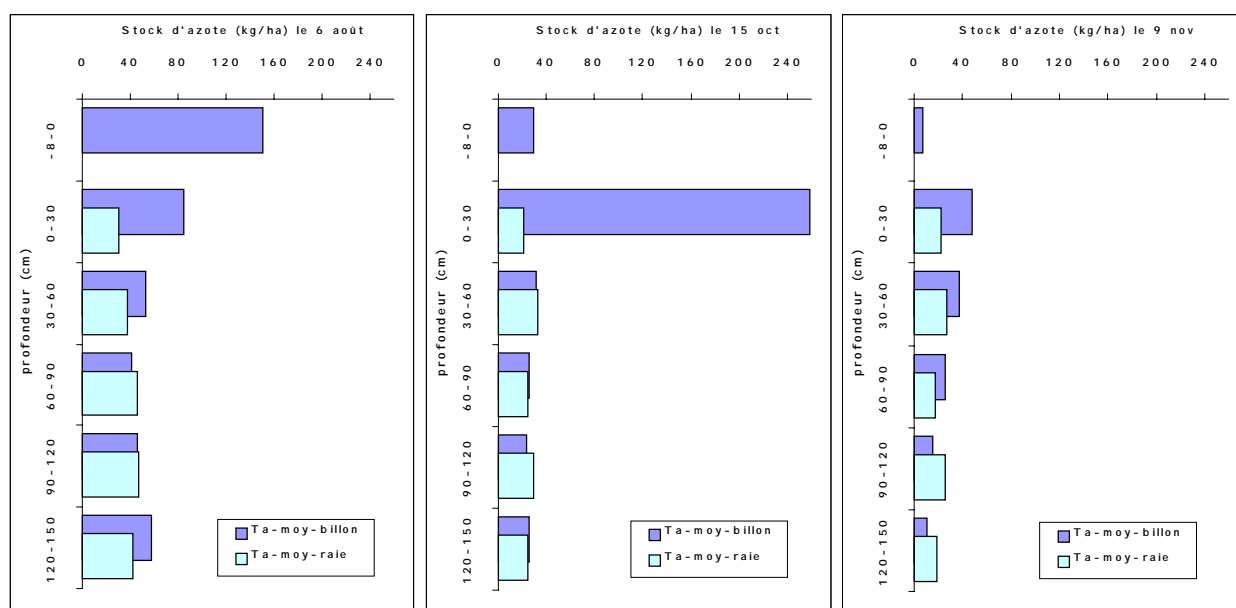


Cet effet perdure au cours de la saison de culture, comme l'illustrent la *Figure 54* et la *Figure 55*, et se maintient jusqu'à la récolte. Les apports initiaux d'azote se faisant avant réalisation des raies, et l'irrigation fertilisante (qui a été réalisé seulement sur *Te* le 23/07) avec un apport d'azote au niveau de la raie, il convient de se demander si les apports d'azote et les transferts qui en résultent ne sont pas influencés par la géométrie particulière induite par la raie.

Les analyses de sol réalisées le 20 juillet et le 03 août sur le site *Te-aval* (*Figure 54*) permettent d'observer l'évolution du stock d'azote minéral sous le billon et sous la raie: sous le billon, le stock d'azote minéral a augmenté de 106 kg/ha alors que sous la raie, il diminue de 9 kg/ha. Entre ces deux dates, il y a eu un apport de fertilisants sous forme d'ammoniaque anhydre dissous dans l'eau d'irrigation. Cet apport au niveau du site *Te-aval* est estimé à 50 kg N/ha¹⁹.

L'augmentation du stock d'azote apparaît seulement sur les deux premières couches du billon alors qu'on pourrait s'attendre à observer un accroissement du stock d'azote sous la raie. Ce phénomène ne peut être expliqué qu'en envisageant des transferts latéraux importants dont l'étude n'entre pas dans le cadre de ce travail. Par ailleurs, cette hypothèse a été confirmée en utilisant une modélisation bi-dimensionnelle des transferts d'eau et de soluté (Mailhol et al., 2000) avec le modèle Hydrus-2D (Simunek et al., 1996).

Figure 55 Evolution du stock d'azote minéral sur le site *Ta-moyen*



Il apparaît que les transferts vers le billon entraînent dans tous les cas une augmentation de la concentration en azote dans les premières couches, et ce phénomène est évidemment accru dans la partie aval des raies du fait de l'endiguement (raies bouchées). Dans les couches inférieures, l'influence de la gravité devient plus importante que la capillarité et les transferts vers le bas prédominent.

¹⁹ Cette estimation résulte de la pesée de l'ammoniac anhydre apporté et de la mesure de la concentration de fertilisant dans l'eau d'irrigation à la sortie de la rampe à vannette et sur le site.

Le site *Ta-moyen* est le seul où nous disposons des valeurs de stock à la récolte et en début de novembre. Il confirme que pendant la campagne d'irrigation, l'azote reste stocké dans les deux premières couches du billon (jusqu'à 30 cm). Ce stockage d'azote dans la partie supérieure de billon réduit donc considérablement le risque de lessivage d'azote pendant le cycle cultural, même si des fortes doses d'irrigation sont appliquées, comme sur le traitement *Te* (Figure 54). Par contre, ce stock non consommé par la culture peut être perdu après les fortes pluies, comme le montre la Figure 55. En effet, début de novembre le stock d'azote a diminué sur toutes les profondeurs, et sur tous les sites (Annexe 1.9). A cette date là, il n'y a plus de différence notable ni entre le billon et le fond de la raie, ni entre les sites des différents traitements. En conséquence, du fait des apports excédentaires sur le site *Te*, les pertes d'azote seront supérieures à celle sur *Ta*. Les quantités perdues par lessivage seront calculées dans le sous-chapitre suivant.

2.5.2.4 Concentration en azote de la solution des bougies poreuses

La Figure 56 montre l'évolution de la concentration en azote total de la solution recueillie dans les bougies poreuses à 140 cm sous le billon. On remarque que les valeurs sont assez faibles et pratiquement constantes jusqu'au 20 septembre. Le site *Te-aval* présente une teneur en azote supérieure aux autres sites (tout comme pour la couche de sol 120-150 cm lors des prélèvements de juillet et août) et voit sa valeur croître dès la mi-septembre. Les évolutions sont à rapprocher du drainage (2.4.3.2.1).

Pour *Ta-moyen* le drainage reste très faible, tandis que pour *Ta-aval* il ne commence qu'à la mi-septembre, à la différence de *Te* et surtout de *Te-aval*, où le drainage est déjà établi pendant l'été. Cependant l'absence de mesures durant presque un mois avec 143 mm de précipitations, qui rendaient la

Figure 56 Evolution de la concentration en azote totale dans la solution des bougies poreuses

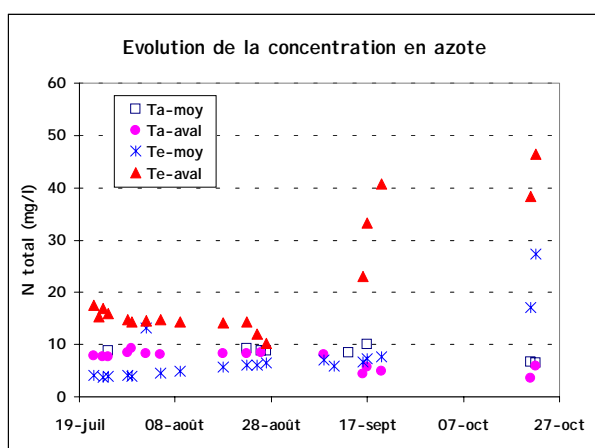
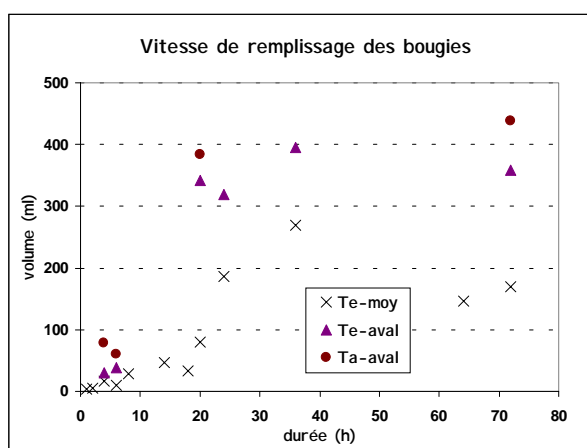


Figure 57 Vitesse de remplissage des bougies poreuses pendant le mois d'octobre



parcelle difficilement praticable, ne permet pas de connaître l'accroissement probable de la teneur en azote pendant cette période.

Avant les pluies d'automne, les observations recueillies sont très proches sur les deux sites de *Ta* (Tableau 47) ainsi que pour *Te-moyen*. Les valeurs sont supérieures sur *Te-aval*, qui est aussi le site

Tableau 47 Teneur en azote total de la solution des bougies poreuses du 22 juillet au 20 septembre

	Ta-moy	Ta-aval	Te-moy	Te-aval*
Moyenne (ppm)	8.2	7.5	6.0	14.6
ET (ppm)	1.4	1.4	2.3	1.9
CV %	17	19	38	13
Nb observations	9	14	17	13

pour lequel la concentration mesurée lors des prélèvements de sol sur la couche 120-150 cm est la plus élevée, mais dans tous les cas ces valeurs fluctuent peu.

La plupart des mesures étant faites par mise en dépression des bougies poreuses pendant 24 à 48

heures, afin de caractériser la vitesse de remplissage des bougies, les volumes recueillis ont été mesurés pour différents pas de temps en septembre. Le volume maximum est atteint entre 24 et 30 heures environ (Figure 57), la méthode mise en œuvre est donc adéquate pour ce type de sol et même si la récupération de la solution se fait plus tard, l'échantillon sera représentatif de cette période après la mise en dépression.

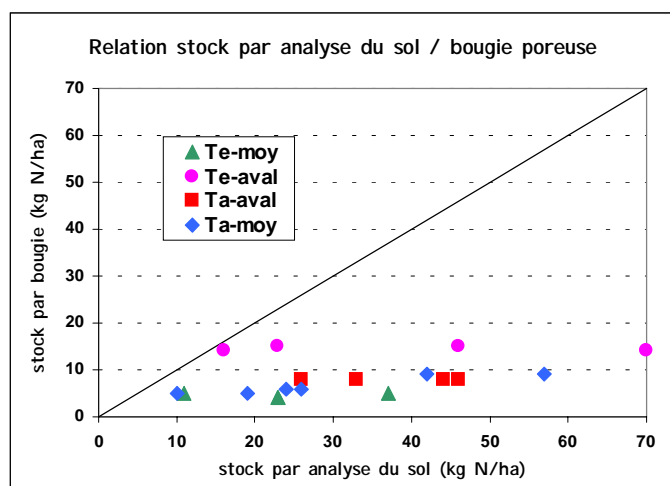
2.5.2.5 Comparaison des stocks d'azote obtenus par différentes méthodes

Avant d'estimer le lessivage à l'aide de l'équation simplifiée du transfert d'azote (Équation 22), utilisant la concentration en azote mesurée en bougie poreuse et le flux Darcien, nous avons comparé le stock total d'azote du sol estimé à partir de prélèvements de sol et de stock d'azote calculé à partir de la solution prélevée dans les bougies poreuses, que nous considérerons proche de celui de la solution du sol, bien que cette affirmation soit critiquée. Les calculs ont été réalisés pour la couche 120-150 cm, et les stocks sont donnés en kg N/ha, selon les relations rappelées au Chapitre 1 (Équation 23 et Équation 24), utilisées par Kengni (1993) et Normand (1997). La comparaison n'est possible qu'en calculant le stock par unité de surface. En effet, la teneur du sol est exprimée en *ppm* par rapport au sol sec, alors que celle du prélèvement est donnée en *ppm* par rapport à la solution prélevée.

Les bougies poreuses ont été utilisées sur les sites *Ta-moyen*, *Ta-aval*, *Te-moyen* et *Te-aval* à la seule profondeur de 140 cm. Le suivi de la concentration en azote a débuté le jour de la deuxième irrigation et s'est terminé en fin d'octobre. La fréquence des prélèvements a été accrue après une irrigation ou une pluie, et diminuée lors des périodes sans apport. Les dates de prélèvements du sol ne correspondent pas toujours aux dates de prélèvement par les bougies, ainsi nous ne disposons que d'un nombre limité de couple de valeurs.

On observe (Figure 58) qu'il n'y a pas de relation simple entre les deux séries de valeurs. En effet, les stocks fournis par les bougies poreuses sont systématiquement inférieurs à ceux de l'autre méthode. Ces mesures correspondent à des périodes en juillet et août où le lessivage est modéré à faible et on peut alors émettre l'hypothèse que seule une fraction de l'azote est présente dans la solution du sol qui est affectée par le drainage.

Figure 58 Comparaison des stocks d'azote obtenus par analyse du sol et par les bougies poreuses



Cette observation est en accord avec la notion de l'eau « mobile » et « immobile » (Clothier et al., 1992; Quisenberry et al., 1993; Jaynes, 1995), qui admet que l'eau se répartit en plusieurs compartiments dans le sol. Le choix de retenir une dépression pour les bougies poreuses voisine de la charge à la cote considérée a, semble-t-il, bien conduit à accéder seulement à l'eau mobile. Plusieurs auteurs ont aussi mise en évidence des écarts entre les stocks d'azote du sol évaluées à partir des mesures de bougies

poreuses et ceux obtenus par prélèvement du sol (Addiscott, 1990; Djurhuus et Jacobsen, 1995), par contre les conditions d'utilisation des bougies ne sont pas toujours précisées. La validité du stock d'azote estimé par la méthode des bougies poreuse est mise en doute aussi par d'autres auteurs, comme Cosserat (1991), Porter (1995) et Duwig (1998).

Par contre, sur les sites *Te-moyen* et *Te-aval*, en début de novembre, après les fortes pluies, les stocks calculés à partir de l'analyse de la solution du sol sont significativement supérieurs à ceux estimés par les prélèvements du sol (respectivement 12 pour 38 et 20 pour 52 kg N/ha). Ces valeurs ne sont pas portés sur la *Figure 58*. Ces écarts peuvent alors provenir du fait que le prélèvement à la bougie précède de quelques jours le prélèvement de sol et qu'on est en période de fort drainage.

2.5.2.6 Calcul du lessivage à l'aide des bougies poreuses placées sous le billon

Pour manque de mesure de concentration en azote de la solution du sol en début de la campagne, le calcul du lessivage a pu être effectué pour deux périodes seulement: du 21 juillet au 3 août et du 3 août au 5 octobre. Les dates limites correspondent aux prélèvements pour l'analyse du sol, afin de pouvoir comparer les résultats. La valeur du drainage utilisée dans notre calcul est obtenu en moyennant les drainages calculés par les différentes méthodes (cf. 2.4.3.2.1).

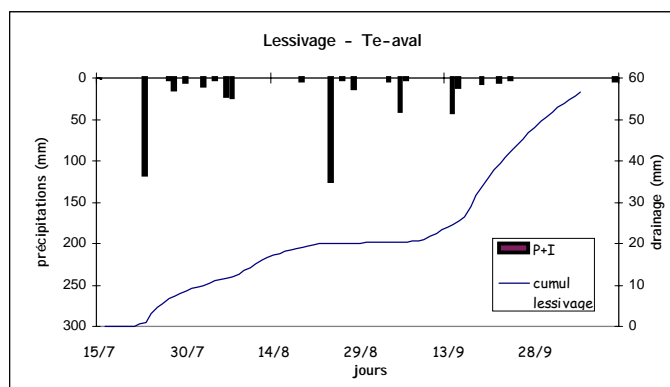
Du fait des faibles concentrations en azote pendant les deux périodes analysées, seul le site *Te-aval* montre du lessivage (*Tableau 48*), comme le laissaient prévoir les remarques faites ci-dessus. Pour ce

Tableau 48 Lessivage estimé sur les sites *Ta* et *Te* (kg N/ha)

Période	Ta-moyen	Ta-aval	Te-moyen	Te-aval
21/7-3/8	0	0	0	10
3/8-5/10	-3	4	4	48

calcul la concentration en azote a été interpolée, ce qui conduit probablement à sous-évaluer le lessivage entre le 20/09 et le 22/10.

Figure 59 Lessivage estimé sur le site Te-aval



Pour *Te-aval* le lessivage le plus important est observé pendant le mois de septembre, après les fortes pluies (Figure 59), et sur ce site les apports ont été complétés par du ruissellement.

D'autre part il convient de rappeler que les mesures de bougies poreuses sont effectuées sous le billon. Bien qu'elles soient effectuées à une profondeur importante (140 cm), il est nécessaire de

contrôler les concentrations de la solution du sol sous la raie et de disposer de plusieurs mesures pour un site donné.

2.5.2.7 Bilan d'azote sur les sites de référence en aspersion et estimation de la minéralisation

2.5.2.7.1 Bilan d'azote jusqu'en août et estimation de la minéralisation

Les données disponibles sur les traitements *ON* et *ETM* permettent d'établir un bilan d'azote. Ils ont en effet été conduits en début de cycle avec des apports d'eau similaires et avec un drainage nul ou limité lors de certaines périodes (cf. 2.4.2.3.2). Ils seront confrontés au cas du traitement en sec, pour lequel les conditions de minéralisation peuvent avoir été différentes.

Pour les deux premiers traitements, un prélèvement de sol a été effectué la veille du semis, le 25/05 et un autre le 11/08 parallèlement à une détermination de la teneur en azote de la culture. En considérant le drainage et donc le lessivage comme négligeables, il est donc possible de déterminer la quantité d'azote fournie par le sol par minéralisation. Avec une efficacité des apports par les engrais de 1.0, la minéralisation apparaît pratiquement identique (Tableau 49).

Tableau 49 Composantes du bilan azoté sur les sites en aspersion pendant le début du cycle

site	période	durée (j)	stock initial	stock final	apports	plante	lessivage	majorants de la minéralisation
ON	25/05 au 11/08	78	130	127	0	78	0*	75*
ETM	25/05 au 11/08	78	147	168	150	208	0*	79*
ETM	07/04 au 25/05	48	123	147	0	0	0*/24*	24***/48**
sec	28/04 au 11/08	105	192	244	88	134	0*/24****	98*/122*

* valeur calculée par différence

** majorant calculé en considérant la vitesse de minéralisation constante

*** hypothèse d'un effet de la température en avril et mai avec diminution de moitié de la minéralisation

**** hypothèse d'un lessivage identique à ETM en début de cycle

Cette minéralisation correspond à 1 kg N/ha/j pour la période considérée. Cette valeur est cohérente avec celle fournie par la littérature. Citons en particulier Recous et al. (1999) qui indiquent une minéralisation brute de 0.8 mg N/kg de sol/jour dans un sol limoneux; cela correspond dans une couche labourée de 0.2 m, à 2.4 kg N/ha/j de minéralisation brute soit 1.6 kg N/ha/j de minéralisation nette environ.

Kengni et al. (1994) note sous maïs, à la Côte Saint André, une minéralisation de 150 Kg/ha/an pour une parcelle présentant un taux de matière organique (MO) de 2.5 %, la majeure partie de cet azote étant libérée pendant la période estivale. Le taux de la MO étant proche de 1.5 % à Lavalette, avec des conditions pédoclimatiques plus favorables à la minéralisation, le résultat obtenu est donc réaliste.

On rappelle que la minéralisation estimée lors de la campagne de 1998 sur un traitement *ON* en asper-sion était de 0.74 Kg/ha/j. Les températures du sol étaient un peu inférieures en début de cycles en 1998 par rapport à celles de 1999.

Il est nécessaire d'étendre la période d'estimation de la minéralisation pour effectuer les bilans sur les autres traitements. Pour cela, on pourrait envisager d'utiliser un prélèvement effectué antérieurement sur *ETM*. Malheureusement la hauteur des précipitations étant élevée entre le 07/04 au 25/05 (avec en particulier de 90 mm au cours de la première décade de mai), un drainage avant le semis, avec une perte possible d'azote par lessivage, ne peuvent être exclus. Aussi pour tenir compte des conditions climatiques différentes, il est proposé d'étudier le cas de deux valeurs de minéralisation pour cette période: l'une avec une vitesse de minéralisation égale à celle établie précédemment et une seconde avec une vitesse diminuée de moitié (à cause des températures plus basse en avril). Ces deux hypothèses conduisent à un lessivage pour l'*ETM*, compris entre 0 et 24 kg/ha pour cette période.

Pour le traitement en sec, les conditions de température et d'humidité étant très différentes des autres sites, il n'est pas possible de considérer à priori que la minéralisation est identique à celle de l'*ETM*. Par contre en début de cycle, le lessivage d'azote sur le traitement *Sec* a probablement été du même ordre que sur *ETM*, qui nous conduit (*Tableau 49*) à estimer, à partir du bilan d'azote, la minéralisation sur ce traitement selon les deux hypothèses déjà proposées ci-dessus. La valeur obtenue est voisine de 100 kg/ha, elle serait donc identique à celle des autres traitements, si on considère un lessivage nul. Par contre la seconde hypothèse semble à rejeter, étant donné qu'elle conduit à une minéralisation supérieure à celle de l'*ETM*, situation assez improbable.

2.5.2.7.2 Bilan d'azote sur l'ensemble du cycle

Le bilan sur l'ensemble du cycle n'a pu être établi à la récolte que sur le site *ON*; les prélèvements sur les autres sites de référence ont été interrompus par la pluie. Cependant il apparaît que les pluies importantes intervenues en septembre ont entraîné du drainage, et donc du lessivage de l'azote, avant la récolte. En l'absence d'autres mesures, il a été retenu de considérer comme constante la vitesse de

minéralisation, compte tenu des conditions climatiques pendant la campagne. On peut donc en déduire, de la même manière que précédemment, un majorant des pertes d'azote (Tableau 50).

Tableau 50 Composantes du bilan azoté sur les sites en aspersion pendant l'ensemble du cycle

Site	Période	durée (j)	stock initial	stock final	apports	Plante	lessivage	Majorants de la minéralisation
ON	25/05 au 12/10	140	130	127	0	79	65	140*
ON	12/10 au 9/11	27	127	87	0	0	53/67	13**/27*
ETM	25/05 au 9/11	167	147	122	150	262	44**/81*	153**/168*
ETM	7/04 au 9/11	216	123	122	150	262	62**/125*	173**/216*
Sec	28/04 au 9/11	195	192	124	88	177	160**/185*	177**/216*

* en considérant la vitesse de minéralisation constante sur toute la période

** hypothèse d'une diminution de moitié de la vitesse de minéralisation pendant le dernier mois

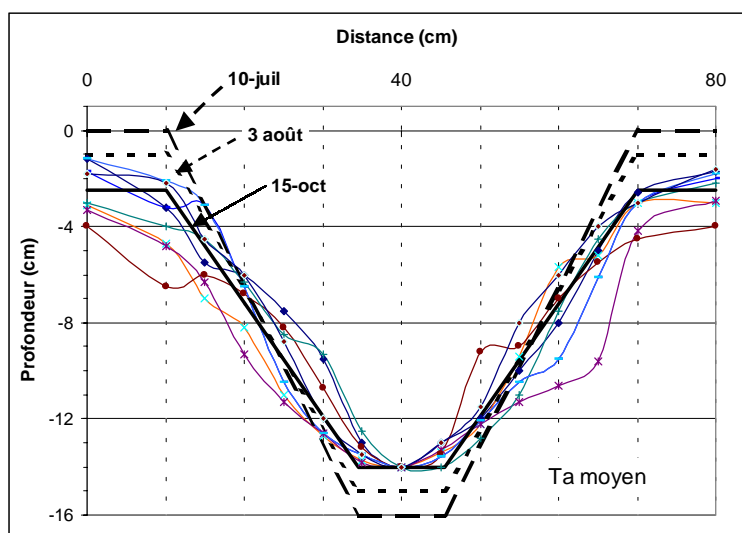
Pour le traitement *ON*, aux 65 kg/ha de lessivage jusqu'au 12 octobre, il faut ajouter une nouvelle perte d'azote de 53 à 67 kg/ha pour le mois suivant, si l'on adopte les deux hypothèses déjà exposées ci-dessus pour la minéralisation jusqu'au 9/11. On peut noter que ces pertes peuvent inclure à la fois du drainage et de la dénitrification compte tenu de la période d'engorgement de fin de cycle.

Pour le traitement *ETM*, avec les mêmes hypothèses, les pertes sont un peu inférieures du fait évidemment d'une meilleure utilisation de l'azote par la culture.

Pour le traitement en *Sec*, les estimations sont délicates pour la fin du cycle. Si l'on considère les mêmes hypothèses que pour le traitement *ETM*, les pertes d'azote sont plus fortes que pour les autres sites bien que la fertilisation ait été volontairement diminuée pour tenir compte du stock initial d'azote ; le stock d'azote est ramené en fin de cycle au même niveau que les autres traitements. Donc il y a bien eu une forte perte d'azote en fin de cycle.

2.5.2.8 Estimation des bilans d'azote sur les sites en irrigation gravitaire

Figure 60 Profil de la raie Ta-moy



Les mesures faites à la fois sur le billon et dans la raie ont fait apparaître une forte hétérogénéité de la répartition de l'azote perpendiculairement aux raies (cf. 2.5.2.3.2). Aussi aux différentes dates un stock pondéré a été calculé en tenant compte de la section correspondant à l'ensemble raie-billon. La valeur mesurée sur le billon a été pondérée par la surface occupée par le billon par rapport à la

surface totale, pour ce qui est des deux premières couches prélevées (-8-0 et 0-30 cm), en utilisant une section type des raies issue des relevés de terrain (Figure 60), effectués à la réalisation des raies et à la récolte. Pour les autres profondeurs, en l'absence d'information sur la représentativité des mesures sur le billon et dans la raie, une moyenne des deux mesures a été utilisée.

Il faut remarquer que le stock pondéré est assez peu affecté par évolution du billon, puisque son affaissement progressif (qui réduit le dénivelé billon-raie de 4 cm à la récolte), n'entraîne qu'une surévaluation du stock de 3 à 15 kg/ha en août et de 2 à 5 kg/ha à la récolte. Ce stock mesuré pondéré (MP) est comparé au terme [Stock final + pertes] (C) calculé à partir du bilan d'azote (Tableau 51). L'Équation 19 s'écrit:

$$C = S_{\text{final}} + \text{pertes} = S_{\text{initial}} + (P+I) + E + (MH+MR-O) \quad \text{Équation 29}$$

En ce qui concerne la minéralisation nette ($MH+MR-O$), la valeur établie sur les traitements de référence a été retenue (1 kg/ha/j), avec les mêmes hypothèses en début et fin de cycle concernant le ralentissement possible de la transformation de la matière organique. L'apport par la pluie et l'irrigation est faible (respectivement 8 kg/ha et 3 kg/ha en moyenne).

Tableau 51 Evaluation des termes du bilan d'azote pour différentes périodes sur les sites en irrigation à la raie

Période du semis (ou 30/04) au 3 août									
site	Période	durée (j)	stock initial	apports	plante	minéralisation	C: stock final calculé + lessivage	MP: stock final mesuré pondéré	MP-C
Ta-moyen	30/04-3/08	95	124	185	161	82**/95*	230/243	313	83/70
Ta-amont	30/04-3/08	95	150	198	171	82**/95*	259/272	342	83/70
Ta-aval	30/04-3/08	95	124	170	158	82**/95*	218/230	387	169/157
Te-moyen	15/05-3/08	80	136	218	113	75**/80*	316/321	(=)	(=)
Te-amont	15/05-3/08	80	130	212	121	75**/80*	296/301	342	46/41
Te-aval	15/05-3/08	80	149	205	122	75**/80*	307/312	386	79/+74

Période du semis (ou 30/04) au 9 novembre									
site	Période	durée (j)	stock initial	apports	plante	minéralisation	C: stock final calculé + lessivage	MP: stock final mesuré pondéré	MP-C
Ta-moyen	30/04-9/11	193	124	185	236	171**/198*	244/271	129	-115/-142
Ta-amont	30/04-9/11	193	150	198	249	171**/198*	270/292	132	-115/-142
Ta-aval	30/04-9/11	193	124	170	212	171**/198*	253/280	170	-83/-110
Te-moyen	15/05-9/11	177	136	218	206	159**/177*	307/325	(=)	(=)
Te-amont	15/05-9/11	177	130	212	210	159**/177*	291/309	129	-162/-180
Te-aval	15/05-9/11	177	149	205	190	159**/177*	323/341	132	-191/-209

* et ** mêmes hypothèses de minéralisation que sur les sites en asperion
(=) données manquantes

Sur le site *Ta-moyen* les estimations du drainage et les suivis de bougies poreuses permettent de considérer que les pertes d'azote jusqu'à la récolte sont faibles, en supposant qu'au cours de mois de mai et juin, ces pertes sont aussi restées négligeables, (ce qui ne semble pas un hypothèse forte, car les stocks initiaux sont faibles).

Sur ce site, le bilan entre le 30/04 et le 3/08 fait apparaître une différence (*MP-C*) de 70 à 83 kg/ha (*Tableau 51*). Cet écart étant supérieur aux erreurs de mesure et d'estimation, il impliquerait une augmentation du stock d'azote qui n'est pas explicable. Le terme (*MP-C*) est aussi positif sur le site *Ta-amont* ainsi que *Te-moyen* et *Te-amont*. Par contre sur les sites ayant reçu des apports plus importants, (*MP-C*) est négatif. Pour la date du 3 août la pondération adoptée doit donc être rejetée. Cependant il paraît difficile de proposer une pondération différente: les tentatives effectuées n'ont pas abouti car la distribution latérale de l'azote évolue au cours du cycle, à partir de répartitions très dissemblables à la réalisation des raies.

Le même calcul entre le début du cycle et le 9 novembre a donné des valeurs négatives pour (*MP-C*) sur tous les sites, ce qui apparaît dans ce cas conforme aux résultats attendus, puisque les pluies ont provoqué du drainage sur tous les sites. La comparaison des profils sous la raie et sous le billon, illustrée pour *Te-aval* (*Figure 54*) et *Ta-moyen* (*Figure 55*), fait apparaître un rapprochement très net des stocks, et les stocks pondérés par la surface occupée par le billon sont alors voisins sur les trois sites: *Ta-moyen*, *Te-amont* et *Te-aval* (*Tableau 52*)²⁰.

Tableau 52 Comparaison des stocks d'azote minéral du sol de la surface à 150 cm le 9/11/1999 sous le billon (stock pondérée) et sous la raie (en kg N/ha)

	Ta-amont	Ta-moyen	Ta-aval	Te-amont	Te-moyen	Te-aval
billon*	100	116	129	108	(=)	120
raie	146	111	183	122	(=)	116

* stock pondéré par la surface occupée par le billon pour la première couche

* (=) données manquantes

Sur ces trois sites (*MP-C*) peut donc être assimilé aux pertes d'azote, ces valeurs restant toutefois des estimations avec une précision limitée, par les approximations faites pour le terme minéralisation dans le billon. Les pertes atteignent donc entre 115 et 140 kg/ha sur *Ta-moyen* pour des valeurs pouvant dépasser 200 kg/ha sur *Te-aval*. Elles sont dans ce cas d'un montant équivalent aux apports, ce qui ne signifie pas que la fertilisation était inutile, comme le démontre le traitement *0N*.

Sur les autres sites, il paraît justifié de considérer (*MP-C*) comme un simple ordre de grandeur de ces pertes compte tenu des écarts de 50 à 60 kg/ha entre les stocks calculés sous la raie et sous le billon. Ces pertes ne peuvent pas être confrontées aux valeurs calculées à partir des prélèvements par les bougies poreuses en l'absence de valeurs disponibles pendant les périodes de fort drainage; remarquons seulement que *Te-aval* apparaît dans tous les cas comme le site avec les pertes les plus élevées.

²⁰ L'écart observé sur *Ta-amont* pourrait s'expliquer par un drainage moins important, du fait du ruissellement, par contre, la même hypothèse ne peut pas être invoquée pour *Ta-aval*.

2.5.3 Conclusions partielles sur les bilans d'azote

Alors qu'il est possible d'effectuer des bilans d'azote à partir de prélèvements de sol à différentes dates sous irrigation en aspersion et disposer d'une estimation des pertes éventuelles (par lessivage et dénitrification), l'hétérogénéité de la répartition de l'azote entre raie et billon et son évolution au cours du temps, rendent cette opération impossible sous irrigation gravitaire en cours de cycle dans le cas étudié. Il serait nécessaire d'évaluer le stock sur une section de raie représentative, et il paraît difficile d'y accéder expérimentalement à partir de sondages à la tarière.

Si le mélange d'échantillons de plantes et l'utilisation de plusieurs placettes permet d'améliorer la représentativité de l'échantillon « composite » obtenu pour accéder à une teneur moyenne d'azote par exemple, il n'est pas de même pour le sol en irrigation gravitaire où il convient de distinguer raie et billon. Le caractère bidimensionnel des transferts perpendiculairement à la raie a été mis en évidence, et il importe de distinguer en particulier les premières couches du billon, où peut être accumulé de l'azote provenant de l'horizon de surface et de l'épandage d'engrais lors de la réalisation des raies.

Le bilan ne peut être établi à partir de sondages à la tarière pour évaluer le stock du sol, qu'entre deux dates de prélèvement où les profils peuvent être considérés comme homogènes, donc après un fort prélèvement par une culture ou un lessivage.

L'utilisation de bougies poreuses pour effectuer une estimation du lessivage à 140 cm n'a pas non plus permis d'accéder de manière indiscutable au lessivage. Bien qu'il ait été établi que le fonctionnement hydrique rende possible une estimation du drainage, le calcul des quantités d'azote perdu par convection (en utilisant des bougies poreuses) est faible et ne paraît pas cohérent avec l'évolution des profils d'azote. Même si on admet les critiques faites aux bougies poreuses qui peuvent introduire un biais dans l'accès à la concentration en azote de la solution du sol²¹, et du fait que certaines périodes ont été insuffisamment échantillonnées, on ne peut exclure l'hypothèse d'une hétérogénéité des concentrations en azote de la solution du sol sous la raie et sous le billon. Ce point devrait être élucidé dans les expérimentations futures.

Dans le cas d'apports d'engrais par irrigation fertilisante, quelques mesures tendent à montrer la bonne répartition de la dose le long de la raie, par contre, là encore les transferts par capillarité tendent à favoriser l'accumulation d'azote sur le billon.

En irrigation par aspersion le lessivage est plus ou moins homogène sur la parcelle, par contre, le ruissellement en irrigation à la raie peut réduire la lame infiltrée sur toute la raie en raies ouvertes et seulement en amont en raies bouchées, mais l'accroître fortement au niveau de l'endiguement. Ce phénomène limite le lessivage lors des orages en raies ouvertes, mais l'accroît fortement à l'aval en raies

²¹ En effet l'hypothèse d'homogénéité de répartition de l'azote dans la phase aqueuse n'est pas satisfaite (Kugler, 1988) et les mesures sont soumises à la variabilité des propriétés physiques du sol (Addiscott, 1990), ce qui met en défaut la représentativité du prélèvement par bougie poreuse.

bouchées. De plus, les précipitations ont un rôle important dans les transferts d'azote: le stock d'azote de la partie supérieure du billon peut être entraînée vers la couche sous-jacente du billon.

Une analyse des transferts d'eau et de soluté, réalisée au niveau de la station expérimentale à l'aide du logiciel Hydrus 2D, montre des transports entre la raie et le billon, qui ont tendance à réduire fortement le lessivage des nitrates (Mailhol et al., 2000), et fait apparaître des tendances en conformité avec les observations.

CHAPITRE 3 MODELISATION

L'utilisation de modèles peut être un substitut à l'expérimentation souvent lourde et onéreuse: la simulation donne une réponse à un problème posé dans un contexte précis. L'expérimentation est nécessaire au calage et à la validation du modèle, qui permet ensuite de tester différents scénarios tels que ceux relatifs à la variabilité climatique. La modélisation sur laquelle repose le présent travail a pour objectif de proposer des scénarios améliorant les pratiques de fertilisation, l'amélioration portant sur les rendements et sur la réduction des impacts environnementaux.

Dans ce chapitre on présentera d'abord un bref aperçu des modèles liés au lessivage des nitrates et les étapes de la modélisation. On parlera aussi de la spécificité de la modélisation de l'irrigation à la raie et on présentera le modèle Raieopt, ici adopté pour estimer la dose apportée en un point donné d'une raie. Ensuite nous nous intéresserons aux modèles qui simulent le transfert d'azote, et plus particulièrement au modèle de culture STICS, retenu ici pour simuler le rendement, les transferts d'eau et d'azote. Dans la partie suivante, nous analyserons les résultats issues de la simulation par Raieopt. Ensuite on présentera les différentes phases de la modélisation réalisées avec le modèle STICS: la construction des fichiers d'entrée du modèle, le calage et l'évaluation du modèle proprement dite.

3.1 GENERALITES SUR LA MODELISATION

Tous les tentatives de l'homme pour comprendre et gérer l'environnement impliquent l'utilisation de modèles. Mais, qu'est ce qu'un modèle? A cette question les scientifiques répondent d'une manière très générale: "une représentation simplifiée d'un processus ou d'un système".

3.1.1 Pourquoi le recours à la modélisation ?

La nécessité de procéder à une analyse spatio-temporelle d'un phénomène fait appel soit à l'expérimentation, soit à la simulation des phénomènes : processus physiques, chimiques ou biologiques (Addiscott, 1996). Les modèles constituent un outil efficace pour améliorer notre compréhension des processus environnementaux. Ils permettent aussi d'obtenir rapidement et à un moindre coût des informations sur la réalité (Tim, 1996). Un modèle est une interprétation très simplifiée de la réalité, et de ce fait, son utilisation doit savoir tenir compte des limitations intrinsèques à toute représentation. Modéliser, c'est aussi discuter les hypothèses simplificatrices nécessairement admises lors de l'élaboration du modèle (Renault, 1991).

Les impacts résultant d'un processus peuvent être obtenus directement par des expériences au champ; celles-ci ne peuvent cependant couvrir qu'un nombre limité de conditions. Le recours à un modèle prédictif simulant les cycles des éléments eau-carbone-azote au sein du système sol-plante est indis-

pensable pour aborder les aléas dus à la variabilité interannuelle du climat (Follet, 1995), ou pour tester différents types de conduite culturale (Dou et Fox, 1995).

Les questions concernant les pratiques agricoles (irrigation et fertilisation, notamment) sont de trois ordres: ❶ stratégique (avant la campagne), où un programme d'action est établi pour conduire la culture en maîtrisant au mieux les risques, ❷ tactique (pendant la campagne), quand les décisions sont prises en fonction de ce qui s'est passé et de ce qui risque d'arriver (quand démarrer et arrêter une irrigation, comment prendre en compte les pluies, modifier les apports en fonction des stress hydriques et azotés) et ❸ diagnostic (après ou pendant la campagne), où on cherche à comprendre ce que s'est passé (comment expliquer le rendement obtenu?, par exemple). Répondre à ces questions nécessite des observations et un simulateur capable d'estimer le rendement de la culture et l'impact environnemental résultant des pratiques agricoles appliquées (calendrier d'irrigation et de fertilisation et itinéraire technique).

3.1.2 Etapes principales de la modélisation

Le calage et la validation sont des étapes indispensables de la modélisation, demandant des jeux d'observations suffisants, une bonne connaissance des processus (physiques, chimiques ou biologiques) simulés, et aussi une bonne maîtrise du fonctionnement de l'outil de simulation et des techniques d'analyse des données.

3.1.2.1 Calage du modèle

Avant de réaliser des simulations de scénarios il est nécessaire de procéder au calage des paramètres du modèle que l'on a retenu. Cette étape de calage peut se dérouler sur un ou plusieurs cycles et requiert que des séries de données expérimentales soient disponibles.

Le calage est une opération essentielle permettant de déterminer un certain nombre de paramètres du modèle afin de pouvoir l'utiliser pour une étude de cas. Selon Desbordes (1984), le calage d'un modèle résulte d'un compromis entre: ❶ un domaine expérimental de tests plus ou moins cohérent, ❷ des incertitudes et des erreurs de mesures des variables du modèle, ❸ des critères de test objectifs pour certains mais plus ou moins subjectifs pour d'autres, ❹ des techniques d'optimisation plus ou moins adéquates, ❺ des erreurs numériques propres à la mise en œuvre du modèle et ❻ l'adéquation du modèle aux phénomènes qu'il est censé représenter. Cette présentation du calage en forme de boutade met l'accent sur la nécessité de conserver esprit critique et rigueur dans cette opération.

Le calage d'un modèle peut demander la modification d'un nombre plus ou moins important de paramètres selon que l'on s'éloigne plus ou moins des conditions de son élaboration, des variables de sorties auxquelles on s'intéresse et de la précision avec laquelle on souhaite obtenir ces variables. La fiabilité du calage dépendra de la bonne connaissance des composantes régissant la physique des processus, des observations expérimentales disponibles par rapport au nombre des paramètres de calage et de

la nature du modèle. Dans de nombreux cas, les incertitudes des observations peuvent rendre le calage plus ou moins illusoire. En tous cas, il est préférable d'utiliser plusieurs critères pour juger de l'adéquation du modèle testé.

La résolution d'un problème inverse est une des nombreuses techniques de calage des modèles. Dans ce cas le modèle est utilisé pour estimer les paramètres à partir de variables de sorties qui sont mesurées. L'utilisation des algorithmes automatiques pour minimiser l'écart pour chaque variable, entre les valeurs mesurées et simulées par le modèle est très développée. Néanmoins, une attention particulière doit être portée au fait que plusieurs combinaisons des différents paramètres peuvent conduire à des résultats similaires et, de plus, la méthode inverse peut être très exigeante en temps de calcul (Normand, 1996).

3.1.2.2 Validation du modèle

La validation sert à vérifier les capacités de reproduction, d'extrapolation et de prédiction du modèle pour les conditions dans lesquelles il est prévu de l'être utilisé par la suite. Par validation il faut entendre donc la vérification de l'ajustement entre grandeurs simulées et observées à partir de séries de données indépendantes de celles ayant servi au calage. Un des obstacles au calage et à la validation provient du fait que tous les paramètres n'ont pas la même sensibilité. Le travail de validation doit tenir compte de ces paramètres sensibles et les ajuster dans des conditions qui leur sont spécifiques. L'analyse de sensibilité permet de connaître l'effet des incertitudes des paramètres sur le résultat du modèle et d'identifier les paramètres qui sont importants dans le modèle (Addiscott, 1995).

La validation est une étape indispensable. En général, les modèles les plus grossiers sont simples à valider, alors que les modèles plus fins nécessitent tant de mesures pour connaître les paramètres et variables d'entrée des fonctions qu'ils utilisent, qu'en pratique leur validation est très mauvaise. Ainsi, le modèle le plus utile sera un modèle intermédiaire.

3.2 MODELISATION DE L'IRRIGATION A LA RAIE

Dans un contexte d'irrigation de surface modernisée (mécanisation, planage), la modélisation peut être envisagée pour améliorer la conduite de l'irrigation à la raie, dans la mesure où elle permet d'évaluer et d'augmenter la performance hydraulique des arrosages à la parcelle.

La connaissance de l'infiltration, variable d'un point de vue spatial est difficilement accessible par la mesure directe, mais la modélisation de l'irrigation à la raie peut être un des moyens pour parvenir à cette connaissance. Celle-ci permet d'apprécier les quantités d'eau apportées aux plantes, les pertes, et de proposer, dans la mesure du possible, des consignes d'amélioration de la conduite de l'irrigation en cours ou pour les irrigations suivantes (Renault, 1991). Il existe plusieurs approches de la modélisation du phénomène avancement-infiltration.

3.2.1 Approche mécaniste: modèle hydrodynamique complet

Ce modèle est basé sur le couplage des équations de Saint-Venant (écoulement de surface) et de l'équation de Richards (hydrodynamique des milieux poreux non saturés). Par cette méthode il est possible de prédire un arrosage par modification des paramètres: débit, durée, pente, rugosité, géométrie, teneur en eau initiale, caractéristiques hydrodynamiques du sol. Les paramètres restent cependant difficiles d'accès (mesures délicates et fastidieuses) et variables dans l'espace et dans le temps. De nombreux phénomènes restent occultés (tels que l'érosion et le colmatage par dépôt des matières en suspension) pour simuler un arrosage réel. L'infiltration et l'avancement suivent deux cinétiques différentes, ce qui complique et limite les résolutions de type numérique. Les modèles satisfaisants en cas bidimensionnel de l'infiltration à la raie sont quasiment inexistant sur le marché, en raison de la lourdeur et les contraintes de la modélisation numérique. Les modèles BIDISUL et TRIDISUL (Tabuada et al., 1995a ; Tabuada et al., 1995b), par exemple, sont seulement adaptés aux raies courtes et bouchées, avec des hypothèses de calcul discutables.

Dans le cas monodimensionnel de l'infiltration, des solutions analytiques exactes existent (Parlange et Haverkamp, 1990) et peuvent être couplées au modèle de St Venant. Dans le cas bidimensionnel, il n'existe pas de solution analytique satisfaisante ou exempte de critique. Les rares solutions analytiques ou semi-analytiques sont incomplètes (Schmitz, 1993 a et b) ou encore trop lourdes pour envisager le couplage (Berthomé, 1991). De plus, ces approches analytiques dérivent du modèle de Richards invalidé par le phénomène de fentes de retrait (de quelques mm à plusieurs cm d'épaisseur) que génère ce mode d'arrosage sur la plupart des sols, même à teneur peu élevée en argile gonflante.

3.2.2 Modélisation empirique

Le choix d'une loi d'infiltration empirique conduit à une approche plus opérationnelle du problème relatif à la modélisation du phénomène couplé avancement – infiltration.

3.2.2.1 Approche hydrodynamique

Cette approche résulte du couplage du modèle de St Venant avec une loi d'infiltration empirique (Kostiakov; loi de Philip à deux termes ou loi d'Horton (1990)). La loi de Philip à deux termes est une loi analytique établie à partir d'une approximation. L'infiltration cumulée (Z) est définie selon:

$$Z = S t^{1/2} + A t \quad \text{Équation 30}$$

S	sorptivité [$l.T^{-1/2}$]
A	transmissivité, lié à K_s
t	temps [min]

Cette loi est applicable pour des temps courts.

L'équation de Kostiakov-Lewis (ou équation de Mezencev (1948)) est une équation de type empirique:

$$Z = k \cdot t^a + b \cdot t \quad \text{Équation 31}$$

b *taux d'infiltration de base*
 k, a *coefficients empiriques*

Ces approches ont l'avantage de permettre la simulation d'un arrosage à posteriori, et d'en caractériser l'efficacité après l'identification des paramètres de la loi d'infiltration. L'inconvénient majeur de ces lois d'infiltration empiriques est que leurs paramètres dépendent des conditions de l'essai (débit, temps, conditions initiales). Les paramètres identifiés au cours de l'essai ne peuvent être utilisés pour prédire un futur arrosage avec des conditions différentes. Par exemple, Bautista et Wallender (1993) se sont basés sur un modèle hydrodynamique pour développer un modèle d'estimation des paramètres d'infiltration à partir des mesures d'avancement.

3.2.2.2 Approche hydrologique ou "bilan-volume"

L'approche hydrologique consiste à résoudre l'équation de continuité sur la phase d'avancement. Cette équation s'écrit:

$$Q \cdot t = C \cdot x(t) + \int_0^x Z(t - t_s) ds \quad \text{Équation 32}$$

Q *débit introduit en tête de raie [mm.s⁻¹]*
 t *temps d'arrosage [min]*
 $Cx(t)$ *volume stocké*
 Z *infiltration cumulée [l/m]*

Certaines lois d'infiltration empiriques établies pour le cas unidimensionnel permettent de trouver des solutions exactes de l'avancement. Philip et Farell (1964) en proposent quelques unes à partir par exemple de la loi de Philip à deux termes (1954) et de la loi d'Horton (1932). Shepard et al. (1993) proposent une méthode, basée sur l'approche bilan-volume, en utilisant seulement le temps d'arrivée pour estimer les paramètres de l'équation de Philip. La loi linéaire (Mailhol 1992; Esfandiari et Maheshwari, 1997), développé initialement pour les sols fissurés, est la modification de l'équation de Kostikov avec deux paramètres. L'Équation 32 n'a pas de solution exacte comme pour l'avancement dans le cas de la loi d'infiltration de Kostikov-Lewis. Les chercheurs ont eu recours à la méthode qui consiste à sur-conditionner le problème en fixant à la fois avancement et infiltration. C'est le cas pour la méthode de Elliot et Walker (1982) avec la lois d'avancement de type:

$$x = p \cdot t^r \quad \text{Équation 33}$$

x *distance de front d'avancement en temps t [m]*
 p, r *paramètres d'ajustement*

En tous cas, il est préférable de se doter d'une fonctionnelle de l'infiltration reposant si possible sur des phénomènes physiques ou relevant de concept résultant de l'observation de terrain, plutôt que d'une fonctionnelle de l'avancement (Esfandiari, et al. 1997 b).

3.3 MODELE RAIEOPT

Ce modèle peut être utilisé en temps réel à l'aide d'un micro-ordinateur portable pour améliorer les performances des arrosages. Il repose sur une modélisation conceptuelle de l'infiltration, sorte de compromis entre déterminisme (irréaliste compte-tenu de la complexité et de la variabilité spatio-temporelle des phénomènes) et l'empirisme total (extrapolation proscrite hors conditions de calage).

3.3.1 Objectifs du modèle

L'objectif est l'amélioration de la conduite d'arrosage par identification du couple débit-temps optimisant les critères hydrauliques (Rendon et Fuentes, 1997), tels que le rendement net (Rn) et l'uniformité (Cu)

$$R_n = \frac{D_n}{D_a} \quad \text{Équation 34}$$

$$C_u = \frac{D_n}{D_i} \quad \text{Équation 35}$$

D_n dose nette ou utile obtenue par la loi d'infiltration [mm]
 D_a dose moyenne apportée [mm]
 D_i dose moyenne infiltrée [mm]

$$D_a = \frac{Q \cdot T_{co}}{L} \quad \text{Équation 36}$$

$$D_i = \frac{V_{in} - V_{out}}{L \cdot d} \quad \text{Équation 37}$$

$$V_{in} = Q \cdot T_{co} \quad \text{Équation 38}$$

V_{in} volume d'eau mesurée en tête de raie [m³]
 V_{out} volume d'eau perdu par colature [m³]
 L longueur de la raie [m]
 d écartement des raies [m]

La dose nette ou utile est obtenue par la loi d'infiltration pour t:

$$t = T_{co} - T_L + T_r(L) \quad \text{Équation 39}$$

t temps d'opportunité (temps de présence de l'eau) [min]
 T_{co} temps d'arrosage [min]
 T_L temps d'arrivée [min]
 $T_r(L)$ temps de récession [min]

La prédiction en temps réel peut se faire à partir du suivi de l'avancement sur trois raies, où l'on enregistre les temps d'arrivée moyens à trois points situés sur la première moitié de la raie. Le Tableau 53 présente les données nécessaires à la modélisation. Le modèle calcule alors le temps d'arrivée de l'eau en bout de raie (T_L), le temps d'arrosage pour apporter la dose nette désirée, les pertes en colature et les coefficients Rn et Cu.

Tableau 53 Données d'entrée du modèle Raieopt

Données liées à la parcelle	Données liées au débit	Données liées au temps
type de sol	dose nette requise en l/m de raie	temps d'irrigation
longueur des raies	Débit en tête de raie	temps d'arrivée à chaque abscisse
pente de la parcelle	1 ^{ère} irrigation (o/n)	
position des abscisses sur la raie suivie		

L'arrosage à débit unique en raies avec colatures peut être qualifié de performant lorsque Rn atteint 70 % et Cu 80 % (DDAF, 1989). La détermination de la solution « optimale » se fait par simulation. Ces simulations sont réalisées par incréments positifs ou négatifs du débit selon les performances obtenues avec le débit initialement choisi et appliqué par l'agriculteur sur le premier bloc. Le paramètre de l'infiltration stabilisée est modifié dans le rapport des périmètres mouillés. Le modèle fournit alors quelques propositions de couple débit-durée et les critères correspondants.

L'incertitude sur les mesures de terrain (débit, système de distribution mal réglée) entrant dans les modèles d'irrigation de surface peut être forte et représente certainement le handicap le plus élevé dans l'optimisation des paramètres d'arrosage. En outre, les hypothèses d'uniformité habituellement admises dans les modèles paraissent souvent abusives et nuisent au comportement des modèles (Renault, 1991).

3.3.2 Fonctionnement du modèle

Le phénomène physique de l'irrigation à la raie comporte l'infiltration dans la section transversale de la raie et l'avancement de l'eau en surface. L'équation de continuité est ici mise à profit pour identifier le processus d'avancement lorsqu'on formule celui de l'infiltration.

La conceptualisation du processus d'infiltration s'inspire de l'observation physique du phénomène en sols fissurés ou ayant une macro-porosité initiale importante: le sol, par unité de longueur, est assimilé à un système à deux réservoirs: ❶ l'un dont le remplissage est instantané (celui relatif à la macro-porosité) et ❷ l'autre (relatif à la micro-porosité) dont le remplissage linéaire s'effectue plus ou moins lentement selon la vitesse d'infiltration stabilisée.

L'observation du phénomène en sols macro-fissurés montre que le front n'avance qu'après avoir rempli le volume correspondant à la macro-fissuration. Ce phénomène de fentes de retrait existe sur la plupart des sols comportant un taux d'argile > 25 % (plus ou moins gonflants), irrigués en gravitaire. Ces fentes peuvent aller de quelques millimètres à plusieurs centimètres sur des sols très argileux. Le terme *B* de l'Équation 40 peut également représenter une part du volume stocké dans les micro-bassins à la surface du sol (amont d'une motte de terre) et voué à l'infiltration. La loi d'infiltration choisie est donc:

$$Z = B + C_s \cdot t \quad \text{Équation 40}$$

<i>Z</i>	<i>infiltration [l.m⁻¹]</i>
<i>B</i>	<i>volume instantané de l'eau infiltrée par unité de longueur de raie [l.m⁻¹]</i>
<i>C_s</i>	<i>infiltration stabilisée [l.m⁻¹.mn⁻¹]</i>

Un des avantages de ce modèle est de n'avoir que deux paramètres: B correspond au remplissage de la macroporosité tandis que C_s la vitesse de remplissage de la micro-porosité. L'identification de N valeurs de B à partir d'un échantillon de N raies d'une parcelle permet d'ajuster la variable aléatoire B à une loi normale (Mailhol et Gonzales, 1993). L'infiltration stabilisée, C_s peut être déduite par calage sur l'avancement mais aussi mesurée, à condition d'avoir pu observer la stabilisation du débit de colature:

$$C_s = \frac{Q - Q_c}{L} 60 \quad \text{Équation 41}$$

Q débit introduit dans la raie [l/s]
 Q_c débit en colature [l/s]
 L longueur de la raie

Cette loi est l'expression asymptotique de la loi de Horton (quand $t \rightarrow \infty$) et identique aux formes asymptotiques de Parlange (1982):

$$Z = \frac{S^2}{2K_s} + K_s \cdot t \quad \text{Équation 42}$$

La loi d'avancement résulte de la solution exacte de l'Équation 32 pour la fonctionnelle de Équation 40:

$$X(t) = \frac{Q}{C_s} \left(1 - \exp\left(-\frac{C_s}{B + \sigma A_0} t\right) \right) \quad \text{Équation 43}$$

$x(t)$ l'abscisse atteint par le front à un temps donné
 $\sigma^* A_0$ estimation du volume stocké (Girousse, 1987)
 A_0 section mouillée en tête de raie
 σ coefficient de forme de la ligne d'eau voisin de 0.8

Le modèle d'avancement a les propriétés intéressantes: une vitesse finie à l'origine ($dx/dt = Q/(B + \sigma A_0)$) et une longueur maximale atteinte par le front (longueur maximale irrigable):

$\lim(t \rightarrow \infty)x(t) \rightarrow Q/C_s$.

A cette équation d'avancement on associe une équation permettant le calcul du temps de disparition de l'eau ou temps de récession à une abscisse x donnée:

$$T_r(x) = \left[\frac{x}{60 \sqrt{S_0} C_s^{2/3}} \right]^{0.6} \quad \text{Équation 44}$$

S_0 pente
 0.6 valeur du paramètre caractérisant la rugosité et la forme de la raie
 x abscisse x sur le long de la raie

Le volume infiltré à $t=T_{co}$ peut s'estimer par la relation:

$$V_{inf} = \int_0^L Z(t_{co} - t(x) - t_r(x)) dx \quad \text{Équation 45}$$

$t(x)$ temps d'avancement du front pour l'abscisse x

Le volume perdu en colature à $t=T_{co}$ est:

$$V_C = Q \cdot t_{co} - V_{inf} \quad \text{Équation 46}$$

3.3.3 Calage du modèle

L'objectif est de caler la loi d'infiltration à partir du suivi de l'avancement pour prédire les performances de l'arrosage sur une durée bien supérieure à cette phase. Pour la plupart des lois d'infiltration qualifiées d'empiriques cette opération peut être hasardeuse. Moyennant une technique de calage adaptée on montre, (Mailhol, 1992) que le modèle possède des capacités prédictives fiables.

Le paramètre σ est choisi égal à 0.8 (Girousse, 1987) et A_0 est estimé d'après la formule de Manning-Strickler pour la raie standard trapézoïdale avec la rugosité $n=0.05$ pour la 1^{ère} irrigation et 0.04 pour les suivantes (Mailhol et al., 1988). Les paramètres à caler en temps réel sont: B et C_s . Les conditions n'étant pas reproductibles d'un arrosage à l'autre (conditions initiales en particulier), le calage résultant est propre à un arrosage donné. La méthode de calage proposée est une technique d'optimisation sous contraintes. Les contraintes choisies portent essentiellement sur le terme C_{so} : la recherche de C_s se fait entre $1/3 C_{so}$ et $2 C_{so}$ qui peut être la fourchette de variation d'un paramètre comme K_s à l'échelle d'une parcelle:

$$C_{so} = K_{so} * \frac{P}{P_0} \quad \text{Équation 47}$$

K_{so} *homologue de la conductivité hydraulique à saturation pour l'infiltration mono-dimensionnelle*
 P_0 et P *périmètres mouillés correspondant au débit standard 1l/s et au débit Q .*

Dans une optique d'application du modèle en temps réel il est préférable de suivre l'avancement sur quelques raies pour essayer de tenir compte de sa variabilité spatiale.

3.3.4 Validation du modèle Raieopt, ses limites

3.3.4.1 Validation de la phase prédictive de l'approche « temps réel »

La phase prédictive du modèle a été validée sur des sols fissurés (Mailhol et Gonzales, 1993) à partir d'une expérimentation menée à Tarascon sur deux parcelles de maïs, de trente raies chacune. Les sols de ces parcelles étaient de type limono-argileux (argile=35 %, limon=55 % et sable=10 % dans la couche 0-60 cm).

La validation de la phase prédictive a été complétée sur une gamme de sols différents (Mailhol, 1992). 80 arrosages en sols limono-argileux à limono-sableux sur 10 parcelles de longueur de 130 à 300 m et de pentes différentes ont été testés. Dans 90 % des cas, la dose moyenne infiltrée et les temps d'arrivée sont prédits avec une erreur inférieure à 15 % lorsque le modèle est calé sur une longueur de raie $\cong L/2$.

3.3.4.2 Validation de la phase optimisation

Le modèle n'étant pas déterministe, on peut mettre en doute son aptitude à prédire dans une fourchette d'erreur acceptable, les performances hydrauliques pour une situation autre que celles ayant permis le calage. La validation de la phase optimisation est nécessaire puisqu'il n'est pas prouvé que la loi d'infiltration n'est pas sensible aux conditions de débit. Il s'agit donc de tester la pertinence de la correction effectuée sur le paramètre concerné. La validation a été effectuée sur deux types de sols: 5 essais à Lavalette sur sol limoneux et à Tarascon sur sol limono-argileux (sols fissurés) (Mailhol, 1992).

3.3.4.3 Application du modèle dans le cas de raies bouchées

Le modèle Raieopt comporte des options de conduite d'arrosage comme la conduite à deux débits avec ou sans colatures (raie bouchée). Pour la conduite en raies bouchées on coupe le débit lorsque la majorité des raies atteint l'aval de la parcelle, donc certaines raies sont sous-irriguées, d'autres sur-irriguées. Dans certains cas, lorsque la variabilité d'avancement est importante, il en résulte une variabilité notable de la dose infiltrée à l'aval.

Le test expérimental a été effectué sur une parcelle de sorgho sur un sol limoneux (limon=50 %, argile= 25 % et sable= 25 %) au Cemagref en 1993. Une seconde expérimentation a été conduite en septembre 1995 au Maroc avec culture de canne sur des sols argileux (argile=60-65 %). La comparaison des doses infiltrées et mesurées est satisfaisante, au même titre que la validation numérique effectuée au moyen d'un modèle hydrodynamique (Mailhol, et al., 1997). Cette option du modèle dans un but d'amélioration des pratiques est utilisée au Maroc où la pratique de la raie bouchée est largement utilisée (Mailhol et al., 1999). C'est à l'occasion de ce travail que la version du modèle a été complétée par la prise en compte des conditions hétérogènes liées à la pratique de la raie bouchée sur cultures pérennes (canne à sucre).

3.3.4.4 Variabilité spatiale et temporelle des paramètres du modèle

Un nombre limité de paramètres facilite la prise en compte de la variabilité spatiale. Les travaux réalisés sur parcelle expérimentale (Mailhol, et al., 1999) ont donné lieu à la mise au point d'un modèle permettant de simuler l'impact d'une pratique d'irrigation sur l'efficience à l'échelle de la parcelle en intégrant différentes sources d'hétérogénéité (déterministes et aléatoires). Dans cette approche il est montré que dans le cas des sols argileux, B peut être relié de façon satisfaisante au niveau d'épuisement de la réserve hydrique du sol, et que la valeur moyenne de C_s est de l'ordre de grandeur de K_s (conductivité hydraulique à saturation) du sol considéré.

3.3.5 Options « prédictive » de Raieopt

3.3.5.1 Option M2P du modèle Raieopt

L'affinité avec les formes asymptotiques de Parlange (1982) permet d'envisager une utilisation prédictive du modèle plus générique que celle faisant appel à la formule résultant de concepts hydrologiques, établie dans le cas des sols lourds pour prédire la valeur de B .

$$Z = \frac{S^2}{2K_s} + K_s \cdot t \quad \text{Équation 48}$$

En introduisant la variable potentiel d'écoulement (Gardner, 1958):

$$\phi(h) = \int_{h_i}^h k(h) dh \quad \text{Équation 49}$$

on fait apparaître λ_c (longueur capillaire) utilisée dans la relation de Gardner (1958):

$$k(h) = k_s \exp\left(-\frac{h}{\lambda_c}\right) \quad \text{Équation 50}$$

λ_c grandeur macroscopique qui correspond à la hauteur de la frange capillaire moyenne

Selon l'expression de $\phi(h)$, λ_c devient:

$$\lambda_c = \frac{\phi_s}{k_s} \quad \text{Équation 51}$$

En remplaçant, selon White et Sully (1987) ϕ_s par $\beta S^2 / (\theta_s - \theta_i)$, ($\beta=0.55$) on obtient avec $\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$:

$$Z = 0.9 \cdot \epsilon_c \cdot \Delta\theta + k_s \cdot t \quad \text{Équation 52}$$

Le paramètre λ_c qui représente l'importance relative entre capillarité et gravité, varie de quelques cm pour un sable jusqu'à 100 cm pour des sols argileux (Kutilek et Nielsen, 1994). Pour exprimer Z en l/m il convient de multiplier Z par l'espacement E_c des raies (en mètres).

3.3.5.2 Option M3P du modèle RAIEOPT

L'option $M3P$ du modèle Raieopt développé pour les sols peu ou pas fissurés à effets capillaires élevés, est plus générique que l'option $M2P$ (loi d'infiltration linéaire à 2 paramètres). Elle permet en effet une simulation plus satisfaisante de la trajectoire d'avancement sur la plupart des sols (Mailhol et al., 1997), alors que $M2P$ reste satisfaisant dans le cas des sols macro-fissurés ou des sols pour lesquels le régime transitoire de l'infiltration est de courte durée (paramètre ρ de $M3P > 0.1 \text{ mn}^{-1}$). L'avancement dans $M3P$ est donné par la solution exacte de l'équation de continuité (équation du bilan hydrologique formulée sur la phase d'avancement) pour la loi d'infiltration de Horton (1940):

$$Z=C \cdot t+b(1-\exp(-p \cdot t)) \quad \text{Équation 53}$$

c, b, p coefficients empiriques

$$X(t) = A_1(1 - e^{-\alpha_1 t}) + B_1(1 - e^{-\alpha_2 t}) \quad \text{Équation 54}$$

$$A_1 = \frac{Q}{\alpha_2 - \alpha_1} \left[\frac{1}{C} + \frac{\alpha_2}{c} \right] \quad \text{Équation 55}$$

$$B_1 = \frac{Q}{\alpha_1 - \alpha_2} \left\{ \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\alpha_1}{C} \right\} \quad \text{Équation 56}$$

Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme. Équation 57

$$C = \sigma A_0 \quad \text{Équation 58}$$

La loi de Horton déduite de la loi de Talsma et Parlange (1972) lorsque $t \rightarrow \infty$, permet de donner, comme dans l'option prédictive de M2P, une signification physique aux paramètres de la loi de Horton:

Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme. Équation 59

En exprimant la sorptivité (S) selon les formules utilisées précédemment on obtient :

$$Z=0.9 \lambda_c \Delta \theta \left\{ 1 - \exp \left[-\chi K_s (\lambda_c \Delta \theta)^{-1} \right] \right\} + K_s \cdot t \quad \text{Équation 60}$$

Le paramètre empirique χ_c peut être fixé à 15 pour la plupart des sols irrigués à la raie. On peut constater que pour une valeur de λ_c donnée, la phase transitoire de l'infiltration est plus courte sur un sol humide que sur un sol sec et qu'à conditions d'humidité initiales identiques elle croît avec λ_c . Le modèle M3P apparaît donc mieux adapté à la simulation du processus avancement - infiltration dans un contexte de sol où les effets capillaires de l'infiltration sont manifestes. C'est le cas des sols à composante argileuse peu ou pas fissurés. Par exemple, dans le contexte de Lavalette, le modèle M3P permet d'améliorer sensiblement la simulation de l'avancement par rapport à M2P sur le traitement Te , où l'on a identifié par calage sur l'avancement, des valeurs moyennes de ρ beaucoup plus faibles que sur Ta : 0.06 et 0.2 mn^{-1} , respectivement, à condition d'humidités comparables.

3.4 LES MODELES DE CULTURES EN BREF

La modélisation est largement utilisée pour décrire et prévoir le développement des cultures, les transformations des produits azotés, les mouvements de l'eau et les transferts de nitrates en milieux non saturés. Les modèles de culture simulent les interrelations entre le sol, la plante, le climat et les itinéraires techniques (Feddes, 1986). Sur le plan agronomique, leur intérêt est de simuler le rendement et prévoir l'état du sol en termes d'évolution du stock d'eau et des éléments fertilisants par exemple azote (Cabelguenne, 1988). Ces modèles fournissent donc un support de décision dans le domaine de la production agricole, la recherche agronomique et dans les études environnementales (Parson, et al., 1995). La croissance foliaire (et par conséquent le rendement de la culture) est simulée en fonction du stress hydrique, du stress azoté et de stress lié à la température (Dou et Fox, 1995).

La performance d'un modèle de culture dépend de la capacité du modèle à simuler le mouvement et la distribution des solutés du sol et la répartition des solutés (Porter et al., 1992; Van dam et al., 1997). Le couplage des transferts d'eau et de solutés constitue la partie la plus délicate de ces modèles.

3.4.1 Simulation du transfert de l'azote dans les modèles de cultures

Les modèles ont pour objet la description du devenir de l'azote au champ situations agricoles habituelles (Addiscott, 1995). Les premiers modèles de lessivage des nitrates ont été développés aux Etats Unis pendant les années 70 et c'est au début des années 80 que les premiers modèles français ont été mis au point en particulier à l'IMFT (Prat, 1982). Depuis, beaucoup de modèles de ce type sont apparus et ont été diffusés, comme par exemple CERES-Maize (Warrick et Gardner, 1983), EPIC (Williams, 1984), NCSWAP (Clay et al, 1985), MORELN (Geng, 1988), DISNIT2 (Fehér et al, 1991), NLEAP (Follet et al., 1994), SWAP (Van-Dam et al., 1997).

Ces modèles en général, ont été développés afin d'évaluer l'impact des activités agricoles sur la qualité des eaux et le choix des pratiques culturales à mettre en oeuvre pour réduire la pollution diffuse d'origine agricole. Ils ont pour but de prévoir les pertes de sols, de fertilisants et de pesticides causées par l'écoulement de l'eau (Jabro et al., 1995).

En égard à la complexité des processus, un bon nombre de modèles intégrés ont été développés, s'appuyant sur les relations empiriques, pour simuler le devenir de l'azote dans le système sol-plante-atmosphère (Williams, 1984, Follett et al., 1994). Cependant, peu d'entre eux ont un caractère holistique, et cela vient du fait que l'étude du cycle de l'azote est abordée différemment par de nombreuses disciplines scientifiques. Les microbiologistes du sol se concentrent traditionnellement sur les transformations de la matière organique, les hydrologues sur les impacts hydrologiques de l'azote du sol, les physiologistes des végétaux sur les interactions avec la plante, et chacun aborde le cycle de l'azote selon son propre point de vue (Normand, 1996).

Les modèles de simulation du transfert de l'azote dans le sol sont généralement très complexes et les données expérimentales utiles à la validation de ces modèles difficiles à obtenir (Vauclin, 1994). Pourtant, ils constituent des outils très importants de recherche appliquée dans le but d'appréhender, par intégration des aspects pluridisciplinaires, les interactions entre les processus concernés et de prévoir l'impact de la modification des pratiques agricoles.

En égard à la complexité des processus, un bon nombre de modèles intégrés ont été développés, s'appuyant sur les relations empiriques, pour simuler le devenir de l'azote dans le système sol-plante-atmosphère (Williams, 1984, Follett et al., 1994). Cependant, peu d'entre eux ont un caractère holistique, et cela vient du fait que l'étude du cycle de l'azote est abordée différemment par de nombreuses disciplines scientifiques. Les microbiologistes du sol se concentrent traditionnellement sur les transformations de la matière organique, les hydrologues sur les impacts hydrologiques de l'azote du sol, les physiologistes des végétaux sur les interactions avec la plante, et chacun aborde le cycle de l'azote selon son propre point de vue.

L'azote minéral étant pour sa plus grande partie dissous dans l'eau, on comprend pourquoi un modèle de transfert de produits en solution doit s'appuyer sur une modélisation du cycle de l'eau aussi performante que possible. Les sous-modèles hydrologiques des modèles de transfert de solutés se différencient selon le nombre de processus pris en compte et selon les zonations spatiales verticale et horizontale. Les principaux processus hydrologiques des transports des polluants sont le ruissellement, l'écoulement subsuperficiel, la percolation et l'écoulement souterrain. Mais en réalité, les modèles de simulation sont capables de décrire seulement une partie des voies de transport et très peu d'entre eux parviennent à décrire les processus hydrologiques complets. Selon les observations, les mécanismes de transfert de l'azote semblent être soumis à des régulations plus complexes qu'une simple mobilisation proportionnelle au flux d'eau (Pinheiro et al., 1996).

Des informations complémentaires sont fournies en annexe qui répertorie quelques modèles utilisés pour appréhender les impacts sur la qualité de l'eau.

3.5 PRESENTATION DU MODELE STICS

STICS (**S**imulateur **m**ultidisciplinaire pour les **C**ultures **S**tandard), développé par un groupe de chercheurs de l'INRA (Brisson et al., 1998; Brisson et Mary, 1999) est un modèle de fonctionnement des cultures. C'est un modèle dynamique qui représente les interactions entre le sol, la plante et le climat au pas de temps journalier. Il prend en compte et simule la croissance et le développement de la culture ainsi que les bilans en eau et en azote, en fonction des itinéraires techniques auxquels sont soumises les cultures.

La présentation du modèle faite dans ce document doit beaucoup à la notice de la version 4.0 (Brisson et Mary, 1999), qui complète Brisson et al. (1998), dont nous avons repris les points principaux afin de rendre ce travail accessible aux lecteurs qui n'y ont pas accès.

3.5.1 Objectifs de STICS

STICS n'est pas un outil de synthèse des connaissances actuelles, mais un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles. Son objectif majeur est de permettre de simuler les conséquences des variations du milieu et du système de culture, sur la production d'une parcelle agricole et sur son environnement (Tayot et al., 1998). En ce sens, STICS peut être utilisé pour l'analyse des potentialités agricoles, pour l'appui au diagnostic agronomique, pour la mise au point de programmes d'intervention culturale ou pour l'étude de l'impact économique ou environnemental de mesures réglementaires (Meynard, réunion STICS 1998).

La validité du modèle est évaluée sur l'ensemble du cycle cultural (quelques mois), donc il n'a pas vocation à rendre compte des variations de peuplement végétal ou du milieu à des pas de temps courts (quelques jours) ou très longs (supérieurs à 5 années). Même si STICS offre la possibilité de simuler sur plusieurs années, il ne simule pas les effets à long terme.

STICS offre diverses possibilités de simulations aux utilisateurs. Par exemple, si l'on s'intéresse uniquement aux bilan d'eau ou d'azote, on peut « forcer » la partie plante en imposant aux modèles des indices foliaires mesurés: c'est l'objectif du modèle STICS-feuille. On peut également « forcer » la partie développement en introduisant les stades phénologiques observés au champ.

3.5.2 Caractéristiques du modèle STICS

Il ne s'agit pas d'un modèle entièrement nouveau. De nombreuses parties font appel à des formalismes classiques ou sont issues de modèles existants. Elles ont été complétées par des apports originaux sur certains points en fonction des problèmes rencontrés sur certaines cultures ou dans certaines conditions culturales ou pédoclimatiques. L'originalité de STICS réside dans son caractère modulaire et générique (pouvant s'adapter facilement à divers types de plantes). Il est conçu de telle manière que la version standard de chacun de ses modules puisse être aisément remplacée par une autre jugée plus performante, admettant si possible, les mêmes variables d'entrée. La généricité signifie la facilité d'introduction de nouvelles espèces. L'adaptation à d'autres espèces enrichit progressivement un cadre général qui facilitera de plus en plus l'adaptation à de nouvelles espèces. Une nouvelle version est en préparation afin d'élargir son champ d'application. A priori seuls les modules de développement et d'élaboration du rendement sont susceptibles d'être modifiés, dans les cas les plus simples.

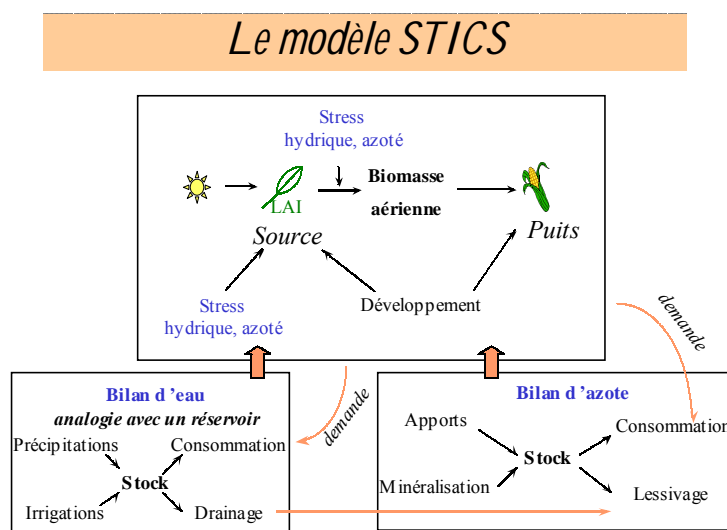
Le modèle est **conceptuel**, ce qui signifie qu'il utilise des principes et des équations algébriques simples pour décrire des phénomènes physiques. En raison de la difficulté de caler les paramètres régissant des phénomènes très complexes, certains d'entre eux sont pré-définis. En conséquence, le nombre de paramètres à caler par utilisateur peut se trouver réduit. En relation avec ces objectifs opérationnels, la version standard de STICS ne comprend que des données d'entrée d'accès facile.

Le modèle suppose que les transferts sont verticaux monodimensionnels. Ces conditions dans lesquelles il est utilisable pour appréhender les transferts d'eau et de soluté dans un contexte d'infiltration bidimensionnelle comme celui de l'infiltration à la raie sont donc à préciser.

3.5.3 Rapport entre les modules de STICS

STICS simule le bilan de carbone, le bilan d'eau et le bilan d'azote du système (Figure 61) et permet de calculer à la fois des variables agricoles (rendement, consommations d'intrants) et des variables environnementales (pertes d'eau et de nitrate) dans diverses situations agricoles. La limite supérieure du système est l'atmosphère caractérisée par les variables climatiques standard (rayonnement, températures minimale et maximale, pluie, évapotranspiration de référence ou éventuellement vent et humidité) et la limite inférieure correspond à l'interface sol/sous-sol. Le sol est assimilé à une succession de couches horizontales, chacune de ces couches étant caractérisées par sa réserve en eau, en azote minéral et en azote organique. Les interactions entre le sol et la culture sont assurées par les racines, celles-ci étant définies par une distribution de densité racinaire dans le profil de sol.

Figure 61 Rapport entre les différents modules dans STICS (d'après Brisson et Mary, 1999)



Le sol est assimilé à une succession de couches horizontales, chacune de ces couches étant caractérisées par sa réserve en eau, en azote minéral et en azote organique. Les interactions entre le sol et la culture sont assurées par les racines, celles-ci étant définies par une distribution de densité racinaire dans le profil de sol.

Selon l'approche de Wit (1978),

la croissance de la culture est pilotée par le bilan de carbone: interception du rayonnement solaire par le feuillage puis transformation en biomasse aérienne qui est orientée vers les organes de récolte pendant la phase finale du cycle. Le modèle de développement est utilisé pour faire évoluer l'indice foliaire et pour définir la phase de remplissage des organes récoltés.

Le modèle tient compte de l'état initial du profil (physico-chimique), du climat (pluviométrie, température du sol, rayonnement) et de plusieurs composantes de l'itinéraire technique (fertilisation, irrigation) pour décrire la croissance des cultures et l'évolution des stocks hydriques et azotés par horizon de sol. Il détermine les stress (hydrique, azoté et de température) en comparant les besoins de la plante et l'offre du milieu puis ils corrige la biomasse potentielle du jour sur la base du facteur limitant principal. Les indices de stress sont calculés dans les bilans hydrique et azoté.

Les trois modules de STICS sont détaillés ci-dessous afin de définir les paramètres qui ont été modifiés pour adapter le modèle au cas particulier étudié.

3.5.4 Bilan de carbone ou développement de la culture

Le principe du modèle de culture est simple: comme dans tous les modèles de croissance, la production est directement proportionnelle à la quantité de rayonnement intercepté par le couvert végétal. Pour cela, le modèle simule l'interception du rayonnement en fonction de l'indice foliaire, dont la dynamique est pilotée par le développement de l'espèce cultivée.

Les cultures annuelles se développent jusqu'à la date de récolte, spécifiée par l'utilisateur, où bien par cumul des unités de chaleur jusqu'à la quantité indispensable pour la maturité physiologique de la culture. De plus, chacun des stades de développement peut être imposé au modèle ou calculé par lui-même. Le rendement de la culture est calculé au moyen d'une fonction de production faisant intervenir un modèle de stress hydrique et azoté dans l'expression du LAI.

3.5.4.1 Levée et développement post-levée

La phase de levée est séparée en une phase de germination de la graine et une phase d'élongation des coléoptiles-hypocotyles (Durr et al., 1991). La germination a lieu quand la somme de degrés.jours dans le lit de semence atteint un seuil donné, avec une condition sur l'état de sécheresse du sol. La vitesse de croissance des coléoptiles-hypocotyles est supposée ensuite être une fonction logistique et la levée est réalisée quand l'élongation des coléoptiles (ELONG) est supérieure à la profondeur de semis. La prise en compte du seuil minimum d'humidité peut donner lieu à des retard de levée qu'il convient de vérifier.

Il y a 8 stades de développement utiles à la simulation de l'indice foliaire et du remplissage des grains (*Tableau 54*). Le calcul des stades de développement est nécessaire à la simulation des indices foliaires et du remplissage des grains. Si l'utilisateur demande la simulation des stades de développement, il est impératif d'introduire la date de récolte qui peut servir de date butoir si la variété a un cycle trop long par rapport aux impératifs techniques, climatiques ou phytosanitaires.

Tableau 54 Stades de développement du maïs

stades végétatifs (indice foliaire)	stades reproducteurs (grains)	durée entre les stades (degrés.jours)	
PLT : le semis		Furio	Volga
LEV : la levée		PLT-LEV	
AMF : accélération maximale de croissance foliaire		LEV-AMF	400
LAX : indice foliaire maxi		AMF-LAX	400
	DRP : début remplissage des grains	LAX-SEN	730
SEN : début sénescence nette		SEN-LAN	300
LAN : indice foliaire nul		LEV-DRP	1100
	MAT : maturité physiologique	DRP-MAT	730
REC : récolte			

Dans la version 4.0, les échelles végétatives et reproductrices sont indépendantes: en particulier le stade *DRP* (début de remplissage du grain), caractérisé par une durée depuis la levée, peut se situer avant ou après le stade *LAX* (indice foliaire maximal) (Brisson et al, 1999). Entre la levée et la matu-

rité physiologique, les durées séparant les stades successifs sont propres à l'espèce et à la variété. Ces durées sont évaluées en unités de développement, qui sont uniquement thermiques (sommées de degrés-jours) dans le cas du maïs.

L'unité thermique journalière, $UDEV_{CULT}$, est calculée à partir de la température de la culture ($TCULT$) ou de la température de l'air et de deux températures seuil pour le développement: $TDMIN$ et $TDMAX$, fixées à 6°C et 30°C, respectivement pour le maïs. Elle est nulle jusqu'au seuil inférieur et plafonnée à la valeur maximale diminuée du seuil inférieur. Le Tableau 54 donne la durée des stades du développement pour deux variétés demi-tardives du maïs incluses dans le modèle, proches de la variété utilisée.

3.5.4.2 Phases de croissance et sénescence des feuilles

L'évolution de l'indice foliaire (et par conséquent de rendement de la culture) est pilotée par le cumul des températures efficaces (au-dessus du seuil de la température minimale) et par le développement. Cette évolution peut être plus ou moins affectée selon l'importance du stress hydrique et du stress azoté.

L'indice foliaire évolue selon trois phases: phase de croissance, phase de stabilité et phase de sénescence (Brisson et al, 1998). Le calcul de la croissance foliaire nette ($DELTAI$) s'effectue entre les stades LEV et LAX :

$$DELTAI = \frac{DLAIMAX}{1 + \exp(5.5(2.2 - ULAI))} \times (TCULT - TCMIN) \times \min(TURFAC, INNS) \times Efdensité \times Densité \quad \text{Équation 61}$$

$TURFAC$	indice de stress hydrique
$INNS$	indice de stress azoté
$DLAIMAX$	vitesse maximale de mise en place de LAI [m^2 feuilles. m^{-2} sol.degré.jours $^{-1}$]
$ULAI$	unité de développement foliaire (=1 à la levée, 2.2 au stade AMF et 3 au stade LAX)

L'effet densité suppose qu'en dessous d'une densité, la surface foliaire d'une plante est indépendante de la densité (pas de compétition entre les plantes). Au-delà de cette densité, la surface foliaire par plante décroît selon une fonction puissance.

Entre les stades indice foliaire maximal (LAX) et début de sénescence (SEN), l'indice foliaire est constant. Du début de sénescence (SEN) au stade « LAI nul » (LAN), l'indice foliaire décroît linéairement. Le stress hydrique peut entraîner une sénescence et une maturité précoces par le biais de l'élévation de la température de culture qui sert dans le calcul du temps d'accomplissement d'un stade donné.

Les mécanismes de sénescence sont limités aux organes végétatifs aériens. Le paramètre $RATIOSEN$ correspond à la proportion de biomasse produite qui disparaît et comme il s'agit fréquemment des feuilles, il prend en compte à la fois l'allocation vers les feuilles au moment de la production de biomasse et les remobilisations. En cas de stress importants, cette sénescence affecte aussi l'évolution de l'indice foliaire. A partir d'un seuil, l'indice foliaire diminue d'une valeur proportionnelle.

3.5.4.3 Croissance en biomasse des parties aériennes

L'accumulation de la biomasse aérienne journalière, grâce à la transformation du rayonnement intercepté, se calcule à partir des paramètres culturaux, de l'indice foliaire, de la température moyenne journalière et de la satisfaction des besoins en eau et en azote, selon une loi parabolique:

$$DLTAMS \times 100 = [EBMAX \times RAIN T - COEFB \times RAIN T^2] \times FTEMP(TCULT) \times SWFAC \times INNS \quad \text{Équation 62}$$

<i>EBMAX</i>	efficience d'utilisation maximale du rayonnement propre à chaque espèce
<i>EFCROIVEG</i>	efficience pendant la phase végétative
<i>EFCROIREPRO</i>	efficience pendant la phase reproductrice
<i>COEFB</i>	paramètre de calcul du coefficient de conversion
<i>FTEMP</i>	facteur de réduction liée à la température

Le rayonnement intercepté (*RAIN T*) par la culture se calcul selon une loi de Beer. *DLTAMS* dépend de la température selon une courbe qui est fonction de 3 températures cardinales: température minimale, maximale et optimale. Si les besoins en eau et en azote ne sont pas satisfaits, la croissance foliaire (et par conséquent le rendement de la culture) est réduite. Par ailleurs, les deux stress, hydrique (*SWFAC*) et azoté (*INNS*), sont ici supposés indépendants. Le cumul de *DLTAMS* jour après jour donne la biomasse aérienne du couvert, *MASEC*.

3.5.4.4 Elaboration du rendement

A partir du début de la sénescence nette de l'indice foliaire, s'effectue le remplissage des grains (pour les cultures à graines) et le calcul des composantes du rendement (nombre de grains/ha, poids du grain). A ce stade est également calculé le stock maximal de biomasse remobilisable depuis les parties végétatives vers les grains.

L'accumulation de la biomasse journalière se calcule à partir de certains paramètres culturaux (efficience de conversion, température physiologique optimale, etc.), de l'indice foliaire, du rayonnement, de la température moyenne journalière et de la satisfaction des besoins en eau et en azote. Il n'y a pas d'influence du remplissage des organes de récolte sur la croissance végétative. Le nombre de grains (*NBGRAINS*) est fixé pendant une phase de durée variable (*NBJGRAIN*), qui précède le début du remplissage. Il dépend de la vitesse de croissance moyenne du couvert pendant cette période selon une dynamique propre à l'espèce (Jeuffroy et Ney, 1997).

$$NBGRAINS = CGRAIN \times VITMOY + CGRAINVO \quad \text{Équation 63}$$

<i>VITMOY</i>	vitesse moyenne de croissance du couvert pendant <i>NBJGRAIN</i>
<i>CGRAIN</i>	nombre de grains produits par g MS/j en moyenne pendant les jours précédents le stade <i>NDRP</i> [grains/gMSj]
<i>CGRAINVO</i>	nombre de grains produits à vitesse de croissance nulle [grains/m ²]

Il existe deux options pour le calcul de l'indice de récolte *IRCARB*:

❶ Option indice de récolte en jours: fonction linéaire du temps, du stade *IDRP* au stade *IMAT*.

L'indice de récolte final est alors limité au paramètre *IRMAX* (indice de récolte maximal):

$$IRCARB = \text{MIN}(VITIRCARB \times (1 - IDR P); IRMAX) \quad \text{Équation 64}$$

I-IDRP nombre de jours écoulés depuis le stade IDR
VITIRCARB vitesse d'augmentation de l'indice de récolte carbone [g grain/g plante/j]

② Option indice de récolte en degré-jours: fonction linéaire du parcours de développement, du stade *IDRP* au stade *IMAT*:

$$IRCARB = VITIRCARB \times SOMCOURDRP \quad \text{Équation 65}$$

SOMCOURDRP somme de degré-jours écoulés depuis le stade *IDRP*

La masse en grains, *MAGRAIN* est calculée à partir de l'indice de récolte:

$$MAGRAIN = IRCARB \times MASEC \quad \text{Équation 66}$$

La masse de chaque grain est ensuite calculée comme:

$$PGRAIN = \min\left(\frac{MAGRAIN}{NBGRAINS}, PGRAINMAXI\right) \quad \text{Équation 67}$$

NBRGRAIN nombre des grains
PGRAINMAXI limite génétique

Après la maturité physiologique, la récolte peut s'effectuer lorsque le grain est suffisamment sec (teneur en eau du grain < teneur en eau du grain à la récolte) et le dessèchement du grain dépend des températures subies depuis la maturité physiologique:

3.5.4.5 Croissance racinaire

La croissance des racines ne dépend pas du bilan du carbone. Les racines jouent uniquement un rôle d'absorbeur d'eau et de nitrate. Leur capacité d'absorption est estimée par un profil de densité racinaire efficace de forme sigmoïdale qui est recalculé pour chaque profondeur du front racinaire. La vitesse de progression du front racinaire dépend de l'espèce, de la température de culture et de l'état d'humidité du sol (Brisson, 1998):

$$DELTAZ = CROIRAC \times DTJ \times EFPFZ \times (1 - ANOX(ZRAC)) \quad \text{Équation 68}$$

DELTAZ approfondissement du front racinaire [cm]
CROIRAC vitesse de croissance du front racinaire [cm/degré.jour]
DTJ température efficace calculée avec la température de culture ou avec la température du sol au niveau
ZRAC EFPZ paramètre de l'option frein hydrique
ANOX paramètre prenant en compte l'humidité du sol
ZRAC profondeur racinaire [cm]

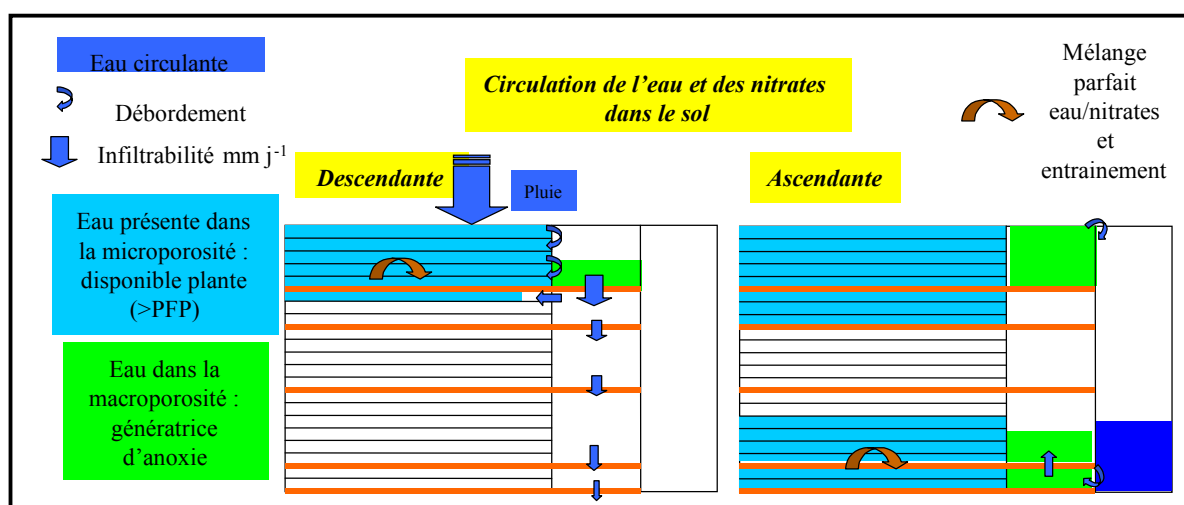
Le front racinaire démarre à la profondeur de semis et s'arrête lorsque il atteint une profondeur du sol faisant obstacle ou, au plus tard quand la culture atteint le stade *LAX* (indice foliaire maximal). Les calculs sont effectués avec les températures de surface du sol. Le stress hydrique augmente la vitesse de croissance du front racinaire par accroissement de la température de surface par rapport à la température de l'air. Le front racinaire est également stoppé ou ralenti quand: ① le sol est trop sec (au point de flétrissement): $PFZ(ZRAC)=0$ ou ② le sol est trop humide (à la saturation): $ANOX(ZRAC)=1$.

3.5.5 Bilan hydrique

Même si l'hydrologie est seulement une composante du système total, l'eau est l'élément principal à l'origine du transport des solutés. De plus, l'eau est un intrant naturel incontrôlable dans le cas des précipitations. Ainsi, le bilan hydrique a plusieurs fonctions: ❶ il joue un rôle déterminant dans le lessivage des nitrates dans le sol et dans l'absorption d'azote par la plante ; ❷ Il permet en outre le calcul des indices de satisfaction des besoins en eau des plantes.

Pour calculer le bilan hydrique dans le sol, le modèle utilise une analogie réservoir multicouche (Figure 62). Le profil de sol est discrétisé en horizons ou couches de sol de caractéristiques différen-

Figure 62 Transfert d'eau et d'azote dans le modèle STICS



tes, si nécessaire. Le transfert entre les couches est selon l'approche type réservoir dont les caractéristiques sont: l'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement relative à la couche. L'écoulement a lieu vers la couche inférieure lorsque le contenu en eau de la couche excède sa capacité au champ. Les apports d'eau d'une couche à l'autre servent à: ❶ remplir la couche si son humidité est inférieure à la capacité au champ, ❷ alimenter la transpiration des plantes et ❸ remplir la couche sous-jacente lorsque l'humidité devient supérieure à la capacité au champ.

Le bilan hydrique est réalisé dans la zone spécifiée par l'utilisateur. Le transfert de type réservoirs s'effectue en sol verticalement divisé en couches de 1 cm d'épaisseur. Dans le calcul du bilan hydrique STICS ne prend en compte que l'évaporation du sol, l'absorption d'eau par le système racinaire et la percolation d'une couche à l'autre. Par contre, les remontées capillaires et le ruissellement ne sont pas calculés.

3.5.5.1 Apports d'eau par irrigation

Les doses d'apports peuvent être imposées en entrée ou calculées par le modèle.

❶ Option irrigation lues: le modèle utilise un calendrier d'irrigations (*AIRG*) donné en entrée, lu dans le fichier technique.

❷ Option irrigations calculées: le modèle calcule automatiquement les apports d'eau de façon à satisfaire les besoins en eau (paramètre *RATIOL*), et il déclenche une irrigation chaque fois que l'indice de stress hydrique atteint un seuil fixé. Les irrigations sont alors calculées de façon à remplir la réserve en eau du sol jusqu'à la capacité au champ, sans toutefois dépasser la dose maximale autorisée par le système d'irrigation. En absence de pluie, une irrigation de 20 mm est imposée au moment du semis. Cette option du modèle sera utilisée dans la dernière partie de la thèse, afin d'analyser des scénarios de pratiques améliorantes.

3.5.5.2 Evapotranspiration

L'évaporation potentielle (ETP) peut être estimée par le modèle à l'aide de la formule Priesley-Taylor, ou être introduite par l'utilisateur selon l'ETP Penman (mm/jour). Le modèle simule séparément l'évaporation du sol et la transpiration de la plante.

3.5.5.2.1 Evaporation du sol

L'évaporation du sol affecte une épaisseur de quelques centimètres, c'est l'effet de mulch. L'évaporation du sol est calculée en deux temps: évaporation potentielle puis évaporation réelle, en se basant sur une contribution du profil d'humidité du sol (Brisson et Perrier, 1991). Il y a deux modalités de calcul de l'évaporation potentielle, qui font intervenir la couverture végétale au dessus du sol (*LAI*) et l'éventuelle présence d'une couverture déposée sur le sol, non utilisée dans notre cas. Nous présentons seulement l'approche $K \times ETP$, qui sera utilisé dans les simulations présentées.

$$EOS = TETP \exp(-DELTA \times LAI) \quad \text{Équation 69}$$

<i>EOS</i>	évaporation maximal [mm/j]
<i>TETP</i>	tableau des ETP dans le calendrier hydrique [mm/j]
<i>DELTA</i>	<i>EXTIN-0.2</i>
<i>EXTIN</i>	coefficient d'extinction de <i>PAR</i> dans le couvert végétal

A partir d'une pluie, l'évaporation réelle du sol se fait en deux phases: ❶ l'évaporation est potentielle jusqu'à ce que le cumul d'évaporation journalière atteigne le seuil Q_0 (paramètre sol) qui est spécifique au type du sol (Ritchie, 1972) et ❷ l'évaporation est réduite en fonction du climat et du type de sol.

3.5.5.2.2 Besoins en eau des plantes - approche $k_c \cdot ETP$

La transpiration de la plante est simulée par une fonction linéaire de l'ETP, de l'indice foliaire (*LAI*), du coefficient cultural (k_{max}) et d'un facteur représentant la sécheresse du sol. L'absorption est calculée comme l'adéquation entre le besoin en eau des plantes (demande climatique) au niveau de l'appareil aérien, et l'offre en eau au niveau de l'appareil racinaire. Puis la répartition de cette absorption par couche élémentaire est estimée en fonction du profil de densité racinaire et de la teneur en eau du sol par rapport au point de flétrissement.

Le calcul des besoins en eau des plantes (transpiration maximale), par l'option de type coefficient cultural, se fait en plusieurs temps (Brisson et al., 1992). On calcule ce que serait l'évapotranspiration de la culture si l'ensemble des surfaces sol et plantes n'étaient pas limitées en eau (EO). Cette évapotranspiration est une fonction logistique de l'indice foliaire qui fait intervenir le paramètre $KMAX$, qui dépend de l'évapotranspiration de référence utilisée:

$$EO = TETP \left[1 + \frac{KMAX - 1}{1 + \exp(-1.5 LAI - 3)} \right] \quad \text{Équation 70}$$

EO variable intermédiaire pour le calcul d'évapotranspiration [$mm.j^{-1}$]
 $KMAX$ coefficient cultural maximal

La transpiration maximale (EOP) dépend de l'énergie disponible au niveau des plantes, estimée par la différence $EO-EOS$, mais aussi de l'état de l'atmosphère. Au pas de temps journalier, l'absorption racinaire peut être considérée égale à la transpiration foliaire. La transpiration relative, c'est à dire le rapport transpiration réelle sur transpiration maximale (EP/EOP), est une fonction bilinéaire de la teneur en eau disponible dans la zone racinaire, définie en tenant compte du point de flétrissement permanent ($HMIN$).

Les indices de stress hydrique qui jouent sur la croissance de la plante sont déduits des calculs précédents:

$$SWFAC = EP / EOP \quad \text{Équation 71}$$

3.5.5.3 Drainage

La percolation a lieu dans chaque couche quand la teneur en eau du sol excède la capacité au champ. L'eau est drainée jusqu'au moment où le volume stocké revient à cette capacité (Brisson et al., 1992).

La description du sol peut comporter jusqu'à 4 compartiments: la microporosité, la macroporosité, les fissures (cas des sols argileux gonflants) et les cailloux. Seule la description de la microporosité est obligatoire, les autres sont facultatives. Le compartiment de macroporosité est discrétisé par horizon (mais non par couche de 1 cm comme le compartiment de microporosité standard) tandis que les fentes correspondent à une entité unique. Evidemment cette décomposition est arbitraire; elle ne se justifie que par la commodité de modélisation qu'elle permet. Dans le cas étudié seul le compartiment microporosité a été utilisé.

Comme déjà évoqué, le transfert de l'eau dans la microporosité du sol est calculé par couche élémentaire de 1 cm en utilisant une analogie de type réservoir. Les apports d'eau remplissent les couches en cascade, où la limite supérieure de chaque réservoir élémentaire correspond à la capacité au champ de la couche. Le modèle estime la percolation en fonction de la précipitation, des caractéristiques permanentes des couches élémentaires (type du sol, densité apparente de l'horizon, de la végétation et de l'humidité du sol, prenant en compte les humidités à capacité au champ et au point de flétrissement.

S'il n'y a pas d'obstacle à l'écoulement, l'eau excédentaire par rapport à la capacité au champ est drainée. En surface, le sol peut se dessécher jusqu'à l'humidité résiduelle en fonction de l'évaporation du sol.

3.5.6 Bilan d'azote

STICS prend en compte seulement l'azote comme nutriment (présent dans le sol ou additionné comme engrais) et il calcule la concentration en azote de la solution du sol par couche.

Les processus du cycle de l'azote simulés par le modèle incluent la fertilisation, la fixation de l'azote, l'azote apporté par la pluie, la minéralisation, la dénitrification, l'immobilisation, le lessivage et le prélèvement par la plante. Par contre, le transport des nitrates par ruissellement et par évaporation du sol, et la migration de l'azote organique par les sédiments ne sont pas pris en compte (Figure 61).

3.5.6.1 Apports d'engrais minéraux

Comme pour l'eau, les doses apportées de fertilisant peuvent être imposées en entrée ou calculées par le modèle.

- ❶ Option fertilisations lues: le modèle utilise un calendrier de fertilisations donné en entrée (ANIT, dans le fichier des techniques).
- ❷ Option fertilisations calculées: le modèle calcule automatiquement les apports de façon à satisfaire les besoins en azote (paramètre *RATIOLN*), à condition qu'il n'y ait pas eu d'apport la veille.

<i>RATIOLN</i>	<i>taux de satisfaction des besoins en azote</i>
<i>INNS</i>	<i>stress azoté</i>

Le modèle déclenche une fertilisation de dose constante et définie par le paramètre *DOSIMXN* chaque fois que $INNS < RATIOLN$. En outre, les apports d'engrais peuvent se faire en surface ou en profondeur. Ces apports à chaque pas de temps (*PRECIPN*) sont calculés comme suit :

$$PRECIPN = TRR \times CONCRR + ANIT \times EFFN + AIRG \times CONCIRR \quad \text{Équation 72}$$

<i>TRR</i>	<i>précipitation du jour [mm]</i>
<i>CONCRR</i>	<i>concentration en azote des eaux de pluies [0.02 kg N ha⁻¹ mm⁻¹]</i>
<i>AIRG</i>	<i>irrigations [mm]</i>
<i>ANIT</i>	<i>fertilisations [kg N ha⁻¹]</i>
<i>CONCIRR</i>	<i>concentration en azote des eaux d'irrigation [kg N ha⁻¹ mm⁻¹]</i>
<i>EFFN</i>	<i>efficacité de la fertilisation, paramètre qui permet de prendre en compte empiriquement les pertes par volatilisation ou dénitrification</i>

3.5.6.2 Minéralisation

La minéralisation nette d'azote du sol est la somme de 2 composantes:

- ❶ **minéralisation de l'humus:** décomposition de la matière organique humifiée du sol. C'est un processus permanent, ayant une valeur toujours positive.

② **minéralisation des résidus:** décomposition des résidus de culture ou des amendements organiques apportés au sol. C'est un processus d'intensité variable, lié au rythme des apports organiques. Suite à l'incorporation de résidus, la minéralisation est en général d'abord négative (organisation de l'azote minéral du sol) puis positive (reminéralisation de l'azote microbien du résidu ou du sol) (Mary et al., 1996).

Les calculs de minéralisation sont réalisés par couche élémentaire dans l'horizon labouré pour l'humus, et sur la profondeur d'incorporation pour les résidus.

3.5.6.2.1 Minéralisation de l'humus

La minéralisation de l'humus dépend à la fois des caractéristiques permanentes du sol (stock d'azote organique humifié, taux d'argile et calcaire) et des fluctuations de température et de teneur en eau des couches du sol. Par contre, le travail du sol est supposé ne pas influencer directement la minéralisation de l'humus. Le rapport N/C (azote organique/carbone organique) de la matière organique humifiée est supposé constant, égal à Wh qui est proche de 0.105.

Le modèle demande une grande quantité de variables d'entrée pour le calcul de la minéralisation. Ces variables doivent être bien vérifiées avant d'entreprendre le calage de la minéralisation.

3.5.6.2.2 Minéralisation des résidus organiques

STICS simule la décomposition des divers résidus organiques par la biomasse microbienne et leur humification. La décomposition et par suite la minéralisation de l'azote dépend des rapports N/C des résidus, de la biomasse et de l'humus formé. La vitesse de décomposition des résidus est fonction de la nature des résidus organiques, de leur profondeur d'incorporation dans le sol (*PROFTRAV*), de la température et de l'humidité du sol.

La minéralisation nette d'azote (positive ou négative) résultant de la décomposition des résidus est calculée en fonction du rapport C/N des trois compartiments: résidus, biomasse microbienne, humus. L'azote minéral du sol contenu dans la zone où se trouvent les résidus organiques en décomposition peut être un facteur limitant de la décomposition.

3.5.6.3 Prélèvement d'azote par la culture

Le processus d'absorption de nutriments par le système racinaire d'une plante est un phénomène encore assez mal connu actuellement. La notion de demande potentielle pour un nutriment donné est nécessaire à la mise en œuvre de la plupart des modèles de culture.

Le prélèvement des nitrates est contrôlé par la demande de la plante et par la réserve en nutriments du sol. Dans STICS l'absorption d'azote par le système racinaire est calculé en comparant chaque jour l'offre du sol à la demande de la culture, la vitesse d'absorption étant la valeur minimale de ces deux termes.

3.5.6.3.1 Demande d'azote par la plante

La demande d'azote par la culture est la limite supérieure de l'absorption. Cette demande est basée sur l'âge phénologique de la plante et sur la concentration critique de nitrate qui lui est propre, et dépend également de la concentration de l'azote présent dans la culture. La fonction de demande potentielle décrit le flux d'absorption par la plante dans des conditions de non limitation du transfert d'ions vers le système racinaire. Cette demande est en pratique réduite par les conditions de stress vis à vis du manque en nutriment que connaît la plante à chaque instant de son développement.

La demande de la culture est estimée en utilisant le concept de courbe de dilution « maximale »:

$$\text{si } MASEC < 1 \rightarrow DEMANDE = ADILMAX * DLTAMS \quad \text{Équation 73}$$

$$\text{si } MASEC \geq 1 \rightarrow DEMANDE = ADILMAX * DLTAMS * (1 - BDILMAX) * MASEC^{(-BDILMAX)} \quad \text{Équation 74}$$

ADILMAX paramètre de la courbe de dilution maximale [N plante]
BDILMAX paramètre de la courbe de dilution maximale [N plante]
DLTAMS vitesse de croissance de la plante [th⁻¹j⁻¹]

La courbe établie pour différentes plantes au stade végétatif est considérée valable aussi au stade reproductif (Plénet, 1996).

3.5.6.3.2 Offre d'azote du sol

L'offre au niveau du système sol - racine est fonction de la concentration de l'azote minéral et de la disponibilité en eau. L'offre du sol est calculée par couche élémentaire de 1 cm jusqu'à la profondeur maximale du système racinaire. Le flux potentiel d'absorption d'azote est décomposé en deux flux disposés « en série »: une composante correspondant au transport des nitrates jusqu'aux sites d'absorption racinaire (*FLUXSOL*), et une composante d'absorption au sens strict représentant le contrôle biologique exercé par la plante sur l'entrée des nitrates (*FLUXRAC*).

La composante de transport comporte elle-même une partie diffusivité et une partie convective. Dans chaque couche élémentaire, le flux convectif est le produit du flux d'eau de transpiration et de la concentration en nitrate de la couche. Ce flux est nul lorsque la transpiration est nulle (absence de racines ou stress hydrique). Le flux diffusif dépend de la densité racinaire, de l'humidité du sol et de la concentration en nitrate du sol. Quand l'humidité du sol est proche de la capacité au champ, le coefficient de diffusion (*DIFN*) varie entre 0.08 et 0.26 cm².j⁻¹ selon certains auteurs, alors qu'une valeur moyenne de 0.21 cm².j⁻¹ a été retenue pour le modèle STICS (Brisson et al., 1998).

L'absorption active par la racine est un processus physiologique actif de la plante et ce flux dépend de la capacité intrinsèque d'absorption, de la densité racinaire et de la concentration en nitrate dans le milieu extérieur. La composante biologique (*FLUCRAC*) est estimée par une double cinétique enzymatique:

$$FLUXRAC = CONC_N(Z) * LRAC(Z) * \left[\frac{VMAX_1}{KMABS_1 + CONC_N(Z)} + \frac{VMAX_2}{KMABS_2 + CONC_N(Z)} \right] \quad \text{Équation 75}$$

<i>FLUXSOL</i>	<i>flux d'absorption passive d'azote (flux de transpiration) [kgN/ha/j]</i>
<i>FLUXRAC</i>	<i>flux d'absorption active d'azote [kgN/ha/j]</i>
<i>VMAX1</i>	<i>vitesse maximale d'absorption du nitrate à forte affinité des racines [$\mu\text{mol.cm}^{-1}$]</i>
<i>VMAX2</i>	<i>vitesse maximale d'absorption du nitrate à faible affinité des racines [$\mu\text{mol.cm}^{-1}$]</i>
<i>KMABS1</i>	<i>constante d'affinité du nitrate par le système d'absorption 1 [$\mu\text{mol.cm racines}^{-1}$]</i>
<i>KMABS2</i>	<i>constante d'affinité du nitrate par le système d'absorption 2 [$\mu\text{mol.cm racines}^{-1}$]</i>

L'offre élémentaire (sur chaque couche) correspond au minimum de ces deux flux et elle est comparée à la demande globale de la plante:

$$\text{offre totale} = \sum \min(\text{FLUXSOL}; \text{FLUXRAC}) \quad \text{Équation 76}$$

$$\text{si offre} < \text{demande} \rightarrow \text{absorption} = \text{offre} \quad \text{si offre} > \text{demande} \rightarrow \text{absorption} = \text{demande} \quad \text{Équation 77}$$

3.5.6.3.3 Indice de nutrition azotée

La comparaison entre la teneur en azote de la plante et la teneur critique donne une indication sur l'intensité du déficit. La concentration relative en azote (ou l'indice de nutrition azotée (INN)) est définie comme le rapport entre la teneur en azote mesurée à un niveau de production donné et la teneur critique (NC) à cette même production. La teneur en azote critique, au-dessous la quelle la croissance de la plante diminue, dépend de la biomasse accumulée et de l'espèce:

$$\text{si } \text{MASEC} < 1 \rightarrow \text{NC} = \text{ADIL} \quad \text{si } \text{MASEC} \geq 1 \rightarrow \text{NC} = \text{ADIL} * \text{MASEC}^{-\text{BDIL}} \quad \text{Équation 78}$$

<i>NC</i>	<i>teneur en azote critique [%]</i>
<i>ADIL</i>	<i>paramètre de la courbe de dilution critique [N % MS]</i>
<i>BDIL</i>	<i>paramètre de la courbe de dilution critique [N % MS]</i>

L'indice de nutrition azotée (INN) est considéré comme optimal pour la croissance à la date de la mesure quand il est voisin de 1. L'indice de stress azoté (INNS) est calculé par la formule:

$$\text{INNS} = \min(1; \text{INN}) \quad \text{Équation 79}$$

3.5.6.4 Lessivage de l'azote

Les nitrates présents dans le sol non utilisés par la plante sont transportés avec l'eau. Ces deux éléments sont supposés se mélanger de façon homogène dans chaque couche élémentaire, et l'azote lessivé correspond au produit de la concentration avec l'eau drainée. Le modèle prend en compte seulement les mouvements convectifs de nitrate et non ceux résultant de la diffusion.

La concentration en azote de la solution du sol dans chaque couche est définie comme le rapport entre quantité d'azote et quantité d'eau de la même couche. L'azote lessivé correspond au produit de la concentration avec l'eau de drainage provenant de la couche au dessus. Les quantités d'eau et d'azote lessivées sont cumulées sur la période de simulation.

3.6 RESULTATS DE LA SIMULATION PAR RAIEOPT

La version M2P du modèle Raieopt a été utilisée pour évaluer les apports d'eau en raies bouchées sur l'expérimentation réalisée sur la station du Cemagref Montpellier. Le nombre d'irrigation était limité à trois, comme nous l'avons déjà indiqué, aussi il n'a pas paru possible d'utiliser la version prédictive du modèle calée sur une partie des irrigations afin de la valider sur les autres. Afin de disposer des évaluations les plus précises possibles des doses apportées sur les sites de mesures du billon (« amont », « moyen » et « aval »), un calage a été réalisé sur chaque irrigation. A titre de validation, une comparaison des doses estimées par le modèle avec celles calculées par bilan hydrique sur les sites de mesures est ensuite réalisée.

3.6.1 Calage du modèle

3.6.1.1 Calcul des coefficients B et Cs

Afin de caractériser le comportement des deux traitements vis à vis de l'irrigation, les paramètres B et C_s du modèle Raieopt (Équation 40), ont été calés à partir des avancements des irrigations observés sur la parcelle (Grattard, 1999). Les valeurs de ces paramètres ont été obtenues pour chaque raie, on dispose donc pour chaque arrosage d'un échantillon de N couples de B et C_s (N raies) dont on peut déduire la moyenne et le coefficient de variation (Tableau 55).

Tableau 55 Valeurs moyennes et () coefficient de variation des paramètres B et C_s

Traitement	N° d'irrigation	Nbr raies suivies	Débit (l/s)	Temps d'irrigation (min)	B (l/m)	C_s (l/m/mn)
T_e	1	15	1.15	170	75 (18 %)	0.22 (25 %)
	2	30	0.75	278	68 (15 %)	0.14 (20 %)
	3	30	1.08	155	48 (16 %)	0.18 (20 %)
T_a	1	15	1.21	121	28 (18 %)	0.21 (25 %)
	2	30	0.76	160	20 (16 %)	0.18 (25 %)
	3	30	0.78	120	16 (14 %)	0.18 (22 %)

On peut noter que sur le traitement T_e le paramètre B est largement supérieur à celui des autres traitements. L'effet macro-pore prédominant semble constituer l'explication majeure de cet état de fait. Les effets capillaires sont en outre plus marqués sur T_e que sur T_a en raison du taux d'argile plus élevé sur T_e (expliquant de plus la présence des fissures). Ces différences sont en accord avec l'expression de B , proposé dans l'approche prédictive de Raieopt, qui prévoit qu'à humidité initiale comparable entre traitements, B affiche des valeurs beaucoup plus faibles sur T_a que sur T_e . C'est que la longueur capillaire pour un limon (T_a) est largement inférieure à celle d'un sol à tendance argileuse (T_e), et en outre fissuré. Sur l'exemple du 3^{ème} arrosage pour une valeur de $\Delta\theta=0.18$, au site central de T_a sur une profondeur d'un mètre, on déduit une valeur de $\lambda_c=10$ cm (Mailhol et al., 2001). Cette valeur est conforme à celle que propose la littérature pour le limon. La même opération effectuée sur T_e donne

une valeur de λ_c de 44 cm. Cette valeur élevée, même pour un sol à tendance argileuse, est à imputer assurément à un effet macro-pore important.

Notons que les valeurs de C_s (l/m/min) obtenues pour Ta sont tout à fait comparables aux valeurs de K_s obtenues par la méthode du drainage interne (Revol, 1991) sur la partie limoneuse de Lavalette ($K_s = 1.4 \text{ cm/h} : 0.18 \text{ l/m/min}$ pour $E_c = 0.8 \text{ m}$). On observe aussi que le coefficient B varie d'une irrigation à l'autre, à la faveur de conditions d'humidité du sol différentes, mais aussi parce que les propriétés hydrodynamiques du sol évoluent. Comme déjà signalé, cette évolution est surtout manifeste entre le premier et second arrosage (restructuration de la matrice poreuse) dans le cas de Ta ; l'évolution est plus difficile à interpréter sur Te .

La variabilité des paramètres reste modérée et du même ordre de grandeur sur les deux parties de la parcelle. Le coefficient de variation de C_s reste faible par rapport à ceux rapportés dans la littérature pour K_s ; cela est dû au fait que C_s est en fait un paramètre intégrateur de l'infiltrabilité sur toute la longueur de la raie (ici 130 m).

3.6.1.2 Simulation de l'avancement de l'irrigation

Le Tableau 56 illustre sur les raies correspondant aux sites de mesure, le fait que *Raieopt* simule l'avancement de façon satisfaisante. Le calage apparaît donc acceptable, cependant si la simulation de

Tableau 56 Comparaison des temps d'arrivée mesurées et simulées (min)

Irrigation		Ta - R60	Te - R24	Te - R25
2 ^{ième}	mesuré	121	267	270
	Raieopt	121	276	278
3 ^{ième}	mesuré	84	126	133
	Raieopt	82	125	136

l'avancement est une condition nécessaire pour que le profil de la dose soit correctement simulée, elle n'est pas forcément suffisante compte tenu que la différence de dose entre abscisses repose essentiellement sur le temps

d'opportunité pour les abscisses échappant à l'endiguement. Pour les abscisses appartenant à la zone endiguée, la pertinence du profil de la dose dépend de la capacité du modèle à correctement simuler l'infiltration en raie bouchée (Mailhol et al., 1997).

3.6.2 Simulation de l'apport d'eau par le modèle Raieopt

Nous disposons de données sur l'avancement et sur le débit d'entrée de toutes les raies de la seconde et troisième irrigation. Le modèle *Raieopt* calcule les paramètres de la loi d'infiltration à partir des avancements observés et simule le profil de la dose infiltrée. Il est donc possible de comparer la dose simulée et la dose mesurée sur les différents sites équipés par des sondes TDR Campbell et Trase ou de tubes d'accès neutronique.

3.6.2.1 Comparaison des doses observées et simulées sur les sites TDR

Sur le site *Ta-moyen*, les données TDR dans la raie 60, fournies de sondes Campbell CS615 jusqu'à 120 cm, ont été recueillies à partir de la deuxième irrigation, au pas de temps de l'heure. Il a donc été possible de suivre le stock d'eau et de déterminer sa variation après les irrigations 2 et 3.

A proximité du site *Te-aval*, dans la raie 24, un site de TDR TRASE équivalent a par contre fait l'objet d'un suivi manuel pendant les irrigations seulement. Il permet aussi de calculer un accroissement du stock sur 120 cm.

Tableau 57 Comparaison des doses d'eau apportées mesurées par les sondes et simulées (mm)

Irrigation	Site localisation	Ta-moy (TDR)	Te-aval (Trace)
		R60, 62 m	R24, 118 m
2 ^{ème}	mesuré	72	109
	Raieopt	73	107
3 ^{ème}	mesuré	44	158
	Raieopt	46	150

La comparaison avec les doses simulées par Raieopt (Tableau 57) fait apparaître un bon accord dans les deux cas²², le modèle fournit donc une simulation satisfaisante de la dose apportée.

3.6.2.2 Comparaison des doses simulées et calculées à partir des mesures neutroniques

Afin de ne pas détruire les sites de mesures et les raies, les mesures neutroniques n'ont pas été faites en fin d'irrigation qu'en bout de raie (site *Te-sup*) ou lors de la dernière irrigation en août pour une partie des sites. Pour des questions de durée des mesures et de personnel disponible, la mesure initial a été réalisée la veille de l'irrigation. Il a donc été tenu compte de la consommation en eau de la culture pour calculer, à partir du bilan hydrique en supposant un drainage nul, un minorant de la dose infiltré qui est comparé à la dose simulée par Raieopt (Tableau 58).

Tableau 58 Comparaison des doses calculées à partir des mesures à sonde à neutron et simulées par Raieopt (en mm)

		mesure avant	mesure après	ΔS	ETR ou EP	dose sonde	dose Raieopt	dose brute
Irrig. 2: 23/7/99 de 10:08 à 15:08	Te-supl R25	21/7 15:45	23/7 18:05	87	15	102	134	130
Irrig. 3: 24/8/99 de 11:55 à 14:35	Te-supl R25	23/8 9:45	24/8 18:00	63	8	111	116	
	Te-aval R24	23/8 10:15	24/8 17:45	80	8	109	150	
	Te-aval B24/25	23/8 10:00	27/8 11:45	68	17	105	125	100
	Te-moy R25	23/8 10:30	24/8 16:30	63	8	72	85	
	Te-moy B24/25	23/8 10:45	24/8 16:45	87	8	95	87	

* numéro de la raie dans laquelle se trouve le site

** le billon se trouve entre deux raies, la dose indiquée est la moyenne des valeurs simulées pour les deux raies

Il apparaît que les ordres de grandeur sont respectés, les deux séries de valeurs ne sont pas aussi proches que pour les mesures TDR. Toutes les valeurs calculées sont inférieures à celles simulées sauf pour *Te-moyen-billon*, mais dans ce cas, les différences sont probablement inférieures à l'incertitude de mesure. Il faut tenir compte du fait que les sites *Te* sur lesquels les mesures sont disponibles, sont soumises au drainage (2.4.3.2.1.3), qui n'a pas été pris en compte car il est difficile à calculer sur un

pas de temps court. D'autre part une incertitude importante existe sur ces sites pour la première cote de mesure neutronique et pourrait en partie expliquer cet écart.

Il n'est pas possible d'effectuer des comparaisons dans les autres cas par suite de l'erreur induite pour l'impossibilité de connaître la répartition des prélèvements de la culture entre raie et billon sur des périodes de plusieurs jours, ainsi que les transferts entre raie et billon.

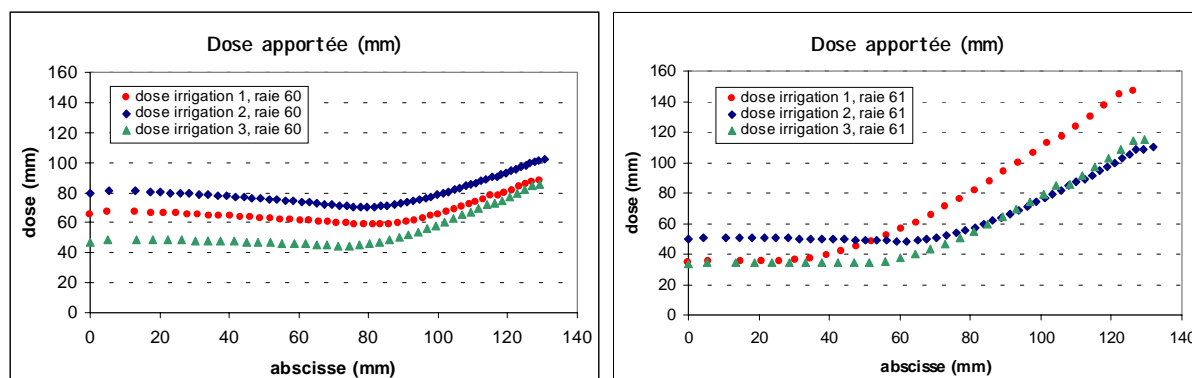
Ces rapprochements montrent les difficultés d'évaluation des doses par suivis discontinus des humidités dans la raie (et sous le billon). Seuls des suivis en continu permettent dans les cas favorables d'accéder aux doses infiltrées en un point donné. Par ailleurs, les simulations des doses par Raieopt sont dans tous les cas cohérentes avec la dose brute moyenne, aussi bien pour les exemples présentés ici que pour les différentes simulations de doses apportées effectuées dans ce travail.

3.6.2.3 Hétérogénéité des doses simulées

En raies bouchées, comme évoqué au chapitre I, selon l'importance du temps d'irrigation, les apports sont variables entre l'amont et l'aval de la raie, et la dose la plus faible peut être apportée en milieu de raie. Les différences entre amont et aval sont plus ou moins accentuées selon les raies et selon les arrosages (Grattard, 1999).

La *Figure 63* présente les deux raies encadrant les sites de mesures sur les traitement Ta. On note que ces deux sites ont un comportement différent: la raie 61 avance beaucoup plus vite que la raie 60. Il en résulte un profil de dose différent, avec des doses plus fortes en aval de la raie 61, dans le contexte de la raie bouchée.

Figure 63 Variabilité des doses apportées le long de la raie et entre les raies



Les profils des doses, illustré par les courbes quasiment parallèles, confirment la tendance du comportement identique au cours de la campagne d'irrigation. Ainsi, par exemple, les doses apportées sur la raie 60 sont toujours plus ou moins homogènes avec l'apport maximal en bout de raie. Sur la raie 61, l'hétérogénéité des apports est nettement supérieure par rapport à celle observée sur la raie 60 et ce, pendant toute la campagne.

²² Les valeurs n'ont pas été corrigées des pertes par évapotranspiration pendant l'irrigation qui sont de l'ordre de 3 à 4 mm.

3.6.3 Conclusion des simulations avec Raieopt

La comparaison des apports observés et simulés montre que le modèle permet de rendre compte de manière satisfaisante des apports sur les sites concernés. Il convient de remarquer que cette comparaison n'a pu être effectuée qu'en bout de raie ou sur le site où on disposait d'une centrale de acquisitions permettant la saisie automatique de mesures, du fait que la parcelle n'était pas accessible à la fin des irrigations.

Pour améliorer le calage du modèle d'irrigation à la raie, il serait important de mesurer les flux de manière automatique au cours de l'irrigation. Il faudrait disposer de mesures d'humidité juste après l'irrigation, en plusieurs points de la raie pour pouvoir vérifier la forme du profil de dose infiltrée simulée par le modèle. Un complément d'étalonnage de l'humidimètre à neutrons permettrait d'améliorer l'estimation des stocks d'eau en particulier en surface.

Enfin, la confrontation entre valeurs moyennes des paramètres du modèle issues du calage avec ceux caractérisant le milieu poreux non saturé (λ_c , K_s) témoigne du caractère prédictif du modèle Raieopt. Ce constat milite en faveur du couplage avec un modèle de culture tel que STICS, pour simuler l'impact des pratiques d'irrigation sur l'efficacité hydraulique et le rendement de la culture.

3.7 RESULTATS DU CALAGE ET VALIDATION DU STICS

Comme cela a déjà été évoqué, le calage du modèle a été effectué sur l'année 1998, sur les traitements *ETM* et *ON*. La validation a été réalisée sur les années 1997 et 1999.

3.7.1 Préparation des fichiers d'entrée du modèle

3.7.1.1 Fichier sol

Les informations concernant les caractéristiques permanentes du sol sont introduites dans le fichier [param.sol] Le *Tableau 59* présente les caractéristiques de la couche de surface du sol utilisées lors du calage et de la validation.

Tableau 59 Caractéristiques de la couche de surface du sol utilisées lors des simulations

Paramètre	Définition	valeur
argi	teneur en argile de la couche de surface (%)	18 ou 22
Norg	teneur en azote organique dans l'horizon d'humification (% pondéral)	0.09
calc	teneur en calcaire dans la couche de surface (%)	50
albedo	albédo du sol nu à l'état sec (SD)	0.15
q0	limite d'évaporation de la phase potentielle d'évaporation du sol (mm)	8
profhum	profondeur équivalente d'humification (cm)	30
obstarac	obstacle à l'enracinement (cm)	200
epc	épaisseur des horizons (cm)	30
HCCF	humidité à la capacité au champ (g g ⁻¹)	selon horizon
HMINF	humidité minimale exploitable par la plante (g g ⁻¹)	selon horizon
DAF	densité apparente de la terre fine des horizons	selon horizon

Deux types de sol ont été définis, selon leur teneur en argile de la couche de surface: l'un avec un taux d'argile de 18 % et l'autre avec 22 %, selon les mesures effectuées sur la parcelle expérimentale.

Nous avons constaté lors de ce travail que la qualité des simulations dépend largement de la pertinence des données introduites dans le fichier « sol ». Ainsi comme le font remarquer Cabelguenne et al. (1988),

à défaut de mesures fiables, l'observation et une connaissance du terrain sont essentiels: il faut absolument éviter les valeurs douteuses. Les humidités caractéristiques du sol sont les données indispensables pour les modèles de type réservoir, les prédictions par le modèle étant très sensibles à ces valeurs (Izadi et al, 1996 b).

L'étape délicate des simulations consiste dans la procédure d'initialisation du modèle (Ponsardin et al., 2000). Les données nécessaires pour les initialisations, sont les valeurs initiales de l'humidité (en % pondéral) et du stock d'azote (en kg N/ha) par couche d'épaisseur choisie par l'utilisateur (mais qui doit être la même que celles du fichier du sol). Nous disposons des mesures d'humidité et du stock d'azote avant le semis sur tous les sites de notre parcelle en 1999, par contre en 1998 les premiers prélèvements ont été réalisés quelques jours après le semis, raison pour laquelle nous avons dû ajuster les valeurs initiales.

3.7.1.2 Fichier climat

Les variables d'entrée du modèle sont des variables climatiques simples (rayonnement, température maximale et minimale, précipitations) ou élaborées (ETP). Le module climatique de STICS a été utilisé pour élaborer les fichiers correspondants aux trois années analysées dans ce rapport (1997, 1998, 1999).

3.7.1.3 Fichier technique

Les paramètres dans le fichier technique sont regroupés par grandes fonctions: semis, stades, fertilisation, irrigation, techniques particulières, travail du sol et apports des résidus organiques. Dans la version STICS-4 il y a la possibilité de démarrer les simulations à partir de n'importe quel stade du développement de la plante (si on dispose des données correspondantes). Cependant nos simulations démarrent toujours avant le semis. Seule la date de semis et la date de récolte butoir sont obligatoires pour simuler une culture à l'aide des paramètres du fichier plante. Chacun des stades de développement peut être imposé au modèle ou calculé par le modèle indépendamment des autres stades.

Pour l'irrigation et à la fertilisation, les données utilisées sont celles du chapitre II. La profondeur de mesure de la réserve en eau et en azote du sol, paramètre PROFMES, a été fixé à 1.4 m, en considérant que la profondeur maximale du maïs est de 120 cm, ainsi les stocks d'azote mesurés à cette profondeur sont perdus pour la culture.

Chaque année les résidus du maïs de l'année précédente ont été enfouis lors des travaux du sol pendant les mois de décembre ou de janvier. La question concernant la prise en compte des résidus dans les simulations se posait, étant donnée que de décembre à mai ces résidus pouvait être déjà minéralisés, donc quantifiés par les mesures du stock initial d'azote minéral du sol. Nous avons donc réalisé des simulations à partir de la récolte précédente où nous disposions des valeurs de stock d'eau et d'azote. Les résultats obtenus de ces simulations étant très similaires aux résultats obtenus sans résidus, les résidus culturaux n'ont pas été pris en compte dans nos simulations.

3.7.1.4 Fichier plante

Dans ce fichier sont définies les caractéristiques des espèces et des variétés. Les paramètres sont regroupés par les fonctions physiologiques suivantes. Un grand nombre de paramètres sont facultatifs, et leur utilisation dépendant de l'option de simulation, ils ne sont pas forcément activées pour la plante considérée.

Les paramètres introduits dans le fichier plante ne correspondait pas à la variété du maïs Samsara, cette variété n'étant pas parmi les variétés incluses dans le modèle. Etant donné que Samsara est une variété demi-tardive, la variété Furio, disponible dans le modèle, a été choisie comme variété de référence pour initialiser le travail de calage.

3.7.2 Calage du modèle STICS

Au début d'une simulation, beaucoup de paramètres peuvent être mal définis, et on doit recourir au calage du modèle. Au cours de cette opération, les paramètres manquant sont estimés indirectement, à l'aide de la résolution d'un problème inverse, où le modèle est utilisé pour estimer les paramètres à partir de données mesurées. Mais la procédure utilisée pour le calage de STICS s'est aussi basée sur la recherche bibliographique.

Pour ce travail il est nécessaire de simuler l'effet de l'hétérogénéité des apports d'eau sur le rendement et le lessivage d'azote. A cette fin, le calage de STICS a été effectué par modification des paramètres concernant la plante (principalement les paramètres variétaux) afin de tenter de faire correspondre les résultats observés et simulés pour des cas correspondant aux conditions dans lesquelles il doit être utilisé.

3.7.2.1 Simulation avec le modèle sans calage

Les premières simulations ont été réalisées avec le modèle sans calage pour identifier les problèmes éventuels dans le cas de traitement sans stress (traitement *ETM*). Ensuite nous nous sommes préoccupés d'analyser des cas avec stress hydrique ou azoté. Comme déjà évoqué, nous avons commencé le calage avec les caractéristiques physiologiques de la culture correspondantes à la variété Furio.

Les résultats obtenus par simulation avec le modèle de culture ont été comparés à ceux obtenus par le modèle feuille. La particularité du modèle feuille est de pouvoir « forcer » la partie plante en imposant au modèle les indices foliaires observés, lorsque l'on s'intéresse uniquement aux bilan d'eau ou d'azote. Le *Tableau 60* présente les résultats de simulation avec les deux types de modèle.

Tableau 60 Résultats de simulation avec STICS sans calage

	ETM 1998			ETM 1999		
	STICS	STICS-feuille	observé	STICS	STICS-feuille	observé
Matière sèche	19.8	21.7	21.8	22.1	23.4	23.1
Rendement (0 %)	13.7	13.7	10.9	13.7	13.6	12.3
N dans plante	305	349	247	334	315	262

Plusieurs problèmes apparaissent: ❶ la quantité d'azote prélevé par la plante et le rendement sont surestimés par les deux modèles, ❷ la matière sèche est sous-estimée par le modèle de culture, ce qui est à relier au choix de la variété. On notera que l'écart est surtout manifeste au niveau du rendement en grain ce qui laisse supposer un problème lié à la simulation de l'indice de récolte. Par ailleurs la minéralisation simulée par les deux modèles est correcte: 140 kg N/ha pour la campagne de 1999, où on a observé pratiquement la même valeur.

3.7.2.2 Développement de la culture

Le développement de la culture pilote la consommation d'eau et l'absorption d'azote, raison pour la quelle son calage est important. Le calage est effectué sur le traitement *ETM* de l'année 1998, où aucun facteur limitant n'est susceptible de limiter le développement et donc d'affecter la LAI. Un calage « pas à pas » a été utilisé en ajustant l'ensemble des paramètres.

Le temps nécessaire à la levée est sous-estimé avec le modèle pour la parcelle d'étude²³ (somme de degré-jour nécessaire à levée de 95 en moyenne sur les trois années, qui correspond à *ILEV*). Un ajustement a été fait pour le paramètre *BELONG* (paramètre de la courbe d'élongation du coléoptile) de 0.022 à 0.010. Cependant le retard à la levée sur la partie Sud de la parcelle en 1999, qui a été irriguée 5-6 jours après le semis (2 jours après que la partie Nord) et où on a observé une levée retardée plusieurs jours par rapport à la partie Nord, n'est pas simulé. D'autre part les défauts de germination et la mort des plantules entre germination et levée n'étant pas pris en compte, la densité de plantes introduite comme paramètre d'entrée doit correspondre à une densité de plantes levées.

Les stades de développement correspondant aux stades végétatifs ont ensuite été calé l'aide de la courbe du LAI et de matière sèche observées, tandis que les paramètres des stades reproducteurs ont été établis en fondant sur les valeurs observées du rendement.

3.7.2.2.1 Croissance du LAI

Pour caler la courbe LAI, la fonction d'optimisation de STICS a été utilisée afin d'identifier les paramètres correspondant aux stades de développement. Un nombre suffisant d'observations étant disponible pendant la période de croissance foliaire, elles ont permis d'ajuster les paramètres correspondant à la croissance du LAI.

Les besoins en température pour atteindre la valeur stabilisée du LAI sont déduits comme proposé par Brissson et al (1992) des ceux nécessaires pour la floraison (980°C lors des trois campagnes pour la variété Samsara), diminués de 70 à 78°C (Tableau 61).

Tableau 61 Sommes de températures estimées à partir des observations (en base 6°C)

	1999	1998	1997		
Semis-levée	96	95	95	ILEV	95
Semis-floraison	977	983	982	ILEV-ILAX	810
Semis-maturité	1870	1870			

Le meilleur ajustement de la courbe de croissance du LAI est obtenu pour une valeur de *DLAIMAX* de $0.0016 \text{ m}^2\text{C}^{-1}$, déterminée

à partir d'un calage manuel. Cette valeur est supérieure à celle obtenue entre deux mesures successives, qui atteignait $0.0011 \text{ m}^2\text{C}^{-1}$, valeur que l'on retrouve aussi début juillet en 1999, mais il s'agit alors de valeurs moyennes. Remarquons que dans la version STICS3 la valeur proposée pour le maïs était 0.00138 et que la fonction d'optimisation du modèle STICS 4.0 fournissait *DLAIMAX*=0.001

$m^2\text{C}^{-1}$, mais l'ajustement obtenu n'était pas satisfaisant, le calage manuel a donc été conservé. Roche (2000) propose une modification du module de génération du LAI qui pourrait donner des résultats plus conformes aux attentes.

Pour le paramètre *STLEVAMF* nous avons trouvé des valeurs différentes dans la littérature: Lorgeou (1991) donne une fourchette de 175 à 310 selon la variété, Brisson et al. (1998) une valeur moyenne de 328, tandis que dans la version STICS-4, toutes les variétés de maïs ont une valeur de *STLEVAMF* égale à 400. En partant des valeurs initiales de 400°C pour *STLEVAMF* et *STAMFLAX*, la fonction d'optimisation de STICS fournit respectivement les valeurs de 350°C et 400°C. Il faut noter que les valeurs obtenues dépendent du choix des valeurs d'initialisation, mais elles sont cependant cohérentes avec des séries d'ajustements manuels.

3.7.2.2 Croissance en biomasse des parties aériennes

Le reste des paramètres correspondant au stades végétatifs a été calé par rapport à la quantité de la

Tableau 63 Longueurs calées de stades du développement de la culture

STEVAMF	STAMFLAX	STFLAXSEN	STSENLAN	STLEVDRP	STDRPMAT
350	400	830	300	1050	830

matière sèche (MS) à la récolte. On a ainsi déterminé *STLEVDRP* et *STDRPMAT* à partir du nombre limité de données disponibles. L'ensemble des paramètres est rassemblé au Tableau 63.

Tableau 62 Comparaison de la MS et du rendement observés et simulés sur le site ETM en 1998

	simulé	observé
MS	21.0	21.8
rendement	9.9	10.9

A l'aide de ces valeurs, nous pouvons dire que le modèle simule bien la matière sèche produite, par contre le rendement en grain est légèrement sous-estimé (Tableau 62). Il faut donc caler les para-

mètres influant sur le rendement. D'autre part, la matière sèche et le rendement intermédiaires (début août) ne sont pas bien simulés par le modèle, il conviendrait donc de poursuivre un processus itératif par la suite.

3.7.2.3 Elaboration du rendement

Selon les données disponibles, nous avons limité le nombre de grains par les paramètres nombre de grains minimum et maximum: $NBGRMIN=1500$ et $NBGRMAX=4500$. Le couple de valeurs de 125 et

Tableau 64 Ajustement du nombre de grains sur le site ETM-98

Nb grains simulé sans calage	4737
Nb grains simulé après calage	3880
Nb grains observé	3850

100, respectivement pour *CGRAIN* et *CGRAIN0*, fournissent une bonne évaluation pour la campagne 1998 (Tableau 64).

Nous avons observé en outre que le paramètre *NBJGRAIN* a peu d'influence sur le nombre de grains. De plus, l'augmentation du paramètre

²³ Cela peut être dû aux particularités pédoclimatiques de la parcelle située en bordure de rivière; la température utilisée est la température de l'air sous abri.

STLEVDRP diminue le nombre de grains par le fait qu'il détermine la date de début de remplissage des grains.

Après différents essais, en ce qui concerne l'indice de récolte sur lequel influent plusieurs paramètres, l'expression initiale du modèle pour *VITIRCARB* a été conservée en considérant que lors de travail le calage devait se limiter aux aspects concernant l'effet variétal. Il faut signaler que Nicoulaud (1998) a observé que le paramètre *VITICARB* peut avoir des valeurs différentes selon l'année (par exemple 0.010 en année froide et 0.014 en année chaude).

3.7.2.2.4 Croissance racinaire

Même si nous n'avons effectué que quelques mesures de la profondeur racinaire pendant les trois années d'études, nous disposons des valeurs tensiométriques qui permettent de situer le plan de flux nul, qui donne une indication sur la position du front racinaire. La profondeur racinaire maximale simulée par le modèle non calé est de 138 cm, alors que nous observons une profondeur maximale de 120 cm environ, à l'exception du site Sec. Pour simuler l'avancement du front racinaire de façon acceptable, il a été nécessaire de diminuer la vitesse de croissance racinaire (*CROIRAC*) de 0.15 à 0.14 cm/°C jour. Ainsi, la profondeur maximale simulée a été de 125 cm. Le modèle ne prenant pas en compte les remontées capillaires, le choix d'une profondeur racinaire « équivalente » est nécessaire dans certains cas de stress hydrique.

3.7.2.3 Calage du bilan d'azote

Par suite des écarts obtenus entre valeurs simulées et observées sur *ETM* pour les prélèvements d'azote par la plante (*Tableau 60*), il est apparu nécessaire d'analyser le comportement du modèle dans le cas d'un stress azoté.

Tableau 65 Résultats de simulation avec du module d'azote non calé du STICS

	ON 1998		ON 1999	
	STICS	Observé	STICS	observé
Matière sèche	15.9	9.9	19.4	12.0
N dans plante	169	91	205	79

Les résultats du *Tableau 65* confirment que la quantité d'azote prélevée par la culture est surestimée, ce qui semble avoir un effet manifeste de sur-

restimation de la production de la MS (et du rendement) en cas de stress azoté. Il s'est donc avéré nécessaire d'analyser le modèle d'absorption d'azote par la plante.

3.7.2.3.1 Analyse d'absorption d'azote par la plante

Etant donné que le modèle simule une absorption bien supérieure à celle observée sur le cas étudié, il en résulte que les cultures sous contrainte azotée (*ON*) ont tendance à avoir un rendement simulé supérieur à celui observé.

Nous avons vu que la quantité d'azote absorbée par le système racinaire est le minimum de l'offre du sol et de la demande de la culture. Etant donné que l'offre (minéralisation) est bien simulée par le modèle, il convient de caler les paramètres agissant sur l'absorption d'azote. La demande de la culture est estimée en utilisant le concept de courbe de dilution « maximale » dont deux paramètres peuvent être calés: *ADILMAX* et *BDILMAX*.

Selon Greenwood et al. (1990) les coefficients de dilution *BDILMAX* sont très voisins quel que soit le groupe métabolique et sont proches de 0.34. Plénet (1995) a estimé une valeur de *BDILMAX*=0.37 pour le maïs. En revanche, les coefficients *ADILMAX* sont différents selon les groupes métabolique: 5.7 pour les plantes C3 et 4.1 pour les plantes C4 (Lemaire et al., 1990). Nous proposons donc une nouvelle valeur seulement pour *ADILMAX* de 4.1 (valeur initiale = 5.44).

Il en résulte une forte réduction de la quantité d'azote dans la plante (*Tableau 66*). Une diminution limitée de la MS est simulée par les deux types de modèle. On peut donc considérer que la demande d'azote par la plante est bien simulée dans le cas où l'azote n'est pas le facteur limitant de la croissance.

Tableau 66 Valeurs mesurées et simulées après le calage de l'absorption d'azote par la plante sur les sites ETM et ON en 1998

	STICS		1998 ETM			1998 ON		
	avant	après	STICS-feuille		observé	STICS		observé
			avant	après		avant	après	
Matière sèche	19.8	19.4	21.7	21.2	21.8	15.9	15.7	9.9
N dans plante	305	239	349	253	247	169	169	91

En vérifiant le cas du stress azoté (*Tableau 66*), on peut observer que le MS et la quantité d'azote dans la plante n'a pas été modifiée; il est donc apparu nécessaire de s'intéresser à l'absorption active par les racines, qui est contrôlée par quatre paramètres: *VMAX1*, *VMAX2*, *KMABS1* et *KMABS2*.

Il apparaît que c'est plutôt le paramètre *VMAX1* qui doit être adapté, car il agit quand l'azote dans le sol est limitant. Le *Tableau 67* rassemble une brève analyse de sensibilité de la quantité d'azote dans

Tableau 67 Analyse de sensibilité des paramètres de la courbe de dilution

<i>VMAX1</i>	N dans «ETM»	N dans «ON»	<i>VMAX2</i>	N dans «ETM»	N dans «ON»
50 %	11 %	20 %	100 %	40 %	30 %
80 %	23 %	30 %	70 %	19 %	11 %

la plante en cas de stress (*ON*) et en cas de non stress (*ETM*), par rapport au changement de

VMAX1 et *VMAX2*. On note que les résultats confirment nos suppositions: le prélèvement de l'azote par la culture est affecté de manière plus significative par le paramètre *VMAX1* en cas de stress azoté.

Après plusieurs essais, le paramètre *VMAX1* a été fixé à 0.00018 (valeur initiale=0.0018). Le *Tableau*

Tableau 68 Valeurs simulées après le calage de l'absorption d'azote par la plante

	ETM 98	ON 98
MS	18.3	13.9
N culture	223	144

68 présente les valeurs de MS et azote dans la culture après le calage. La MS apparaît mieux simulée en cas de stress azoté, mais l'absorption d'azote reste excédentaire. Par contre, la diminution de la vitesse d'absorption

d'azote a occasionné un léger stress dans les cas de traitements *ETM* (INNS=0.93 à 0.95), avec une réduction de la production de MS de plus de 2 t/ha.

L'absorption de l'azote est difficile à simuler, car elle dépend fortement de la validité du modèle qui décrit le développement de la densité racinaire (Brisson, et al., 1998). On constate donc qu'il ne paraît pas possible de simuler exactement les quantités d'azote absorbées, par contre les ordres de grandeur sont respectés. Une itération pour recalibrer le développement de la culture apparaît nécessaire pour mieux simuler le MS sur le site *ETM*.

3.7.2.4 Réajustement du bilan de culture

Lors du calage initial du développement de la culture, la courbe d'évolution du LAI et de la MS ont été ajustées en adoptant la longueur des différentes phases du développement, ce qui ne paraît pas à remettre en cause. Par contre la croissance de la MS est aussi commandée par le *EFCROIVEG* (effi-

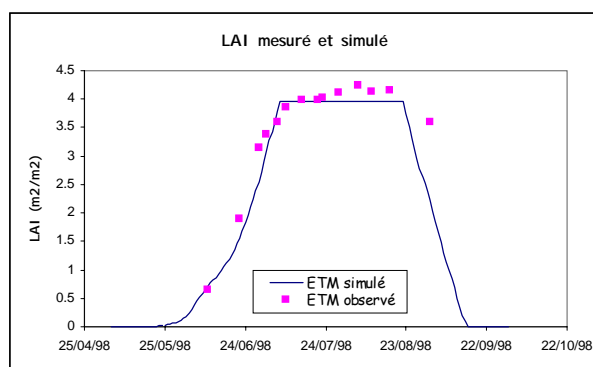
Tableau 69 Réajustement des longueurs calées de stades du développement de la culture

STEVAMF	STAMFLAX	STFLAXSEN	STSENLAN	STLEVDRP	STDRPMAT
280	500	820	350	1130	820

cience de croissance maximale pendant la phase végétative). Dans la version STICS-3, ce paramètre est proposé à 4.2, tandis que dans la version STICS-4, il a une valeur de 3.8. L'utilisation d'une valeur intermédiaire de 4.0, conduit à une légère modification des longueurs des stades (Tableau 69).

La Figure 64 montre un ajustement assez satisfaisant de la courbe du LAI simulé, avec cependant un

Figure 64 Comparaison de l'évolution de LAI simulée et mesurée



écart vers la sénescence, mais les mesures sont insuffisantes en nombre et en fiabilité.

En fin, la comparaison des rendements et de la quantité d'azote absorbée simulées et mesurées (Tableau 70) montre que les résultats sont acceptable pour le traitement à *ETM*, mais trop élevées pour celui à *ON*.

Tableau 70 Résultats de simulation après le calage de STICS

	ETM 1998		ON 1998	
	STICS	observé	STICS	observé
Matière sèche	21.1	21.8	15.2	9.9
Rendement (15 %)	12.1	12.5	9.5	5.8
N dans plante	252	247	154	91

3.7.2.5 Conclusions sur la partie calage du STICS

Le calage d'un modèle avec beaucoup de paramètres est délicat. Les interactions entre paramètres ne doivent pas être négligées (Ruguet et Brisson, 2000). Nous avons constaté que plusieurs combinaisons des différents paramètres peuvent conduire à des résultats de simulations similaires, comme ça a été observé par exemple par Normand (1996), avec le modèle WAVE.

On remarque, selon les conditions de simulation de culture, que ce n'est pas toujours le même paramètre qui apparaît comme le plus important, d'où l'importance d'une bonne prise en compte de ces conditions (Ruguet et Brisson, 2000). Afin d'accéder au bilan d'azote, ainsi nous nous sommes limités à caler principalement les paramètres intervenant dans ce module, aussi que dans celui de l'évaluation de la production. Il est vrai que c'est le drainage qui conditionne le lessivage, donc la bonne simulation du bilan hydrique est aussi très importante. Mais selon les résultats obtenus par les autres utilisateurs de STICS (Ponsardin, 1999; Pierre et Pons, 2000) le modèle donne une relativement bonne représentation du fonctionnement hydrique du sol (état hydrique, saison de drainage). Par contre, selon les mêmes auteurs, la modélisation de l'azote dans le sol (profils azoté, lessivage) n'a pas encore apporté les mêmes satisfactions. Nos résultats obtenus lors des simulations avec le modèle sans calage ont confirmé ses observations.

Après un calage fastidieux relatifs à plusieurs paramètres, les améliorations ont été obtenues au prix de compromis à valider. Ainsi pour retrouver la quantité d'azote prélevée par la plante, le modèle simule un léger stress azoté pour traitement *ETM* et le cas sans azote ne peut pas être simulé de manière satisfaisante.

3.7.3 Validation du modèle STICS sur les sites « en aspersion » en 1997, 1998 et 1999

Comme déjà évoqué, un modèle est une représentation simplifiée du système étudié, de telle sorte que les sorties du modèle sont nécessairement différentes des sorties du système observé. En ce sens, Normand (1996) préfère employer le terme d'évaluation plutôt que de validation. Afin de pouvoir analyser la qualité de l'évaluation, un critère de validation doit être défini, dépendant de la qualité des données expérimentales dont on dispose et de la différence qu'on accepte entre résultat de simulation et mesure. Il est indiscutable, que l'absence d'erreur de mesure est peu plausible dans les systèmes naturels complexes, et multiplier les mesures n'est pas toujours réaliste.

Lorsque à la fois le modèle et le système réel sont considérés déterministes, la différence arithmétique entre une variable simulée et mesurée constitue l'évaluation la plus directe. A partir de là, les performances du modèle peuvent être évaluées à l'aide de critères statistiques, associés à une comparaison graphique entre les évolutions temporelles d'une variable mesurée et simulée à différentes profondeurs, qui peut donner un bon aperçu qualitatif, même si elle est sujette à l'interprétation personnelle de l'utilisateur.

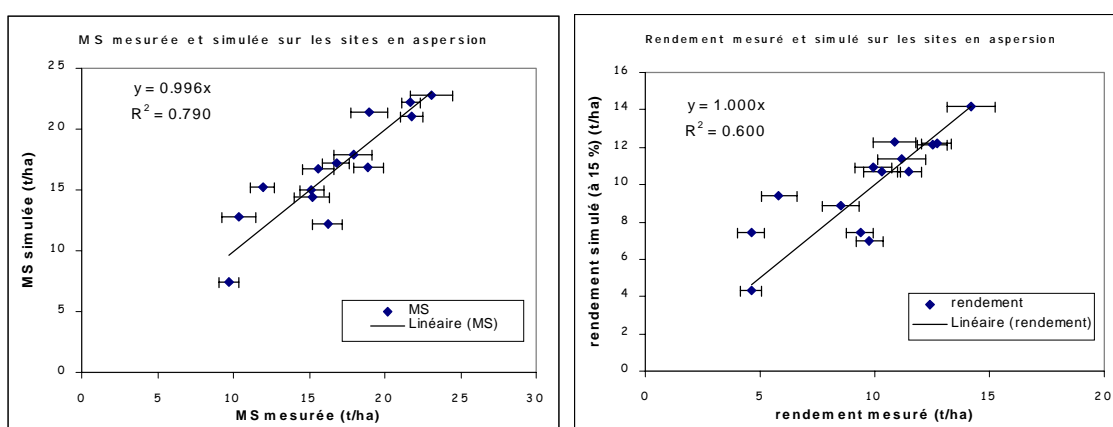
3.7.3.1 Développement de la plante et rendement

La performance d'un modèle de culture se juge en comparant les rendements simulés et observés. Pour évaluer la performance du sous-modèle plante, nous disposons des données expérimentales des années 1997, 1998 et 1999, concernant des traitements différenciés par les doses d'irrigation et d'azote.

3.7.3.1.1 Production de la MS et rendement

Nous avons comparé le rendement en matière sèche et en grains simulés et observés sur tous les traitements en irrigation en aspersion. Les données simulées sont reportées en fonction des données mesurées (présentées par les valeurs moyennes et les écart types) (Figure 65).

Figure 65 Comparaison des rendements en MS et en grains simulés et mesurés

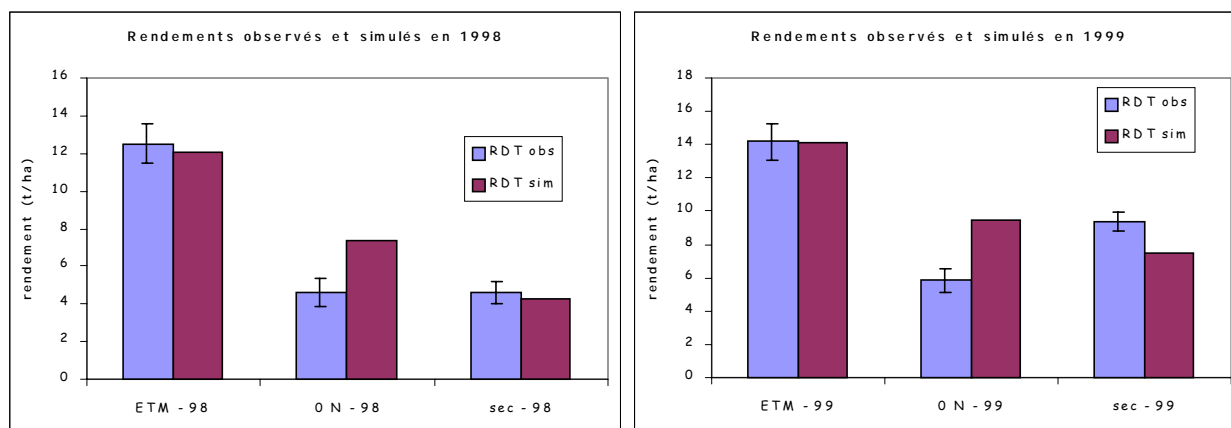


Les points se situent autour de la droite d'équation $y=x$ sans s'écarter de la marge de 15 % habituellement tolérée (Cosserrat, 1991 ; Quinones, 1989). La simulation des MS est plus performante que celle du rendement en grains, ce qui montre que la simulation de l'indice de récolte est à préciser. Les écarts les plus significatifs ont été observés dans le cas du traitement en stress azoté, où STICS surestime le rendement. Par exemple la valeur de la MS simulée est 15.2 t/ha par rapport à 12.0 t/ha observée en 1999.

Ce résultat n'est pas surprenant, car lors du calage nous avons conclu que le bilan d'azote n'était pas encore bien calé, ce qui se répercute sur la simulation du développement de la plante en cas de stress azoté. Si on ne prend pas en compte les valeurs correspondantes aux traitements avec stress azoté, le coefficient de détermination entre la MS et le rendement observé et simulé augmente à 0.85 et à 0.82, respectivement.

La simulation de l'effet du stress hydrique sur le rendement apparaît meilleure (Figure 66).

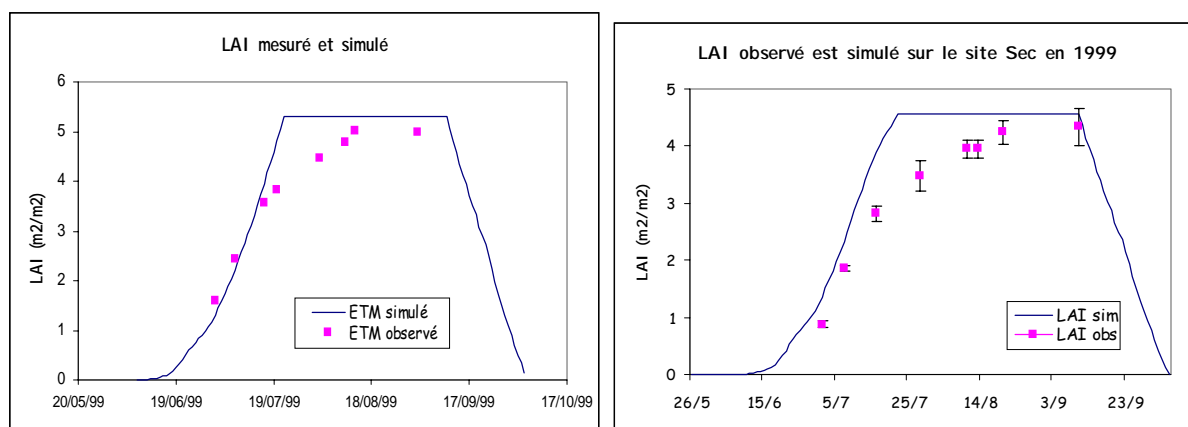
Figure 66 Comparaison des rendements simulés et mesurés



3.7.3.1.2 Evolution de l'indice foliaire (LAI)

Sur le site *ETM* en 1999 la simulation de l'évolution du LAI par le modèle est acceptable (Figure 67). La croissance du LAI est bien simulée, par contre la valeur maximale atteinte du LAI est sous-estimée.

Figure 67 Comparaison de l'évolution de LAI simulée et mesurée sur les sites *ETM* et *Sec* en 1999



Dans le cas du stress hydrique, la simulation de l'évolution du LAI est moins bonne, comme on le note sur le site *Sec* en 1999 (Figure 67). En effet, le modèle ne simule pas le retard de la croissance du LAI pris depuis le début du cycle. Par contre, les valeurs maximales du LAI simulée et estimée ne sont pas très différentes: 4.6 et 4.3, respectivement, surtout si l'on prend en compte les écart types (Figure 67).

3.7.3.2 Bilan hydrique

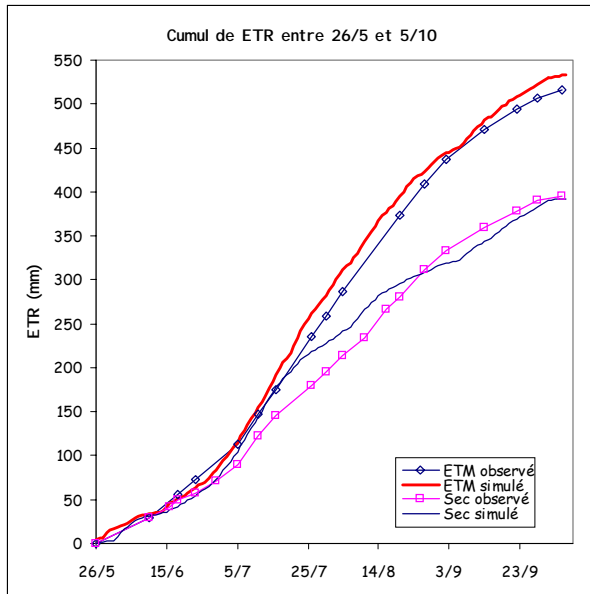
La simulation de la consommation hydrique par le modèle est très bonne dans le cas du traitement à *ETM* et aussi dans le cas de stress hydrique en 1999 (Tableau 71 et

Tableau 71 Comparaison des ETR simulées et «observées» sur les sites en aspersion en 1999 du semis à la récolte

	ETM	ON	Sec
Simulé	533	528	393
Observé	515	472	395

Figure 68), par contre la consommation hydrique de la plante dans le cas de stress azotée est sur-estimée. Ces observations sont en accord avec nos observations précédentes.

Figure 68 Cumul de ETR simulée et estimé sur les sites ETM et Sec

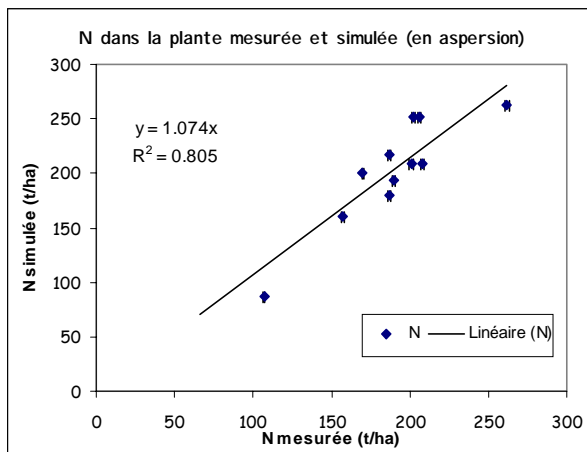


Le drainage simulé par le modèle est nul pendant la campagne culturale pour les trois sites. Ce résultat est cohérent avec les bilans mesurés pour *ETM* et *Sec* en tenant compte des incertitudes de mesures; par contre des écarts importants apparaissent pour *0N*. Après les pluies de fin d'octobre le modèle simule 9 mm de drainage sur le site *Sec*, 27 mm sur le site *ETM* et jusqu'à 104 mm sur le site *0N*. Ces dernières valeurs ne peuvent pas être comparées avec les « mesures » faute de données après la récolte.

3.7.3.3 Bilan d'azote

La comparaison des valeurs de teneur en azote de la plante observée et simulée lors des trois années, sur les sites en aspersion, sans stress azoté donne de bons résultats (Figure 69).

Figure 69 Comparaison de teneur en azote de la plante observée et simulée sur sites en aspersion sans stress azoté

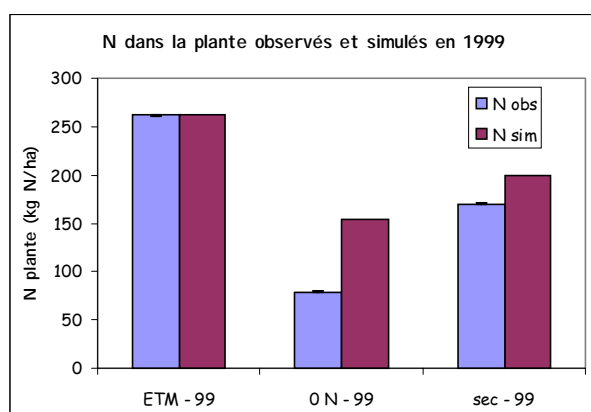


Comme attendu, dans le cas de stress azoté, la teneur en azote de la plante est nettement surestimée (Figure 70). Dans le cas du stress hydrique en 1999, la teneur en azote est surestimée (200 Kg N/ha simulée contre 170 Kg N/ha mesurée). En revanche, en 1997 sur les sites avec différents niveaux de stress, cette valeur est tout à fait bien simulée: par exemple sur le site *Sec* on simule 180 Kg N/ha contre 187 Kg N/ha mesurée.

Le modèle simule une minéralisation de 142 kg N/ha du 25 mai jusqu'à 11 novembre (soit une minéralisation journalière de 0.84 kg N/ha), valeur assez proche de nos estimations qui varie dans l'intervalle: 153 à 168 kg N/ha.

Le lessivage simulé est sous-estimé par rapport aux valeurs estimées par le bilan azoté. Sur le site *0N*, le modèle donne du lessivage seulement à partir de la mi-septembre, avec une valeur de 25 kg N/ha, jusqu'au 9 novembre. Pour comparaison, sur la période du 12 octobre au 9 novembre, nous avons estimé, à partir du bilan d'azote, un lessivage d'environ 60 kg N/ha.

Figure 70 Comparaison des teneurs en azote observées et simulées sur les sites en aspersion en 1999



Sur le site *ETM*, le lessivage simulé pour la période du semis au 9 novembre est 7 kg N/ha, tandis que notre valeur estimée est d'environ 63 kg N/ha. En conséquence, les stocks finaux simulés et observés sont aussi différents. Ce résultat est évidemment à rapprocher de celui concernant le drainage; une amélioration de l'ajustement des valeurs seuil de l'humidité au niveau local est à rechercher.

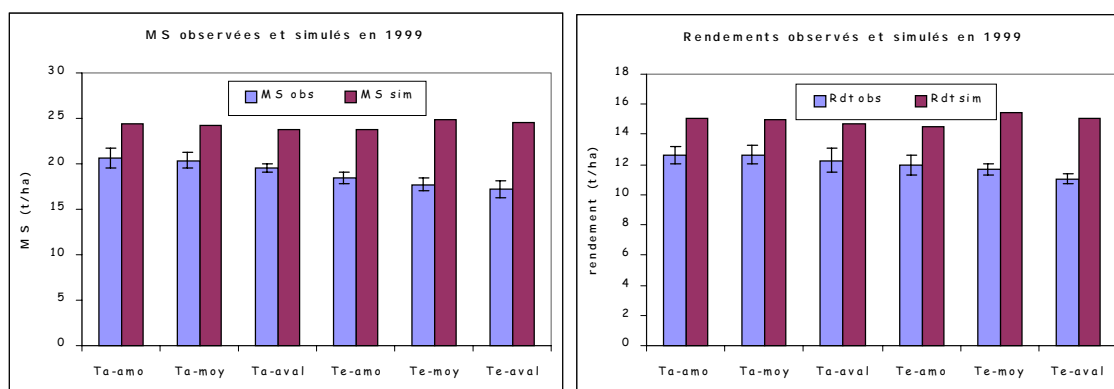
3.7.4 Test du modèle sur les sites gravitaires

Dans le cas des traitements sous irrigation gravitaire, l'objectif est d'analyser l'aptitude du modèle à simuler les conséquences de l'hétérogénéité des apports d'eau.

3.7.4.1 Simulation du rendement

On note que la matière sèche et par conséquent le rendement, sont systématiquement sur-estimés par le modèle (Figure 71). L'écart entre la simulation et l'observation varie très peu entre les sites du traitement *Ta*. Par contre, sur les sites *Te*, selon nos observations, le rendement diminue d'amont en aval, tandis que le modèle estime le rendement sensiblement plus élevé sur *Te-moyen*.

Figure 71 Comparaison des rendements simulés et observés sur les sites gravitaires en 1999



On a vu précédemment, que la simulation du profil de dose infiltrée par le modèle Raieopt a été satisfaisante, et que la distribution de l'eau entre le billon et la raie est plus où moins homogène en profondeur (au delà de 130 cm environ). Le problème n'est pas lié à l'estimation des doses d'eau utilisées dans les simulations. Par contre, l'hétérogénéité de la distribution de l'azote dans le profil du sol, qui n'est pas prise en compte dans le modèle, peut être responsable des mauvaises simulations. En effet, une grande partie de l'azote est concentrée dans la partie supérieure du billon, où il est difficilement

accessible par les racines. Le modèle ne pouvant pas simuler cette différence de stock en azote entre le billon et la raie, il surestime l'azote réellement disponible pour la culture, sur-estimant ainsi le rendement.

3.7.4.2 Simulation du drainage et du lessivage

Les valeurs du drainage simulées et estimées par l'équation de Darcy sont nettement différentes

Tableau 72 Comparaison des drainages simulés et estimés à partir de l'équation de Darcy de la 1^{ère} irrigation à la raie à la récolte

	Ta-moyen	Ta-aval	Te-moyen	Te-aval
estimé*(mm)	-10 / 10 / 5	95 / 90 / 95	100 / 85 / 55	290 / 250 / 40
simulé (mm)	0	30	40	90

* estimé d'après les différentes relations de drainage (2.4.3.2.1)

(Tableau 72), sauf pour *Ta-moyen*; cependant le classement des sites reste le même. Cela signifie que les simulations donnent des résultats proches de la réalité lorsque le drainage (ou la remontée capillaire) est

négligeable. Dans les autres cas, les simulations permettent de déceler les tendances en ce qui concerne les flux en dessous de la zone racinaire. Les écarts observés proviennent d'une part des conditions expérimentales qui n'ont pas toujours été strictement en accord avec le protocole, et d'autre part des difficultés d'estimation des flux et des paramètres du modèle STICS.

Comme signalé précédemment, un stress modéré induit par la réalisation tardive des raies (et la présence d'une zone compactée due au planage) n'est pas simulé par STICS car des réserves hydriques suffisantes étaient disponibles. Ces effets sont plus marqués sur *Te* où la vitesse d'enracinement a été probablement inférieure si l'on se réfère à la mobilisation des réserves durant la première partie du cycle.

Une meilleure estimation des humidités caractéristiques, en les adaptant précisément à chaque site serait nécessaire, étant donné l'hétérogénéité des caractéristiques du sol sur la parcelle. Cependant l'absence de sollicitation des réserves hydriques profondes par la culture sur la plupart des sites a gêné cette analyse en 1999.

Le modèle simule des drainages après la récolte plus ou moins importants selon le site; par contre le ruissellement n'est évidemment pas pris en compte dans le modèle. Cette composante du bilan hydrique n'est pas négligeable et devrait probablement être modélisé pour aboutir à une modélisation opérationnelle. Les difficultés rencontrées en ce qui concerne la simulation du drainage remettent en cause les estimations par le modèle des flux de nitrates lessivés.

3.7.5 Conclusions de la partie validation

L'indice foliaire de la culture est simulé de façon assez satisfaisante par STICS, même en conditions de stress hydrique. La matière sèche est aussi bien estimée par le modèle, sauf pour les traitements avec stress azoté. Par contre, le rendement en grain est plus ou moins sur-estimé.

La simulation de l'absorption de l'azote apparaît peu satisfaisante pour le traitement en fort stress azoté. La littérature confirme que en général les modèles de culture ont de difficultés de bien simuler le bilan d'azote surtout en cas de stress azoté comme par exemple CERES-Maize, (Kovacs et Németh, 1995), RZWQM, (Kumar et al. 1999). Les difficultés du modèle à simuler correctement les vitesses d'absorption souligne une limite de l'approche offre-demande utilisée pour calculer l'assimilation azotée de la plante. Cependant, pour une meilleure analyse de ce point du modèle, il faudrait un suivi de la teneur en azote de la plante avec un pas de temps plus fin.

Quant aux prédictions des percolations d'eau et de nitrates, en raison des incertitudes relatives aux valeurs « observées », il apparaît difficile d'évaluer dans ce domaine les performances du modèle.

Le modèle STICS ne permet pas des simulations précises des bilans en irrigation à la raie sauf en absence de drainage si on se place au moins à l'échelle du cycle de culture.

3.7.6 Possibilités et limites de l'utilisation du modèle STICS

Le modèle STICS apparaît comme un outil intéressant pour déterminer le risque de pollution lié aux systèmes de culture, car il est pluriannuel, pluriespèces et il prend en compte les interactions plante-sol-climat-itinéraire technique.

La simulation de la croissance de la culture et la dynamique de l'eau est assez satisfaisante, mais de nombreuses questions ayant trait à la qualité de description de la dynamique de l'azote dans le sol demeurent en suspens étant donné les difficultés à les appréhender. Les quantités d'azote impliquées dans les phénomènes de minéralisation, réorganisation, absorption par la plante et lessivage n'ont pas pu être validées en raison de l'absence de détermination des données expérimentales relatives à ces phénomènes.

La marge d'erreur de STICS sur les termes du bilan environnemental reste plus ou moins grande, mais peut être pondérée par les importants écart-types expérimentaux associés à ces termes. Cette marge est également jugée satisfaisante pour rendre compte de tendances probables du système sol-plante lors des simulations exploratoires. Ceci reste valable dans le cas d'irrigation gravitaire si l'on prend en compte les bilans globaux sur une unité élémentaire du sol correspondant à une section de raie et englobant l'ensemble du système racinaire depuis la surface jusqu'à une profondeur où l'humidité sous la raie et sous le billon reste identique.

Le modèle permet donc une prédiction satisfaisante des flux eau-carbone-azote dans le système sol-plante. Le principal enjeu reste la paramétrisation du modèle, dont il ressort qu'elle constitue le principal déterminant de la précision d'un modèle. Il faut y ajouter son initialisation pour les variables concernant le sol. La paramétrisation est une des clés de l'extrapolation du modèle, c'est-à-dire de l'application de STICS à d'autres sites que celui sur lequel il a été calé. L'utilisation de STICS sur des parcelles d'agriculteurs pour l'aide à la décision pose deux problèmes: ❶ celui de la disponibilité des variables d'entrée (caractéristiques précises du sol, par exemple) et ❷ celui de sa validation sur la gamme des conditions de milieu et de cultures où il sera utilisé. Cette validation est souvent difficile car l'accès à certaines variables peut être coûteux et les paramètres à identifier sont très nombreux.

Malgré des restrictions quant à l'utilisation du modèle en irrigation gravitaire, il semble possible de le mettre en contribution pour déceler des tendances, c'est ce qui sera tenté dans la partie suivante pour un cas du Mexique. Le modèle STICS a déjà été utilisé dans les conditions du Mexique par Affholder (2000) pour simuler les effets du sol, des itinéraires techniques et du climat sur la variabilité des rendements de maïs dans l'ouest du Mexique, dans une partie plus méridionale.

CHAPITRE 4 APPLICATION AU CAS DU MEXIQUE

Un des objectifs de l'expérimentation au Mexique était de préciser les pratiques actuelles des agriculteurs en matière d'irrigation et de fertilisation à partir de l'exploitation des bases de données disponibles et d'enquêtes auprès des agriculteurs. Le suivi d'un cycle cultural du maïs avait pour objectif d'analyser sur un dispositif expérimental, l'impact des pratiques d'irrigation et de fertilisation sur le risque de pollution des nappes et le rendement de la culture.

Avant de décrire l'expérimentation, quelques données liées aux ressources en eau et à la pollution au Mexique sont présentées.

4.1 LE MEXIQUE FACE AU DEFIL DE L'EAU

Pays de contrastes géographiques, le Mexique souffre d'une distribution irrégulière dans le temps et dans l'espace de son potentiel hydraulique. Soumises à une exploitation intensive, liée à la croissance de la population et au développement agricole, les ressources en eau sont devenues aujourd'hui l'une des clés du développement économique et social du pays.

4.1.1 Ressources hydriques du Mexique

Alors que le Nord et le centre du pays concentrent les trois quarts de la population mexicaine et produisent les trois quarts du PIB, ils ne disposent que de 20 % des ressources hydriques du pays. Autrement dit, près du tiers du Mexique, moteur de l'économie mexicaine, se situe en zone désertique ou semi aride.

Sur le plan national, le Mexique possède pourtant une disponibilité en eau importante: 455 milliards de m³/an. L'utilisation des eaux superficielles atteint 53 milliards de m³ et 28 milliards m³ pour les eaux souterraines. Même si la disponibilité est nettement supérieure à la demande en eau, sa distribution

Tableau 73 Eau et activités humaines au Mexique

Région	% de précipitation totale du pays	% de population du pays	% de la surface irriguée nationale	% du PIB national
Sud-est	80	24	10	23
Centre et Nord	20	76	90	77

irrégulière (Tableau 73), la pollution des cours d'eau et des aquifères ainsi que leur surexploitation limitent son usage (Chesno, 1998).

Les eaux souterraines sont actuellement exploitées de manière intensive dans la partie Nord et centre du pays. Certains bassins connaissent déjà des conflits d'usage, notamment entre l'eau destinée à l'agriculture et celle servant à l'approvisionnement des grandes villes situées dans des zones déficitaires telles que Monterrey, Guadalajara, Ciudad Juarez, Tijuana et Mexico avec une population supé-

rieure à 35 millions d'habitants. Dans cette situation, la réutilisation des eaux usées en l'agriculture peut être une solution intéressante (Xanthoulis et Wallender, 1991; Bahri et Brissaud, 1996).

4.1.2 Agriculture irriguée au Mexique

Actuellement, sur les 20 millions d'hectares cultivés au Mexique, 6 sont irrigués, dont 3,2 millions sur des périmètres irrigués, et la taille des parcelles est en moyenne de 6 ha par utilisateur. La superficie irriguée génère plus de 50 % de la production agricole nationale et 70 % des exportations. Les céréales représentent 80 % des surfaces irriguées mais seulement 45 % de la valeur de la production des cultures irriguées. Ces valeurs montrent l'importance de l'agriculture irriguée pour le Mexique (Ramos et al., 1999). Sur ces 6 millions d'hectares irrigués, 92 % le sont par irrigation gravitaire et les 2/3 de la superficie des « distritos de riego » (périmètres irrigués) sont irrigués à la raie.

Au niveau national, plus de 80 % de l'eau est utilisée dans l'agriculture, et près de la moitié de l'eau employée pour irrigation est perdue. Les pertes durant le transport sont estimées à 40 % en moyenne et les pertes au niveau de la parcelle en colature ou par percolation profonde sont aussi importantes (Palacios Veléz, 1990).

Le programme de fertigation au Mexique avait inclue 8851 projets d'irrigation (jusqu'à 1998), au bénéfice de plus de 323 000 hectares de terres agricoles, avec des différents systèmes d'irrigation. Le système d'irrigation le plus largement adopté était les rampes à vannettes, représentant environ 40 % les dernières années. C'est sur la culture du maïs que la fertigation a été le plus largement appliqué. Les résultats montrent que la fertigation par des systèmes d'irrigation superficielle bien instrumentés est un moyen idéal pour augmenter le rendement (Rosano, 1999).

4.1.3 Problèmes de pollution liés à l'agriculture

Dans les années 80, la nette détérioration de la situation hydraulique dans le pays a conduit les autorités à accorder la priorité absolue aux problèmes de l'eau. Trois axes d'action ont été retenus: ❶ développement des infrastructures hydrauliques pour satisfaire une demande en forte croissance, ❷ augmentation de l'efficacité de l'usage de l'eau, notamment en agriculture et ❸ lutte contre la pollution des eaux.

Tableau 74 Pratiques sources de pollution des eaux

Liées aux pratiques en général	Liées à la fertilisation
forte intensification de la production peu ou pas de prairies permanentes, retournement des prairies surestimation de l'objectif de rendement pas d'engrais vert	pas d'utilisation de la méthode des bilans apports de fertilisants disproportionnés par rapport aux rendements obtenus non prise en compte des reliquats d'azote dans le sol apports de matières fertilisantes uni- formes sur toute la surface

L'origine agricole de la pollution des eaux souterraines et superficielles par l'azote est maintenant reconnue (Tableau 74). Pour lutter contre la pollution des eaux d'origine agricole on dispose de plusieurs instruments (Larrue, 1992), comme: ❶ les dispositions réglementaires, ❷ les mesures incitatives (incitations à la fertilisation raisonnée, vulgarisation

agricole) et ③ les mesures économiques (subventions pour pratiques compatibles avec la protection des eaux, taxe sur la pollution émise). Parmi ces instruments nous nous intéressons surtout à celui portant sur la vulgarisation agricole. Il s'agit d'inciter les agriculteurs à recourir à des pratiques agricoles plus compatibles avec la protection des ressources en eau. Ces mesures sont axées sur l'élaboration de « codes de bonnes pratiques agricoles » et sur leur diffusion auprès des agriculteurs.

Le calcul économique des agriculteurs intervient fortement dans la conduite des cultures. En effet, la plupart des agriculteurs conduisent leur exploitation de manière à en assurer la meilleure rentabilité, ainsi une pression sur le prix des intrants aurait des répercussions sur la consommation d'engrais. Il nous semble important de souligner qu'aucun instrument économique de type redevance n'est utilisé pour lutter contre la pollution des eaux d'origine agricole sur le périmètre. D'autre part, la baisse du prix des céréales conduit les agriculteurs à diversifier leur production, en augmentant leurs surfaces en cultures à risque vis à vis de la pollution.

Les pratiques d'irrigation mal adaptées sont facteurs d'engorgement, de salinisation (Gonzales-Barrios, 1992), d'érosion et de pollution de l'eau. L'engorgement et la salinisation des sols sont parmi les principales causes de la perte de productivité de nombreux périmètres irrigués. La superficie touchée par la salinisation est estimée à 10 % de la superficie irriguée totale au Mexique (FAO, 1994).

4.2 PRESENTATION DU PERIMETRE IRRIGUE «EL CARRIZO»

Le périmètre irrigué de «El Carrizo» est situé à la latitude 26°16' Nord et à la longitude 109°02' Ouest de Greenwich, à une altitude moyenne de 20 m. Il se localise dans les municipalités d'Ahome et El Fuerte, en partie Nord de l'Etat de Sinaloa. Il est limité au nord par l'Etat de Sonora, au sud par des montagnes de Barobampo et à ouest par le Golfe de Californie.

4.2.1 Les raisons du choix de ce site expérimental

La surface irriguée au périmètre d'«El Carrizo» est importante, raison pour la quelle les problèmes liés à l'irrigation touche un grand nombre de producteurs agricoles, et aussi un grand nombre de pêcheurs et d'ostréiculteurs de la même zone. Ainsi, l'effort de la conservation et d'utilisation durable de ces moyens de production est une raison suffisante pour chercher des solutions à ces problèmes. Il est donc important d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau et des fertilisants, ce qui devrait permettre irriguer de plus grandes surfaces et de remédier aux problèmes de sécheresse. De plus, il serait possible d'améliorer la rentabilité des cultures et de diminuer les risques de pollution de la nappe et des collecteurs.

L'irrigation gravitaire y est pratiquée avec des doses importantes sur des céréales fertilisées de manière intensive. Cependant les rendements restent faibles (5 à 8 t/ha pour le maïs) alors que les potentialités sont plus élevées (*Tableau 75*). Les agriculteurs et les organismes publics sont intéressés par

une amélioration des résultats économiques que permettrait une meilleure valorisation des intrants. Parallèlement, la prise de conscience de la nécessité de maîtriser les pollutions diffuses progresse.

Tableau 75 Exemple des rendements potentiels en grain de différentes variétés du maïs à l'Etat de Sinaloa (d'après CERES)

Date du semis	Durée du cycle	Type du sol	Rayo	Tornado	Ciclón	Centella	Huracán
du 23/10 à 11/12	190 jours en moyenne	barrial alluvion	10.4 8.4	11.0 11.0	10.5 10.6	10.7 10.9	9.9 10.2

Le périmètre irrigué d'«El Carrizo», un des périmètres irrigués les plus développés du Mexique, est l'objet depuis plusieurs années de nombreuses recherches sur

les pratiques culturales, dont l'irrigation (principalement gravitaire). Différents projets y sont testés avant leur application sur des périmètres voisins. Sur ce périmètre a été mis en place une base de données pour le suivi et la prévision des besoins en irrigation au jour le jour.

L'IMTA et l'association des usagers du district dispose de 92 ha de terre pour les différentes expérimentations. Cette station a été retenue car elle possède les infrastructures nécessaires et des parcelles avec un sol profond. Cependant il existe des problèmes liés à la proximité d'une nappe phréatique, raison pour laquelle presque toute la station est drainée à l'aide de drains enterrés (profondeur 1.50 m).

4.2.2 Climat de «El Carrizo»

Situé dans l'Etat de Sinaloa (*Annexe*), au nord-ouest du Mexique, «El Carrizo» est soumis à un climat très sec. La précipitation moyenne annuelle (période d'observation: 22 ans) est de 354 mm, mal répartie dans l'année (Tableau 76). Presque la totalité de la pluie tombe entre les mois de juillet et septembre. L'évaporation moyenne annuelle est de 2161 mm. La température moyenne annuelle est de 24°C, avec une valeur maximale de 42°C en juillet et une valeur minimale de 2.5 °C en janvier (INEGI, 1995). Une forte sécheresse est apparue ces dernières années sur le système d'irrigation de Rio Fuerte, dont «El Carrizo»; c'est la raison pour laquelle sur le cycle agricole de 1998-99 la disponibilité en eau des barrages a été insuffisante pour l'irrigation.

Tableau 76 Données climatiques de 22 ans sur «El Carrizo»

	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	moyenne ou total
Tmax	24.3	26.4	28.1	31.1	34.3	37.5	37.1	36.2	35.9	34.0	29.1	25.4	31.6
Ecart type	2.8	3.0	3.4	3.1	2.6	2.0	2.1	2.3	2.4	3.0	3.4	3.0	4.8
Tmin	9.6	9.6	10.7	12.1	16.4	23.6	26.0	25.7	24.9	19.6	13.5	10.8	16.9
Ecart type	3.2	2.8	2.8	2.9	3.5	3.2	1.4	1.4	1.7	3.7	3.3	2.9	6.7
Pluie	19.1	9.8	1.6	0.5	2.6	4.3	85.2	99.7	65.9	30.0	14.0	21.1	354
Ecart type	11.1	8.8	2.1	2.7	5.7	4.4	12.4	15.9	17.2	13.6	11.7	12.2	
jour-pluie/mois	2.1	1.1	0.5	0.1	0.4	1.1	8.6	8.8	5.1	2.8	1.3	2.4	

4.2.3 Type du sol

Le type de sol prédominant sur le périmètre (75 %) est argileux. Cette terre « barrial », difficile à cultiver et sensible au ruissellement et à érosion ou à l'engorgement selon la topographie, donne les rendements moyens et rend la fertilisation peu efficace (Pieri, 1985). Cette texture, conjuguée à l'existence éventuelle d'une semelle du labour et une sodicité très importante (Rosano, 1999) peut être la cause de vitesses d'infiltration limitées ou même rendre les sols imperméables (Pons et al., 2000). La topographie avec une pente de 0.5 %, est propice à l'application efficace de l'irrigation.

Tableau 77 Texture du sol à «El Carrizo»

couche (cm)	Sol 1 (Carrizo)			Sol 2 (Carrizo)			Centre de formation		
	sable	limon	argile	sable	limon	argile	sable	limon	argile
0-30	52	15	33	32	15	53	45	19	36
30-60	50	13	39	32	12	56	45	18	37
60-100	45	14	41	31	12	57	45	18	37
100-150	46	17	37	28	14	58	47	19	34
150-200	47	17	36	28	12	60	53	17	30

Le Tableau 77 présente les résultats d'analyse des données disponibles sur la texture du sol au périmètre irrigué et sur les parcelles voisines à la parcelle expérimentale.

Le pH des sols varie de 7.1 à 8.0, ce qui les classifie en sols modérément alcalins. Quant à la salinité, dans la première couche les valeurs de la conductivité électrique sont inférieures à 3 ds/m, ce qui est

Tableau 78 Tolérance des cultures à la salinité (Ojeda et al, 1999)

Culture	maïs	blé	haricot	sorgho	luzerne	tomate
Tolérance	1.7	6.0	1.0	4.0	2.0	2.5

favorable à la mise en place du système racinaire. Par contre, les valeurs de 3-9 ds/m dans la couche 30-60 cm peuvent limiter le développement de

certaines cultures (CNA-IMTA, 1999), dont la tolérance à la salinité est présentée par le Tableau 78.

4.2.4 Occupation du sol

La surface cultivée en hiver est beaucoup plus importante qu'en été: 39 000 ha pour l'hiver 97-98, contre 1000 ha pour l'été 1997. Les cultures principales sont maïs, blé, tomate verte, coton haricot, courge pour l'hiver et maïs, soja, sorgho et haricot pour l'été. Le maïs d'hiver représente 62 % de la surface cultivée et utilise 65 % du volume d'eau total distribué.

4.2.5 L'irrigation et fertilisation à «El Carrizo»

Le périmètre irrigué 076 «El Carrizo» comporte une superficie irrigable de 56 856 ha (CNA, IMTA, 1999), divisée en deux unités d'irrigation. La première unité (sujet de notre étude) comporte une superficie de 43 259 ha, composée de quatre modules d'irrigation (Tableau 79), organisés en une société de responsabilité limitée (SRL). Le district s'approvisionne à la rivière Rio Fuerte, alimenté par trois barrages. C'est un périmètre de taille moyenne et la surface irriguée par agriculteur, de 10 ha environ (Tableau 79), est supérieure à la moyenne nationale (6 ha/agriculteur) (Palacios Veléz, 1990).

Tableau 79 Compositions des modules d'irrigation

Module	Nombre de sections	Superficie (ha)	Nombre d'usagers	ha/ agriculteur
1	4	10215	1150	8.9
2	3	8149	878	9.3
3	4	13586	1436	9.5
4	4	11309	1140	9.9
Total	15	43259	4604	9.4

Le périmètre irrigué de «El Carrizo» est caractérisé par l'adaptation d'une technologie de haute productivité, notamment: ❶ l'utilisation de semences de qualité, d'engrais chimiques, d'herbicides et d'insecticides, ❷ l'amélioration de travaux du sol, des pratiques culturales et d'irrigation, ❸ l'application de la fertigation et

d'injection directe d'ammoniaque anhydre dans le billon (Diaz et Namuche, 1997).

L'irrigation est conduite à la raie, à l'aide de siphons coudés dont la capacité maximale est de 2 l/s. Plus de 200 de ces siphons peuvent être utilisés simultanément pour irriguer un champ. L'efficacité des apports d'eau est estimée à 0,5 à cause des pertes en colature et par percolation. Bien que l'IMTA²⁴ préconise la conduite de l'irrigation en raies bouchées (pour des raisons d'économie d'eau et de fertilisants), la plupart des agriculteurs irriguent en raies ouvertes, espacées d'environ 80 cm. Le

Tableau 80 Productivité de l'eau en El Carrizo, toutes cultures confondues (CNA-IMTA, 1999)

Cycle Automne-Hiver.	Superficie récoltée (ha)	Productivité de l'eau (kg/m ³)
96-97	43820	0.655
97-98	48797	0.770
98-99	40357	0.849

Tableau 80 présente la productivité de l'eau sur «El Carrizo», toutes cultures confondues.

Les agriculteurs appliquent des doses de fertilisants de plus en plus élevées afin d'obtenir de meilleurs rendements et d'être plus compétitifs (De Los Santos, 1999). La quantité d'azote appliquée varie de

200 à 300 kg/ha pour le maïs et de 200 à 280 kg/ha pour le blé. L'indice de rentabilité de l'azote est de 0.6, raison pour la quelle un grand volume d'azote non utilisé par les cultures se perd par ruissellement et lessivage, entraînant un risque de pollution des eaux superficielles dans les parties plus basses (à la proximité de la mer), et il existe aussi un risque de pollution des aquifères.

Ce problème s'aggrave en raison de l'application peu efficace de l'eau et des fertilisants par les agriculteurs. Il est important de noter que dans les périmètres irrigués, l'eau ne se paye pas selon un tarif volumétrique, mais par prix forfaitaire en accord avec la culture et le nombre d'irrigations appliquées. A noter également qu'une économie de 1 cm sur la lame d'eau d'irrigation au niveau du district, engendre une économie de 8 millions de m³ au niveau du barrage (IMTA, 1995).

Un des facteurs qui affecte le plus la productivité en «El Carrizo» est la salinisation des sols, due aux fluctuations continues des niveaux phréatiques, occasionnées par l'absence de pratiques adéquates et efficaces de l'irrigation. Les canaux ne sont pas revêtus, augmentant ainsi le niveau de la nappe phréatique. En 1995 la superficie affectée et sujette à dégradation par les problèmes de salinité a été de 8513 ha, équivalent à 20 % de la surface irriguée (IMTA, 1995). On estime qu'au mois de mars (fin de la culture d'hiver correspondant au maximum de la hauteur de la nappe), sur 30 milles hectares la

²⁴ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

nappe se situe à moins de 1,5 mètres de profondeur. Pour améliorer la situation, des drains enterrés (profondeur 1,50 m) ont été installés sur une superficie de 2800 ha, suite à un projet de drainage.

4.2.6 Grandes lignes de la recherche sur le périmètre

Le comportement des agriculteurs est globalement défavorable aux mesures visant à améliorer la qualité des eaux sur le périmètre, car ils sont encore trop peu sensibilisés à ces problèmes de pollution agricole. Dans ces conditions la politique de lutte contre la pollution agricole n'est pas facile à mettre en œuvre.

4.2.6.1 Système de prévision des irrigations

Le système de pronostic d'irrigation et statistique (SIPRES) permet de prévoir, de manière fiable, les besoins des irrigations des cultures sur chaque parcelle d'un périmètre irrigué (Ibanez-Castillo et al., 1997; Ojeda et al., 1999). Ce système de pronostic est appliqué à «El Carrizo» depuis 1996 dans les quatre modules de la 1^{ère} unité du district (Ojeda et al., 1997 a). Il est alimenté par une base de données des cultures, des caractéristiques du sol, du registre d'usagers, des irrigations appliquées, et il est connecté via radio à 2 stations agro-météorologiques automatisées (données horaires) (Ojeda, et al., 1997 b).

4.2.6.2 Le programme de ferti-irrigation

Les objectifs principaux du programme de ferti-irrigation (PF), débuté en 1996, sont l'augmentation des revenus des agriculteurs irrigants à travers la réduction des coûts et l'augmentation des rendements, et la réduction des prélèvements des aquifères grâce à l'utilisation efficiente de l'eau. Ce programme est accepté et demandé par la majorité des agriculteurs. Le PF est surtout un programme de modernisation de l'irrigation.

Un projet démonstratif de l'irrigation gravitaire avec un système de distribution type rampe à vannettes en PVC a été établi en «El Carrizo», avec la collaboration de l'IMTA. Ce système n'a pas augmenté le rendement, mais l'économie de l'eau a été de 50 %. La technologie qu'impulse le PF est un processus qui permet d'ajouter facilement les nutriments en quantité et temps nécessaire, soit avant la culture, soit pendant son développement. L'irrigation est appliquée de manière opportune, basée sur des données en temps réel, ce qui signifie une économie de l'eau d'irrigation. Par contre, l'augmentation du rendement demande une dose d'azote supérieure à celle recommandée dans la région (Rendon et al, 1997).

4.3 EXPERIMENTATION EN «EL CARRIZO» EN 1998

4.3.1 Objectifs de l'expérimentation

L'objectif principal des collectes d'information réalisées au Mexique a été d'analyser les conduites actuelles de l'irrigation à la raie et de la fertilisation azotée pour une culture de maïs sur le périmètre irrigué d'«El Carrizo» et d'identifier des voies d'amélioration de leur efficacité d'un point de vue écologique (pollution par lessivage de l'azote) et économique (rendement). Pour cela nous avons comparé des pratiques actuelles et des pratiques améliorées. L'expérimentation a porté sur deux parties principales: ❶ l'exploitation des bases de données disponibles et d'enquêtes afin de préciser les pratiques actuelles des agriculteurs en matière d'irrigation et de fertilisation et ❷ expérimentation sur le périmètre irrigué pour recueillir les données nécessaires pour caractériser les différentes pratiques d'irrigation et de fertilisation du maïs et leur effets.

Le plan d'expérimentation a été préparé en tenant compte des résultats acquis antérieurement dans le domaine de l'optimisation de l'irrigation par l'IMTA (à El Carrizo) et par le Cemagref (sur Lavalette).

4.3.2 Pratiques agricoles sur le site expérimental

Une partie importante de la préparation de l'expérimentation a été le calcul des doses optimales d'eau et d'azote pour les conditions mexicaines.

4.3.2.1 Comment irriguer de manière optimale?

4.3.2.1.1 Doses et itinéraire des irrigations

Le besoin en eau d'irrigation de la culture, calculé à partir des données climatiques (ETP, précipitation) disponibles sur le périmètre irrigué et le coefficient cultural du maïs, est environ 750 mm, avec

Tableau 81 Calcul approximatif de doses d'irrigation à partir de données de climat de 1996

Mois	Pluie (mm)	ETP _{PM} (mm)	Kc	ETR (mm)
Janvier	2	78	-	-
Février	1	84	-	-
Mars	0	125	0.4	25*
Avril	0	155	0.7	109
Mai	0	190	1	190
Juin	0	195	1.1	215
Juillet	69	163	0.9	147
Août	108	135	0.6	41*
Besoin en eau total				726
pluie				177
apport d'eau (75 % d'efficacité)				754

(* jours pris en compte = 15)

une efficacité de 75 % de l'irrigation (Tableau 81). Cette valeur correspond à la quantité d'eau moyenne apportée actuellement sur les parcelles du périmètre.

En tenant compte de la réserve utile du sol et des recommandations de PRONASE (1995) pour le maïs de printemps et d'hiver (Tableau 82), une irrigation de pré-sémi de 100 mm et six irrigations après-sémi ont été retenues, avec un pas de temps de 15 jours.

Tableau 82 Itinéraire d'irrigation recommandée par PRONASE pour le maïs de printemps et d'hiver

		maïs de printemps	maïs d'hiver
0	Pré-semis	(jours entre 2 irrigations)	
1	7-8 feuilles	35-40	32-38
2	12-14 feuilles	15-17	18-20
3	Hoja bandera	14-17	18-20
4	Floraison masculine	14-16	17-19
5	Formation des grains	11-12	16-17
6	Grain laiteux	7-9	9-10
7	Grain pâteux dur	8-9	11-12

Dans notre calcul préliminaire nous n'avons pas pris en compte les contraintes du type organisation du travail: la disponibilité du matériel et de main d'œuvre, cependant ces dernières conditionnent le succès de l'expérimentation. L'itinéraire d'irrigation était donc adapté au site, prenant en compte toutes les contraintes locales.

4.3.2.1.2 Type d'arrosage

Les contraintes imposées sur l'eau dans certaines régions où ces ressources sont limitées incitent les agriculteurs à irriguer en raie bouchée. Ce mode d'arrosage n'est guère conseillé en France à cause de risques de submersion en aval lors d'éventuels orages ou lorsque l'alimentation est maintenue trop longtemps (RNED-AFEID, 1995). Il existe aussi le problème relatif à la maîtrise du temps d'arrosage: la dose apportée peut être insuffisante lorsqu'on coupe l'alimentation, dès que l'eau atteint l'aval de la raie. En outre lorsque la variabilité de l'avancement est grande, il peut en résulter une forte hétérogénéité de la dose infiltrée; ce phénomène étant d'autant plus marqué que les raies sont longues.

L'arrosage à double débit minimise les risques de débordement en aval de la raie et permet d'obtenir une dose plus homogène. Par contre, il mobilise plus de main d'œuvre, en absence d'automatismes permettant de réduire le débit d'attaque au moment opportun. Etant donné que la main d'œuvre qualifiée constitue aussi un problème sur le périmètre d'«El Carrizo», la technique de la raie bouchée à simple débit peut être la meilleure variante à retenir pour ce contexte.

4.3.2.2 Comment fertiliser selon les pratiques améliorées?

Jusqu'à présent, le rendement de la culture a été le seul paramètre pris en compte pour l'élaboration d'un plan de fertilisation. Par exemple, dans les bulletins informatifs (PRONASE, 1995; Mendoza, 1993), on recommande d'appliquer 250 à 300 kg d'azote par hectare sur maïs. Mais aujourd'hui le respect de l'environnement (limitation de perte en nitrate par lessivage) est un nouveau paramètre à prendre en compte pour fertiliser les cultures. Ce besoin de modifier les pratiques nécessite la mise en place d'essais, de tests, et de parcelles de références, comme sur le périmètre d'«El Carrizo».

4.3.2.2.1 Calcul de la dose d'azote minéral à apporter

La méthode du bilan provisionnel permet de calculer la quantité d'azote à apporter à une culture en équilibrant les besoins par un stock d'azote disponible. Le bilan porte sur le compartiment azote minéral dans la zone exploitée par les racines pendant le cycle végétatif de la culture:

$$b \cdot Y = R + Mh + Mr + c \cdot X$$

Équation 80

<i>b</i>	<i>besoin en azote de la culture par unité de production [kg/q]</i>
<i>Y</i>	<i>objectif de rendement retenu [q/ha]</i>
<i>R</i>	<i>reliquat d'azote minéral avant le cycle cultural [kg/ha]</i>
<i>Mh</i>	<i>minéralisation nette de l'humus du sol [kg/ha]</i>
<i>Mr</i>	<i>minéralisation des résidus de récolte [kg/ha]</i>
<i>c</i>	<i>coefficient d'utilisation de l'azote apporté</i>
<i>X</i>	<i>fumure minérale azotée [kg/ha]</i>

Etant donné un rendement actuel du maïs sur le périmètre irrigué d'«El Carrizo» de 60 à 100 q/ha, nous avons retenu un **objectif de rendement (Y)** de 100 q/ha, car il n'est pas réaliste de prévoir une augmentation significative du rendement, sans une étude plus approfondie et une amélioration des pratiques culturales actuelles.

Le **besoin en azote du maïs (b)** est de 2,0 à 2,3 kg N/q ou de 12 à 14 kg N/t MS (Desvignes, 1993). Nous avons retenu une valeur de $b = 2,2$ kg N/q.

La **détermination du reliquat d'azote minéral (R)** se fait à partir d'une mesure directe au champ (prélèvements par carottage de sol) ou par estimation, ce qui suppose une connaissance précise de tous les facteurs qui interagissent: précédent cultural, minéralisation, quantité résiduel après la récolte précédente, lixiviation, entre autres. Le stock d'azote initial du sol n'a pas été encore connu lors de notre calcul, ainsi nous avons pris une valeur moyenne trouvée dans la littérature, soit 50 kg/ha.

La **minéralisation de l'humus (Mh)** peut être calculée à partir d'un modèle d'estimation d'un coefficient annuel de destruction de l'humus, qui dépend des conditions pédoclimatiques locales et qui varie peut d'une année sur l'autre, ce qui en fait une caractéristique du sol (Delphin, 1993). Sur le sol de type argilo-limoneux de la parcelle expérimentale, selon Desvignes (1993), la minéralisation nette de l'humus (Mh) est environ 100 kg/ha. Cependant, selon Quifer (1998) la minéralisation des sols du périmètre n'est que 50 kg/ha sur le cycle.

Selon les données disponibles, il n'y a pas d'enfouissement des résidus de récolte, ainsi la **minéralisation des résidus de récolte (Mr)** est nulle.

Le **coefficient d'utilisation de l'azote (c)** est la résultante d'un ensemble de processus qui interviennent dès l'apport d'azote au système sol-plante (1.3.1). Selon Jacquin et al. (1994) et Maruejols (1994), ce coefficient varie entre 17 à 75 %, et dépend du type du sol, du climat, de la forme et quantité du fertilisant.

En prenant des valeurs de $C = 0.5$ et 0.75 , un intervalle de 180 à 240 Kg N/ha d'azote à apporter a été obtenu, soit environ 200 kg N/ha:

$$X = \frac{(100 \cdot 2.2) - 50 - 50}{0.75} = 180 \cdot \text{ou} \cdot X = \frac{(100 \cdot 2.2) - 50 - 50}{0.5} = 240.$$

Ce calcul est assez approximatif. De plus, on suppose que les apports atmosphériques compensent les pertes gazeuses (volatilisation, dénitrification), ce qui justifie l'omission de ces termes de bilan (Meynard et al., 1997). La méthode du bilan non ajusté en cours de campagne peut sous-estimer la dose permettant un rendement optimal.

4.3.2.2 Itinéraire de fertilisation

A «El Carrizo» les agriculteurs appliquent $\frac{1}{2}$ à $\frac{3}{4}$ d'azote avant semis et le reste lors de la première irrigation après semis. Pour améliorer les performances de la fertilisation, nous avons proposé d'appliquer trois apports post-semis sous forme de fertigation. Les apports d'azote devaient donc correspondre aux dates des irrigations. D'autre part, il n'y a pas eu apport d'engrais au semis sur le traitement amélioré, car le stock d'azote initial était assez élevé pour permettre à la plante son développement sans stress azoté jusqu'à la première irrigation. D'ailleurs, le fait d'apporter la même quantité d'azote sur les traitements amélioré et excédentaire lors des fertigations avait facilité l'expérimentation.

Les différentes pratiques de fertilisation appliquées sur la parcelle d'expérimentation ont été les suivantes: ❶ sans aucune fertilisation (7 raies), ❷ avec fertilisation réduite, dite pratiques améliorées avec 210 kg d'azote/ha (20 raies) et ❸ avec fertilisation traditionnelle, dite pratiques actuelles avec 370 kg d'azote/ha (20 raies). L'itinéraire des irrigations et fertilisations est montré sur le *Tableau 83*.

4.3.2.3 Formes des apports d'azote

Quant à la forme utilisée des fertilisants, nous considérons que les types d'engrais et les méthodes d'application actuelles sont adaptées aux conditions locales (irrigation à la raie, climat, etc.) et sont caractérisées par leur facilité de mise en oeuvre. Ainsi la fertirrigation est réalisée avec l'ammoniaque anhydre dissoute dans l'eau d'irrigation, sur la parcelle à l'exception du site *0N* (sans fertilisation). Le premier apport de l'urée a été incorporé avant le semis, lors des labours, sur la sous-parcelle avec des pratiques « actuelles » et le deuxième apport a été réalisé début mai sur les traitements « actuels » et « améliorés » (*Tableau 83*).

Tableau 83 Pratiques agricoles sur la parcelle expérimentale

Date	interventions culturales	irrigation (650-700 mm)	fertilisation		analyses
			actuelle	améliorée	
29/01	planage				
09-12/02	travaux du sol				
16-17/02					sol
19/02		120 mm (q = 1 + 0.55 l/s)			
14/03	semis		161 Kg N urée	0 Kg N	
23/03	levée				
24/04		85 mm (q = 1.1 l/s)			
06/05	hauteur: 20-80 cm		46 Kg N urée	46 Kg N urée	sol
13/05		70 mm (q = 0.9 l/s)			
26/05					sol
03/06		100 mm (q = 1.1 l/s)	82 Kg N ammoniacque anhydre	82 Kg N ammoniacque anhydre	
05/06	floraison				
13/06		100 mm (q = 1.1 l/s)	82 Kg N ammoniacque anhydre	82 Kg N ammoniacque anhydre	
27/06		100 mm (non suivie)			
11/07		100 mm (non suivie)			
24/08	récolte				sol + plante
Total		675 mm	371 Kg N/ha	210 Kg N/ha	

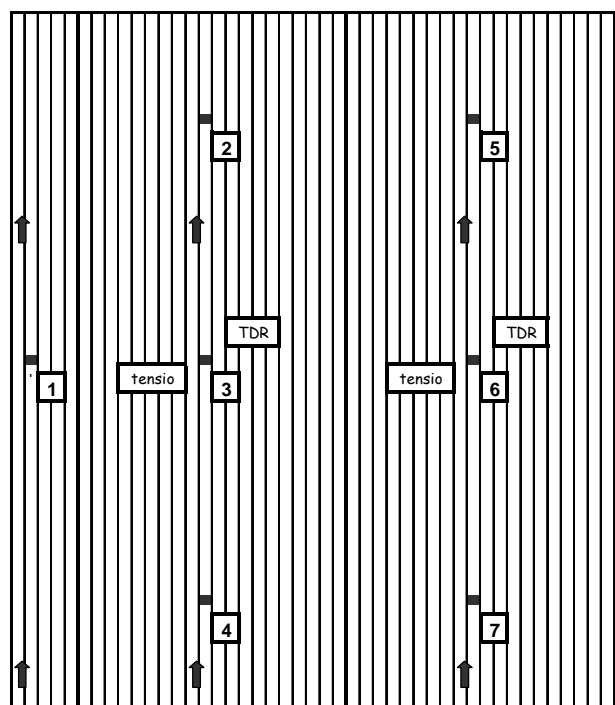
4.3.2.3 Conduite de la culture

Le semis a eu lieu le 14 mars, un mois plus tard que prévu initialement, car le planage a été refait à fin d'avoir des bonnes conditions pour l'irrigation à la raie. La variété du maïs était le H-431, spécialement choisie pour le cycle printemps-été. Elle a été semée à raison de 7 grains par mètre linéaire, qui correspond à une densité de semis de 87 000 pieds par hectare (espacement des raies: 80 cm).

La levée a eu lieu 9 jours après le semis, le 23/03. Il faut noter qu'il y a eu une grande variabilité quant au développement de la culture (par exemple: hauteur de plante entre 30 et 120 cm, le 20 mai). La récolte a été effectuée le 24 août, 163 jours après le semis. Ainsi on confirme les résultats de Mendoza (1993), selon lesquels pour un maïs tardif, semé le 15 mars, la maturité est obtenue en 160 jours.

4.3.3 Résultats du suivi expérimental à «El Carrizo»

Figure 72 Schéma de la parcelle expérimentale au «Centro de Capacitacion»



La taille de la parcelle expérimentale était de 125 m x 40 m, avec au total de 47 raies. Les trois traitements ont été équipés de 7 sites de suivi au total (Figure 72). Les sites de suivi ont été placés en amont, au milieu et en aval sur les traitements fertilisés; par contre sur le traitement sans azote nous avons suivi seulement un site, au milieu de la sous-parcelle. Seuls les sites au milieu des sous-parcelles fertilisées ont été équipés pour la mesure tensiométrique et humidimétrique.

4.3.3.1 Analyse du climat

Les données climatiques correspondantes à la campagne d'expérimentation (de mars à août 1998) sont présentées par la Figure 73 et le Tableau 84.

Tableau 84 ETP et pluies mensuelles à El Carrizo pendant la campagne de 1998

	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août
ETP mensuel (mm)	89	118	155	182	197	159	139
pluie mensuelle (mm)	21	2	2	0	1	32	63

On peut noter l'importance de l'irrigation sur cette zone, car comme illustré par le Tableau 84 et par la Figure 73. L'été 1998 a été relativement sec, les pluies pendant le mois de juillet et d'août ont été inférieures aux valeurs moyennes sur 22 ans (Tableau 76).

Figure 73 Données climatiques de 1998 en «El Carrizo»

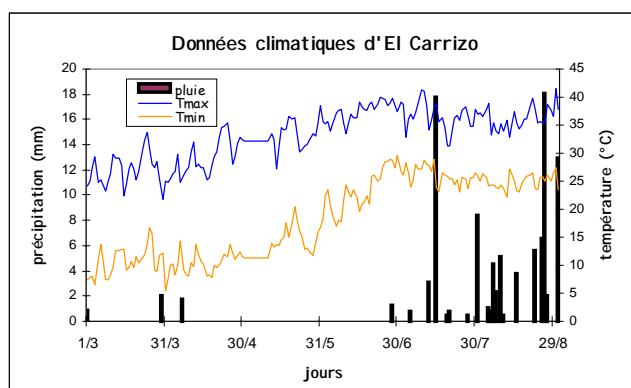


Tableau 85 Rendement (à 15 %) sur la parcelle expérimentale

traitement (Kg N/ha)	rendement (t/ha)
0	5,72
210	8,49
360	8,92

traitement (Tableau 85). On peut noter que la sur-fertilisation (360 kg N/ha) n'a pratiquement pas augmenté le rendement, car la quantité d'azote apportée en plus n'a pas pu être valorisée par le maïs. La suppression de l'apport de fertilisant diminue d'environ 35 % le rendement. Donc même si les stocks initiaux d'azote du sol paraissent élevés, la fertilisation est nécessaire.

4.3.3.3 Analyse des irrigations à la raie

L'avancement du front d'eau dans les raies et le temps d'arrosage ont été mesurés lors des premiers irrigations; tous les 5 m pour la première irrigation, puis tous les 10 m, sur 10 raies appartenant au traitement « actuel ». Le système d'irrigation utilisé était le siphon. Le débit en tête a été estimé à partir d'une formule hydraulique en fonction du diamètre du siphon et de la charge hydraulique.

4.3.3.3.1 Analyse des débits

La première irrigation a été réalisée avec deux débits: le premier débit avec une moyenne de 1 l/s (CV=13 %, n=10) a été appliqué pendant 90 minutes, puis un débit moyen de 0.55 l/s (CV=10 %, n=10) pendant 184 minutes. Les autres irrigations ont été réalisées avec un seul débit: de 0.9 à 1.1 l/s,

Tableau 86 Analyse de l'avancement des irrigations

No. arrosage	Débit (l/s)	T _L moyenne (min)	ET de T _L	T _c (min)
0	Q1=1, Q2=0.55	192	13	T1=90, T2=184
1	1.1	112	7	130
2	0.9	86	19	130
3	1.1	89	14	148

selon l'arrosage (Tableau 86). Le débit n'a pas été mesuré sur chaque siphon, ainsi on ne peut pas caractériser l'hétérogénéité des débits sur les autres arrosages.

Les pluies dont l'occurrence est forte à la fin de la campagne, rendent difficile la récolte. C'est la raison pour laquelle le maïs de printemps est peu cultivé sur le périmètre.

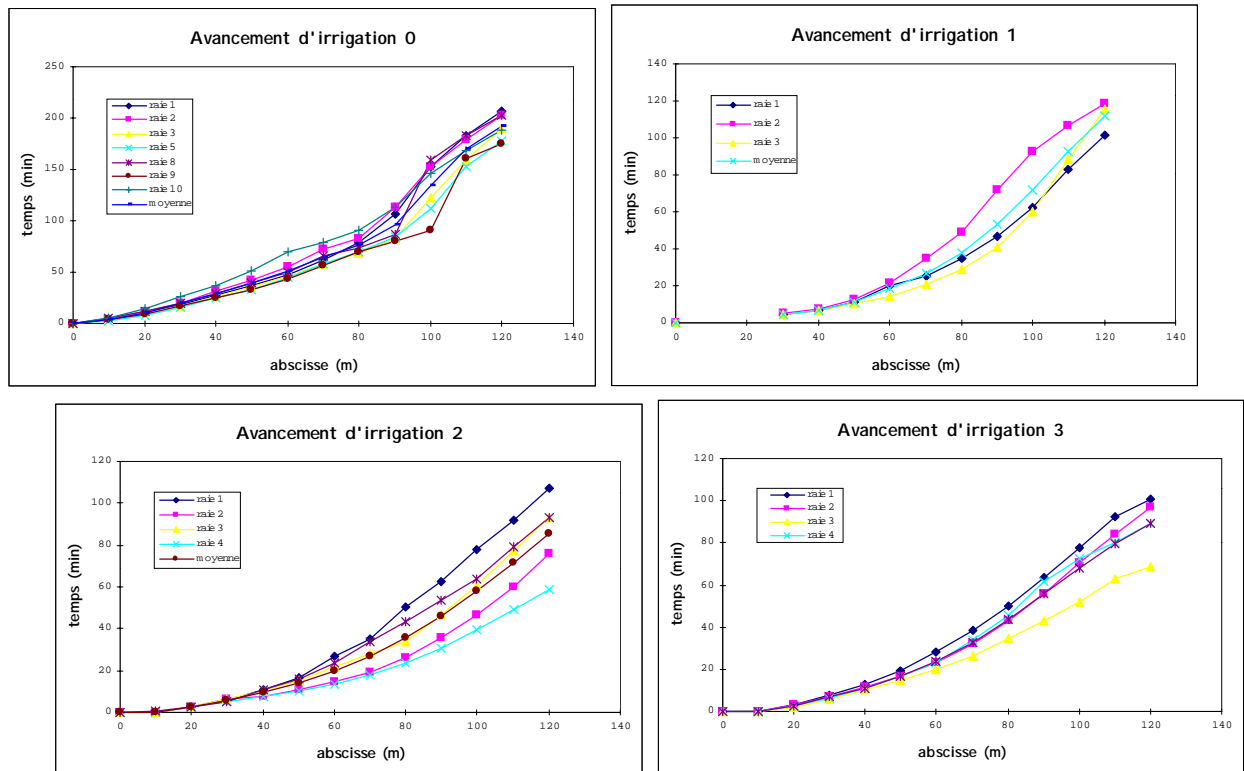
4.3.3.2 Analyse du rendement

Même si les échantillons ont été prélevés sur plusieurs placettes de chaque sous-parcelle, nous disposons seulement d'une valeur moyenne du rendement pour chaque

4.3.3.3.2 Analyse de l'avancement

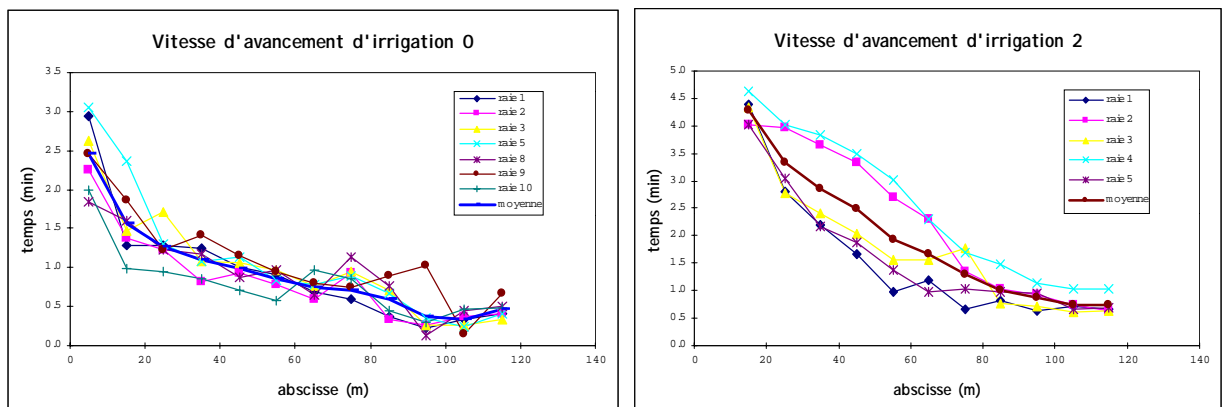
On dispose de mesures (utilisables) de l'avancement sur 3 à 7 raies selon les irrigations, mais seulement d'un débit moyen assigné à toutes les raies. L'avancement est assez variable d'une raie à l'autre (*Tableau 86 et Figure 74*), dû principalement aux mottes, et surtout lors du premier arrosage.

Figure 74 Avancement des irrigations sur la parcelle expérimentale en «El Carrizo»



Afin de caractériser l'hétérogénéité des conditions d'avancement, nous présentons les vitesses mesurées lors de l'irrigation pré-semis et de la deuxième irrigation.

Figure 75 Vitesse d'avancement lors de l'irrigation de pré-semis et de la 2^{ème} irrigation



Lors de l'irrigation 0 (pré-semis), on peut noter une grande hétérogénéité des vitesses d'avancement due à l'hétérogénéité des débits entre les raies (ils varient entre 0.8 et 1.2 l/s) et aux travaux du sol réalisés très peu avant cet arrosage. Certaines raies (par exemple 9 et 10) se distinguent par des vitesses d'avancement très différentes au départ pour finalement tendre vers l'avancement moyen ($T_{\text{raie10}}=189$ min et $T_{\text{moy}}=192$ min). Lors de la deuxième irrigation, les raies 3 et 5 ont les temps d'arrivée les plus proches au temps d'arrivée moyen (93 minutes en les deux cas contre 86 minutes), mais l'évolution de la vitesse d'avancement est différente dans chaque cas.

On voit donc la difficulté de pouvoir caractériser une irrigation sur une parcelle entière à partir des mesures d'avancement sur quelques raies seulement. De plus, les données sur avancement sont parfois incomplètes, ainsi leur utilisation pour le calage du modèle Raieopt sur une raie prise au hasard nous paraît délicate. Pour calculer les doses apportées en amont, au milieu et en aval de la parcelle, nous sommes basés donc sur l'avancement moyen.

4.3.3.3 Calculs des doses apportées

La dose moyenne apportée à la première irrigation a été de 120 mm, tandis que lors des irrigations suivantes on a apporté de 70 à 100 mm d'eau (*Tableau 83*). Il faut rappeler d'une part que le débit sur chaque siphon n'a pas été mesuré, et que d'autre part on n'a pas la garantie que le débit d'alimentation est resté constant durant tout l'arrosage. En conséquence les doses moyennes apportées calculées sont seulement approximatives.

Pour caractériser la variabilité des apports entre amont et aval, nous avons simulé la dose apportée à chaque point le long d'une raie « moyenne » à l'aide du modèle Raieopt. Nous présentons ici les résultats correspondants à la 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} irrigation. Sur l'avancement de l'irrigation de pré-semis le changement de débit ne permet pas le calage du modèle Raieopt. De plus, à partir de la 4^{ème} irrigation, l'avancement n'a pas été mesuré, le débit n'étant pas constant dans le canal d'irrigation.

La *Figure 76* présente les avancements simulés et calculés pour les trois irrigations, où on peut noter un bon calage de la courbe d'avancement. Cependant il est important de souligner que le modèle est calé sous l'hypothèse que le débit demeure constant durant toute la phase d'avancement, ce dont nous ne sommes pas sûr, d'autant que l'avancement présente des caractéristiques plutôt irrégulières. Le profil de la dose apportée à chaque arrosage est également simulé selon hypothèse de débit constant (*Figure 76*). Le profil simulé de la dose apportée est différente selon l'arrosage. Ainsi, au premier arrosage la partie amont a été la plus irriguée, tandis que lors de deux irrigations suivantes, elle a été la moins irriguée (*Figure 76*). Par ailleurs, le coefficient d'uniformité (CU) (calculé le long d'une raie moyenne) est assez élevé, et il varie entre 85 et 95 % selon l'arrosage, ce qui est tout à fait normal pour des raies courtes irriguées à 1 l/s.

Figure 76 Résultats du calage de Raieopt sur les 3 premiers arrosages post-semis de la parcelle d'El Carrizo

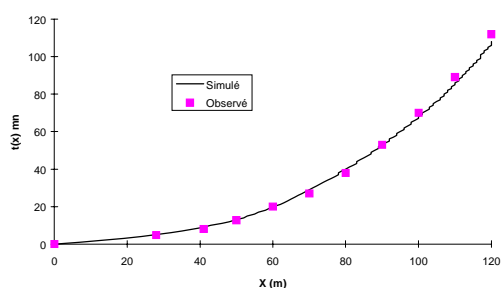


Figure A Avancement 1^{er} arrosage

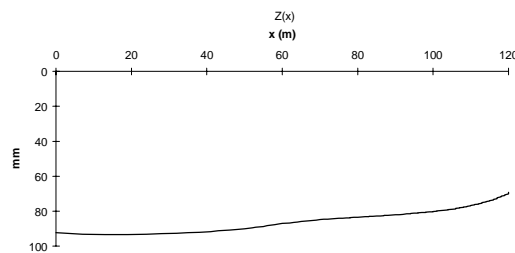


Figure B Profil de la dose 1^{er} arrosage

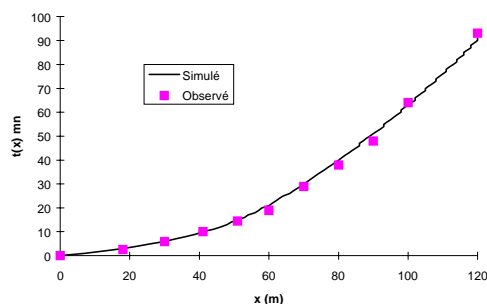


Figure C Avancement 2^{ème} arrosage

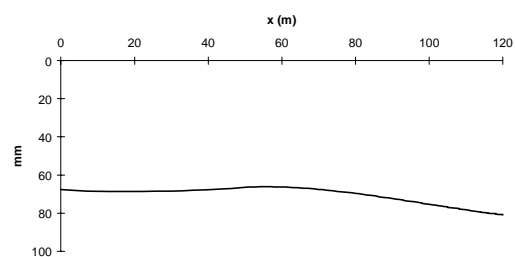


Figure D Profil de la dose 2^{ème} arrosage

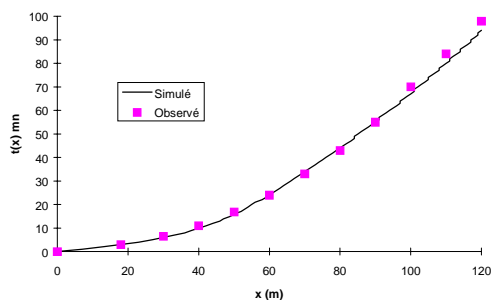


Figure E Avancement 3^{ème} arrosage

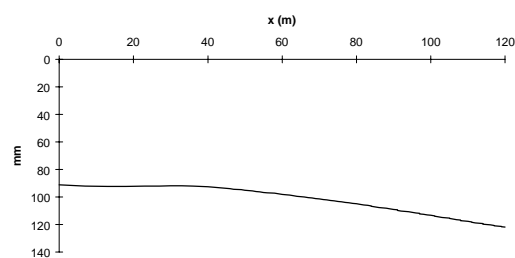


Figure F Profil de la dose 3^{ème} arrosage

Tableau 87 Doses apportées calculées avec Raieopt, lors des premières irrigations après semis

	amont (30 m)	milieu (60 m)	aval (100 m)
irrigation 1	92	87	80
irrigation 2	70	67	76
irrigation 3	90	98	112

Si on compare les doses simulées apportées sur les différents sites de mesures (Tableau 87) avec les doses moyennes calculées à partir du temps d'irrigation et la dose moyenne (Tableau 83), on peut noter que c'est le site « milieu » qui a reçu des apports très proches de la dose moyenne.

des apports très proches de la dose moyenne.

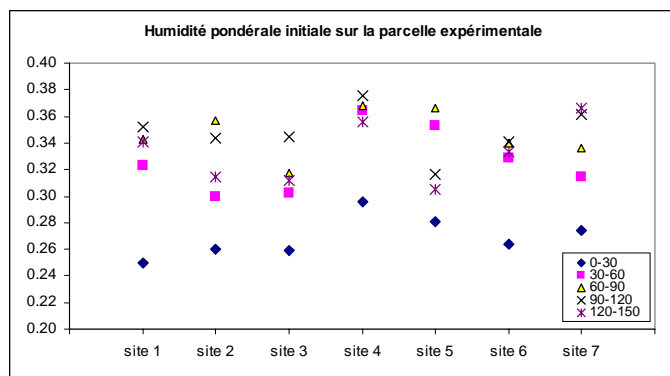
4.3.3.4 Suivi du fonctionnement hydrique

4.3.3.4.1 Humidité du sol

Afin de suivre l'humidité du sol, 8 sondes TDR (CS615 de Campbell) ont été installées sur les sites 3 et 7. Cependant, en raison d'une erreur lors des mesures manuelles, les mesures TDR ne sont pas exploitables.

La détermination de l'humidité par **gravimétrie** a été réalisée parallèlement aux analyses du stock d'azote du sol, sur les 7 sites suivis (*Figure 72*). Les résultats obtenus lors du premier prélèvement ont servis à l'évaluation du stock initial en eau, donnée d'entrée nécessaire au modèle STICS.

Figure 77 Humidité initiale du sol sur la parcelle expérimentale



Les résultats issus de l'analyse gravimétrique (*Figure 77*) montrent des différences d'humidité initiale entre l'amont et aval de la parcelle, et les sites au milieu de la parcelle (site 1, 3 et 6) sont les plus secs. Il faut ajouter que sur les sites 4 et 7 nous avons noté la présence de la nappe vers 120 cm de profondeur, tandis que vers les sites 2 et 5 la nappe est rabattue et se trouve dans une profondeur de 150 cm environ.

4.3.3.4.2 Analyse de la dynamique des écoulements

Des **tensiomètres à capteur-aiguille** ont été installés uniquement sur les sites 3 et 6, aux profondeurs 15, 45, 75 et 105 cm. Les lectures des tensiomètres ont été effectuées tous les jours (sauf le dimanche), vers 9 heures du matin. Nous avons reproduit pour les sites 3 et 6, l'évolution des charges hydrauliques à différentes profondeurs et l'évolution du gradient de charge à 90 cm. On peut remarquer (*Figure 78*) qu'après chaque arrosage, le tensiomètre à 105 cm a réagit, ce qui signifie que le front d'humectation est survenu au moins jusqu'à cette profondeur. D'autre part, un gradient de charge négatif à 90 cm indique un flux de drainage à cette profondeur tout au long de l'année (*Figure 78*).

Seul le tensiomètre à la cote 15 cm (mesures disponibles seulement sur le site 6) enregistre des variations de charge importante. Plus en profondeur, le sol se dessèche beaucoup moins vite.

Figure 78 Evolution des charges hydraulique et du gradient de charge à 90 cm sur le site 3

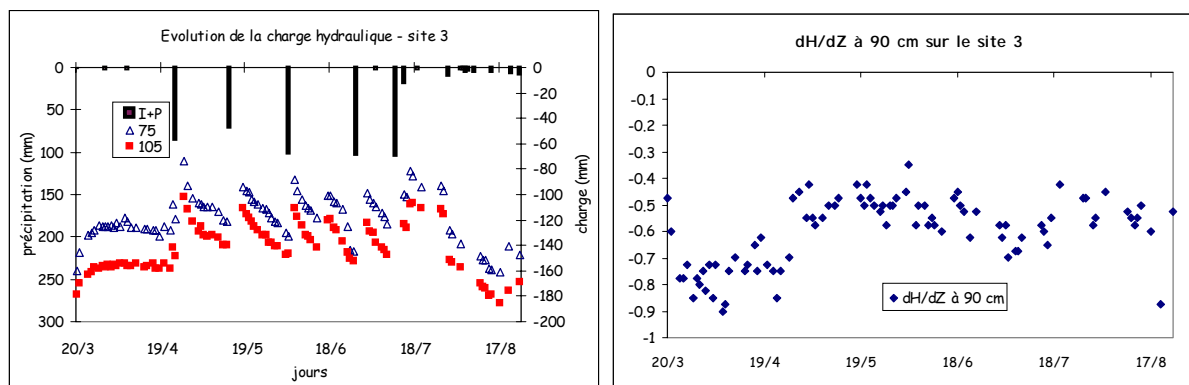
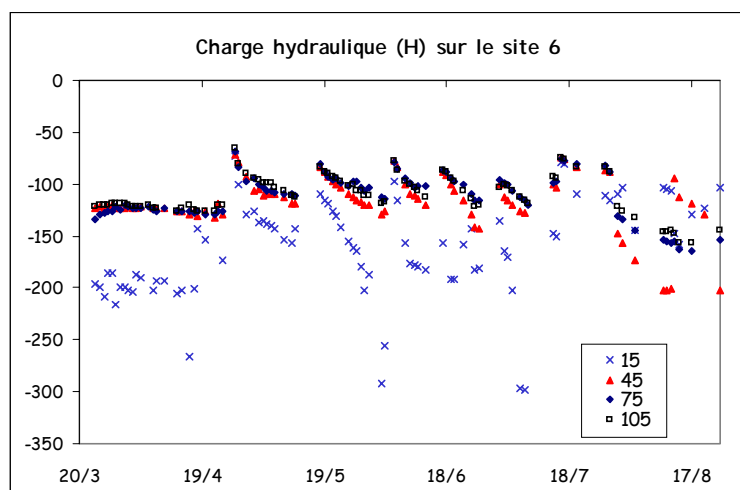


Figure 79 Evolution des charges sur le site 6



Il est important d'ajouter qu'après chaque arrosage la première mesure tensiométrique n'a été réalisée que 2-3 jours après l'irrigation. Après la fin de la campagne d'irrigation (11 juillet), on note l'augmentation des charges hydrauliques (en valeur absolue) à chaque profondeur (Figure 79), ce qui peut témoigner de l'activité racinaire sur tout le profil, même si c'est vers 45 cm que la densité racinaire apparaît la plus élevée.

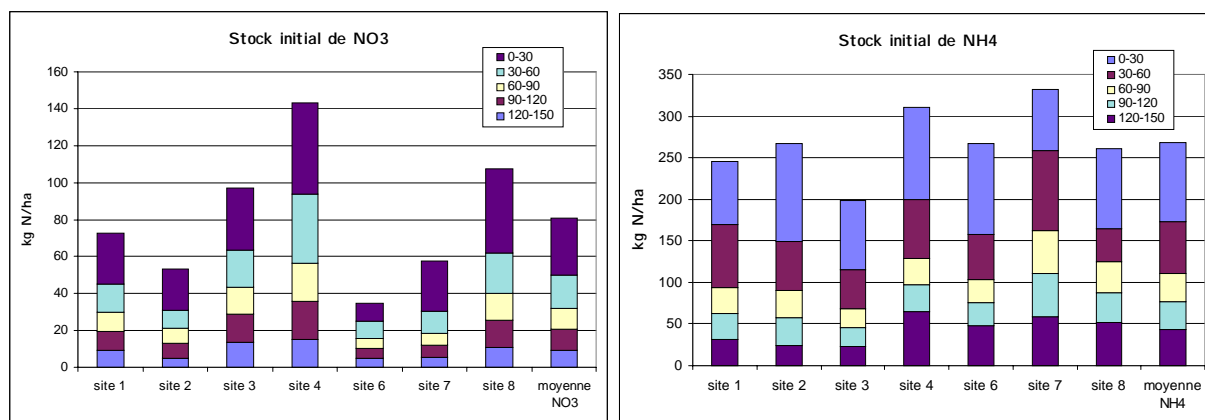
4.3.3.5 Suivi du bilan d'azote

Les analyses du stock d'azote minéral du sol ont été réalisées sur les 7 sites de suivi. Des prélèvements ont eu lieu avant l'irrigation de pré-semis, après la première irrigation post-semis, après les irrigations fertilisantes et à la récolte. Les prélèvements ont été réalisés à la tarière aux profondeurs de 0-30, 30-60, 60-120 et 120-150 cm. Pour chaque horizon, la terre provenant de 3 à 5 prélèvements entre le billon et le fond de la raie a été mélangée pour avoir une meilleure représentativité de l'échantillon (problème de l'hétérogénéité entre billon et raie). Nous disposons des données aux trois dates seulement pendant la campagne, ainsi les conclusions à tirer de cette analyse apparaissent très limitées. De plus, en raison de certains problèmes d'organisation, une seule mesure d'azote dans la plante a pu être réalisée. Les analyses ont été effectuées au laboratoire de l'Institut Technologique de l'Etat de Sonora au Nord Est du pays.

4.3.3.5.1 Analyse de l'hétérogénéité du stock initial d'azote

Nous présentons le stock d'azote initial par couche de 30 cm sur les sept sites suivis (Figure 80). A cette date, et surtout concernant les couches superficielles, l'azote se présente sous forme d'azote ammoniacal. On peut noter une diminution de la teneur en nitrate de l'amont à l'aval (de S4 à S2, et de S8 à S6). Cette tendance n'est pas valable pour le stock en ammonium. D'autre part, ce sont les deux premières couches (0-30 et 30-60) qui sont les plus hétérogènes, car c'est à ces profondeurs que les réactions microbiologiques se réalisent. Le stock d'azote total moyen est très élevé (350 kg N/ha), avec un écart-type de 55 kg N/ha. Ces teneurs sont difficiles à expliquer en l'absence d'autres analyses sur le périmètre.

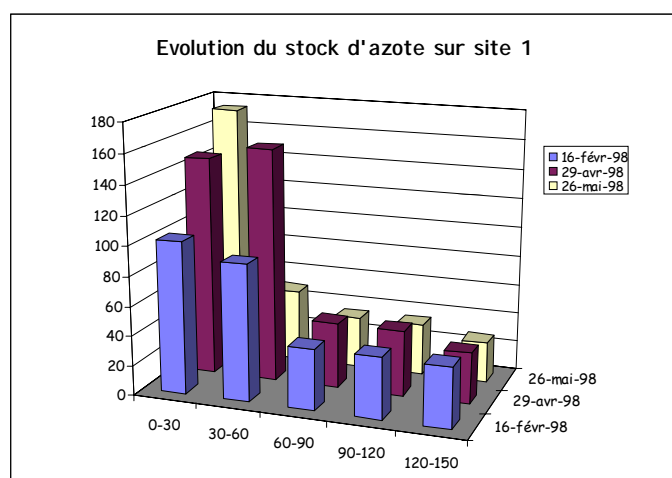
Figure 80 Comparaison des stocks initiaux d'azote (en forme NH_4 et NO_3)



4.3.3.5.2 Evolution du stock d'azote sur le site non fertilisé

On peut noter (Figure 81) une forte teneur en azote du sol en début de la campagne, surtout dans les 60 premiers cm. A cette date, le stock d'azote est principalement sous forme d'ammoniaque (par exemple 21 ppm de NH_4^+ contre 8 ppm de NO_3^- dans la première couche). Cependant, cette forte

Figure 81 Evolution du stock d'azote sur le site non fertilisé



concentration en ammoniaque diminue pendant la campagne dans toutes les profondeurs: l'azote ammoniacal se transformant en azote nitrique. La perte d'ammoniaque par lessivage est exclue, car cette forme d'azote est retenue par le sol. D'autre part, c'est l'azote sous forme nitrate qui est principalement prélevé par la culture.

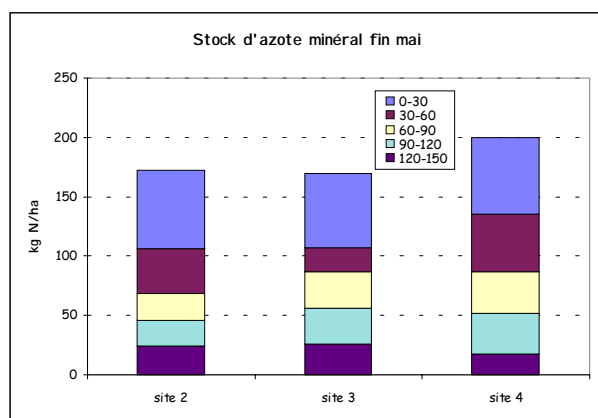
On observe une augmentation de la teneur en azote total (somme des formes ammoniacale et nitrique) entre les deux premiers prélèvements. A cette époque le prélèvement d'azote par le maïs est encore très faible, ainsi la variation du stock peut nous renseigner sur la minéralisation. La teneur en azote du sol a augmenté d'environ 100 kg N/ha pendant 2.5 mois, donnant un minérant de la vitesse de minéralisation de 1.3 kg N/jour.

Etant donné que la minéralisation a lieu essentiellement dans la couche labourée (couche 0-30 cm), l'augmentation de la teneur en azote dans la couche 30-60 correspond fort vraisemblablement à la quantité lessivée de la couche supérieure. La teneur en azote des couches plus profondes ne varie pas durant la campagne, mais on ne peut pas conclure qu'il n'y a pas eu de lessivage au-delà de la profondeur racinaire (80 cm environ pour le maïs dans cette région).

4.3.3.5.3 Cas des sites fertilisés

L'analyse du stock d'azote en fin mai témoigne d'une augmentation difficilement explicable du stock d'azote (sous forme de nitrate) dans la couche de 0-30 cm, sur les sites S5, S6 et S7. Il y aurait eu, semble-t-il un apport d'azote sur la parcelle voisine quelques jours avant les prélèvements, qui aurait « pollué » les sites appartenant au traitement «actuel». D'autre part, on ne peut pas exclure des erreurs d'analyse. Sur les autres sites (S2, S3 et S4), le stock d'azote total est semblable, aussi que sa distribution dans les différentes couches (*Figure 82*). Le stock d'azote total moyen sur ces sites est de 180 kg

Figure 82 Comparaison du stock d'azote sur les sites fertilisés



N/ha en fin mai. Le manque de fiabilité des données du stock d'azote à différentes dates ne nous permet pas une analyse plus approfondie de l'évolution des stocks pendant le cycle cultural. Il faut aussi noter que les observations faites sur le site de Lavalette (lors de la campagne suivante 1999) ont montré de fortes hétérogénéités entre raie et billon, qu'il faudrait vérifier sur le site et selon l'itinéraire technique mexicain.

4.3.4 Conclusion de la partie expérimentale

Un retard considérable dans le programme expérimental a été pris en raison du report de la date de semis et de l'indisponibilité des instruments de mesure. L'étalonnage constructeur des sondes TDR s'étant révélé inutilisable, et les valeurs de temps de parcours prises manuellement sans calage préalable n'ont pas été validées et donnent des valeurs de l'humidité du sol ininterprétables. D'autre part, dû aux différents problèmes, le suivi des irrigations et la réalisation des analyses des nitrates dans le sol n'ont pas été assurées selon le protocole initialement établi.

Les résultats issues de l'expérimentation sont difficilement exploitables et utilisables par la suite et ils ne permettent pas de caler le modèle STICS dans les conditions mexicaines.

4.3.5 Calage des modèles Raieopt et STICS à partir d'expérimentations sur maïs d'hiver (Rosano, 1999)

Pour palier au manque de données disponibles pour le calage du modèle STICS, nous avons pu heureusement disposer des données expérimentales obtenues par Rosano (1999) sur un site expérimental du périmètre «El Carrizo», qui nous ont aussi permis de compléter les données disponibles pour Raieopt. Cette expérimentation s'est déroulée de novembre 1997 à mai 1998, donc sur un maïs d'hiver, ce qui correspond au cas des agriculteurs enquêtés. De plus, la variété du maïs était Asgrow, la même utilisée par la plupart des agriculteurs en «El Carrizo».

4.3.5.1 Préparation des fichiers d'entrée

Selon l'information obtenue auprès du distributeur de la semence d'Asgrow, il s'agit d'une **variété** demi-précoce, avec une floraison à 80 jours environ, et la durée entre le semis et la maturité physiologique est de 160 jours. Ces valeurs ont été confirmées par l'expérimentation menée par Rosano (1999) où ces durées ont été 85 et 165 jours, respectivement. Nous avons transformé ces durées en degrés-jours grâce au fichier climatique correspondant à la campagne d'hiver de 1997-98, en se basant sur une date de semis au 10 novembre.

On peut comparer Asgrow aux variétés utilisées dans STICS (*Tableau 88*). Ce sont les variétés Dunia

Tableau 88 Caractéristiques de différentes variétés de maïs (AGPM, 1996)

	besoins en degrés-jours entre semis et floraison	Besoins en degrés-jours entre semis et maturité	Poids maximum d'un grain (en g)
Furio	975	1875	0.29
Dunia	1025	1925	0.30
Volga	1025	2000	0.31
Samsara	980	1870	0.33
Asgrow	1025	1975	0.31

et Volga (variétés demi-tardives à tardives) qui ont une longueur de cycle assez proche de celle de la variété Asgrow.

Tableau 89 Pratiques agricoles sur la parcelle expérimentale de Rosano (1999)

Date	interventions culturales	irrigation	fertilisation	
			traditionnelle	expérimentale
14-19 oct.	travaux du sol		135	
21 oct.		120		100
10 nov.	semis		105	
15 nov.	levée			
26 dec		100		122
25 jan		100		173
3 févr.	floraison			
16 févr.		100		
6 mars		100		
23 mars		100		
7 avril		100		
24 avril	maturité			
23 mai	récolte			
Total		720	240	395

Le **sol** de la parcelle expérimentale est de type argilo-sableux (sable=52 %, argile=33 %), type comparable à celui que l'on utilisera pour simuler les scénarios. La texture est homogène sur le profil de sol correspondant à l'enracinement maximal. Les humidités caractéristiques de ce sol sont données au *Tableau 101*

Les **itinéraires techniques** sont ceux utilisés par Rosano (1999), correspondants à plusieurs traitements, dont deux ont été simulé

sans stress et un avec stress azoté (sans apport d'azote). Les apports d'eau sur ces trois traitements étaient réalisés selon les pratiques utilisées par les agriculteurs (*Tableau 89*). A noter que les traitements présentés ici sont différenciés seulement selon les pratiques de fertilisation: traditionnelle et expérimentale. Le précédent cultural a été le haricot rouge, dont les résidus de récolte ont été pris en compte lors des simulations.

Faute de mesure d'humidité du sol au semis, nous avons fixé les conditions initiales d'humidité du sol à la capacité au champ, en prenant le parti de démarrer la simulation au lendemain d'une forte précipitation de septembre. Le stock initial d'azote a été estimé à partir des données disponibles sur la parcelle en question.

4.3.5.2 Calage et validation du modèle Raieopt

Le calage et la validation de Raieopt (*Figure 83*) ont été donc effectués sur un sol argilo-sablo-limoneux. Les valeurs de conductivité ($K_s = 0.52$ cm/h) obtenues sont très proches de celles déduites des formules de pédotransfert (Shaap et al., 1998). K_s est plus élevé lors d'irrigation de pré-semis (0.7 cm/h), car le sol n'est pas encore stabilisé suite aux travaux du sol. Au-delà de cette irrigation, les valeurs de K_s et λ_c convergent vers celles du sol en place.

Figure 83 Calage et validation du Raieopt sur la parcelle expérimentale de Rosano (1999)

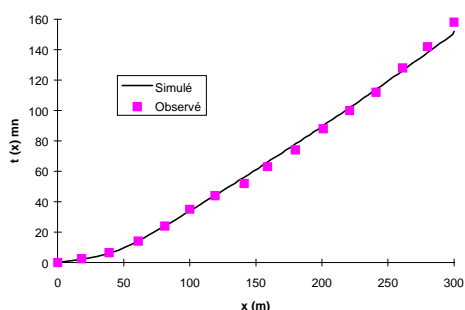


Figure a Calage de Raieopt sur une irrigation de pre-semis ($\Delta\theta = 0.26$, $\lambda_c = 35$ cm, $K_s = 0.7$ cm/h, $Q_{in} = 2.9$ l/s)

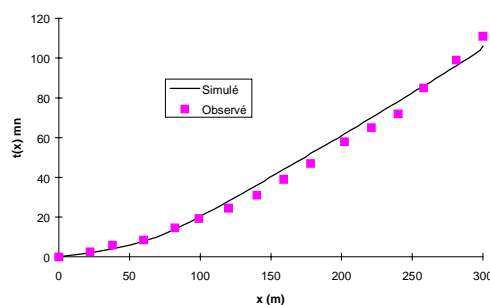


Figure b Calage de Raieopt sur la 1^{ère} irrigation ($\Delta\theta = 0.25$, $\lambda_c = 30$ cm, $K_s = 0.52$ cm/h, $Q_{in} = 3.0$ l/s)

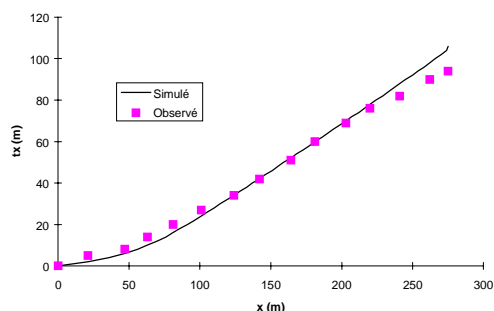


Figure c Validation de Raieopt sur la 2^{ème} irrigation ($\Delta\theta = 0.22$, $\lambda_c = 30$ cm, $K_s = 0.52$ cm/h, $Q_{in} = 3.0$ l/s)

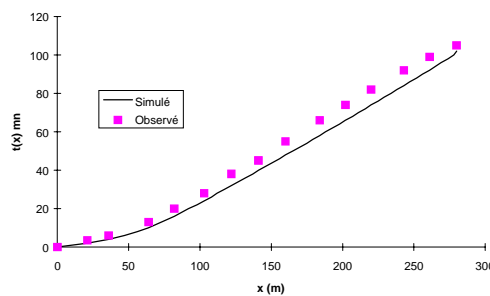


Figure d Validation de Raieopt sur la 3^{ème} irrigation ($\Delta\theta = 0.21$, $\lambda_c = 30$ cm, $K_s = 0.52$ cm/h, $Q_{in} = 3.0$ l/s)

4.3.5.3 Résultats des simulations avec STICS non calé

Nous avons donc effectué les premières simulations avec la variété Volga. Nous avons utilisé le modèle général de STICS et aussi le modèle STICS-feuilles car nous disposons du suivi du LAI. Nous avons constaté que la matière sèche et le rendement était légèrement surestimé dans le cas du traitement sans stress, par contre ces valeurs sont largement surestimées pour le cas du traitement en stress azoté (Tableau 90). La quantité d'azote prélevée par la plante est surestimée dans les deux cas. De plus, l'évolution du LAI et de la matière sèche est mal simulée par le modèle non calé. Nous ne disposons pas de données pour vérifier la validité du modèle dans une situation de stress hydrique.

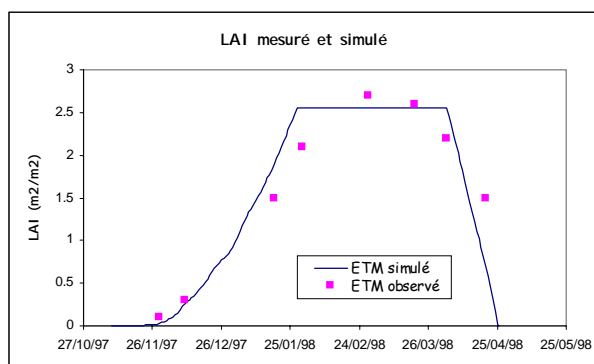
Tableau 90 Résultats des simulations avec le modèle STICS non calé

	Traitement sans stress			Traitement avec stress azoté	
	STICS	STICS-feuille	Observé	STICS	observé
Matière sèche	24.7	21.3	23.0	23.6	11.0
rendement	10.1	9.1	8.0	10.1	2.8
N dans plante	409	349	140	223	55

4.3.5.4 Résultats des simulations avec calage

La même procédure de calage que celle décrite au chapitre du calage de STICS pour le site de Lavallette a été suivie. Nous avons calé certains paramètres relatifs à la plante, notamment ceux concernés par l'évolution du LAI

Figure 84 LAI mesuré et simulé sur le site 2 sans stress



et pour l'azote, la quantité d'azote prélevée par la plante, car nous disposons d'un bon suivi de ces valeurs (Rosano, 1999). Les valeurs simulées de la MS, du rendement et la quantité d'azote dans la plante sont satisfaisantes (Tableau 92).

Tableau 91 Paramètres calés pour le maïs de variété Asgrow

LAI			MS			Azote		
paramètre	valeur initiale	valeur calée	paramètre	valeur initiale	valeur calée	paramètre	valeur initiale	valeur calée
dlaimax	0.0016	0.0009	efcroiveg	3.8	4.4	adilmax	5.44	4.0
			teopt	25	20	Vmax1	0.0018	0.0001
			teoptbis	25	30	Vmax2	0.017	0.005

Tableau 92 Résultats des simulations avec le modèle STICS calé

	Traitement sans stress 1		Traitement sans stress 2		Traitement avec stress azoté	
	STICS	observé	STICS	observé	STICS	Observé
matière sèche	21.3	23.0	24.2	24.0	13.2	11.0
rendement	8.2	8.0	9.1	10.2	5.3	2.8
N dans plante	168	140	228	210	96	55

4.4 RESULTATS DES ENQUETES ET DE L'ANALYSE DE BASES DE DONNEES

Des enquêtes et une base de données “irrigation” existant sur le périmètre irrigué de “El Carrizo” nous ont fourni les informations concernant la conduite du maïs (principalement irrigation) pour l’année 1996/1997. Pour rester cohérent par rapport aux données sur la fertilisation dont nous disposons, nous avons exploité séparément les données relatives aux 19 agriculteurs enquêtés sur les pratiques de fertilisation.

4.4.1 Caractéristiques du maïs

Selon la date de semis, il existe trois catégories de maïs: de printemps (semis de février à mi-mars), d’été (semis de mi-août à fin septembre) et d’automne-hiver (semis d’octobre à mi-novembre). Le cycle avec semis au printemps est le moins productif, car une partie du cycle coïncide avec des températures élevées en période reproductive, et de plus, la récolte coïncide avec les pluies d’été.

Tableau 93 Durée du cycle du maïs tardif selon la date de semis (Mendoza, 1993)

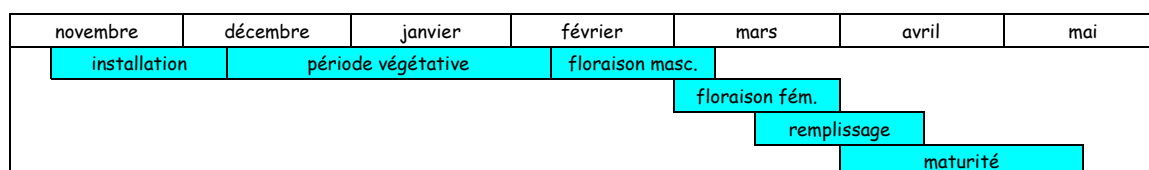
semis	floraison (jours)	maturité (jours)	rendement relatif*
15 mars	78	160	62 %
15 novembre	98	205	96 %.

* rendement par rapport au rendement maximal

L’inconvénient pour le cycle d’été est le risque de pluies au moment du semis, et de cyclones lors du développement végétatif. Le maïs d’hiver est le plus productif, mais il existe un risque de grêle lors du développement végétatif (Mendoza, 1993). Les rendements moyens observés pour les 3 catégories sont: 5.0 t/ha (printemps), 6.5 à 7.5 t/ha (été) et 7.7 à 8.8 t/ha (hiver) (Mendoza, 1993). Le rendement et la durée du cycle varient selon la date du semis (Tableau 93).

La Figure 85 présente les étapes du développement du maïs pour un semis au début de mois de novembre.

Figure 85 Etapes du développement du maïs en «El Carrizo» pour le cycle d’automne-hiver



4.4.2 Date de semis, taille des parcelles

La date de semis et la taille des parcelles de maïs sont disponibles pour les quatre modules pour les campagnes hiver, printemps et été. D’après la base de données, il n’y a pas eu de maïs d’été au module 1 et 2, et non plus de maïs de printemps au module 1. Nous disposons aussi des données sur le rendement du maïs (en t/ha) et sur le rendement agronomique de l’eau (kg/m^3) sur les exploitations du module 2.

Tableau 94 Données sur les pratiques agricoles hiver 1996-97

Module No.	date du semis				superficie (ha)				rendement (t/ha)	rendement d'eau (kg/m ³)
	1	2	3	4	1	2	3	4	2	2
Intervalle	24/09 à 06/01	17/10 à 09/01	03/09 à 26/12	02/10 à 30/12	1 à 16	2 à 30	1 à 30	1 à 30	4 à 9	0.53 à 1.2
valeur moyenne (CV)	24/11	23/11	04/11	19/11	7.7 (38 %)	7.2 (61 %)	6.4 (76 %)	8.5 (63 %)	6.3 (22 %)	0.84 (22 %)
valeur médiane	24/11	19/11	08/11	19/11	9.0	6.8	6.0	8.5	6.5	0.87
nombre de cas	771	1466	926	621	771					

La surface des parcelles de maïs varie d'un hectare jusqu'à 30 hectares, avec une moyenne de 6 à 10 hectares, selon le module et la campagne agricole. Le maïs d'hiver a été semé entre le 24 septembre et le 9 janvier, avec une date moyenne vers le 20 novembre (Tableau 94). Le semis pour le maïs de printemps a été réalisé entre le 3 février et le 20 mai, mais sur la plupart des parcelles on a semé vers la fin du mois de mars (Tableau 95). Le maïs d'été a été cultivé seulement sur les modules 2 et 4, avec une date de semis moyenne vers la fin du mois de mai (Tableau 96).

Tableau 95 Données sur les pratiques agricoles printemps 1997

Module No.	date du semis			superficie (ha)			rendement (t/ha)	rendement d'eau (kg/m ³)
	2	3	4	2	3	4	2	2
Intervalle	09/03 à 16/04	-	03/02 à 20/05	5 à 10	2 à 20	2 à 30	4.0 à 5.0	0.53 à 0.67
valeur moyenne (CV)	31/03	-	01/04	8.9 (21 %)	7.8 (99 %)	15.6 (61 %)	4.5 (9 %)	0.61 (9 %)
valeur médiane	31/03	-	25/03	10.0	4.0	16.3	4.5	0.60
nombre de cas	7	7	18					

Les valeurs du rendement sont disponibles seulement sur les exploitations appartenant au module 2. On a trouvé un rendement moyenne de 6.3 t/ha pour le maïs d'hiver, contre 4.5 t/ha au printemps et 4.3 t/ha en été. Ces valeurs sont très proches des valeurs trouvées dans la littérature pour la même région (Mendoza, 1993).

Tableau 96 Données sur les pratiques agricoles été 1997

Module No.	date du semis		superficie (ha)		rendement (t/ha)	Rdt d'eau (kg/m ³)
	2	4	2	4	2	2
intervalle	08/05 à 14/07	04/04 à 15/07	2 à 30	1 à 30	1.5 à 7.5	
valeur moyenne (CV)	03/06	25/05	9.1 (58 %)	9.0 (56 %)	4.3 (43 %)	0.57 (44 %)
valeur médiane	30/05	25/05	10.0	9.0	4.0	
nombre de cas	54	194				

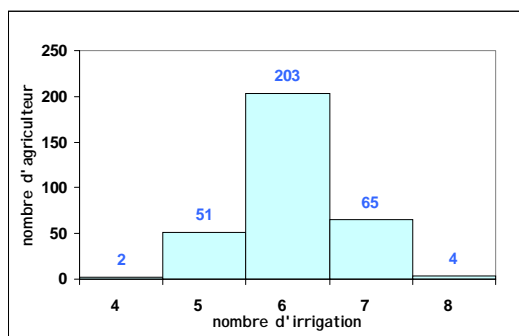
4.4.3 Irrigations

L'après d'analyse de la base de données concernant les parcelles de maïs (date de semis, taille des parcelles) on peut constater que les pratiques sont quasiment identiques sur les parcelles appartenant aux différents modules. Pour cette raison, nous avons exploité par la suite la base de données d'irrigation d'un module uniquement. Etant donné que les agriculteurs questionnés lors de notre en-

quête sur le terrain appartiennent au module 1, il nous a paru logique d'exploiter la base de données d'irrigation sur ce module.

Cette base de données contient les heures d'ouverture et de fermeture des vannes des agriculteurs ainsi que le débit délivré et la surface irriguée. Le volume distribué et la dose apportée sont donc facilement déductibles. Nous avons analysé un sous-échantillon de 325 agriculteurs de maïs parmi les 800 appartenant au module 1.

Figure 86 Nombre d'arrosages appliqué par les agriculteurs du module 1 (325 agriculteurs analysés)



Le choix de ces agriculteurs a été aléatoire. Selon les résultats de cette analyse, le semis a été réalisé entre le 24 septembre et le 26 décembre, et on a trouvé une date moyenne de semis vers le 22 novembre. Le débit moyen par bloc a été 80 l/s, tous les arrosages confondus. Le plus fréquemment ces agriculteurs ont appliqué six arrosages pendant la campagne, mais on a trouvé aussi des agriculteurs ayant appliqué quatre ou huit irrigations (Figure 86).

Le Tableau 97 présente les doses brutes moyennes apportées lors de chaque irrigation. On peut noter que le coefficient de variation des doses (CV) a été constant pour presque tous les arrosages (22 %). On présente aussi les doses maximales apportées pour montrer que les valeurs moyennes peuvent cacher des valeurs extrêmes. Certains agriculteurs sur-irriguent fortement, ce qui peut être la cause du lessivage d'azote et de la perte de rendement.

Tableau 97 Calendrier d'irrigation en 1996-97 (moyenne sur 325 agriculteurs)

No. d'irrigation	date moyenne	jours entre 2 irrigations	dose moyenne brute (mm) et CV %	dose maximale brute (mm)	nombre d'agriculteurs
1	27/10		155 (21 %)	275	325
2	10/01	49 (JAS)	130 (23 %)	288	325
3	14/02	35	122 (22 %)	281	325
4	09/03	23	116 (23 %)	283	325
5	27/03	18	113 (22 %)	227	323
6	13/04	17	105 (22 %)	216	272
7	24/04	11	93 (28 %)	194	69
8	05/05	11	120 (32 %)	173	4

La dose totale moyenne apportée a été de 742 mm, avec un écart-type de 106 mm (CV=14 %). La dose minimale et maximale apportée était de 505 mm et 1072 mm, respectivement. A noter que la dose totale

moyenne ne correspond pas obligatoirement à la somme des apports moyens prenant en compte six irrigations (nombre le plus fréquent d'irrigations). Ce phénomène s'explique par le fait que dans notre calcul nous n'avons pas différencié les agriculteurs appliquant des nombres différents d'arrosage: la dose moyenne par arrosage est calculée sur la totalité des agriculteurs analysés. Or les agriculteurs irriguant seulement 4 ou 5 fois apportent des doses plus élevées par arrosage, que les agriculteurs qui irriguent 6 ou 7 fois pendant la même campagne d'irrigation. Cependant en raison à un nombre assez élevé d'agriculteurs analysés et à une certaine homogénéité entre les pratiques, dans notre cas ces deux valeurs sont très proches: 739 contre 742 mm.

Figure 87 Nombre d'arrosage pratiqué par les agriculteurs enquêtés

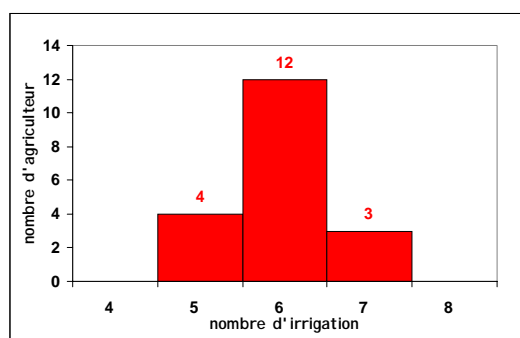


Tableau 98 Irrigations pratiquées par les agriculteurs enquêtés (n=19) de El Carrizo pour le maïs d'hiver

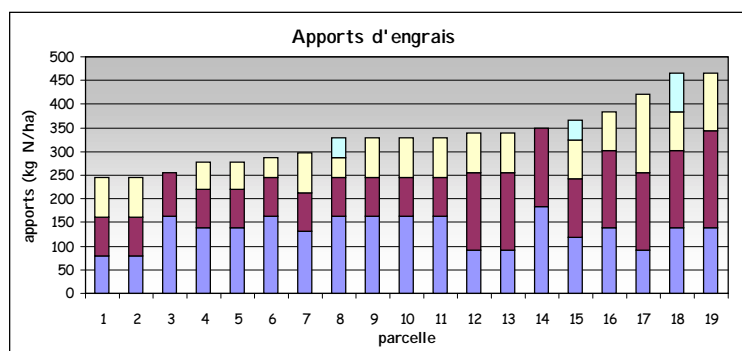
No. d'irrigation	date	jours entre 2 irrigations	dose apportée (mm)	ecart-type
0 ou pré-semis	22/10/96		159	29
Semis	21/11/96		-----	-----
1 ^{ère}	05/01/97	45 Jours après semis	131	29
2 ^{ème}	09/02/97	35	112	23
3 ^{ème}	05/03/97	24	111	29
4 ^{ème}	24/03/97	19	102	23
5 ^{ème}	14/04/97	21	103	19

bien les pratiques agricoles moyennes.

4.4.4 Fertilisations

Notre enquête au sujet de la fertilisation pendant le cycle cultural d'hiver 1996-97 a été effectuée sur

Figure 88 Quantité d'azote apporté par les agriculteurs enquêtés et son fractionnement



19 agriculteurs appartenant au module 1. Les résultats montrent que les agriculteurs effectuent de deux à quatre apports d'azote (Figure 88).

L'apport total moyen a été de 327 UN avec un écart-type de 72 UN, reparti en plusieurs doses (Tableau 99). Le quatrième apport (seulement chez trois agriculteurs des 19) a été en moyenne de 55 kg N/ha, appliqué en fertigation.

Les résultats montrent que les agriculteurs effectuent de deux à quatre apports d'azote (Figure 88).

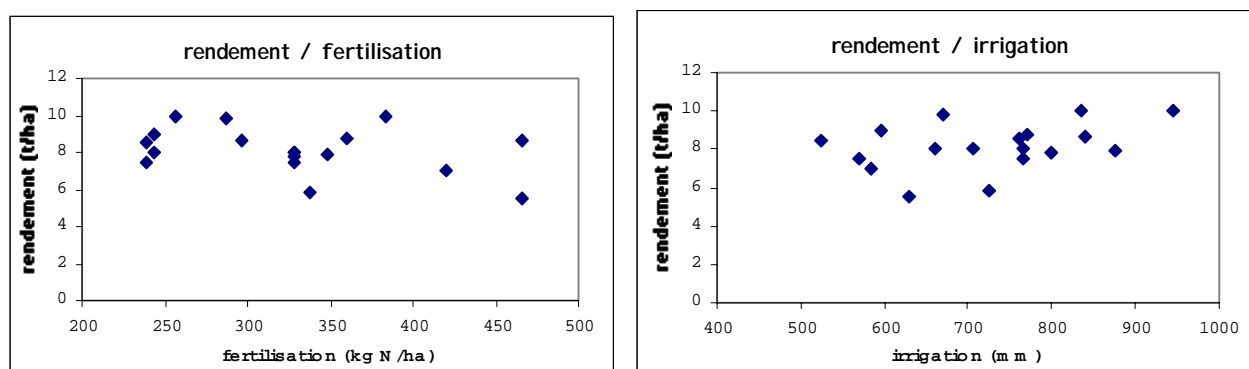
Tableau 99 Fertilisations pratiquées par les agriculteurs de «El Carrizo» pour une culture de maïs d'hiver

Numéro de l'apport	date d'apport	forme de l'apport	dose moyenne (kg N/ha)	écart-type (kg N/ha)
1er apport	semis ou pré-semis	urée ou ammoniacque anhydre gazeuse injectée dans sol	132	34
2ème apport	avant la 1ère irrigation	ammoniacque anhydre gazeuse injectée dans le sol	114	43
3ème apport	avec la 2ème irrigation	ammoniacque anhydre dissoute dans l'eau d'irrigation	81	29

4.4.5 Rendements

Les rendements pour les 19 agriculteurs enquêtés ont été très hétérogènes: ils varient de 5,5 à 10 t/ha, avec une moyenne de 8,1 t/ha (ET=1,2 t/ha) alors que le rendement potentiel de la variété utilisée fluctue de 10,9 à 11,8 t/ha dans la région de Sinaloa. Chez certains agriculteurs, le rendement est faible alors que les apports d'eau et de fertilisants ne semblent pas être limitants. L'analyse des résultats de l'enquête montre qu'aucune relation ne peut être proposée entre rendement et dose d'azote ou apport d'eau (Figure 89).

Figure 89 Relation entre rendement et fertilisation et rendement et irrigation



4.4.6 Définition de scénarios types de maïs irrigué sur le périmètre

4.4.6.1 L'itinéraire technique

La date de semis, la profondeur du labour et du semis ont été choisies sur la base des pratiques les plus couramment utilisées sur «El Carrizo». Les précédents culturaux peuvent être des cultures d'hiver (maïs et blé) ou des cultures d'été (sorgho, maïs ou soja). Ainsi les conditions initiales au sujet des résidus semblent assez hétérogènes et il est difficile de proposer une situation valable pour l'ensemble. Par ailleurs, lors des simulations avec des données de Rosano (1999) nous avons pu constater que les résidus n'avaient pas d'effet notable sur le bilan d'azote. Ainsi même au cas où cela pourrait engendrer quelques erreurs sur le bilan d'azote, la quantité des résidus a été choisie nulle.

L'itinéraire de fertilisation a été choisi en se basant sur les données issues de l'enquête auprès des agriculteurs (Tableau 99). Ainsi, nous avons considéré trois fertilisations avec un apport total de 327 kg N/ha.

4.4.6.1.1 Identification des pratiques d'irrigation

A l'aide d'une base de données existante sur les pratiques d'irrigation nous avons pu déterminer la dose brute moyenne d'eau apportée à chaque irrigation (Tableau 98). Nous savons aussi que généralement les agriculteurs irriguent sur des raies longues pouvant aller jusqu'à 1000 mètres, la moyenne

observée étant de 500 m. Le débit délivré pour un bloc d'arrosage est 80 l/s, et généralement on irrigue 120 raies environ en même temps. Ainsi le débit moyen par raie est d'environ 0.7 l/s. Par ailleurs les siphons utilisés peuvent laisser passer un débit maximal de 2 l/s. Pour d'autres scénarios possibles on peut considérer les débits par raies plus élevés, ce qu'implique qu'on irrigue moins de raies par bloc d'arrosage. Le temps moyen des irrigations est de l'ordre de 14 heures par bloc, toutes longueurs de raies confondues (communication personnelle, Hernandez). Pour des raies de 500 m, c'est un débit d'environ 1.0 l/s (*Tableau 100*) qui permet d'apporter la dose brute moyenne déterminée sur l'échantillon des 19 irriguants (*Tableau 98*), dans les limites de temps observées (durée de 11 à 18 heures, selon arrosage).

A partir de la dose moyenne apportée sur une parcelle, du débit moyen par raie et de la longueur des raies, nous pouvons déduire la durée totale de l'irrigation d'un bloc. Nous disposons ainsi de couples

Tableau 100 Couples débit – durée d'irrigation possibles (min)

dose brute apportée	159 mm	131 mm	112 mm	102 mm
TL si q=0.7 l/s	1500	1260	1080	960
TL si q=1.0 l/s	1080	900	720	660
TL si q=1.4 l/s	780	660	540	480

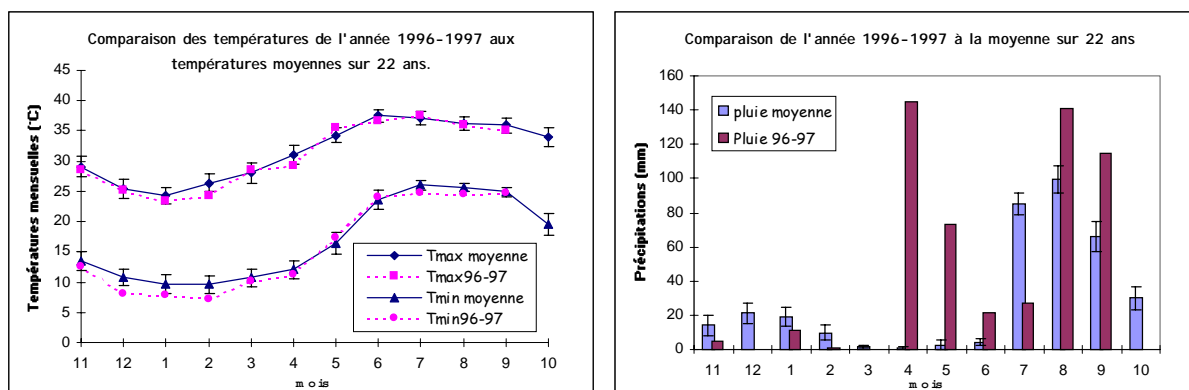
(débit, durée) pour chaque irrigation (*Tableau 100*). Ces données permettent de construire des scénarios réalistes d'irrigation des agriculteurs de «El Carriizo» pour analyser les avantages et les

inconvenients de différents couples débit-temps d'irrigation.

4.4.6.1.2 Le climat

Il est intéressant de comparer les données climatiques des années 1996/97 à celles des valeurs moyennes sur 22 ans, pour étudier la représentativité de la campagne 96/97. Nous avons comparé les températures moyennes mensuelles (maximales et minimales) et les pluies mensuelles (*Figure 90*).

Figure 90 Comparaison des pluies et des températures de l'année 1996-97 avec la moyenne sur 22 ans



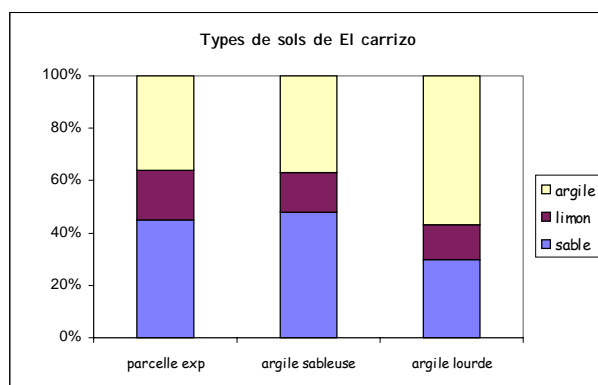
Les températures sont légèrement moins élevées que les températures moyennes (notamment les températures minimales). C'est une année plutôt froide ce qui peut influencer la longueur du cycle du maïs. Du point de vue des précipitations, l'année 96-97 est plus sèche pendant les mois du cycle cultural (de novembre à mars). On peut remarquer, par contre, qu'elle est beaucoup plus humide fin avril,

durant les mois de mai et de juin (à cause de pluies occasionnelles très importantes) et le mois de septembre. La pluie du 20/04 n'aura certainement que peu d'effets sur le développement du maïs qui est déjà au stade de maturité fin avril. Par contre, elle pourra provoquer un lessivage qui n'aurait pas eu lieu en année moyenne. Pour une étude plus complète des effets des pratiques d'irrigation et de fertilisation, il conviendrait de réaliser des simulations aussi en année sèche et en année humide.

4.4.6.1.3 Le sol

Les données du sol, importantes dans le cas d'un diagnostic, sont celles utilisées pour le calage des

Figure 91 Type du sol du périmètre «El Carrizo»



paramètres des lois d'infiltration. Sur «El Carrizo», la texture des sols varie entre deux types: « argile sableuse » et « argile lourde » (d'après les classes de texture de Jamagne, 1967). La texture du sol de notre parcelle expérimentale mexicaine est très proche de celle de l'argile sableuse (Figure 91). La texture est très homogène sur la totalité du profil de sol. Les valeurs des humidités caractéristiques correspondantes à chaque sol (Tableau 101) sont calculées en fonction de la texture, à

l'aide d'une formule empirique établie sur «El Carrizo». Les valeurs des réserves utiles sont assez proches pour les deux types de sol (Tableau 101). Il convient de noter cependant, que le seul critère

Tableau 101 Humidités (pondérales) caractéristiques des deux types de sol de El Carrizo (valeurs moyennes sur 1 m)

	HCC	HPF	réserve utile (mm/m)
argile sableuse	26 %	17 %	120
argile lourde	34 %	24 %	140

texture ne peut pas, à lui seul, conduire à une estimation satisfaisante des propriétés de rétention en eau.

4.4.6.1.4 Les conditions initiales

Pour les raisons déjà évoquées, le début des simulations a été choisi de sorte que le sol se trouve à l'humidité à la capacité au champ, soit après les pluies en septembre. L'erreur résultant des conditions initiales a un impact limité puisque, on atteint l'humidité à la capacité au champ pour tous les horizons à la première irrigation de pré-semis, compte tenu de l'importance de la dose apportée. Le stock initial d'azote nitrique dans le sol est estimé à environ 140 kg/ha, selon les résultats obtenus sur la parcelle expérimentale du « Centro de Capacitation ».

4.5 SIMULATIONS DES SCENARIOS

Le type d'arrosage le plus répandu est l'irrigation à la raie avec colature. Nous avons utilisé la version prédictive du modèle Raieopt pour le calcul des doses à différentes abscisses le long d'une raie, que l'on va supposer être la raie moyenne. Lors des analyses de scénarios, les modèles Raieopt et STICS sont utilisés de manière interactive: Raieopt calcule les doses apportées, introduites ensuite dans STICS, et STICS estime les conditions d'humidité du sol, données indispensables pour une simulation prédictive du modèle Raieopt.

4.5.1 Scénarios des pratiques actuelles

Le modèle STICS a été utilisé afin de prévoir si des apports d'eau hétérogènes au niveau de la raie ont un impact sur le rendement et sur l'environnement.

4.5.1.1 Simulation des profils de dose infiltrée

Les données nécessaires pour la simulation avec la version prédictive de Raieopt sont principalement les caractéristiques hydrodynamiques du sol, comme: la longueur capillaire (λ_c), la conductivité hydraulique à saturation (K_s), l'humidité à saturation (θ_s) et l'humidité initiale (θ_0). Les valeurs de deux premières variables ont été obtenues à partir d'un calage sur les données issues des suivies d'irrigation sur les sols similaires.

L'application des formules de type pédo-transfert (Shoap et al., 1998), donnent des valeurs très proches de celles obtenues par calage en ce qui concerne K_s , soit 0.52 cm/h pour une valeur de $d_s=1.5$ au delà du 1^{er} arrosage. Quant à la valeur de λ_c déduite du calage ($\lambda_c = 30$ cm), elle est dans la gamme des valeurs que propose la littérature pour les sols à tendance argileuse (White et Jully, 1987; Kutilek et Nielsen, 1984).

Afin de connaître l'humidité du sol avant chaque arrosage et optimiser $\Delta\theta = (\theta_s - \theta_0)$, faute de mesures, nous avons utilisé le modèle STICS avec des doses moyennes apportées. Trois scénarios ont été étudiés pour apporter les doses requises: scénario 1 avec débit de 0.7 l/s et pour les scénarios 2 et 3, débit de 1.0 et 1.4 l/s, respectivement. La dose minimale requise est considérée de 100 mm pour les irrigations après le semis et 120 mm pour l'irrigation de pré-semis. Une augmentation du temps d'irrigation a été imposée aux irrigations 5 et 6 pour atteindre 100 mm en moyenne.

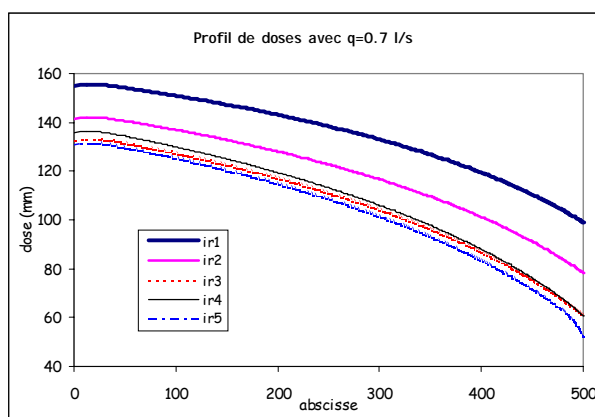
On observe une mauvaise uniformité (de 50 à 73 %) selon l'arrosage avec un débit de 0.7 l/s (*Tableau 102 et Figure 92*).

Tableau 102 Caractéristiques des arrosages avec un débit = 0.7 l/s et les doses aux différents abscisses

	TC (min)	TL (min)	Rn (%)	Cu (%)	Pc (%)	dose max	dose min	dose moy	100 m	200 m	300 m	400 m	450 m	θ_0
1	1500	782	63	73	14	155	99	157	151	143	133	119	110	0.32
2	1260	876	59	66	10	142	78	132	137	128	116	101	91	0.30
3	1080	988	54	57	6	133	61	113	127	117	104	87	75	0.28
4	1080	1018	53	56	4	136	61	113	130	120	106	88	76	0.27
5-6	1020	1018	48	50	3	131	52	107	125	115	101	83	71	0.27

Pc= pertes en colature, Tc= temps de coupure, TL=temps d'arrivée en bout de raie, dose moy=dose moyenne brute apportée

Figure 92 Profils de doses simulés avec q=0.7 l/s



Cette uniformité diminue le long de la campagne, à cause de la diminution de l'humidité du sol. Jusqu'à environ 300 mètres la dose apportée est similaire à la dose requise, par contre les derniers 100 mètres reçoivent un apport fortement déficitaire. Les pertes par colature (PC %) sont faibles (3 à 14 % selon l'arrosage).

Avec un débit plus fort, de 1 l/s, on obtient une meilleure uniformité (de 68 à 82 %), par contre les pertes en colatures sont plus importantes (entre 11 et 27 %), quoique très acceptables. La dose requise n'est pas atteinte sur la moitié de la parcelle, mais on apporte tout de même plus de 80 mm sur 80 % de la parcelle. Il faut remarquer qu'un accroissement du temps d'irrigation pour se rapprocher de la dose envisagée conduira à de plus grandes pertes par colatures.

Tableau 103 Caractéristiques des arrosages avec un débit = 1.0 l/s et les doses aux différents abscisses ($\lambda_c=30$ cm, $K_s=0.52$ cm/h, $\theta_s=0.46$)

	TC	TL	Rn	Cu	Pc	Dose max	Dose min	Dose moy	100	200	300	400	450	θ_0
1	1080	460	60	82	27	131	97	162	129	123	116	108	103	0.32
2	900	514	61	77	21	120	82	135	118	112	104	95	89	0.30
3	720	582	61	70	13	111	66	108	107	100	91	80	74	0.28
4-6	720	594	63	70	11	114	68	108	110	103	93	82	76	0.27

En augmentant encore le débit (q=1.4 l/s), on obtient une très bonne uniformité, en moyenne 80 %, mais la dose minimale requise n'est pas atteinte car les pertes en colatures sont fortes (de 15 à 37 % selon l'arrosage) (Annexe 2.4.4). Il convient d'ajouter que dans les trois scénarios (Tableau 102, Tableau 103 et Annexe 2.4.4), nous avons utilisé le temps d'arrosage issu de notre calcul sur la base des doses moyennes brutes apportées. Evidemment, si le débit est très fort et le sol humide, les pertes par colature sont considérables et la dose nette apportée diminue et n'atteint pas la dose requise.

L'irrigation à deux débits (1 l/s → 0.6 l/s à t=T_L) serait la conduite la mieux adaptée au contexte. Elle permettrait, par exemple sur l'ensemble d'arrosage, avec un temps d'irrigation de 18 heures d'apporter

la dose minimale requise. Par contre, en appliquant un seul débit, le scénario de référence 1 avec le débit de 0.7 l/s constitue une des moins mauvaises solutions dans les conditions de «El Carrizo», si l'on met la priorité sur la réduction des pertes par colature. Cependant, avec ce débit assez faible, le temps d'irrigation est long, de 17 jusqu'à 25 heures selon l'arrosage. Dans l'hypothèse où l'eau peut être récupérée en colature par les agriculteurs en aval, c'est l'uniformité des doses qui peut être le facteur décisif, et la solution à 1 l/s s'avère intéressante. On rappelle ici aussi que les agriculteurs ne payent pas selon le volume d'eau consommé mais que la tarification est basée sur la surface des parcelles irriguées.

4.5.1.2 Simulation du développement de la culture et effet des hétérogénéités d'apport

On vient de voir, que déjà au niveau du couple débit - temps d'arrosage il y a plusieurs scénarios possibles. Nous avons choisi de simuler le scénario de référence 1, où l'uniformité des apports est assez basse ($q=0.7$ l/s), en comparant avec un scénario où l'uniformité est bonne et la dose requise est atteinte sur la majeure partie de la parcelle ($q=1.0$ l/s).

La date moyenne de semis n'a pas pu être retenue pour ces scénarios. En effet pour la date de semis du 21 novembre STICs simule une levée à la mi-janvier et une maturité fin mai. Ce retard dans le cycle de culture, qui ne correspond pas aux données collectées lors de l'enquête, entraîne une forte baisse de rendement. Ce problème, qui est probablement dû aux faibles températures de l'air observées fin novembre, alors que le sol conserve une température suffisante pour assurer une levée rapide. Nous avons donc retenu le 7 novembre 1996, qui est aussi une date plausible, comme date de semis.

4.5.1.2.1 Effets des apports hétérogènes

Nous avons choisi trois points le long de la raies où les apports sont différents avec le débit de 0.7 l/s. Ainsi la dose apportée au point 100 correspondra à la dose moyenne entre le début de raie jusqu'à 200 mètres, celle à 300 mètres à la dose moyenne entre 200 et 400 mètres, enfin le point 450 à la dose moyenne entre 400 mètres et le bout de la raie.

Tableau104 Effet de la dose apportée sur le rendement et le lessivage simulés

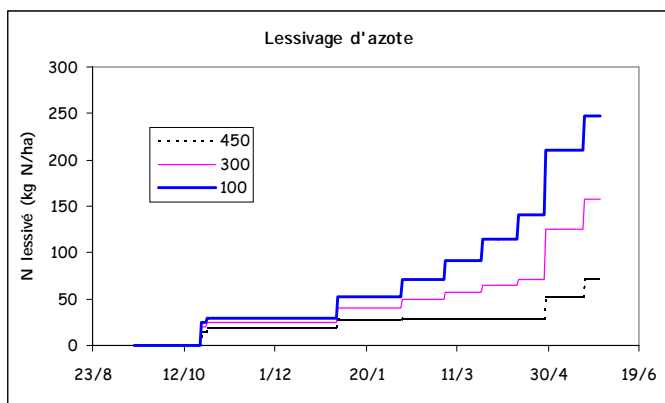
abscisse	Doses	MS (t/ha)	Rendement (15 %)	Drainage (mm)	N plante (kgN/ha)	(N lessivé) (kgN/ha)
100	795	18.6	8.9	581	172	(248)
300	661	19.5	9.1	445	191	(158)
450	494	20.4	9.4	275	209	(72)

() valeurs indicatives

Selon les simulations (Tableau104), l'hétérogénéité des doses apportées n'entraîne une baisse de rendement que de 0.5 t/ha, mais on constate que le rendement le plus élevé correspond à la dose minimale. Cette tendance s'explique par l'effet du lessivage qui a réduit la quantité d'azote disponible pour la plante sur les parties ayant reçu des doses les plus élevées. En effet, la teneur en azote de la plante

simulée diminue d'aval en amont: 1.00 % en aval, 0.98 % au milieu et 0.95 % en amont. Dans tous les cas le modèle indique une absence de stress hydrique; par contre on relève un stress azoté à 100 m: le

Figure 93 Lessivage de l'azote simulé



été provoqué principalement par les fortes pluies de fin de cycle (Tableau104 et Figure 93). Le printemps de 1997 a été particulièrement pluvieux, avec de gros orages en fin de cycle cultural (144 mm le 30 avril et 72 mm le 21 mai), ce qui a accru les pertes d'azote par lessivage.

4.5.2 Scénarios de pratiques alternatives

Sur la base de résultats antérieurs, il semble que l'itinéraire des irrigations n'ait pas été optimal cette année-là. La version avec le calcul automatique des irrigations de STICS peut nous indiquer une solution optimale permettant d'éviter le lessivage. Nous avons fixé la dose d'eau maximale par irrigation à 100 mm, car c'est la dose moyenne appliquée par irrigation sur le périmètre. Avec un semis le 7 novembre, selon le mo-

Tableau105 Comparaison des itinéraires d'irrigation traditionnelle et optimisée pour un semis de 7 novembre (date d'irrigation et dose en mm)

irrigations	0	1	2	3	4	5
traditionnel	22/10 133	05/01 116	09/02 104	05/03 106	25/03 101	14/04 101
simulé par STICS	07/11 20	-	01/02 93	04/03 96	27/03 95	

dèle (Tableau105), l'irrigation de pré-semis de 120 mm n'est pas nécessaire, il suffit d'un apport d'eau de 20 mm au semis (que l'irrigation gravitaire ne peut cependant pas délivrer). De plus, le premier apport après le semis, selon la simulation, est à réaliser en février. Ensuite les dates des irrigations sont similaires. Ainsi pour optimiser les pratiques d'irrigation il conviendrait de supprimer le premier apport après semis et le dernier de la campagne et réduire la dose apportée avant le semis. Cela peut être envisageable cependant seulement en irrigation par aspersion où il est possible d'apporter de faibles doses sur un sol sec, contrairement au gravitaire dont l'efficacité est tributaire des conditions d'humidité initiale du sol.

Pour construire un scénario alternatif qui se rapproche de la situation optimale de STICS, il faut envisager un débit de 1.4 l/s et un temps d'irrigation de 300 minutes; d'après Raieopt la dose moyenne est

niveau de satisfaction n'atteint que 0.73 pendant la phase végétative et 0.79 pendant la phase reproductive. Ces stress sont dus aux lessivages de l'azote (dont on peut retenir les tendances fournies par STICS), qui croissent fortement de l'aval vers l'amont.

D'après le modèle il y a eu du lessivage lors de chaque arrosage, sauf sur le site à 450 mètres, où le lessivage a

été provoqué principalement par les fortes pluies de fin de cycle (Tableau104 et Figure 93). Le printemps de 1997 a été particulièrement pluvieux, avec de gros orages en fin de cycle cultural (144 mm le 30 avril et 72 mm le 21 mai), ce qui a accru les pertes d'azote par lessivage.

alors de 55 mm, avec un CU=74 %, pour l'irrigation de semis. Puis l'utilisation de STICS avec cet apport à la première irrigation fournit l'humidité du sol à la veille des autres irrigations prévues par l'option de calcul automatique de l'irrigation, avec une date de semis le 7 novembre. L'humidité moyenne du sol est de 0.24 pour toutes les irrigation après le semis.

La simulation avec Raieopt avec un débit de 1.4 l/s donne une bonne uniformité et un rendement net tout à fait acceptable (*Tableau107*), pour un temps d'irrigation de 9 heures.

Tableau107 Caractéristiques des arrosages »optimisées » avec un débit = 1.4 l/s et les doses aux différents abscisses ($\lambda_c=30$ cm, $K_s=0.52$ cm/h, $\theta_s=0.46$, $\theta_0=0.24$)

TC	TL	Rn	Cu	Pc	Dose max	Dose min	à 100 m	à 200 m	à 300 m	à 400 m	à 450 m
540	440	66	77	14	111	75	109	102	95	86	80

Le rendement et le lessivage pour les doses calculées par Raieopt sont donnés dans le *Tableau106*. Ces valeurs sont valables pour l'ensemble de la parcelle, car les apports d'eau sont assez homogènes (différences très acceptables entre l'amont et l'aval de la parcelle) (*Tableau107*).

Tableau106 Comparaison des résultats avec irrigation traditionnelle et optimisée (abscisse=300 m)

	apport total (mm)	MS (t/ha)	rendement (15 %)	drainage (mm)	N plante kgN/ha	(N lessivé) (kgN/ha)
traditionnel	661	19.5	9.1	445	191	(158)
simulé par STICS	340	20.8	8.6	119	205	(25)

Avec la pratique d'irrigation optimisée on réduit le drainage et par conséquent le lessivage (*Tableau106*). La production de la matière sèche a augmenté 7 % (1.7 t/ha), par contre le rendement en grain a diminué sensiblement, à cause de la suppression de la dernière irrigation (stress hydrique en phase reproductive = 0.98). la perte de 5 q/ha paraît acceptable, compte tenu des économies d'eau, cette eau étant utilisable pour d'autres cultures par le même agriculteur.

Le drainage, et par conséquent le lessivage, est apparu en raison des pluies de fin de cycle dans le cas des itinéraires d'irrigations automatisées et après chaque arrosage dans le cas des irrigations traditionnelles. On voit donc, qu'avec l'optimisation des irrigations (moyennant une méthode de pilotage adaptée des irrigations) le lessivage peut être réduit pendant le cycle cultural. Après la récolte c'est l'éventuel reliquat d'azote minéral du sol qui déterminera l'importance du lessivage. Il est donc indispensable de minimiser ce reliquat avec un itinéraire de fertilisation adapté à la culture est aux conditions du milieu (sol, climat, etc.): une réduction importante de la fertilisation azoté est possible. Les pertes par lessivage de l'azote survenant pour moitié lors de la première irrigation, il serait important de réduire le premier apport ou de le différer. La fertigation, à condition d'avoir des pertes en colature très réduites et une bonne uniformité, peut apporter des solutions intéressantes à explorer.

4.5.3 Conclusions

Le rendement moyen étant peu affecté par la répartition des apports d'eau le long de la raie (supposée représentative la raie moyenne), nous pouvons effectuer une brève analyse des rendements obtenus sur «El Carrizo». Nous avons pu simuler grâce aux données disponibles (à savoir les apports d'eau moyens, les dates des irrigations et l'itinéraire technique appliqué sur leur maïs d'hiver) les pratiques des agriculteurs mexicains. Nous obtenons un rendement moyen de 9 t/ha alors que le rendement moyen observé à «El Carrizo» pour le maïs d'hiver 1996/1997 est de 8 t/ha.

La solution proposée pour optimiser les pratiques ne permet pas, selon le scénario de l'hiver 1996-97, d'améliorer de façon significative le rendement. Seul le drainage est considérablement limité et on peut supposer qu'il en est de même pour le lessivage des nitrates. Cette diminution du lessivage n'a tout fois pas d'impact sur le rendement, d'après le modèle, en raison des forts apports d'engrais.

L'origine de la faiblesse des rendements simulés par STICS ne peut être que d'ordre thermique: températures trop élevées lors de la fécondation ou trop basses à certaines périodes. En effet, Affholder (2000) a aussi souligné l'existence des fonctions dans STICS ne donnant pas satisfaction en contexte tropical.

Les conséquences environnementales d'une hétérogénéité des apports d'eau à l'échelle parcellaire sont importantes. Cette hétérogénéité entraîne une variabilité importante des stocks d'azote à la récolte, cela pouvant induire une augmentation du lessivage en inter-culture.

La méthodologie illustrée succinctement ci-dessus semble adaptée à la simulation des pratiques des agriculteurs puisque il est possible de modifier le calendrier des irrigations et des fertilisations (STICS) et modifier la conduite de l'irrigation à la raie (*Raieopt*). Ainsi, après avoir repris le calage de STICS pour les conditions pédoclimatiques ainsi que les variétés mexicains, et complété les données concernant les irrigations et les pratiques des agriculteurs de «El Carrizo», puis validé les deux modèles, il sera possible à la fois d'établir un diagnostic agronomique et environnemental et envisager des pratiques améliorées. Des tests des solutions proposées resteront évidemment nécessaires pour valider les hypothèses faites lors de la modélisation.

CONCLUSIONS GENERALES

L'objectif de ce travail était d'analyser les processus de lessivage d'azote sous une culture irriguée à la raie en vue de proposer une méthodologie de diagnostic des pratiques agricoles et d'identification de pratiques alternatives. Il s'agit de mettre en œuvre une approche opérationnelle afin de rechercher des pratiques, qui tout en maintenant ou améliorant le rendement, minimisent les risques de lessivage d'azote. Il faut noter que les buts poursuivis étaient ambitieux dans la mesure où les phénomènes sont plus complexes en irrigation gravitaire. En effet, la distribution de l'eau sur une parcelle n'est pas indépendante de l'état du sol, contrairement au cas de l'aspersion. Par contre, il faut rappeler que l'irrigation gravitaire est le système le plus répandu dans le monde.

Ce travail a permis de dégager un certain nombre de résultats originaux et de voies possibles de recherche en s'appuyant sur l'expérimentation et la modélisation pour une culture irriguée de maïs. La méthodologie proposée a ensuite été appliquée à une étude de cas du Mexique.

L'expérimentation et les mises au point méthodologiques ont été réalisées sur la station expérimentale du Cemagref à Montpellier à partir de suivis des apports, de l'état hydrique du sol, de la culture, des bilans et des flux d'eau et d'azote sur une parcelle comportant une centaine de raies²⁵ et des traitements de référence en aspersion. L'une des difficultés principales du calcul des flux repose sur la nécessité de disposer des données d'humidité, de charge hydraulique et de concentration en azote, à des pas de temps fins, compte tenu de la cinétique rapide des transferts. Au niveau métrologique, disposer d'enregistrements automatiques au moins des humidités (mesures TDR par exemple) apparaît nécessaire, d'autant que la parcelle n'est pas praticable après les irrigations.

Concernant l'**irrigation**, un suivi de l'avancement de l'eau et un contrôle du débit alimentant chaque raie des différents traitements ont été effectués. L'hétérogénéité des apports d'eau à différents niveaux a ainsi pu être mise en évidence et évaluée. A la variabilité classiquement observée le long de la raie, une variabilité entre les différentes parties de la parcelle d'étude a été constatée (différences du temps d'arrivée en bout de raie de près de 40 % entre raies alimentées avec le même débit, pour les traitements T_a et T_e . Ces différences sont à rapprocher des caractéristiques hydrodynamiques du sol de la parcelle). La variabilité des temps d'arrivée induit une hétérogénéité relativement importante de la dose apportée à l'aval des raies, compte tenu de la pratique de la raie bouchée. Ces observations justi-

²⁵ raies assez courtes de 130 m de long, conduites sans colature

fient des suivis sur des séries importantes de raies au lieu des mesures habituelles sur quatre à cinq raies et l'adoption éventuelle des conduites différentes au sein d'une même parcelle.

Les apports d'eau induisent un processus d'infiltration bi-dimensionnel. L'**humidité du sol** s'homogénéise sous la raie et le billon, mais des différences peuvent subsister en particulier si les apports sont modérés (et non massifs comme c'est souvent le cas), par suite des prélèvements de la culture. Cependant il a été établi que les humidités et les gradients hydrauliques étaient identiques sous la raie et le billon à une cote située au delà de la zone racinaire (140 cm pour l'étude réalisée sous maïs). Ce résultat est important car il établit qu'il est possible de réaliser un bilan hydrique sur un volume élémentaire de sol correspondant à une surface unitaire comprenant une section de raie et d'une épaisseur comprise entre la surface et une profondeur excédant l'enracinement maximal de la culture de l'ordre de 20 cm.

Au niveau de l'**azote**, l'utilisation d'échantillons «composites»²⁶ a été systématique, ce qui a permis d'améliorer la représentativité des mesures. Un traitement de référence sans azote a fourni des estimations réalistes de la minéralisation locale. La différenciation des échantillons sous la raie et sous billon, contrairement à la pratique fréquemment employée de mélanger les échantillons, a révélé comme fait original, la très grande hétérogénéité des profils d'azote sur une section de raie, en liaison avec la technique d'apport des engrais azotés avant la réalisation des raies. Le maintien de profils hétérogènes au delà de la durée de la campagne de culture rend impossible l'établissement de bilans azotés expérimentaux par sondage à la tarière. Il faut attendre l'homogénéisation des profils d'azote par les prélèvements de la plante et le lessivage.

L'azote stocké dans la partie supérieure du billon est très peu lessivé lors des irrigations gravitaires, cependant sous l'effet des fortes précipitations, cet azote peut migrer vers les couches sous-jacentes du sol. Une analyse des transferts d'eau et de soluté, réalisée au niveau stationnel à l'aide du logiciel Hydrus 2D, montre que la technique de fertilisation adoptée réduit très fortement le lessivage même sous régime d'apports d'eau élevés (Mailhol et al., 2000). Par contre il pourra subvenir lors des pluies d'automne, d'autant que la question de la mobilisation par la culture de cet azote localisé dans une zone assez sèche reste posée. Le bilan d'azote doit donc être réalisé dans le même volume élémentaire de sol que le bilan hydrique. Il fournira alors une simple évaluation des risques de lessivage en fonction du profil initial et des exportations. Cependant au niveau expérimental l'estimation des flux à partir des concentrations en azote de la solution du sol, mesurées par bougies poreuse sous le billon, ne paraît pas satisfaisant pour évaluer les pertes d'azote dans les conditions de l'étude. L'utilisation de bougies poreuses à la fois sous la raie et sous le billon, avec un suivi à un pas de temps adéquat pendant les périodes de drainage pourrait néanmoins permettre de préciser et de résoudre les problèmes rencontrés.

La modélisation du comportement de la culture et des pertes d'azote s'est fondée sur l'utilisation couplée de deux modèles existants: Raieopt et STICS. Pour les **apports d'eau** en différents points des raies, le modèle **Raieopt**, élaboré au Cemagref (Mailhol, 1992 et 1999) a été calé sur l'avancement de l'eau dans les raies et validé sur le site de manière satisfaisante. Les valeurs moyennes des paramètres du modèle déduites par méthode inverse peuvent être rapprochées de certains paramètres caractéristiques de l'hydrodynamique du milieu poreux (λ_c , K_s) et de l'état hydrique du sol. Ce constat permet d'envisager l'usage du modèle Raieopt à des fins prédictives lorsque l'on a outre ces paramètres, les conditions hydriques de la parcelle.

Pour accéder au niveau stationnel au **fonctionnement de la culture et aux bilans d'eau et d'azote**, le modèle **STICS**, développé par l'INRA (Brisson et al., 1998; Brisson et Mary, 1999) a été utilisé. Il a été calé sur des traitements de référence en aspersion sur le site de Montpellier en cherchant à obtenir un bon accord avec les données expérimentales pour la mise en place et l'évolution du système foliaire et la production de la matière sèche par la culture. La validation est assez satisfaisante pour les aspects eau et production, par contre des écarts notables entre valeurs mesurées et simulées subsistent en cas de stress azoté important. Cette situation souligne les limites de l'approche offre-demande utilisée pour calculer l'assimilation de l'azote par la plante.

Pour ce qui concerne la culture en irrigation à la raie, le modèle surestime, en partie à cause des conditions expérimentales particulières, la consommation hydrique et les rendements. Il permet cependant, couplé au modèle d'apport d'eau, de classer de manière correcte les situations conduisant à des pertes d'eau croissantes par drainage. Du fait de la prédominance des phénomènes de convection dans les pertes d'azote, et en accord avec les tendances observées, il a été fait l'hypothèse que ce résultat était aussi valable pour le lessivage de l'azote. Des travaux expérimentaux complémentaires sont nécessaires (et en cours) pour améliorer le calage stationnel et valider le modèle pour ces variables dont il convient de souligner qu'elles sont difficiles d'accès.

Tout en tenant compte de ces limites, ces travaux montrent que le **couplage des modèles Raieopt et STICS** est un outil utilisable pour déterminer le risque de pollution lié à l'hétérogénéité des apports d'eau en irrigation gravitaire et hiérarchiser des pratiques d'irrigation et de fertilisation du point de vue de leur impact environnemental.

La méthodologie proposée avec une version prédictive de Raieopt a été appliquée pour une analyse des pratiques des agriculteurs sur le périmètre de El Carrizo au Mexique. Des scénarios de référence ont été établis à partir d'enquêtes et de la base de données du périmètre. Les paramètres des modèles sont issus des résultats d'expérimentations obtenus pour partie dans le cadre de ce travail. Les simulations

²⁶ correspondant classiquement à 5 à 7 carottes pour le sol ou placettes pour la culture

font apparaître des possibilités de limiter sensiblement les risques environnementaux en réduisant d'une manière importante les apports d'eau parallèlement à une diminution des apports d'azote qui sont fortement excédentaires. Par contre les modèles ne font pas apparaître de gain de rendement compte tenu de la sur-fertilisation actuelle qui compense le lessivage.

Dans cette hypothèse de réduction des apports, un choix adéquat du couple débit-temps indispensable pour les différentes irrigations est proposé pour un cas type, pour conserver une uniformité et un rendement net suffisants. L'absence de gain de rendement peut rendre difficile l'adoption de nouvelles pratiques. Cependant le résultat économique et la possibilité d'utiliser l'eau économisée pour d'autres cultures dans cette région aux ressources limitées devraient inciter les agriculteurs à tester les alternatives proposées (après vérification de leur adéquation dans certaines zones sensibles aux problèmes de salinité).

BIBLIOGRAPHIE

- Abu-Awwad, A.M. 1999. Effects of sand column, furrow and supplemental irrigation on agricultural production in an arid environment. *Irrig. Sci.*, 18: 191-197.
- Addiscott, T.M. 1990. Mesure du lessivage des nitrates. In: R. Calvet (Editor). Nitrates-Agriculture-Eau., Paris-La Défense, pp. 157-168.
- Addiscott, T.M. 1995. Modelling the fate of crop nutrients in the environment : problems of scale and complexity. *European Journal of Agronomy*, 4(4): 413-417.
- Addiscott, T.M. 1996. Measuring and modelling nitrogen leaching : parallel problems. *Plant and Soil*, 181: 1-6.
- Addiscott, T.M., Whitmore, A.P. et Powelson, D.S. 1991. Farming, Fertilizers and the Nitrate Problem. C. International. Wallingford, UK. 170 pp.
- Adriaanse, F.G. et Human, J.J. 1993. Effect of time of application and nitrate: ammonium ratio on maize grain yield, grain N concentration and soil mineral N concentration in a semi-arid region. *Field Crops Research*, 34(1): 57-70.
- Affholder, F. 2000. Application de STICS pour l'étude des risques climatiques à la parcelle. Reunion STICS. Montpellier.
- AGPM. 1996. Besoins en degrés-jours des variétés de maïs. Bulletin technique n°208.
- AGPM. 1998. Le monde du maïs - La vie du maïs. Matériel de divulgation sur internet.
- Aguila-Marin, F.M. 1997. Alternativa tecnologica y organizacional para mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura. Pronostico de riego en tiempo real, distrito de riego 076 Valle del Carrizo, Sinaloa. *Thèse: Ciencias agricolas*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo de Mexico, 114 pp.
- Andersen, M.K. et Jensen, L.S. 2001. Low soil temperature effects on short-term gross N mineralisation-immobilisation turnover after incorporation of a green manure. *Soil Biologie & Biochimistrie*, 33(2001): 511-521.
- Antil, R.S., Gangwar, M.S. et Kumar, V. (Editors). 1992. Transformation and movement of urea in soil as influenced by water application rate, moisture management regime, and initial moisture content. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 6, 319-325 pp.
- Bahri, A. et Brissaud, F. 1996. Wastewater reuse in Tunisia: assessing a national policy. *Water Science and Technologie*, 33(10-11): 87-94.
- Barral, J.P. 1997. Analyse de la culture de maïs sous différentes modalités d'irrigation à la station de Lavalette (Montpellier). Cemagref, Montpellier.
- Bastet, G., Bruand, A., Quélin, P. et Cousin, I. 1998. Estimation des propriétés de rétention en eau à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT): Une analyse bibliographique. *Etudes et Gestion de Sols*, 1(7-28).
- Bautista, E. et Wallender, W.W. 1985. Spatial variability of infiltration in furrows. *Trans. of ASAE*, 28(6): 1846-1855.
- Benjamin, J.G., Porter, L.K., Duke, H.R., Duke, L.R. et Butters, G. 1998. Nitrogen movement with furrow irrigation method and fertiliser band placement. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62: 1103-1108.
- Berthome, P. 1991. Modelisation de l'infiltration en irrigation à la raie. *Thèse: Physique et chimie de l'environnement*. L'Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 196 pp.
- Berthomé, P. 1985. Evaluation d'un arrosage et automatisation en irrigation à la raie. Cemagref, Groupement d'Aix en Provence, Div. Irrigation.
- Beusen, A.H.W., Klepper, O. et Meinardi, C.R. 1995. Modelling the flow of nitrogen and phosphorus in Europe: from loads to coastal seas. *Wat. Sci. Tech.*, 31(8): 141-145.
- Brisson, N. 1998. An analytical solution for estimation of the critical soil water fraction for the water balance under growing crops. *Hydrology and Earth System Science*, 2: 221-231.
- Brisson, N., Itier, B., L'Hotel, J.C. et Lorendeau, J.Y. 1998. Parameterisation of the Shuttleworth-Wallace model to estimate daily maximum transpiration for use in crop models. *Ecological Modelling*, 107: 159-169.
- Brisson, N., King, D., Nicoullaud, B., Ruget, F., Ripoche, D. et Darthout, R. 1992. A crop model for land suitability evaluation: a case study of maize crop in France. *Eur. J. Agron.*, 1: 163-175.
- Brisson, N., Mary, B. et al., e. 1999. Notice concept et formalismes de la version 4.0 du modèle STICS. INRA.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J.M. et Delécolle, R. 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18: 311-346.
- Brisson, N. et Perrier, A. 1991. A semi-empirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. *Water Resour. Res.*, 27: 719-727.
- Brisson, N., Seguin, B. et Bertuzzi, P. 1992b. Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *Agric. For. Meteorol.*, 59: 267-287.
- Brooks, R.H. et Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. 3. Colorado State University, Fort Collins, CO.

- Bruand, A., Duval, O., Gaillard, H., Dorthout, R. et Jamagne, M. 2000. Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols: importance de la densité apparente. *Etude et gestion des sols*, 3(1): 27-40.
- Cabelguenne, M., Jones, C.A., Marty, J.R. et Quinones, H. 1988. Contribution à l'étude des rotations culturales: tentative d'utilisation d'un modèle. *Agronomie*, 8(6): 549-560.
- Caillot, G., Chamayou, H., Maertens, C. et Salsac, L. 1983. Mieux comprendre les interactions sol-racine. INRA. INRA. Paris. 325 pp.
- Campbell, G.S. 1985. Soil physics with basic. Transport models for soil-plant systems. Elsevier. Amsterdam. 150 pp.
- Campbell Scientific. 1997. CS615 Water content reflectometer. C. Scientific. 20 pp.
- Carlotti, B. (Editor), 1992. Recueil des bases de préconisation de la fertilisation azotée des cultures. Paris, 132 pp.
- Cartagena, M.C., Vallejo, A., Diez, J.A., Bustos, A., Caballero, R. et Roman, R. 1995. Effect of the type of fertilizer and source of irrigation water on N use in a maize crop. *Field Crops Research*, 44(1): 33-39.
- Catroux, G. et Germon, J.C. 1981. Les pertes d'azote par voie gazeuse. C.R. de l'Acad. d'Agr. de France, pp. 875-883.
- Cemagref-INRA (Editor), 1991. Etat des recherches sur la conduite optimale de l'irrigation. Cemagref, INRA. Montpellier.
- CERES. 1997. Rendimientos consistentes ano tras ano. Boletín informativo, Los Mochis, Sin.
- Chesno, C. 1998. Le Mexique face au défi de l'eau. Hydroplus.
- Childs, J.L., Wallender, W.W. et Hopmans, J.W. 1993. Spatial and seasonal variation of furrow infiltration. *Journal of Irrig. and Drain. Div. ASCE*, 119(1): 74-90.
- Chopart, J.L. et Vauclin, M. 1990. Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54: 1377-1384.
- Clay, D.E., Clapp, C.E. et Molina, J. 1985. Nitrogène-tillage-residue management. I. Simulating soil and plant behavior by the modèle NCSWAP. *Plant and Soil*, 84: 67-77.
- Clothier, B.E., Kirkham, M.B. et McLean, J.E. 1992. In situ measurements of the effective transport volume for solute moving through soil. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 733-736.
- CNA-IMTA. 1999. Informe del operativo para fortalecer la supervisión y distribución del agua para riego en el ciclo agrícola 98-99. Distrito de Riego 076 Valle del Carrizo, Sinaloa. CNA, Mexico.
- Collis-Georges, N. et Greene, R.S.B. 1979. The effect of aggregate size on the infiltration behavior of a slaking soil and its relevance to ponded irrigation. *Aus. J. Soil Res.*, 17: 65-73.
- Corbeels, M., Hofman, G. et Cleemput, O.V. 1998. Residual effect of nitrogen fertilisation in a wheat-sunflower cropping sequence on a vertisol under semi-arid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 9(2-3): 109-116.
- Cosserat, M. 1991. Contribution à l'adaptation des techniques culturales pour réduire la pollution nitrique sous monoculture de maïs en Basse Arège. *Thèse: Science et technique de l'eau*. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 188 pp.
- DDAF, A., Cemagref, SCP et ARDEPI. 1989. Acquisition de références tecnico-économiques sur les matériels d'irrigation de surface (ARTHEMIS). Cemagref, Aix en Provence.
- De Los Santos, A., Pena, E. et Pacheco, P. 1999. Evaluation del fertiriego en cultivo de trigo, en el modulo No 2, D.R. 076 El carrizo, Sin. Rapport interne. IMTA, Cuernavaca, Mexico.
- De Neve, S. et Hofman, G. 1998. N minéralisation and nitrate leaching from vegetable crop residues under field conditions: a model evaluation. *Soil Biol. Biochem.*, 30(14): 2067-2075.
- Débordes, M. 1984. Modélisation en hydrologie urbaine. Recherche et applications. Support du cours de DEA. USTL Montpellier.
- Delphin, J.E. 1993. Azote: le sol en libère aussi. *Cultivar*, pp. 34-35.
- Desvignes, P. 1992. Maïs: un bilan simplifié pour réduire le risque nitrate. *Cultivar*, 318: 18-19.
- Desvignes, P. 1993. Azote sur maïs: un bilan simplifié. *Cultivar*, 337: 46-47.
- Deumier, J.M. 1987. Contribution en eau des sols. In: ITCF (Editor). Le maïs et l'eau. Colloque Alimentation hydrique du maïs. Agen, pp. 1-14.
- Deumier, J.M., Lacroix et Bouthier, A. 1991. Alimentation en eau du maïs en période préfloraison et élaboration du rendement en grain. In: Cemagref (Editor). Etat des recherches sur la conduite optimale de l'irrigation, pp. 81-88.
- Diaz, M.A. et Namuche, V.R. 1997. Diagnostico del uso de fertilisantes y plaguicidas en el distrito de riego 076, Valle del carrizo, Sinaloa. RD-9714. Rapport interne. IMTA, Cuernavaca.
- Diez, J.A., Roman, R., Caballero, R. et Caballero, A. 1997. Nitrate leaching from soil under a maize-wheat-maize sequence, two irrigation schedules and three types of fertilisers. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 65(3): 189-199.
- Djurhuus, J. et Jacobsen, O.H. 1995. Comparison of ceramic suction cups and KCI extraction for the determination of nitrate in soil. *European J. of Soil Sci.*, 46: 387-395.
- Dorge, J. 1994. Modelling nitrogen transformations in freshwater wetlands. Estimating nitrogen retention and removal in natural wetlands in relation to their hydrology and nutrient loadings. *Ecological Modelling*, 75/76: 409-420.
- Dou, Z. et Fox, R.H. 1995. Using NCSWAP to simulate seasonal nitrogen dynamics in soil and corn. *Plant and Soil*, 177: 235-247.
- Droesch, J.-P. 1998. Mesure, acquisition et traitement des données de l'état hydrique du sol. *Rapport de DEA - Ressources en eau*. Université Paris-Sud, Paris, 201 pp.
- Ducrocq, M. 1987. Les bases de l'irrigation. Techniques et Documentation Lavoisier. E.S. Universitaires. Paris. 117 pp.

- Durr, C., Boiffin, J. et Boizard, H. 1991. Influence du régime thermique sur la croissance pondérale et le rythme d'apparition des feuilles de jeunes plants de maïs. In: P. D. (Editor). *Physiologie et production du maïs*. Pau, pp. 83-90.
- Duthil, J. 1971. *Éléments d'écologie et d'agronomie*. III. J.-B. Baillière. Paris. 657 pp.
- Duwig, C. 1998. Etude des transferts d'eau et de nitrate dans les sols ferrallitiques de Maré (Nouvelle-Calédonie): risques de pollution des lentilles d'eau douce. *Thèse: Géophysique, géochimie et géomecanique*. Université Joseph Fourier, Grenoble, 189 pp.
- Elliot, R.L. et Walker, W.R. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans. ASAE*, 25(2)(396-400).
- Esfandiari, M. et Maheswari, B.L. 1997. Application of the optimization method for estimating infiltration characteristics in furrow irrigation and its comparaison with other methods. *Agricultural Water Management*, 34: 169-185.
- Esfandiari, M., Maheswari, B.L. et Cornish, P.S. 1997. Estimating recession times in furrow with small longitudinal slope on a clay soil. *Agricultural Water Management*, 34: 187-193.
- FAO. 1979. Yield response to water. No. 33, Rome.
- FAO. 1994. Politiques de l'eau et agriculture. In: FAO (Editor). *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture en 1993*. Rome.
- FAO. 1996. Control of water pollution from agriculture. No. 55, Rome.
- Feddes, R.A. 1986. Modelling and simulation in hydrologic systems related to agricultural development: state of the art. In: N.T.U.o. Athens (Editor). *Water management for Agricultural development*. European Water Resources Association. Athens, Grece, pp. 131-146.
- Fehér, J., Genuchten, M.T.v., Kienitz, G., Németh, T., Biczok, G. et Kovacs, G.J. 1991. DISNIT2, a Root Zone Water and Nitrogen Management Model. In: IAHS (Editor). *Hydrological Interactions Between Atmosphere, Soil and Vegetation*. Vienna, pp. 197-205.
- Fernandez, J.E., Moreno, F., Cabrera, F., Murillo, J.M. et Fernandez-Boy, E. 1994. Water and nitrogen use efficiency in a maize crop in Southern Spain. In: I. Mediterraneo (Editor). *International Conference on Land and Water Resources Management in the Mediterranean Region*. Bari, Italy, pp. 327-340.
- Feyen, J. et Zerihun, D. 1999. Assessement of the performance of border and furrow irrigation systems and relationship between performance indicators and sytem variables. *Agricultural Water Management*, 40(1999): 353-362.
- Follet, R.F. 1995. NLEAP model simulation of climate and management effects on N leaching for corn grown on sandy soil. *Journal of contaminant hydrology*, 20: 241-252.
- Follet, R.F., Shaffer, M.J., Brodahl, M.K. et Reichman, G.A. 1994. NLEAP simulation of residual soil nitrate for irrigated and non-irrigated corn. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(4): 375-382.
- Foth, H.D. 1978. *Fundamentals of soil science*. Wiley. New York. 436 pp.
- Frere, M.H. 1977. Control og nonpoint water pollution from agriculture: some concepts. *Journal of Soil and Water Conservation*, 32(6): 260-264.
- Gardner, W.R. 1958. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation. *Soil Sci.*, 85: 228-232.
- Gardner, W.R. 1964. Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agron. J.*, 56: 41-45.
- Geng, Q.Z. 1988. Modélisation conjointe du cycle de l'eau et des transferts de nitrates sur un système hydrologique. *Thèse: Hydrologie et hydrogéologie quantitative*. Ecole des Mines de Paris, Paris.
- Girousse, J.C. 1987. Estimation des volumes stockés en surface au cours d'un arrosage à la raie. *Rapport de DEA*. USTL Montpellier, Montpellier.
- Gonzales-Barrios, J.L. 1992. Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine: Exemple dans la "Comarca Lagunera". *Thèse: Physiologie et Biologie des Organismes et des Populations*. Université Montpellier II, Montpellier, 150 pp.
- Grattard, G. 1999. Influence de l'irrigation à la raie sur le lessivage des nitrates. Expérimentation et simulation des pratiques. *Mémoire d'ingénieur agronome*. Cemagref, Montpellier.
- Greenwood, D.J., Lemaire, G., Gosse, G., Cruz, P., Draycott, A. et Neeteson, J.J. 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Ann. Bot.*, 66: 425-436.
- Grossmann, J. et Udluft, P. 1995. The extraction of soil water by the suction-cup method: A review. *Journal of Soil Science*, 42: 83-93.
- Hadas, A., Hadas, A., Sagiv, B. et Haruvy, N. 1999. Agricultural practices, soil fertility management modes and resultant nitrogen leaching rates under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 42: 81-95.
- Havercamp, R., Vauclin, M. et Vachaud, G. 1984. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: local standpoint. *Soil Science*, 137(2): 78-90.
- Heller, R. 1978. *Physiologie végétale - Développement*. Masson. Paris. 215 pp.
- Hénin, S. 1977. *Cours de physique du sol - L'eau et le sol*. II. O.e. EDITEST. Paris. 222 pp.
- Hénin, S. 1981. Le cycle d'azote, les problèmes de fertilisation et de pollution. C.R. des Séances de l'Acad. d'Agr. de France.
- Hillel, D. 1974. *L'eau et le sol: principes et processus physiques*. Vander. Paris.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of Soil Physics*. A. Press. London. 405 pp.
- Hlavek, R. 1996. *Guia para la eleccion de sistemas de riego*. I.-C. CEDEX. Madrid. 139 pp.

- Horton, R.E. 1940. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 5: 399-417.
- Hubbard, R.K., Leonard, R.A. et Johnson, A.W. 1991. Nitrate transport on a sandy coastal plain soil underlain by plinthite. *Transactions of ASAE*, 34(3): 802-808.
- Ibanez-Castillo, L., Chavez-Morales, J. et Marino, M.A. 1997. A planning model for the Fuerte-Carrizo irrigation system, Mexico. *Water Resources Management*, 11: 165-183.
- Idso, S.B., Reginato, R.J. et Jackson, R.D. 1977. Remote sensing of crop yield. *Science*, 196: 19-25.
- INEGI. 1995. Estudio hidrológico del Estado de Sinaloa. INEGI. Aguascalientes. 88 pp.
- Itier, B. 1994. Measurement and estimation of evapotranspiration. Nato Workshop on Sustainability of Irrigated Agriculture. Vimeiro (Portugal), pp. 18.
- Izadi, B., Ashraf, M.S., Studer, D., McCann, I. et King, B. 1996b. A simple model for the prediction of nitrate concentration in the potato root zone. *Agricultural Water Management*, 30(1): 41-56.
- Izadi, B., King, B., Westermann, D. et McCann, I. 1996a. Modeling transport of bromide in furrow-irrigated field. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, march/april: 90-96.
- Izuno, F.T., Podmore, T.H. et Duke, H.R. 1985. Infiltration under surge irrigation. Paper No. 84-2088. Trans. of ASAE.
- Jabro, J.D., Toth, J.D., Dou, Z., Fox, R.H. et Fritton, D.D. 1995. Evaluation of nitrogen version of LEACHM for predicting nitrate leaching. *Soil Science*, 160(3): 209-217.
- Jacquín, F., Alfaia, S., Florentin, L., Ganry, F., Niane, A., Palma-Lopez, D. et Sulce, S. 1994. The fate of nitrogen fertilisers in some soil types. *International Society of Soil Science*, 5b: 40-41.
- Jaynes, D.B., Logsdon, S.D. et Horton, R. 1995. Field method for measuring mobile/immobile water content and solute transfer rate coefficient. *Soil Science Society of America Journal*, 59: 352-356.
- Jeuffroy, M.H. et Ney, B. 1997. Crop physiology and productivity. *Field Crop. Res.*, 53: 3-16.
- Jury, W.A. 1982. Simulation of solute transport using a transfert function model. *Water Res.*, 18: 363-368.
- Jury, W.A. et Flübler, H. 1992. Transport of chemicals through soil : mechanism, models and field applications. *Advances in Agronomy*, 47: 141-201.
- Kachanoski, R.G., Thony, J.L., Vauclin, M., Vachaud, G. et Laty, R. 1994. Mesurement of solute transport during constant infiltration from a point source. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 304-309.
- Kang, S., Liang, Z., Pan, Y., Shi, P. et Zhang, J. 2000. Alternate furrow irrigation for maize production in an arid area. *Agricultural Water management*, 45(2000): 267-274.
- Katerji, N. 1987a. Lois de circulation de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère. In: ITCF (Editor). Le maïs et l'eau. Colloque Alimentation hydrique du maïs. Agen, pp. 13-22.
- Katerji, N. 1987b. Methodes de determination de l'évaporation réelle (ETR) à l'échelle de la parcelle. In: ITCF (Editor). Le maïs et l'eau. Colloque Alimentation hydrique du maïs. Agen, pp. 1-12.
- Kauark-Leite, L. 1990. Réflexion sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole. *Thesis*. Ecole Nationale de Pont et Chaussées, 342 pp.
- Kemper, W.D. et Rosenau, R.C. 1988. Soil cohesion as affected by time and water content. *SOIL Sci. Soc. Am. J.*, 48: 1001-1006.
- Kengni, L. 1993. Mesure in-situ des pertes d'eau et d'azote sous culture de maïs irrigué. Application à la Plaine de la Bièvre (Isère). *Thesis*. Université Joseph Fourier, Grenoble, 220 pp.
- Kengni, L., Normand, B., Thony, J.L., Vachaud, G., Vauclin, M. et Garino, B. 1994. Mesure in-situ et analyse des pertes en eau et en azote sous maïs irrigué. In: ICID (Editor). 17th European Regional Conference on Irrigation and Drainage. ICID. Varna, pp. 47-52.
- Kovacs, G.J. et Németh, T. 1995. Testing simulation models for the assessment of crop production and nitrate leaching in Hungary. *Agricultural Systems*, 49(4): 385-397.
- Kucke, M. et Kleeberg, P. 1997. Nitrogen balance and soil nitrogen dynamics in two areas with different soil, climatic and cropping conditions. *European Journal of Agronomy*, 6(1-2): 89-100.
- Kugler, J. 1988. Approche méthodologique pour la modélisation du transfert des nitrates vers la nappe phréatique d'Alsace. Cas de la zone inondable du Ried central de l'III. *Thèse: Sciences et Techniques de l'Eau*. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 186 pp.
- Kumar, A., Kanwar, R.S., Singh, P. et Ahuja, L.R. 1999. Evaluation of the root zone water quality model for predicting water and NO₃⁻ movement in an Iowa soil. *Soil & Tillage Research*, 50(3-4): 223-236.
- Kutilek, M. et Nielsen, D.R. 1994. Soil hydrologie. *GeoEcologie*.
- Lacroix, A. 1995. Les solutions agronomiques à la pollution azotée. *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, n°24: 29-41.
- Lacroix, B. 1987. Alimentation en eau. Elaboration du rendement et conduite de l'irrigation du maïs grain. In: ITCF (Editor). Le maïs et l'eau. Colloque Alimentation hydrique du maïs. Agen, pp. 1-20.
- Larocque, M. et Banton, O. 1995. Gestion de la contamination des eaux souterraines par les fertilisants agricoles: application du modèle AgriFlux. *Revue des Sciences de l'Eau*, 8: 3-15.
- Larrue, C. 1992. Le comportement des agriculteurs face aux mesures de protection de l'eau. *Economie Rurale*, 208-209(42-50).
- LeClech, B. 1995. Environnement et agriculture. Synthèse Agricole 1995. 290 pp.

- Leiros, M.C., Trasar-Cepeda, C., Seoane, S. et Gil-Sotres, F. 1999. dependence of mineralisation of soil organic matter on temperature and moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(1999): 327-335.
- Lemaire, G., Gastal, F., Cruz, P., Greenwood, D.J. et Draycott, A. 1990. Relationships between plant-N, plant mass and relative growth rate for C3 and C4 crops. Proc. first ESA congress. Paris.
- Linderman, C.L., Mielke, L.N. et Schuman, G.E. 1976. Deep percolation in a furrow-irrigated sandy soil. *Transactions of the ASAE*: 250-253.
- Longuenne, C., Desangles, P. et Castillon, R. 1991. Actions menées pour les Chambres d'Agriculture et les Instituts Techniques concernant la lutte contre la pollution nitrique des nappes dans la Région Midi-Pyrénées. Journée Technique Nitrates, pp. 25.
- Lopez Avendano, J.E., Palacios Velez, O.L., Fuentes Ruiz, C., Rendon Pimentel, L. et Garcia Villanueva, N.H. 1997. Analisis bidimensional de la infiltración en el riego por surcos. *Agrociencia*, 31: 259-269.
- Lorgeou, J. 1991. Des références pour les variétés. In: D. Picard (Editor). Physiologie et production du maïs. Pau, pp. 291-306.
- Lorre, M. et Perret, M. 1996. Mesure de teneur en eau du sol par reflectometrie temporelle (TDR). Modalités pratiques de mise en oeuvre d'un appareillage Campbell Scientific. CIRAD-SAR 30/96. CIRAD-SAR, Saint-Denis, Reunion.
- Machet, J.M., Pierre, D., Recous, S. et Rémy, J.C. 1987. Signification du coefficient reel d'utilisation et conséquences pour la fertilisation azotée des cultures. C.R. Acad. Agric. de France, pp. 39-55.
- Mailhol, J.C. 1992a. Un modèle pour améliorer la conduite de l'irrigation à la raie. *ICID Bulletin*, 41(1): 43-60.
- Mailhol, J.-C. 1992b. Increasing hydraulic efficiency of furrow irrigation through improved conducting methods. In: I.C.o.I.a. Drainage (Editor). Ecological, technological and social-economical impacts on agricultural water management. Budapest, Hongrie, pp. 171-184.
- Mailhol, J.C., Baqri, M. et Lachhab, M. 1997. Operative irrigation modeling for real-time applications on closed-end furrows. *Irrigation and Drainage Systems*, 11: 347-366.
- Mailhol, J.C., Girousse, J.C. et Rakotoarisoa, A. 1988. Essai de prédétermination de la qualité hydraulique d'un arrosage. application au cas des raies courtes. C.I.G.R. Int. Symp. Ilorin, Nigeria, pp. 403-410.
- Mailhol, J.-C. et Gonzales, J.-M. 1993. Furrow irrigation model for real-time applications on cracking soils. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(5): 768-783.
- Mailhol, J.-C., Priol, M. et Benali, M. 1999. A furrow irrigation model to improve irrigation practices in the Gharb valley of Morocco. *agricultural Water Management*, 42: 65-80.
- Mailhol, J.C., Ruelle, P. et Nemeth, I. 2000a. Analysis of nitrate leaching under sprinkler and furrow irrigation techniques on loamy soil plot with corn. In: ICID (Editor). Control of adverse impacts of fertilizers and agrochemicals. Cape Town, South Africa, pp. 113-126.
- Mailhol, J.C., Ruelle, P. et Nemeth, I. 2000b. Impact of fertilisation practices on nitrogen leaching under irrigation. *Irrigation Science*, sous presse.
- Maïsadour-AGPM. 1996. Samsara - fiche maïs. Matériel de divulgation.
- Mallawatantri, A.P. et Mulla, D.J. 1996. Uncertainties in leaching risk assesment due to field averaged transfert function parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60: 722-726.
- Maraux, F., Lafolie, F. et Bruckler, L. 1998. Comparison between mecanistic and functional models for estimating soil water balance: deterministic and stochastic approaches. *Agricultural Water Management*, 38: 1-20.
- Marcesse, J. 1967. Determination in situ de la capacité de retention d'un sol au moyen de l'humidité à neutrons. In: ANEA (Editor). Colloque sur l'emploi des radioisotopes et des rayonnements dans les études sur la physique du sol et l'irrigation. Istanbul, Turquie.
- Mariotti, A. 1982. Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote. *Thèse: Sciences Naturelles*, Paris, 476 pp.
- Martin, D.L., Stegman, E.C. et Fereres, E. 1990. Irrigation scheduling principles. In: G.J. Hoffman, T.A. Howell and K.H. Solomon (Editors). Management of farm irrigation systems. A. Ed.St. Joseph, USA, pp. 163.
- Mary, B. 1987. Effets du précédent cultural sur la disponibilité du sol en azote minéral. C.R. Acad. Agric. de France, pp. 57-69.
- Mary, B. et Recous, S. 1994. Measurement of nitrogen mineralization and immobilization fluxes in soil as a means of predicting net mineralization. *Eur. J. Agron.*, 3(4): 291-300.
- Mary, B., Recous, S., Darwis, S. et Robin. 1996. Interactions between decomposition of plant residus and nitrogen cycling in soil. *Plant Soil*, 182: 72-82.
- Meek, B.D., Carter, D.L., D.T., W., Wright, J.L. et Peckenpaugh, R.E. 1995. Nitrate leaching under furrow irrigation as affected by crop sequence and tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59: 204-210.
- Mehdi, B. et Madramootoo, C.A. 1999. Soil nitrate distribution under grain and silage corn using three tillage practice on a loamy sand in southwestern Quebec. *Soil & Tillage Research*, 51(1999): 81-90.
- Mendoza, R.J.L. 1993. Tecnologia para producir maiz en los sistemas agricolas del Valle del Fuerte. Matériel de divulgation. SARH, Los Mochis, Sinaloa.
- Mercier, A. 2000. Caractérisation hydrodynamique des sols en vue de simuler les transferts d'eau et de solutés sous culture irriguée pour évaluer les impacts environnementaux. *Rapport de maîtrise de sciences de l'environnement*. Université Montpellier II., Montpellier, 30 pp.

- Mérrillon, Y. et Evain-Bousquet, N. 1996. Irrigation et environnement - les relations peuvent s'améliorer. *Perspectives Agricoles*, 214: 83-86.
- Meynard, J.M. 1998. Cahier de charge de STICS. Réunion de STICS. Avignon.
- Meynard, J.M., Justes, E., Mchet, J.M. et Recous, S. 1997. Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ. In: INRA (Editor) Paris.
- Mitchell, A.R. 1994. Furrow irrigation modelling and management for reduced nitrate leaching. In: IAHS (Editor). Groundwater Quality Management. IAHS. Tallinn, pp. 413-421.
- Moller-Hansen, E. et Djurhuus, J. 1997. Nitrate leaching as influenced by soil tillage and catch crop. *Soil and Tillage Research*, 41(3-4): 203-219.
- Moral, J.F. et Martinez, J. 1995. Emission d'ammoniac après épandage de lisier: le problème. *Ingénieries EAT*, 1: 53-60.
- Moreno, F., Cayuela, J.A., Fernandez, J.E., Fernandez-Boy, E., Murillo, J.M. et Cabrera, F. 1996. Water balance and nitrate leaching in an irrigated maize crop in SW Spain. *Agricultural Water management*, 32(1996): 71-83.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12(3): 513-522.
- Muller, J.C. et Mary, B. 1981. Influence des résidus de culture sur la réorganisation de l'azote minéral. C.R. des Séances de l'Acad. d'Agr. de France, pp. 888-901.
- Musy, A. et Soutter, M. 1991. Physique du sol. Gérer l'environnement. P.p.e.u. romandes. Lausanne.
- Nardeux. SOLO 25 (notice technique).
- Nicoulaud, B. 1998. Accroissement de l'indice de récolte en degrés.jour. Réunion de STICS. Avignon.
- Normand, B. 1996. Etude expérimentale et modélisation du devenir de l'azote dans le système sol-plante-atmosphère. *Thèse: Géophysique, géochimie et géomecanique*. Université Joseph Fourier, Grenoble, 190 pp.
- Ojeda, W., Sifuentes, E., Gonzalez, J.-M., Guillen, J.A. et Unland, H. 1999. Pronostico del riego en tiempo real. IMTA. Jiutepec. 224 pp.
- Ojeda, W., Sifuentes, E., Hernandez, J., Unland, H., Patron, R. et Valdéz, J.A. 1997a. La calendarizacion del riego en tiempo real en el norte de Sinaloa. In: ANEI (Editor). VII Congreso national de irrigation. Hermosillo, Sonora, Mexico.
- Ojeda, W., Unland, H., Lemus, O., Fitz, E., Espinoza, T. et Verdugo, L. 1997b. La red agrometeorologica nacional. In: ANEI (Editor). VII Congreso national de irrigation. Hermosillo, Sonora, Mexico.
- Olesen, T., Griffiths, B.B., Henriksen, K., Moldrup, P. et Wheatley, R. 1997. Modeling diffusion and reaction in soils: V. nitrogen transformations in organic manure-amended soil. *Soil Science*, 162(3): 157-168.
- Oliveira, M.R.G., Serralheiro, R.P., REIS, M.P.Z. et Santos, F.L. 1994. Maize root system response to surface irrigation in a Mediterranean brown soil: root growth related to water distribution along the furrow. In: AGENG (Editor). International Conference on Agricultural Engineering. Milano, pp. 35-36.
- Ollier, C. et Poirée, M. 1983. Irrigation. Les réseaux d'irrigation, théorie, technique et économie des arrosage. Bibliothèque de l'Institut de Topométrie. Eyrolles. Paris. 503 pp.
- Olson, R.V. 1980. Fate of tagged nitrogen fertilizer applied to irrigated corn. *Soil science society of America Journal*, 44: 514-517.
- Olufayo, A. 1994. Caractérisation des réponses du sorgho grain au déficit hydrique à l'aide d'indicateurs bioclimatiques. *Thesis*. ENSA Rennes, Rennes, 97 pp.
- Otegui, M.E., Andrade, F.H. et Suero, E.E. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Corps Research*, 40(2): 87-94.
- Ouattar, S., Jones, R.J., Crookston, R.K. et Kajeiou, M. 1987. L'adaptation du grain de maïs à la sécheresse pendant la phase reproductive. In: ITCF (Editor). Le maïs et l'eau. Colloque Alimentation hydrique du maïs. Agen, pp. 1-17.
- Palacios-Veléz, E. 1990. Les périmètres irrigués au Mexique. In: I.I.d.M.d. l'Irrigation (Editor). gestion de l'irrigation en Amérique Latine Colombo, Sri Lanka, pp. 95-104.
- Pang, X.P., Letey, J. et Wu, L. 1997. Irrigation quantity and uniformity and nitrogen application effects on crop yield and nitrogen leaching. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61: 257-261.
- Pansu, M., Gautheyrou, J. et Loyer, J.-Y. 1998. L'analyse du sol. Echantillonnage, instrumentation et contrôle. Masson. Paris. 497 pp.
- Parlange, J.Y., Lisle, I. et Braddock, R.D. 1982. The three parameters infiltration equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 133(6): 337-341.
- Parsons, R.L., Pease, J.W. et Bosch, D.J. 1995. Simulating nitrogen losses from agricultural land: implications for water quality and protection policy. *Water Resources Bulletin*, 31(6): 1079-1086.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. (London)*, 193: 120-145.
- Pereira, L.S. 1999. Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling. *Agricultural Water Management*, 40: 153-169.
- Philip, J.R. et Farrell, D.A. 1964. General solution of the infiltration-advance problem in irrigation hydraulics. *J. Geophys. Res.*, 69(4): 621-631.
- Pierre, P. et Pons, Y. 2000. Application de STICS dans les sols gonflants. Simulation du drainage. Reunion STICS. Montpellier, pp. 41.

- Pinheiro, J. et Caussade, B. 1996. Modélisation de la pollution diffuse agricole: cas des nitrates. *revue de l'Agence de l'Eau*, 66: 9-16.
- Plénet, D. 1995. Fonctionnement des cultures de maïs sous contrainte azotée. *Thèse: Sciences Agronomiques*. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy-Metz, 247 pp.
- Ponsardin, G., Beaudoin, N., Couturier, A. et Mary, B. 2000. Test et paramétrisation de STICS aux échelles multilocale et du bassin hydrologique. Reunion STICS. Montpellier, pp. 54.
- Porter, D.O., Boone, M.Y.L. et McKinion, J.M. 1992. Soil solution flux in crop models: theory and practice. 92-2582. American Society of Agricultural Engineers.
- Porter, L.K. 1995. Depleted ¹⁵N carryover, leaching and uptake for three years of irrigated corn. *Journal of Contaminant Hydrology*, 20: 209-226.
- Prat, M. 1982. Simulation numérique de transport de produits réactifs dans les sols. cas de l'azote dans les relations bassin versant-rivière. *Thèse*. Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 184 pp.
- Prieri, C. 1985. Rapport de mission au Mexique. Projet Lider - Projet Xalapa. CA-AT-VV/C.
- PRONASE. 1995. Maiz de primavera: H-431. Boletín informativo, Los Mochis, Sin.
- Prunty, L. et Greenland, R. 1997. Nitrate leaching using two potato-corn N fertilizer plans on sandy soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 65(1): 1-13.
- Quifer. 1998. Como crece la planta de maiz, como y cuando fertilizarla. Panorama Agropecuario, pp. 10-11.
- Quinones, H. 1989. Simulation des contraintes hydriques sur la croissance et le rendement du tournesol et du maïs. *Thèse: Traitement des matières premières végétales*. Institut National Polytechnique, Toulouse, 172 pp.
- Quinones, H. et Ruelle, P. 2001. Operative calibration methodology of a TDR sensor for soil moisture monitoring under irrigated crops. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2(1): 31-45.
- Quinones, H., Ruelle, P. et Nemeth, I. 2002. Medicion de la humedad del suelo por reflectometria en el dominio temporal (TDR): Aplicaciones en irrigacion. *Ingenieria Hidraulica en Mexico, à paraître*.
- Quisenberry, V.L., Smith, B.R., Phillips, R.E., Scott, H.D. et Norteliff, S. 1993. A soil classification system for describing water and chemical transport. *Soil Science*, 156(5): 306-315.
- Raghuwanshi, N.S. et Wallender, W.W. 1998a. Optimal Furrow irrigation scheduling under heterogeneous conditions. *Agricultural Systems*, 58(1): 39-55.
- Raghuwanshi, N.S. et Wallender, W.W. 1998b. Optimization of furrow irrigation schedules, designs and net return to water. *Agricultural Water Management*, 35(1998): 209-226.
- Ramos, C. 1996. Effect of agricultural practices on the nitrogen losses to the environment. *Fertilizer research*, 43: 183-189.
- Ramos-Valdés, C., Pimentel, L.R., Leon, E.E.d., Spinola, J.A., Arvizu, I.G. et Capiterucho, A.D. 1999. Users in modernization of Mexico's irrigation districts. In: ICID-CIID (Editor). 17th Congress on irrigation and drainage. Granada, Spain, pp. 239-247.
- Recous, S., Aita, C. et Mary, B. 1999. In situ changes in gross N transformations in bare soil after addition of straw. *Soil Biology & Biochemistry*, 31: 119-133.
- Recous, S., Robin, D., Darwis, D. et Mary, B. 1995. Soil inorganic N availability: effect on maize residue decomposition. *Soil Biol. Biochem.*, 27(12): 1529-1538.
- Rejesus, R.M. et Hornbaker, R.H. 1999. Economic and environmental evaluation of alternative pollution-reducing nitrogen management practices in central Illinois. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 75: 41-53.
- Renault, D. 1991. Modélisation hydrologique en irrigation de surface: Analyse de la linéarisation de la vitesse du front d'avancement: ALIVE. *Thèse*. USTL, ENGREF, Montpellier, 200 pp.
- Renault, D. 1993. Modernisation de l'irrigation de surface: aquis et perspectives. *La Houille Blanche*, 2/3: 175-181.
- Rendon, L. 1987. L'irrigation à la planche: Développement et évaluation d'un nouveau modèle hydrologique pour simuler et prédire l'avancement du front couplé à l'infiltration. *Thèse: Mécanique*. Université J. Fourier Grenoble, Grenoble, 174 pp.
- Rendon, L. et Fuentes, C. 1997. Eficiencias de riego. In: IMTA-CNA (Editor). Manual para diseno de zonas de riego pequenas. IMTACuernavaca, Mor. Mexico, pp. 325.
- Rendon, L., Pacheco, P., Machado, J.L. et Pena, E. 1997. La ferti-irrigacion en baja presion y tuberias con compuertas. 2do Simposium Internacional de Ferti-irrigacion. Querétaro, Qro., México.
- Revol, P. 1990. Modélisation simplifiée de l'infiltration appliquée à la micro-irrigation. *Rapport de DEA*. Université de Grenoble, Grenoble, 38 pp.
- Revol, P. 1994. Caractérisation hydrodynamique des sols par infiltration bidimensionnelle axisymétrique et modélisation simplifiée de la micro-irrigation. *Thèse: Mécanique*. Université Joseph Fourier - Grenoble, Grenoble, 224 pp.
- Reynolds, P.E., Thevathasan, N.V., Simpson, J.A., Gordon, A.M., Lautenschlager, R.A., Bell, W.F., Gresch, D.A. et Buckley, D.A. 2000. Alternative conifer release treatments affect microclimate and soil nitrogen mineralization. *Forest Ecology and management*, 133: 115-125.
- Ritchie, J.T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.*, 8: 1204-1213.
- Ritter, W.F., Chirnside, A.E.M. et Scarborough, R.W. 1990. Soil nitrate profiles under irrigation on coastal plain soils. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 116(6): 738-751.

- Ritter, W.F., Scarborough, R.W. et Chirnside, A.E.M. 1991. Nitrate leaching under irrigation on coastal plain soils. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 117(4): 490-502.
- RNED-AFEID (Editor), 1995. La conduite de l'irrigation. De la stratégie au pilotage de l'irrigation, 127 pp.
- Robelin, M. 1987. Déséquilibre hydrique, métabolisme, croissance et développement. In: ITCF (Editor). Le maïs et l'eau. Colloque Alimentation hydrique du maïs. Agen, pp. 1-10.
- Roche, R. 2000. Génération du LAI, sénescence foliaire, accident climatique (gel). Reunion STICS. Montpellier, pp. 24.
- Rosano-Mendez, L. 1999. Fertiirrigacion nitrogenada del maiz con un sistema de baja presion y tuberias multicompuertas. *Thesis: Hydrosiences*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo de Mexico, 112 pp.
- Ruelle, P. 1995. Variabilité spatiale à l'échelle de parcelles de cultures: étude expérimentale et modélisation des bilans hydriques et des rendements. *Thèse: Mécanique*. Université Joseph Fourier, Grenoble, 210 pp.
- Ruget, F. et Brisson, n. 2000. Analyse de sensibilité en vue de l'estimation de paramètres du modèle STICS. Reunion STICS. Montpellier, pp. 10.
- SAGDR. 1997. Caracteristicas agronomicas del cultivo de maiz, Los Mochis, Sin.
- Santos, D.V., Sousa, P.L. et Smith, R.E. 1997. Model simulation of water and nitrate movement in a level-basin under fertigation treatments. *Agricultural Water Management*, 32(3): 293-306.
- Santos, F. 1996. Evaluation and adoption of irrigation technologies. I. management -design curves for furrow and level basin systems. *Agricultural Systems*, 52(2-3): 317-329.
- Savin, M.C., Gorres, J.H., Neher, D.A. et Amador, J.A. 2001. Biogeophysical factors influencing soil respiration and mineral nitrogen content in an old field soil. *Soil Biology & Chemistry*, 33(2001): 429-438.
- Scandella, P. et Mecella, G. 1994. Irrigation ecologiquement viable: principes, possibilités d'application et mesure nécessaires. In: ICID/CIID (Editor). 17th European Regional Conference on Irrigation and Drainage. Varna, pp. 97-104.
- Schmidt, I.K., Jonasson, S. et Michelsen, A. 1999. Mineralization and microbial immobilization of N and P in arctic soils in relation to season, temperature and nutrient amendment. *Applied Soil Ecology*, 11(1999): 147-160.
- Schmitz, G.H. 1993a. Transient infiltration from cavities. I. Theory. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(3): 443-457.
- Schmitz, G.H. 1993b. Transient infiltration from cavities. II. Analysis and application. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(3): 458-470.
- SDEC. 1999. Système tensiométrique multivoies à mercure STM 2150 (notice d'utilisation).
- Serralheiro, R.P. et Oliveira, M.R. 1994. Furrow irrigation on a subsoiled mediterranean brown soil: water balance and root growth. In: AGENG (Editor). International Conference on Agricultural Engineering. Milano, pp. 41-42.
- Shepard, J.S., Wallender, W.W. et Hopmans, J.W. 1993. One-point method for estimating furrow infiltration. *Trans. ASAE*, 36(2): 395-404.
- Shepherd, M.A., Davies, D.B. et Johnson, P.A. 1993. Minimizing nitrate losses from arable soils. *Soil Use and Management*, 9(3): 94-99.
- Shoap, M.G., Leij, F.J. et Van Genuchten, M.T. 1998. Neuronal network analysis for hierarchical prediction of soil water retention curve and saturated conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62: 847-855.
- Silvertooth, J.C., Watson, J.E., Malcuit, J.E. et Doerge, T.A. 1992. Bromide and nitrate movement in an irrigated cotton production system. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 548-555.
- Simunek, J., Sejna, M. et Genuchten, M.T.V. 1996. HYDRUS-2D. IGWMC, USDA/ARS, Riverside, California.
- Sojka, R.E., Lehrsch, G.A. et Westermann, D.T. 1994. Water or nitrogen placement and leaching from furrow irrigation. In: SWCS (Editor). Agricultural Research to protect water quality. Minneapolis, Minn., pp. 274-278.
- Soltner, D. 1987. Les bases de la production végétale. Sciences et techniques agricoles. 1. Angers. 464 pp.
- Stanford, G. et Epstein, E. 1974. Nitrogen mineralisation - water relation in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38: 103-107.
- Stanford, G., Freere, M.H. et Schwaninger, D.H. 1973. Temperature coefficient of soil nitrogen mineralisation. *Soil Science*, 115: 321-323.
- Stanford, G. et Smith, S.J. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36: 465-472.
- Stenberg, M., Aronsson, H., Linden, B., Rydberg, T. et Gustafson, A. 1999. Soil mineral nitrogen and nitrate leaching losses in soil tillage systems combined with a cash crop. *Soil & Tillage Research*, 50(1999): 115-125.
- Stolte, J., Freijer, J.I., Bouten, W., Dirksen, C., Halbertsma, J.M., Dam, J.C.V., Berg, J.A.V.d., Veerman, G.J. et Wosten, J.H.M. 1994. Comparison of six methods to determine unsaturated soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58(1596-1603).
- Sweeten, J.M. et Reddell, D.L. 1978. Nonpoint sources: State-of-the-art overview. *Transactions of the ASAE*, 76: 474-483.
- Tabuada, M.A., Rego, Z.J.C., Vachaud, G. et Pereira, A. 1995a. Modelling of furrow irrigation. Advance with two-dimensional infiltration. *Agricultural Water Management*, 28: 201-221.
- Tabuada, M.A., Rego, Z.J.C., Vachaud, G. et Pereira, A. 1995b. Two-dimensional infiltration under furrow irrigation: modelling, its validation and applications. *Agricultural Water Management*, 27: 105-123.
- Talsma, T. et Parlange, J.Y. 1972. One dimensional infiltration. *Aust. J. Soil Res.*, 10: 143-150.
- Tardieu, F. 1987. Système racinaire et alimentation en eau. In: ITCF (Editor). Le maïs et l'eau. Colloque Alimentation hydrique du maïs. Agen, pp. VI/1-12.

- Tayot, X., Ruget, F., Brisson, N., Fort, J.-L. et Lemaire, G. 1998. Le modèle de simulation de culture STICS: un util pour le conseil. *Perspectives Agricoles*, 241: 92-97.
- Thony, J.L. 1970. Etude expérimentale des phénomènes d'hystérésis dans les écoulements en milieux poreux non saturés. *Thesis: Ingénieur*. Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble, Grenoble, 140 pp.
- Tiercelin, J.-R. 1998. Traité d'irrigation. T. Doc. Paris. 1011 pp.
- Tim, U.S. 1996. Emerging technologies for hydrologic and water quality modeling research. *Transactions of the ASAE*, 39(2): 465-476.
- Todoroff, P. 1993. Adaptation méthodologique d'une sonde reflectométrique pour la mesure de l'humidité des sols - Application aux sols de La Réunion. *Diplôme d'Agronomie Approfondie, mention Genie Agronomique*. ENSA, Montpellier, 39 pp.
- Topp, G.C. et Reynolds, W.D. 1998. Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil. *Soil & Tillage Research*, 47(1-2): 125-132.
- Turpin, N., Vernier, F. et Joncour, F. 1997. Transferts de nutriments des sols vers les eaux - Influence des pratiques agricoles. *Ingénieries - EAT*, 11: 3-16.
- Vachaud, G., Dancette, C., Sonko, S. et Thony, J.L. 1978. Méthode de caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. *Ann. agron.*, 29(1): 1-36.
- Vallin, P. 1999. Irrigation. La gestion volumétrique entre dans les moeurs. *Cultivar*, pp. 8-10.
- van Dam, J.C., Huygen, J., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., Kabat, P., Walsum, P.E.V.v., Groenendijk, P. et Diepen, C.A.v. 1997. Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. 45. Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- van Diest, A. 1994. Agricultural Sustainability and Soil Nutrient Cycling, With Emphasis on Tropical Soils. *International Society of Soil Science*, 4b: 48-61.
- van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.
- Vanderborght, J., Gonzalez, C., Vanclooster, M., Mallants, D. et Feyen, J. 1997. Effects of soil type and water flux on solute transport. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61: 372-389.
- Vauclin, M. 1994. Modélisation du transport de solutés dans la zone non saturée du sol. *Revue des Sciences de l'Eau*, 7(1): 81-102.
- Vauclin, M. et Vachaud, G. 1987. Caractérisation hydrodynamique des sols: analyse simplifiée des essais de drainage interne. *Agronomie*, 7: 647-655.
- Verreken, H., Maes, J. et Feyen, J. 1990. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Sci.*, 149(1): 1-12.
- Verrel, J.L. 1995. Risque de pollution d'origine agricole. *Ingenieries-EAT, Special Rade de Brest*: 9-11.
- Vodicka, A. 2000. Amélioration de l'irrigation gravitaire au moyen Sébou (Maroc). Diagnostic des pratiques en vigueur et perspectives d'amélioration. *Mémoire ITA*. ISEA.
- Webster, C.P., Poulton, P.R. et Goulding, K.W.T. 1999. Nitrogen leaching from winter cereals grown as part of a 5-year ley-arable rotation. *European Journal of Agronomy*, 10: 99-109.
- Wendland, F. 1994. Modelling the nitrate flow in the ground-water provinces of the "old" federal states of the Federal Republic of Germany. *Ecological Modelling*, 75/76(1994): 385-397.
- Whalley, W.R. 1993. Considerations on use of time domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. *J. Soil Sci.*, 44: 1-9.
- White, I. et Sully, J. 1987. Macroscopic and microscopic capillarity length and time scales from field infiltration. *Water Reour. Res.*, 23: 1514-1522.
- Williams, J.R. 1984. EPIC The Erosion - Productivity Impact Calculator. Vol. I. Model documentation. U.S. Department of Agriculture.
- Wraith, J.M. et Das, B.S. 1998. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time-domain reflectometry. *Soil and Tillage Research*, 47(1-2): 145-150.
- Xanthoulis, D. et Wallender, W.W. 1991. Furrow infiltration and design with cannery wastewater. *Transactions of the ASAE*, 34(6): 2390-2396.
- Yen, L.X. 1997. Approche du bilan hydrique sous culture de maïs par étude expérimentale et modélisation. *Rapport de fin d'étude*. ENSAM & Cemagref, Montpellier.

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION	1
<u>CHAPITRE 1 TRANSFERT D'EAU ET DE SOLUTES EN CULTURE IRRIGUÉE</u>	6
1.1 LE SYSTÈME SOL-PLANTE-ATMOSPHERE	6
1.1.1 La culture: le maïs	6
1.1.1.1 Besoin en chaleur de la plante	7
1.1.1.2 Effets du stress hydrique sur la plante	7
1.1.2 Le sol et ses caractéristiques	8
1.2 BILAN ET TRANSFERT HYDRIQUE	9
1.2.1 Equations fondamentales	9
1.2.1.1 Equation de conservation de la masse	9
1.2.1.2 La loi de Darcy	9
1.2.1.3 Equation de Richards	10
1.2.2 Variables descriptives et méthodes de mesure	10
1.2.2.1 Relation pression effective – teneur en eau	11
1.2.2.2 Relation conductivité – teneur en eau ou tension	12
1.2.2.2.1 Modèles de calculs de $K(h)$ et $K(\theta)$	12
1.2.2.2.2 Méthodes de détermination de $K(\theta)$ au champ	13
1.2.2.2.2.1 Méthode du plan de flux nul	13
1.2.2.2.2.2 Méthode du drainage interne	14
1.2.2.2.3 Limites d'utilisation des fonctions de pédo-transfert	14
1.2.3 Bilan hydrique « mesuré » au champ	14
1.2.3.1 ETP, ETM et ETR: rappel des définitions utilisées en agronomie	14
1.2.3.2 Calcul du bilan hydrique	15
1.2.3.3 Coefficient cultural k_c	16
1.2.3.4 Limites du bilan hydrique mesuré au champ	17
1.2.4 Bilan hydrique simulé selon le concept RU	17
1.2.4.1 Réserve utile	17
1.2.4.2 Limites du bilan hydrique simulé	18
1.3 BILAN ET TRANSFERT D'AZOTE	19
1.3.1 Cycle de l'azote dans les sols cultivés	19
1.3.1.1 Apports	20
1.3.1.1.1 Apports météoriques	20
1.3.1.1.2 Fixation symbiotique et non symbiotique	20
1.3.1.1.3 Fertilisation	20
1.3.1.2 Transformations	21
1.3.1.2.1 Minéralisation	21
1.3.1.2.2 Immobilisation (ou organisation)	22
1.3.1.3 Pertes	22
1.3.1.3.1 Adsorption par les plantes	22
1.3.1.3.2 Pertes par voies gazeuses: volatilisation et dénitrification	23
1.3.1.3.3 Pertes par voies hydriques	24
1.3.2 Lois du transfert d'azote	24
1.3.2.1 Equation de conservation de la masse	25
1.3.2.2 Equation de convection-dispersion	25
1.3.2.3 Calcul du stock d'azote dans le sol	26
1.3.2.3.1 Cas des bougies poreuses	26
1.3.2.3.2 Cas des prélèvements de sol	26
1.4 PRATIQUES CULTURALES	27
1.4.1 Fertilisation azotée	27
1.4.1.1 Quelle quantité d'azote apporter?	27
1.4.1.2 Date des apports de fertilisant	28
1.4.1.2.1 Pourquoi le fractionnement des apports d'engrais?	28
1.4.1.2.2 Difficultés pour le fractionnement des apports	29
1.4.1.3 Forme des apports	29
1.4.2 L'irrigation	30
1.4.2.1 Irrigation et risques environnementaux	30
1.4.2.2 Irrigation à la raie	31
1.4.2.2.1 Principe du fonctionnement de l'irrigation à la raie	31
1.4.2.2.2 Phases d'irrigation à la raie	32
1.4.2.2.3 Efficacité de l'arrosage gravitaire	32
1.4.2.2.4 Couple débit - temps d'arrosage	33
1.4.2.3 Variabilité de l'infiltration en irrigation à la raie	33
1.4.2.3.1 Variabilité spatiale à l'échelle de la raie	33

1.4.2.3.1.1 Hétérogénéité le long de la raie	33
1.4.2.3.1.2 Hétérogénéité entre le billon et la raie	34
1.4.2.3.2 Variabilité spatiale à l'échelle de la parcelle	34
1.4.2.3.3 La variabilité temporelle	35
1.5 CONCLUSIONS DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	35
CHAPITRE 2 EXPÉRIMENTATION	36
2.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'EXPÉRIMENTATION SUR LAVALETTE	36
2.1.1 Situation géographique	36
2.1.2 Caractéristiques du sol	36
2.1.3 Climat	37
2.1.4 La plante: maïs, variété Samsara	38
2.1.5 Description des traitements	39
2.1.5.1 Expérimentation en 1997 et 1998	39
2.1.5.2 Expérimentation en 1999	39
2.1.5.2.1 Traitements sous irrigation par aspersion	39
2.1.5.2.2 Traitements sous irrigation gravitaire	40
2.1.5.2.3 Sites de suivi en 1999	40
2.2 MATÉRIEL ET MESURES	41
2.2.1 Suivi des cinétiques et des bilans hydriques	41
2.2.1.1 Mesure de l'humidité	41
2.2.1.1.1 Mesure de l'humidité par sonde à neutrons	41
2.2.1.1.2 Mesure de l'humidité par méthode gravimétrique	41
2.2.1.1.3 Mesure de l'humidité par réflectométrie dans le domaine temporel (TDR)	42
2.2.1.2 Mesure de la charge hydraulique par les tensiomètres	42
2.2.2 Mesure des caractéristiques du déroulement de l'irrigation	43
2.2.2.1 Mesure de l'avancement	43
2.2.2.2 Mesure des débit en tête	43
2.2.3 Déterminations agronomiques	43
2.2.3.1 Suivi des stades phénologiques	43
2.2.3.2 Etude de l'indice foliaire (LAI)	43
2.2.3.2.1 Mesure manuelle de LAI	43
2.2.3.2.2 Mesure par Picqhélios	44
2.2.3.3 Détermination de la production de MS et du rendement final	44
2.2.3.4 Température de surface du couvert	45
2.2.4 Suivi des bilans et des flux d'azote	46
2.2.4.1 Prélèvement des échantillons du sol pour l'analyse d'azote	46
2.2.4.2 Mesure d'azote minéral du sol par bougie poreuse	46
2.2.4.3 Mesures des autres éléments du bilan d'azote	47
2.2.5 Critique des méthodes expérimentales: représentativité des échantillons et précision des mesures	47
2.2.6 Description des campagnes d'irrigation	48
2.3 RÉSULTATS AGRONOMIQUES	51
2.3.1 Conduite de la culture	51
2.3.2 Croissance-développement	51
2.3.3 Mesure du LAI	52
2.3.3.1 Calage du Picqhélios	52
2.3.3.2 Analyse des résultats de LAI	53
2.3.4 Température de surface du couvert	55
2.3.5 Enracinement	56
2.3.6 Rendement	57
2.3.6.1 Rendement en 1997	57
2.3.6.2 Rendement en 1998	58
2.3.6.3 Rendement en 1999	59
2.3.7 Conclusions partielles et critique des résultats	61
2.4 SUIVI DES BILANS ET FLUX D'EAU	62
2.4.1 Humidités caractéristiques et densités des parties Nord et Sud	62
2.4.1.1 Humidités caractéristiques	62
2.4.1.2 Densité apparente du sol	64
2.4.2 Cas des sites en aspersion	65
2.4.2.1 Evolution de l'état hydrique du sol en fonction des apports et de la fertilisation	65
2.4.2.1.1 Evolution des charges et gradients hydrauliques	65
2.4.2.1.2 Teneur en eau et stock	66
2.4.2.2 Evolution du plan de flux nul	67
2.4.2.3 Bilans hydriques sur les sites en aspersion	68
2.4.2.3.1 Evapotranspiration	68
2.4.2.3.2 Drainage	69
2.4.3 Cas de sites en irrigation gravitaire	70
2.4.3.1 Comparaison des humidités et des charges sous la raie et le billon	70
2.4.3.1.1 Comparaison des profils hydriques	71
2.4.3.1.2 Comparaison des humidités	72

2.4.3.1.3 Comparaison des charges	74
2.4.3.2 Bilan hydrique sur les sites gravitaires	76
2.4.3.2.1 Drainage et remontées capillaires à 140 cm	76
2.4.3.2.1.1 Flux a 140 cm sur le site Ta-moyen	78
2.4.3.2.1.2 Flux a 140 cm sur le site Ta-aval	79
2.4.3.2.1.3 Flux a 140 cm sur le site Te-aval	80
2.4.3.2.1.4 Flux a 140 cm sur le site Te-moyen	81
2.4.3.2.2 Evapotranspiration	81
2.4.3.2.2.1 Cas du site Ta-moyen	81
2.4.3.2.2.2 Cas des autres sites	83
2.4.4 Analyse de l'hétérogénéité d'apport d'eau en irrigation à la raie bouchée	83
2.4.4.1 Variabilité à l'échelle parcellaire	83
2.4.4.1.1 Variabilité des débits	84
2.4.4.1.2 Variabilité des temps d'arrivée entre blocs	84
2.4.4.1.3 Variabilité des temps d'arrivée entre raies d'un même bloc	85
2.4.4.2 Variabilité à l'échelle de la raie	87
2.4.4.2.1 Variabilité de la vitesse d'avancement le long de la raie	87
2.4.5 Estimation de l'apport d'eau à partir des mesures d'humidité	87
2.4.5.1 Apport mesuré par la sonde TDR Campbell	88
2.4.5.2 Apport mesuré par la sonde TDR Trase	88
2.4.5.3 Apport mesuré par la sonde à neutron	88
2.4.5.4 Variabilité d'apports observée le long de raie	89
2.4.5.5 Conclusion partielle	90
2.5 SUIVI DES BILANS ET FLUX D'AZOTE	91
2.5.1 Résumé des résultats de 1997 et 1998	91
2.5.1.1 Azote dans la plante	91
2.5.1.2 Bilan d'azote: Estimation de la minéralisation en 1998	92
2.5.2 Résultats de l'année 1999	93
2.5.2.1 Fertilisation	93
2.5.2.2 Teneur en azote de la plante	94
2.5.2.3 Analyse du stock d'azote du sol	95
2.5.2.3.1 Evolution du stock d'azote du sol sur les sites en aspersion	95
2.5.2.3.2 Hétérogénéité des stocks entre le billon et la raie	97
2.5.2.4 Concentration en azote de la solution des bougies poreuses	99
2.5.2.5 Comparaison des stocks d'azote obtenus par différentes méthodes	100
2.5.2.6 Calcul du lessivage à l'aide des bougies poreuses placées sous le billon	101
2.5.2.7 Bilan d'azote sur les sites de référence en aspersion et estimation de la minéralisation	102
2.5.2.7.1 Bilan d'azote jusqu'en août et estimation de la minéralisation	102
2.5.2.7.2 Bilan d'azote sur l'ensemble du cycle	103
2.5.2.8 Estimation des bilans d'azote sur les sites en irrigation gravitaire	104
2.5.3 Conclusions partielles sur les bilans d'azote	107
CHAPITRE 3 MODELISATION	109
3.1 GÉNÉRALITÉS SUR LA MODÉLISATION	109
3.1.1 Pourquoi le recours à la modélisation ?	109
3.1.2 Etapes principales de la modélisation	110
3.1.2.1 Calage du modèle	110
3.1.2.2 Validation du modèle	111
3.2 MODÉLISATION DE L'IRRIGATION À LA RAIE	111
3.2.1 Approche mécaniste: modèle hydrodynamique complet	112
3.2.2 Modélisation empirique	112
3.2.2.1 Approche hydrodynamique	112
3.2.2.2 Approche hydrologique ou "bilan-volume"	113
3.3 MODÈLE RAIEOPT	114
3.3.1 Objectifs du modèle	114
3.3.2 Fonctionnement du modèle	115
3.3.3 Calage du modèle	117
3.3.4 Validation du modèle Raieopt, ses limites	117
3.3.4.1 Validation de la phase prédictive de l'approche « temps réel »	117
3.3.4.2 Validation de la phase optimisation	118
3.3.4.3 Application du modèle dans le cas de raies bouchées	118
3.3.4.4 Variabilité spatiale et temporelle des paramètres du modèle	118
3.3.5 Options « prédictive » de Raieopt	119
3.3.5.1 Option M2P du modèle Raieopt	119
3.3.5.2 Option M3P du modèle RAIEOPT	119
3.4 LES MODÈLES DE CULTURES EN BREF	121
3.4.1 Simulation du transfert de l'azote dans les modèles de cultures	121
3.5 PRÉSENTATION DU MODÈLE STICS	122
3.5.1 Objectifs de STICS	123
3.5.2 Caractéristiques du modèle STICS	123

3.5.3 Rapport entre les modules de STICS.....	124
3.5.4 Bilan de carbone ou développement de la culture.....	125
3.5.4.1 Levée et développement post-levée.....	125
3.5.4.2 Phases de croissance et sénescence des feuilles.....	126
3.5.4.3 Croissance en biomasse des parties aériennes.....	127
3.5.4.4 Elaboration du rendement.....	127
3.5.4.5 Croissance racinaire.....	128
3.5.5 Bilan hydrique.....	129
3.5.5.1 Apports d'eau par irrigation.....	129
3.5.5.2 Evapotranspiration.....	130
3.5.5.2.1 Evaporation du sol.....	130
3.5.5.2.2 Besoins en eau des plantes - approche k_c * ETP.....	130
3.5.5.3 Drainage.....	131
3.5.6 Bilan d'azote.....	132
3.5.6.1 Apports d'engrais minéraux.....	132
3.5.6.2 Minéralisation.....	132
3.5.6.2.1 Minéralisation de l'humus.....	133
3.5.6.2.2 Minéralisation des résidus organiques.....	133
3.5.6.3 Prélèvement d'azote par la culture.....	133
3.5.6.3.1 Demande d'azote par la plante.....	134
3.5.6.3.2 Offre d'azote du sol.....	134
3.5.6.3.3 Indice de nutrition azotée.....	135
3.5.6.4 Lessivage de l'azote.....	135
3.6 RESULTATS DE LA SIMULATION PAR RAIEOPT.....	136
3.6.1 Calage du modèle.....	136
3.6.1.1 Calcul des coefficients B et Cs.....	136
3.6.1.2 Simulation de l'avancement de l'irrigation.....	137
3.6.2 Simulation de l'apport d'eau par le modèle Raieopt.....	137
3.6.2.1 Comparaison des doses observées et simulées sur les sites TDR.....	138
3.6.2.2 Comparaison des doses simulées et calculées à partir des mesures neutroniques.....	138
3.6.2.3 Hétérogénéité des doses simulées.....	139
3.6.3 Conclusion des simulations avec Raieopt.....	140
3.7 RESULTATS DU CALAGE ET VALIDATION DU STICS.....	141
3.7.1 Préparation des fichiers d'entrée du modèle.....	141
3.7.1.1 Fichier sol.....	141
3.7.1.2 Fichier climat.....	142
3.7.1.3 Fichier technique.....	142
3.7.1.4 Fichier plante.....	142
3.7.2 Calage du modèle STICS.....	143
3.7.2.1 Simulation avec le modèle sans calage.....	143
3.7.2.2 Développement de la culture.....	144
3.7.2.2.1 Croissance du LAI.....	144
3.7.2.2.2 Croissance en biomasse des parties aériennes.....	145
3.7.2.2.3 Elaboration du rendement.....	145
3.7.2.2.4 Croissance racinaire.....	146
3.7.2.3 Calage du bilan d'azote.....	146
3.7.2.3.1 Analyse d'absorption d'azote par la plante.....	146
3.7.2.4 Réajustement du bilan de culture.....	148
3.7.2.5 Conclusions sur la partie calage du STICS.....	149
3.7.3 Validation du modèle STICS sur les sites « en aspersion » en 1997, 1998 et 1999.....	149
3.7.3.1 Développement de la plante et rendement.....	150
3.7.3.1.1 Production de la MS et rendement.....	150
3.7.3.1.2 Evolution de l'indice foliaire (LAI).....	151
3.7.3.2 Bilan hydrique.....	151
3.7.3.3 Bilan d'azote.....	152
3.7.4 Test du modèle sur les sites gravitaires.....	153
3.7.4.1 Simulation du rendement.....	153
3.7.4.2 Simulation du drainage et du lessivage.....	154
3.7.5 Conclusions de la partie validation.....	155
3.7.6 Possibilités et limites de l'utilisation du modèle STICS.....	155
CHAPITRE 4 APPLICATION AU CAS DU MEXIQUE.....	157
4.1 LE MEXIQUE FACE AU DÉFI DE L'EAU.....	157
4.1.1 Ressources hydriques du Mexique.....	157
4.1.2 Agriculture irriguée au Mexique.....	158
4.1.3 Problèmes de pollution liés à l'agriculture.....	158
4.2 PRÉSENTATION DU PERIMÈTRE IRRIGUÉ «EL CARRIZO».....	159
4.2.1 Les raisons du choix de ce site expérimental.....	159
4.2.2 Climat de «El Carrizo».....	160
4.2.3 Type du sol.....	161

4.2.4 Occupation du sol.....	161
4.2.5 L'irrigation et fertilisation à «El Carrizo».....	161
4.2.6 Grandes lignes de la recherche sur le périmètre.....	163
4.2.6.1 Système de prévision des irrigations.....	163
4.2.6.2 Le programme de ferti-irrigation.....	163
4.3 EXPÉRIMENTATION EN «EL CARRIZO» EN 1998.....	164
4.3.1 Objectifs de l'expérimentation.....	164
4.3.2 Pratiques agricoles sur le site expérimental.....	164
4.3.2.1 Comment irriguer de manière optimale?.....	164
4.3.2.1.1 Doses et itinéraire des irrigations.....	164
4.3.2.1.2 Type d'arrosage.....	165
4.3.2.2 Comment fertiliser selon les pratiques améliorées?.....	165
4.3.2.2.1 Calcul de la dose d'azote minéral à apporter.....	165
4.3.2.2.2 Itinéraire de fertilisation.....	167
4.3.2.2.3 Formes des apports d'azote.....	167
4.3.2.3 Conduite de la culture.....	168
4.3.3 Résultats du suivi expérimental à «El Carrizo».....	168
4.3.3.1 Analyse du climat.....	168
4.3.3.2 Analyse du rendement.....	169
4.3.3.3 Analyse des irrigations à la raie.....	169
4.3.3.3.1 Analyse des débits.....	169
4.3.3.3.2 Analyse de l'avancement.....	170
4.3.3.3.3 Calculs des doses apportées.....	171
4.3.3.4 Suivi du fonctionnement hydrique.....	172
4.3.3.4.1 Humidité du sol.....	172
4.3.3.4.2 Analyse de la dynamique des écoulements.....	173
4.3.3.5 Suivi du bilan d'azote.....	174
4.3.3.5.1 Analyse de l'hétérogénéité du stock initial d'azote.....	174
4.3.3.5.2 Evolution du stock d'azote sur le site non fertilisé.....	175
4.3.3.5.3 Cas des sites fertilisés.....	176
4.3.4 Conclusion de la partie expérimentale.....	176
4.3.5 Calage des modèles Raiopt et STICS à partir d'expérimentations sur maïs d'hiver (Rosano, 1999).....	177
4.3.5.1 Préparation des fichiers d'entrée.....	177
4.3.5.2 Calage et validation du modèle Raiopt.....	178
4.3.5.3 Résultats des simulations avec STICS non calé.....	179
4.3.5.4 Résultats des simulations avec calage.....	179
4.4 RÉSULTATS DES ENQUÊTES ET DE L'ANALYSE DE BASES DE DONNÉES.....	180
4.4.1 Caractéristiques du maïs.....	180
4.4.2 Date de semis, taille des parcelles.....	180
4.4.3 Irrigations.....	181
4.4.4 Fertilisations.....	183
4.4.5 Rendements.....	184
4.4.6 Définition de scénarios types de maïs irrigué sur le périmètre.....	184
4.4.6.1 L'itinéraire technique.....	184
4.4.6.1.1 Identification des pratiques d'irrigation.....	184
4.4.6.1.2 Le climat.....	185
4.4.6.1.3 Le sol.....	186
4.4.6.1.4 Les conditions initiales.....	186
4.5 SIMULATIONS DES SCÉNARIOS.....	187
4.5.1 Scénarios des pratiques actuelles.....	187
4.5.1.1 Simulation des profils de dose infiltrée.....	187
4.5.1.2 Simulation du développement de la culture et effet des hétérogénéités d'apport.....	189
4.5.1.2.1 Effets des apports hétérogènes.....	189
4.5.2 Scénarios de pratiques alternatives.....	190
4.5.3 Conclusions.....	192
CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	193

LISTE DE FIGURES

Figure 1	Courbes caractéristiques de l'humidité du sol en sorption et désorption	11
Figure 2	Evolution type du k_c (d'après Martin et al., 1990)	16
Figure 3	Schéma simplifié du cycle de l'azote (d'après Mariotti, 1982)	19
Figure 4	Phases de l'irrigation à la raie	32
Figure 5	Déficit hydrique pendant les trois campagnes expérimentales	37
Figure 6	Cumules des pluies décennales de 1997 à 1999 à Lavalette	38
Figure 7	Parcelle expérimentale à Lavalette en 1999	39
Figure 8	Schéma d'installation des capteurs TDR sur le terrain	42
Figure 9	Evolution de l'humidité du grain en fin de campagne 1999	52
Figure 10	Evolution de LAI mesurées manuellement et par Picqhélios	52
Figure 11	Comparaison des valeurs de LAI mesurées manuellement et par Picqhélios	53
Figure 12	Ajustement des valeurs de LAI mesurées manuellement et par Picqhélios	53
Figure 13	Indices foliaires (LAI) mesurés par Picqhélios en 1997	54
Figure 14	Indices foliaires (LAI) mesuré par Picqhélios en 1998	54
Figure 15	Indices foliaires obtenus par correction des mesures Picqhélios, sur les sites en aspersion	55
Figure 16	Indices foliaires (LAI) sur les sites en gravitaire	55
Figure 17	Evolution de la profondeur racinaire	56
Figure 18	Comparaison des rendements en grain en 1997	57
Figure 19	Comparaison des rendements en grain en 1998	59
Figure 20	Comparaison des rendements en grain en 1999	59
Figure 21	Réserve mobilisée cumulée pour le maïs en 1998 sur le traitement Sec	63
Figure 22	Densité sèche du sol mesurée après la récolte 1999	64
Figure 23	Charges hydrauliques sur les sites en aspersion	65
Figure 24	Evolution du gradient de charge sur les sites en aspersion	66
Figure 25	Evolution du stock sur les sites en aspersion	66
Figure 26	Evolution de plan de flux nul	67
Figure 27	Evolution du rapport ETR/ETP sur les sites ETM et 0N d'après le bilan hydrique calculé	68
Figure 28	Evolution du rapport ETR/ETP en fonction des pluies sur le site Sec	68
Figure 29	Cumul de ETR sur les sites en aspersion	69
Figure 30	Flux cumulés à 140 cm depuis le 10 juin sur les sites en aspersion	70
Figure 31	Comparaison des profils d'humidité entre billon et raie avant et après la 2^{ème} irrigation sur le site Te-moyen	71
Figure 32	Comparaison des profils d'humidité entre billon et raie avant et après la 2^{ème} irrigation sur le site Ta-moyen	72
Figure 33	Evolution de l'humidité sur le site Ta-moyen, aux différentes profondeurs	72
Figure 34	Evolution de l'humidité sur le site Ta-aval, aux différentes profondeurs	73
Figure 35	Evolution de l'humidité sur les sites Te, aux différentes profondeurs	74
Figure 36	Evolution du gradient de charge sur le site Ta-moyen aux différentes profondeurs	75
Figure 37	Evolution des charge sur le site Ta-moyen aux différentes profondeurs	75
Figure 38	Relation $h(\theta)$ sur les sites Ta, à différentes profondeurs	77
Figure 39	Relation $h(\theta)$ sur les différents sites, entre les profondeurs 130 et 150 cm	77
Figure 40	$K(\theta)$ obtenu par drainage interne à 140 cm, sur le site Ta-moyen	78
Figure 41	Flux cumulé à 140 cm sur le site Ta-moyen	78
Figure 42	Flux cumulé à 140 cm sur le site Ta-aval	79
Figure 43	Drainage sur le site Te-aval	80
Figure 44	Drainage sur le site Te-moyen	81
Figure 45	Exemple de la variabilité d'avancement	85
Figure 46	Comparaison de la vitesse d'avancement sur Te et Ta	85
Figure 47	Relation temps d'arrivé-débit, irrigation n°2	85
Figure 48	Effet de la permanence du comportement des raies	86
Figure 49	Variabilité de la vitesse d'avancement le long de raie (Ta, 3^{ème} arrosage)	87
Figure 50	Profil d'humidité volumique avant et après l'arrosage sur site Te-sup	89
Figure 51	Suivi du profil d'humidité volumique avant et après l'arrosage sur les sites de traitement Te	89
Figure 52	Relation entre la teneur en azote des partie aériennes et la biomasse aérienne accumulée	94
Figure 53	Evolution du stock d'azote minéral par couche sur les sites ETM, Sec et 0N	96

Figure 54	Evolution du stock d'azote minéral sur le site Te-aval	97
Figure 55	Evolution du stock d'azote minéral sur le site Ta-moyen	98
Figure 56	Evolution de la concentration en azote totale dans la solution des bougies poreuses	99
Figure 57	Vitesse de remplissage des bougies poreuses pendant le mois d'octobre	99
Figure 58	Comparaison des stocks d'azote obtenus par analyse du sol et par les bougies poreuses	101
Figure 59	Lessivage estimé sur le site Te-aval	102
Figure 60	Profil de la raie Ta-moy	104
Figure 61	Rapport entre les différents modules dans STICS (d'après Brisson et Mary, 1999)	124
Figure 62	Transfert d'eau et d'azote dans le modèle STICS	129
Figure 63	Variabilité des doses apportées le long de la raie et entre les raies	139
Figure 64	Comparaison de l'évolution de LAI simulée et mesurée	148
Figure 65	Comparaison des rendements en MS et en grains simulés et mesurés	150
Figure 66	Comparaison des rendements simulés et mesurés	151
Figure 67	Comparaison de l'évolution de LAI simulée et mesurée sur les sites ETM et Sec en 1999	151
Figure 68	Cumul de ETR simulée et estimé sur les sites ETM et Sec	152
Figure 69	Comparaison de teneur en azote de la plante observée et simulée sur sites en aspersion sans stress azoté	152
Figure 70	Comparaison des teneurs en azote observées et simulées sur les sites en aspersion en 1999	153
Figure 71	Comparaison des rendements simulés et observés sur les sites gravitaires en 1999	153
Figure 72	Schéma de la parcelle expérimentale au «Centro de Capacitacion»	168
Figure 73	Données climatiques de 1998 en «El Carrizo»	169
Figure 74	Avancement des irrigations sur la parcelle expérimentale en «El Carrizo»	170
Figure 75	Vitesse d'avancement lors de l'irrigation de pré-semis et de la 2^{ème} irrigation	170
Figure 76	Résultats du calage de Raieopt sur les 3 premiers arrosages post-semis de la parcelle d'El Carrizo	172
Figure 77	Humidité initiale du sol sur la parcelle expérimentale	173
Figure 78	Evolution des charges hydraulique et du gradient de charge à 90 cm sur le site 3	173
Figure 79	Evolution des charges sur le site 6	174
Figure 80	Comparaison des stocks initiaux d'azote (en forme NH₄ et NO₃)	175
Figure 81	Evolution du stock d'azote sur le site non fertilisé	175
Figure 82	Comparaison du stock d'azote sur les sites fertilisés	176
Figure 83	Calage et validation du Raieopt sur la parcelle expérimentale de Rosano (1999)	178
Figure 84	LAI mesuré et simulé sur le site 2 sans stress	179
Figure 85	Etapas du développement du maïs en «El Carrizo» pour le cycle d'automne-hiver	180
Figure 86	Nombre d'arrosages appliqué par les agriculteurs du module 1 (325 agriculteurs analysés)	182
Figure 87	Nombre d'arrosage pratiqué par les agriculteurs enquêtés	183
Figure 88	Quantité d'azote apporté par les agriculteurs enquêtés et son fractionnement	183
Figure 89	Relation entre rendement et fertilisation et rendement et irrigation	184
Figure 90	Comparaison des pluies et des températures de l'année 1996-97 avec la moyenne sur 22 ans	185
Figure 91	Type du sol du périmètre «El Carrizo»	186
Figure 92	Profils de doses simulés avec q=0.7 l/s	188
Figure 93	Lessivage de l'azote simulé	190

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1	Phases principales du développement du maïs (d'après AGPM, 1998)	6
Tableau 2	Tolérance du maïs à la salinité en fonction du rendement espéré (d'après FAO, 1979 et Ojeda et al, 1999) ..	6
Tableau 3	Sommes de températures en différentes régions pour différentes variétés (FAO, 1996)	7
Tableau 4	Effet de stress hydrique sur l'élaboration du rendement du maïs (d'après Lacroix, 1987, Deumier, 1991) ..	8
Tableau 5	Valeurs moyennes de l'humidité et du potentiel des sols (d'après Hénin, 1977)	18
Tableau 6	Variation de teneur en azote du maïs au cours de sa croissance (Duthil, 1973)	23
Tableau 7	Effet du type de fertilisant sur le rendement	30
Tableau 8	Coefficients de variation du débit en fonction du matériel de distribution (d'après Mailhol et al., 1999) ..	34
Tableau 9	Caractéristiques du sol de Lavalette par couche	37
Tableau 10	Traitements réalisées en 1997 et 1998	39
Tableau 11	Récapitulatif des sites de mesures pour les trois années	40
Tableau 12	Itinéraire de l'irrigation sur chaque site en 1997 (mm)	49
Tableau 13	Itinéraire de l'irrigation sur chaque site en 1998 (mm)	49
Tableau 14	Calendrier des irrigations (et des précipitations) sur chaque site en 1999 (mm)	50
Tableau 15	Conduite de la culture sur les 3 années	51
Tableau 16	Stades phénologiques en 1997	51
Tableau 17	Formules d'ajustement pour LAI	53
Tableau 18	Analyse du stress hydrique du maïs par mesure de la température de surface en 1999 (en SDD)	56
Tableau 19	Rendement et composantes du rendement du maïs en 1997 (moyennes de 6 placettes de 4 à 6 m²)	57
Tableau 20	Apports et demande climatique sur les différents sites en 1997	58
Tableau 21	Rendement et composantes du rendement du maïs en 1998 (moyennes de 6 à 8 placettes de 4.8 m²)	58
Tableau 22	Rendement et composantes du rendement du maïs en 1999 (moyennes de 6 à 7 placettes de 4.8 m²)	60
Tableau 23	Analyse de l'hausse du rendement à l'ETM par rapport à l'augmentation de la densité	61
Tableau 24	Humidités volumiques caractéristiques pour les traitements Ta et Te en 1999	62
Tableau 25	Comparaison d'humidité volumique maximale et minimale par couche sur le site Sec de 1997 à 1999	62
Tableau 26	Comparaison du stock minimal, maximal et RU sur 1 mètre sur le site Sec entre 1997 et 1999	63
Tableau 27	Humidités caractéristiques moyennes du sol estimées par Barral (1997)	63
Tableau 28	Densité du sol aux différents sites de mesures	64
Tableau 29	Valeurs de ETR sur les sites en aspersion	69
Tableau 30	Résumé du bilan hydrique calculé sur les sites en aspersion, entre le 10 juin et 5 octobre (valeurs en mm)	69
Tableau 31	Drainage estimé par les différentes formules sur Ta-aval du 7/9 au 5/10	79
Tableau 32	Drainage (ou remontées capillaires (-)) estimé par les différents modèles sur Ta-moyen et Ta-aval (mm)	80
Tableau 33	Paramètres de l'équation de Van Genuchten calculés et ajustés pour les sites Te	80
Tableau 34	Drainage (ou remontées capillaires (-)) estimé par les différents modèles sur Te-moyen et Te-aval (mm)	81
Tableau 35	Composantes du bilan hydrique calculé sur la couche 0-140 cm pour le site Ta-moyen et ETM	82
Tableau 36	Bilan hydrique en période sans apport d'eau sur Ta-moyen, sur le billon et dans la raie (valeurs en mm)	82
Tableau 37	Composantes du bilan hydrique calculé sur trois sites en irrigation gravitaire	83
Tableau 38	Résultats du suivi des irrigations à Lavalette	84
Tableau 39	Exemple d'avancement de la 3^{ème} irrigation sur le traitement Ta	86
Tableau 40	Doses d'eau apportées mesurées par les sondes (mm)	88
Tableau 41	Teneur en azote de la plante en % MS et en Kg N/ha à la récolte en 1997	91
Tableau 42	Teneur en azote de la plante le 12/8/1998 (kg N/ha)	91
Tableau 43	Bilan d'azote en 1998	92
Tableau 44	Sensibilité du stock en azote du sol à l'humidité et à la densité apparente	92
Tableau 45	Calendrier et apport de fertilisation en 1999	93
Tableau 46	Teneur en azote de la plante en % MS et en Kg N/ha à la récolte et au début août	94
Tableau 47	Teneur en azote total de la solution des bougies poreuses du 22 juillet au 20 septembre	100
Tableau 48	Lessivage estimé sur les sites Ta et Te (kg N/ha)	101
Tableau 49	Composantes du bilan azoté sur les sites en aspersion pendant le début du cycle	102
Tableau 50	Composantes du bilan azoté sur les sites en aspersion pendant l'ensemble du cycle	104
Tableau 51	Evaluation des termes du bilan d'azote pour différentes périodes sur les sites en irrigation à la raie	105
Tableau 52	Comparaison des stocks d'azote minéral entre 0-150 cm le 9/11/1999 sous le billon et sous la raie	106
Tableau 53	Données d'entrée du modèle Raieopt	115

Tableau 54	Stades de développement du maïs	125
Tableau 55	Valeurs moyennes et () coefficient de variation des paramètres B et Cs	136
Tableau 56	Comparaison des temps d'arrivée mesurées et simulées (min)	137
Tableau 57	Comparaison des doses d'eau apportées mesurées par les sondes et simulées (mm)	138
Tableau 58	Comparaison des doses calculées à partir des mesures à sonde à neutron et simulées par Raicopt	138
Tableau 59	Caractéristiques de la couche de surface du sol utilisées lors des simulations	141
Tableau 60	Résultats de simulation avec STICS sans calage	143
Tableau 61	Sommes de températures estimées à partir des observations (en base 6°C)	144
Tableau 62	Comparaison de la MS et du rendement observés et simulés sur le site ETM en 1998	145
Tableau 63	Longueurs calées de stades du développement de la culture	145
Tableau 64	Ajustement du nombre de grains sur le site ETM-98	145
Tableau 65	Résultats de simulation avec du module d'azote non calé du STICS	146
Tableau 66	Valeurs mesurées et simulées après le calage de l'absorption d'azote sur les sites ETM et 0N en 1998	147
Tableau 67	Analyse de sensibilité des paramètres de la courbe de dilution	147
Tableau 68	Valeurs simulées après le calage de l'absorption d'azote par la plante	147
Tableau 69	Réajustement des longueurs calées de stades du développement de la culture	148
Tableau 70	Résultats de simulation après le calage de STICS	148
Tableau 71	Comparaison des ETR simulées et «observées» sur les sites en aspersion en 1999 du semis à la récolte	151
Tableau 72	Comparaison des drainages simulés et estimés par l'équation de Darcy de la 1^{ère} irrigation à la récolte	154
Tableau 73	Eau et activités humaines au Mexique	157
Tableau 74	Pratiques sources de pollution des eaux	158
Tableau 75	Exemple des rendements potentiels en grain de différentes variétés de maïs à l'Etat de Sinaloa	160
Tableau 76	Données climatiques de 22 ans sur «El Carrizo»	160
Tableau 77	Texture du sol à «El Carrizo»	161
Tableau 78	Tolérance des cultures à la salinité (Ojeda et al, 1999)	161
Tableau 79	Compositions des modules d'irrigation	162
Tableau 80	Productivité de l'eau en El Carrizo, toutes cultures confondues (CNA-IMTA, 1999)	162
Tableau 81	Calcul approximatif de doses d'irrigation à partir de données de climat de 1996	164
Tableau 82	Itinéraire d'irrigation recommandée par PRONASE pour le maïs de printemps et d'hiver	165
Tableau 83	Pratiques agricoles sur la parcelle expérimentale	167
Tableau 84	ETP et pluies mensuelles à El Carrizo pendant la campagne de 1998	168
Tableau 85	Rendement (à 15 %) sur la parcelle expérimentale	169
Tableau 86	Analyse de l'avancement des irrigations	169
Tableau 87	Doses apportées calculées avec Raicopt, lors des premières irrigations après semis	172
Tableau 88	Caractéristiques de différentes variétés de maïs (AGPM, 1996)	177
Tableau 89	Pratiques agricoles sur la parcelle expérimentale de Rosano (1999)	177
Tableau 90	Résultats des simulations avec le modèle STICS non calé	179
Tableau 91	Paramètres calés pour le maïs de variété Asgrow	179
Tableau 92	Résultats des simulations avec le modèle STICS calé	179
Tableau 93	Durée du cycle du maïs tardif selon la date de semis (Mendoza, 1993)	180
Tableau 94	Données sur les pratiques agricoles hiver 1996-97	181
Tableau 95	Données sur les pratiques agricoles printemps 1997	181
Tableau 96	Données sur les pratiques agricoles été 1997	181
Tableau 97	Calendrier d'irrigation en 1996-97 (moyenne sur 325 agriculteurs)	182
Tableau 98	Irrigations pratiquées par les agriculteurs enquêtés (n=19) de El Carrizo pour le maïs d'hiver	183
Tableau 99	Fertilisations pratiquées par les agriculteurs de «El Carrizo» pour une culture de maïs d'hiver	183
Tableau 100	Couples débit – durée d'irrigation possibles (min)	185
Tableau 101	Humidités (pondérales) caractéristiques des deux types de sol de El Carrizo	186
Tableau 102	Caractéristiques des arrosages avec un débit = 0.7 l/s et les doses aux différents abscisses	188
Tableau 103	Caractéristiques des arrosages avec un débit = 1.0 l/s et les doses aux différents abscisses	188
Tableau 104	Effet de la dose apportée sur le rendement et le lessivage simulés	189
Tableau 105	Comparaison des itinéraires d'irrigation traditionnelle et optimisée pour un semis de 7 novembre	190
Tableau 106	Comparaison des résultats avec irrigation traditionnelle et optimisée (abscisse=300 m)	191
Tableau 107	Caractéristiques des arrosages «optimisés» avec un débit=1.4 l/s et les doses aux différents abscisses	191

ANNEXE 1 SUIVI AGRONOMIQUE A LA VALETTE

1.1 INTERVENTIONS SUR LA PARCELLE EXPERIMENTALE EN 1999

Date	Intervention
07-avr	prélèvement initial de sol pour l'analyse de NO ₃ , NH ₄ et P-K-Mg (sub-parcelle gravitaire)
08-avr	prélèvement initial de sol pour l'analyse de NO ₃ , NH ₄ et P-K-Mg (site ETM)
09-avr	prélèvement initial de sol pour l'analyse de NO ₃ , NH ₄ et P-K-Mg (site sec)
13-avr	mesures topographique (longueur des raies)
21-avr	préparation des tensiomètres
28-avr	prélèvement initial de sol pour l'analyse de NO ₃ et NH ₄ (ON)
30-avr	prélèvement initial de sol pour l'analyse de NO ₃ et NH ₄ (sites Ta)
10-mai	prélèvement initial de sol pour l'analyse de NO ₃ et NH ₄ (sites Te et site Ta-moy)
25-mai	prélèvement initial de sol pour l'analyse de NO ₃ et NH ₄ (ETM et 0 N); apport de fertilisants
26-mai	travail du sol et semis (8 plantes / mètre linéaire, profondeur de semis: 3-4 cm)
28-mai	irrigation par canon enrouleur (Ta et ETM)
29-mai	irrigation par canon enrouleur (Ta et ETM)
31-mai	irrigation par canon enrouleur (Ta, Te, 0 N et sec)
01-juin	irrigation par canon enrouleur (Ta, Te, 0 N et sec)
02-juin	levée du maïs (côté nord); mesures topographiques
04-juin	installation de tensiomètres (ETM), maïs 3 feuilles (sites Ta)
05-juin	Levée du maïs (côté sud)
08-juin	installation de tensiomètres (Ta-moy): maïs 4 feuilles (Ta-moy) et 3 feuilles (Te-moy)
09-juin	installation de tensiomètres (Te-moy): maïs 3 feuilles (Te-moy)
10-juin	installation du tube pour sonde à neutron (ETM, Ta-moy), hauteur du maïs 9 cm, 5 feuilles, profondeur des racines 22 cm sur ETM
11-juin	installation du tube pour sonde à neutron (ON, Sec)
14-juin	installation du tube pour sonde à neutron (Te-moy), maïs 6 feuilles (ETM) et 5 feuilles (Ta-moy)
15-juin	installation du tube pour sonde à neutron (Ta-aval, Te-aval), installation de station météo sur site Sec, irrigation par canon enrouleur (Ta et ETM), maïs 7 feuilles (ETM)
16-juin	irrigation par canon enrouleur (Ta, Te, 0 N et sec)
17-juin	mesure de LAI manuelle (sec), maïs 6 feuilles (Sec, Te-amo) et 7 feuilles (Ta-aval, Ta-moy)
21-juin	mesure de LAI manuelle (ETM), maïs 9 feuilles (ETM)
24-juin	installation de tensiomètres (ON)
30-juin	mesure de LAI manuelle (Sec) et par Pihélios (ETM, ON), maïs 9-10 feuilles (Sec) et 11 feuilles (ETM)
01-juil	fertilisation (sauf sites sec et N)
02-juil	fertilisation (sauf sites sec et N)
05-juil	réalisation des raies
08-juil	déplacement de central Campbell du site sec à site Ta-moy, irrigation gravitaire (Te)
09-juil	irrigation gravitaire (Ta), mesure de LAI manuelle (ETM), maïs 11-13 feuilles (ETM)
10-juil	irrigation gravitaire (Ta)
11-juil	maïs 11 feuilles (ETM) et 7-8 feuilles (ON)
12-juil	irrigation par aspersion (ETM, ON)
15-juil	mesure de LAI manuelle, maïs 8-11 feuilles (Sec)
16-juil	mesure de température de surface (tout les sites), installation des sondes TDR Campbell sur le site Ta-moy
19-juil	installation du tube pour sonde à neutron dans la raie (Ta-moy, Te-moy, Ta-aval)
21-juil	prélèvement de sol et de plante pour l'analyse d'azote (dans la raie et sur billon, site Te-moy, Te-aval)
22-juil	irrigation gravitaire (Ta)
23-juil	irrigation gravitaire fertilisante (Te)

Date	Intervention
25-juil	prélèvement de l'eau des bougies poreuses
28-juil	irrigation par aspersion (ETM, ON)
29-juil	floraison (Ta, ETM), prélèvement de l'eau des bougies poreuses
30-juil	prélèvement de l'eau des bougies poreuses
02-août	mesure de LAI par Piqhélios (ETM, sec, ON, sites Te), relèvement de l'eau des bougies poreuses
03-août	prélèvement de sol et de plante pour l'analyse d'azote (sites Te)
05-août	prélèvement de sol (ON) et de plante (ON) pour l'analyse d'azote, prélèvement de l'eau des bougies poreuses
06-août	irrigation par aspersion (ETM, ON), prélèvement de sol et de plante pour l'analyse d'azote (sites Ta), prélèvement de l'eau des bougies poreuses
09-août	prélèvement de l'eau des bougies poreuses
10-août	mesure de LAI par Piqhélios (ETM, sec, ON)
11-août	mesure de LAI par Piqhélios (sites "gravitaires")
12-août	mesure de LAI manuelle
17-août	mesure de température de surface (sites Ta, Te, ETM, sec)
18-août	prélèvement de l'eau des bougies poreuses
19-août	irrigation par aspersion (ETM, ON), comptage des feuilles jaunes
23-août	prélèvement de l'eau des bougies poreuses, mesure de température de surface (sites Ta, Te)
24-août	irrigation gravitaire (Te)
25-août	irrigation gravitaire (Ta), prélèvement de l'eau des bougies poreuses
27-août	prélèvement de l'eau des bougies poreuses
03-sept	mesure de l'humidité des grains (Ta-moy, Te-moy, ETM; ON, sec), irrigation par aspersion (ETM, ON)
08-sept	prélèvement de l'eau des bougies poreuses
09-sept	prélèvement de l'eau des bougies poreuses
10-sept	mesure de l'humidité des grains, prélèvement de l'eau des bougies poreuses
13-sept	prélèvement de l'eau des bougies poreuses
16-sept	prélèvement de l'eau des bougies poreuses
17-sept	mesure de l'humidité des grains, prélèvement de l'eau des bougies poreuses
20-sept	prélèvement de l'eau des bougies poreuses
24-sept	mesure de l'humidité des grains
01-oct	mesure de l'humidité des grains
04-oct	mesure de LAI manuelle (sec)
05-oct	mesure de LAI manuelle (ETM)
07-oct	récolte (ETM)
08-oct	récolte (ON, sec)
11-oct	récolte (Ta-amo, Ta-moy)
12-oct	récolte (Ta-aval, Te-aval), prélèvement de sol pour l'analyse d'azote (ON)
15-oct	récolte (Te-amo, Te-moy), prélèvement de sol pour l'analyse d'azote (Ta-moy)
21-oct	prélèvement de l'eau des bougies poreuses
22-oct	prélèvement de l'eau des bougies poreuses
28-oct	prélèvement de l'eau des bougies poreuses
08-nov	prélèvement de sol pour l'analyse d'azote (Ta-aval, Ta-moy)
09-nov	prélèvement de sol pour l'analyse d'azote (Te-aval, ETM, Te-amo, Ta-amo)
10-nov	prélèvement de sol pour l'analyse d'azote (ON, sec)
19-nov	analyse d'humidité (par gravimétrie, sonde TDR et sonde à neutron), mesure de densité par sonde gamma (Ta-moy, Te-moy, Te-aval)
24-nov	analyse d'humidité (par gravimétrie, sonde TDR et sonde à neutron), mesure de densité par sonde gamma (Ta-moy, Te-moy)

Note: les mesures tensiométriques ont été réalisées tous les jours ouvrables, et les mesures d'humidité à la sonde à neutron tous les 5 jours, en moyenne; les deux types de mesures s'effectuant jusqu'à la récolte

1.2 HUMIDITES DU SOL SUR LAVALETTE EN 1997 ET 1999

Tableau 1 Humidité volumique pour les différents horizons le 13 juin (une semaine après la fin de l'épisode pluvieux) et le 10 septembre (minimum), en 1997

Couche	le 13 juin					le 10 septembre				
	Sec	Centre	Sud	nord	ETM	Sec	centre	sud	nord	ETM
0-30	26.3	26.3	25.7	24.4	25.0	12.3	12.3	12.8	11.3	20.7
30-60	26.3	26.3	25.7	24.4	25.0	12.3	12.3	12.8	11.3	20.7
60-90	29.5	28.6	29.2	27.1	25.4	14.0	16.0	17.8	10.7	15.2
90-120	31.5	32.1	33.8		27.5	20	20.3	21.4	13.2	18.9
120-150	35.5	35.2	35.9		32.6					

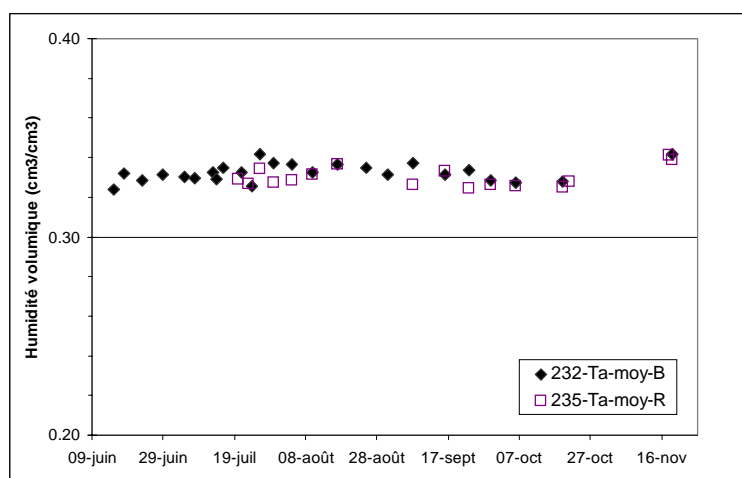
Tableau 2 Humidité volumique maximale par couche sur tous les sites en 1999

Couche	ETM	ON	Sec	Ta-amo	Ta-moy	Ta-aval	Te-amo	Te-moy	Te-aval
0-30	26.1	29.6	27.3	25.7	28.5	35.1	28.3	30.0	30.2
30-60	27.2	31.0	29.7	27.6	28.1	29.4	28.7	29.9	30.3
60-90	26.4	34.3	29.8	24.9	29.3	30.1	28.6	31.2	32.7
90-120	29.7	35.5	29.7	26.0	32.3	33.1	31.5	32.9	36.1
120-150	32.1	36.3	32.3	28.4	34.2	36.6	33.3	36.4	38.5

Tableau 3 Humidité volumique minimale par couche sur tous les sites en 1999

Couche	ETM	ON	Sec	Ta-amo	Ta-moy	Ta-aval	Te-amo	Te-moy	Te-aval
0-30	12.0	18.4	16.0	12.1	12.9	14.9	16.9	17.7	16.2
30-60	13.6	23.2	15.3	15.6	12.1	16.2	19.1	23.3	22.8
60-90	15.5	28.7	17.7	13.5	15.6	18.2	22.6	24.8	24.2
90-120	21.9	30.5	22.5	19.1	21.2	25.9	29.8	30.0	29.7
120-150	29.6	32.8	27.5	25.0	29.6	31.3	32.0	33.1	31.3

Figure 1 Evolution de l'humidité sur le site Ta-moyen à 235 cm de profondeur



1.2.1 Humidités mesurées par TDR (site Ta-moyen)

Figure 2 Evolution de l'humidité du profil du sol (0-120 cm) par TDR

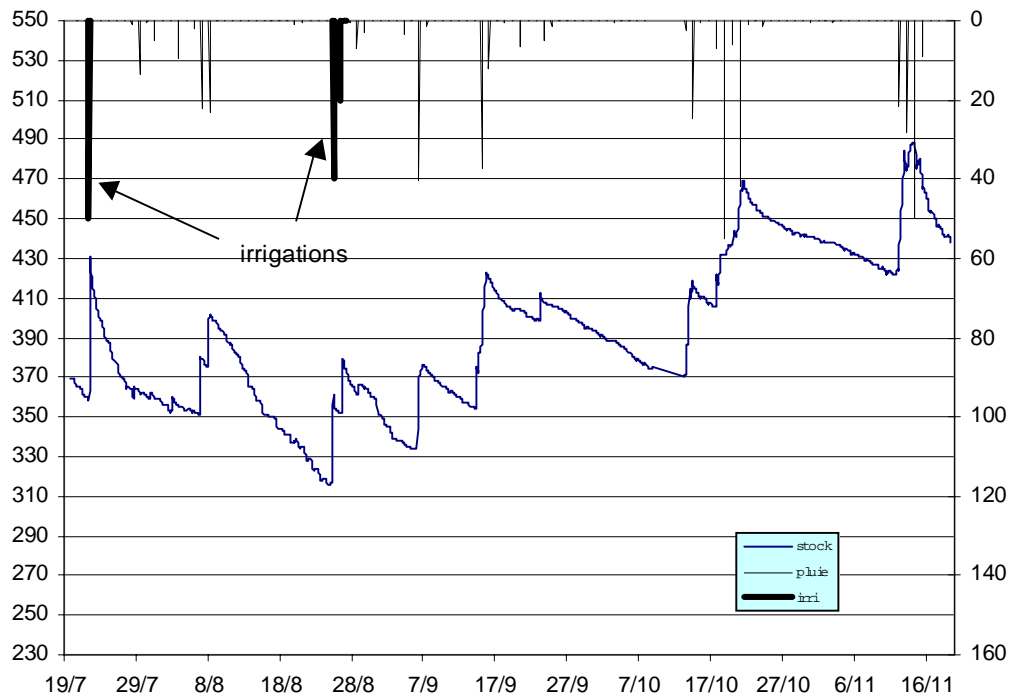
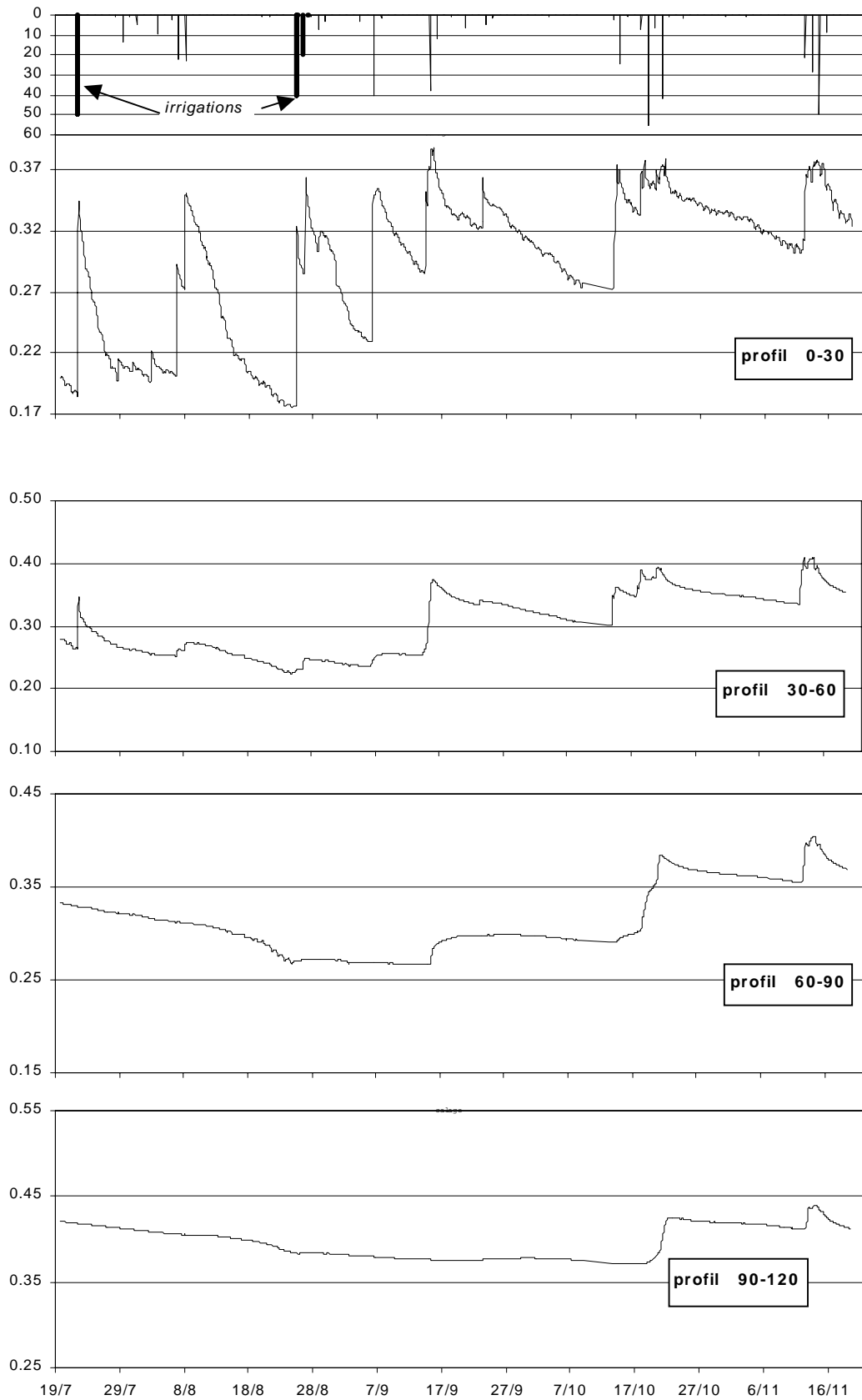


Figure 3 Evolution de l'humidité volumique du sol TDR par profil



1.3 SUIVI DE L'INDICE FOLIAIRE (LAI)

Tableau 4 Indices foliaires (LAI) obtenus par Picqhélios en 1997

Date	ETM	Nord	Centre	Sud	Sec
06/06/97	0.34	0.32	0.33	0.33	0.32
11/06/97	0.41	0.38	0.39	0.38	0.39
17/06/97	0.6	0.60	0.68	0.59	0.72
20/06/97	0.71	0.71	0.71	0.71	0.73
24/06/97	0.94	1.00	0.99	0.96	1.07
27/07/97	1.19	1.14	1.24	1.24	1.34
03/07/97		1.96	2.16	2.03	2.20
07/07/97	2.04	1.80	1.85	1.87	1.78
10/07/97	2.04	1.95	2.06	1.85	2.17
15/07/97					3.92
23/07/97	3.11				
24/07/97	3.33				
29/07/97	3.58	3.29	3.41	3.19	3.26
08/08/97	3.92	3.79	3.73	3.61	3.16
13/08/97	3.95	3.77			3.53
20/08/97	3.65	3.75	3.90	4.18	3.75

Tableau 5 Indices foliaires (LAI) obtenus par Picqélios en 1998

date	ETM	ON	nord	SE	SOE	sec
15/06/98	0.66		0.59			
22/06/98	1.24	0.87	1.42	1.02	0.92	0.78
29/06/98	2.39	1.48	2.16	1.55	1.52	1.02
02/07/98	2.70	1.57	2.60	1.83	1.95	1.32
06/07/98	3.00	1.83	2.83	1.90	2.10	1.46
09/07/98	3.47	1.98	3.11	2.03	2.14	1.25
15/07/98	3.69	2.00	3.20	2.15	2.31	
21/07/98	3.71	1.91	3.63	2.72	2.78	1.89
23/07/98	3.79	2.27	4.23	2.51	2.62	1.82
29/07/98	3.95	2.08	4.02	2.48	3.02	2.02
05/08/98	4.24	2.63	4.46	2.78	3.32	2.24
10/08/98	3.97	2.41	4.10	2.59	2.99	2.06
17/08/98	4.02	2.18	3.71	2.70	3.29	
01/09/98	3.03	2.05	2.96	1.90	2.31	1.70

Tableau 6 Indices foliaires (LAI) obtenus par Picqhélios (date de la première irrigation gravitaire: 10/07/99)

Date	ETM	ON	Sec	Ta-amo	Ta-moy	Ta-aval	Te-amo	Te-moy	Te-aval
01/07/99	0.8	0.40	0.50	0.61	0.86	0.81	0.46	0.42	0.44
07/07/99	1.24	0.45	0.88	1.13	0.93	1.05	0.49	0.45	0.45
16/07/99	2.22		1.49						
20/07/99	2.56	0.76	2.02	2.96	3.43	2.69	1.69	1.29	1.54
28/07/99			2.16	3.38	3.61	3.50	2.74	2.44	2.73
02/08/99	3.55	2.12	2.66				2.89	2.66	3.15
10/08/99	4.19	2.78	2.77	4.57	4.88	4.49	3.29	3.45	3.72
20/08/99	4.73		3.05	4.63	4.88	4.36	3.49	3.54	3.85

1.4 MESURES DE TEMPERATURE DE SURFACE

Tableau 7 Analyse du stress hydrique du maïs par mesure de la température de surface en 1998 (en SDD)

	ETM	sec	Nord	SE	SOE
06/07/98	-1.6 ± 0.3	0.4 ± 0.5		-1.7 ± 0.3	-0.8 ± 0.3
07/07/98	-1.6 ± 0.1	0.5 ± 0.6	-1.3 ± 0.3	-0.4 ± 0.1	0.0 ± 0.2
08/07/98		2.2 ± 0.7			
09/07/98	-1.9 ± 0.5	-0.3 ± 0.5			
10/07/98	-1.9 ± 0.2	2.1 ± 0.6		-0.9 ± 0.6	-0.2 ± 0.3
13/07/98		0.6 ± 0.4			0.2 ± 0.5
15/07/98	0.1 ± 0.6	1.4 ± 0.6	0.8 ± 0.5	-1.5 ± 0.2	-0.6 ± 0.2
17/07/98	-0.3 ± 0.3	2.0 ± 0.7		0.2 ± 0.5	0.3 ± 0.5
20/07/98	-0.4 ± 0.3	3.0 ± 0.4		0.4 ± 0.4	0.9 ± 0.5
21/07/98	-2.5 ± 1.1	1.7 ± 0.3		0.9 ± 0.5	0.5 ± 0.5
22/07/98	-1.1 ± 0.7	1.6 ± 0.7		-0.5 ± 0.4	0.0 ± 0.6
23/07/98		1.5 ± 0.4			
24/07/98	-1.0 ± 0.3	3.4 ± 0.7	-0.6 ± 0.7	-1.4 ± 0.3	
27/07/98		1.3 ± 0.3		-0.8 ± 0.4	-0.7 ± 0.2
30/07/98	-1.2 ± 0.2	2.1 ± 0.7	-1.06 ± 0.9	-0.9 ± 0.4	
04/08/98	-0.4 ± 0.3	0.5 ± 0.4		-0.4 ± 1.1	0.2 ± 0.3
05/08/98	0.6 ± 0.2	1.4 ± 0.2		0.7 ± 0.3	-0.2 ± 0.2
06/08/98	-1.0 ± 0.5	1.1 ± 0.1		-0.8 ± 0.2	-0.3 ± 0.4
10/08/98	0.1 ± 0.5	2.0 ± 0.6	0.67 ± 0.4	1.4 ± 0.3	0.5 ± 0.4
17/08/98	0.4 ± 0.4			0.1 ± 0.3	

1.5 MESURE DES COMPOSANTES DU RENDEMENT

Tableau 8 Résultats du comptage sur épis à partir d'un sous-échantillon de 8 à 16 épis par site (valeurs moyennes) en 1997

	ETM	Centre	Sud
Nb grains /épis	468	433	487
Nb rangs /épis	13.2	12.6	13.0
Nb grains /rang	35.5	34.3	37.5

Tableau 9 Résultats du comptage sur épis à partir d'un sous-échantillon de 8 à 16 épis (valeurs moyennes) en 1998

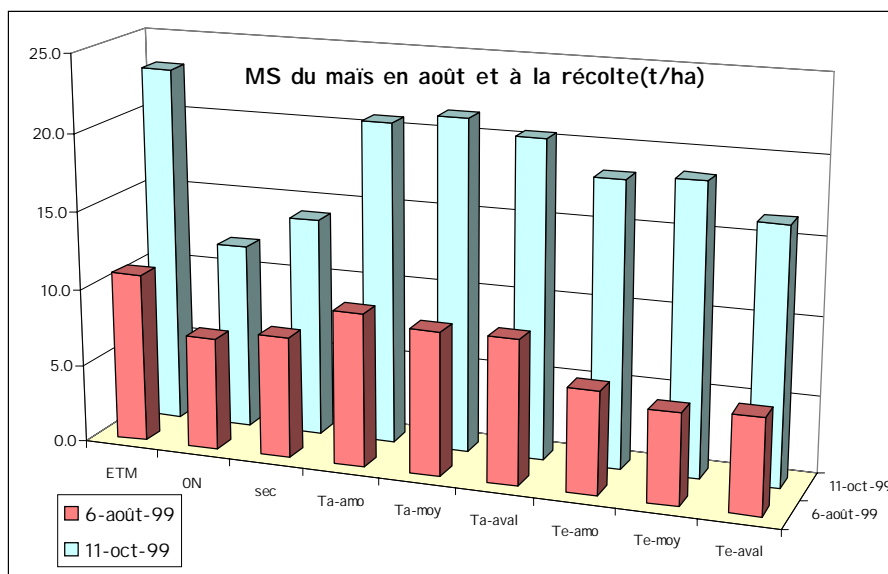
	ETM	O N	Sec	Nord	SE	SOE
Nb grains /épis	454	249	368	445	425	479
Nb rangs /épis	13.3	12.7	12.8	13.0	12.3	13.3
Nb grains /rang	34.0	19.4	28.9	34.3	34.7	36.2

Tableau 10 Résultats du comptage sur épis à partir d'un sous-échantillon de 24 à 30 épis (valeurs moyennes) en 1999

	ETM	O N	Sec	Ta-amo	Ta-moy	Ta-aval	Te-amo	Te-moy	Te-aval
Nb grains /épis	409	267	351	385	380	376	363	375	360
Nb rangs /épis	12.9	12.4	11.9	12.3	12.4	12.6	11.8	12.2	11.4
Nb grains /rang	31.6	21.5	29.6	30.8	30.7	29.9	30.8	31.0	31.8

1.6 PRODUCTION EN MATIERE SECHE

Figure 4 Comparaison de la MS en août et à la récolte en 1999



1.7 TENEUR EN AZOTE DE LA PLANTE

Tableau 11 Teneur en azote de la plante le 12/8 et à la récolte en 1998 (kg N/ha)

N (kg/ha)	ETM		0 N		nord		SE	SOE	Sec	
	12/08	Récolte	12/08	récolte	12/08	récolte	récolte	récolte	12/08	récolte
Grains	104	148	42	44	101	151	123	132	44	70
Rafles		4		2		3	3	3		2
Tiges	143	47	48	22	146	47	28	39	60	32
Total	247	199	90	68	247	202	154	174	104	104
azote/rdt	-	1,8	-	1,7	-	1,8	1,8	1,9	-	2,6

Tableau 12 Teneur en azote de la plante (% MS) le 12/8 et à la récolte en 1998

N (% MS)	ETM		0 N		nord		SE	SOE	Sec	
	12/08	récolte	12/08	récolte	12/08	récolte	récolte	récolte	12/08	Récolte
Grains	1,27	1,36	0,95	1,11	1,23	1,37	1,45	1,43	1,34	1,75
Rafles		0,48		0,43		0,43	0,42	0,42		0,45
Tiges	1,10	0,50	0,54	0,39	1,02	0,53	0,44	0,50	0,79	0,68
plante entière	1,17	0,93	0,68	0,67	1,10	0,95	0,97	0,96	0,96	1,10

Tableau 13 Teneur en azote de la plante en % MS et en Kg N/ha à la récolte et début août en 1999

	grains		rafles		tiges		total à la récolte			total en août	
	N %	kg N/ha	N %	kg N/ha	N %	kg N/ha	N %	kg N/ha	N/rdt (%)	N %	kg N/ha
ETM	1.47	181	0.47	8	0.80	73	1.13	262	2.1	1.91	208
0 N	1.04	53	0.48	4	0.37	22	0.66	79	1.6	1.08	78
Sec	1.50	114	0.48	6	0.84	46	1.16	166	2.2	1.72	134
Ta-amo	1.53	168	0.42	6	0.91	75	1.20	249	2.3	1.73	171
Ta-moy	1.51	166	0.46	7	0.80	64	1.16	237	2.1	1.75	161
Ta-aval	1.39	148	0.49	7	0.76	57	1.08	212	2.0	1.71	158
Te-amo	1.45	151	0.50	8	0.78	52	1.14	211	2.0	1.83	121
Te-moy	1.47	150	0.50	7	0.82	50	1.16	206	2.0	1.95	113
Te-aval	1.46	140	0.50	6	0.69	43	1.11	189	2.0	1.99	122

1.8 STOCK D'AZOTE DU SOL EN 1998

Figure 5 Stock d'azote du sol sur le site ETM en 1998

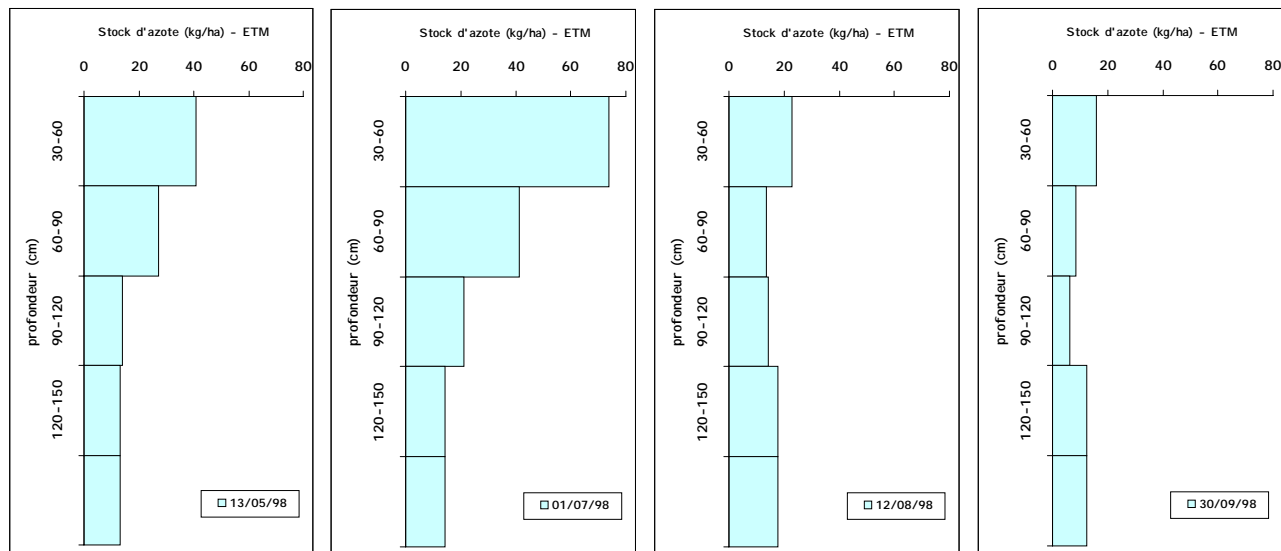


Figure 6 Stock d'azote du sol sur le site 0N en 1998

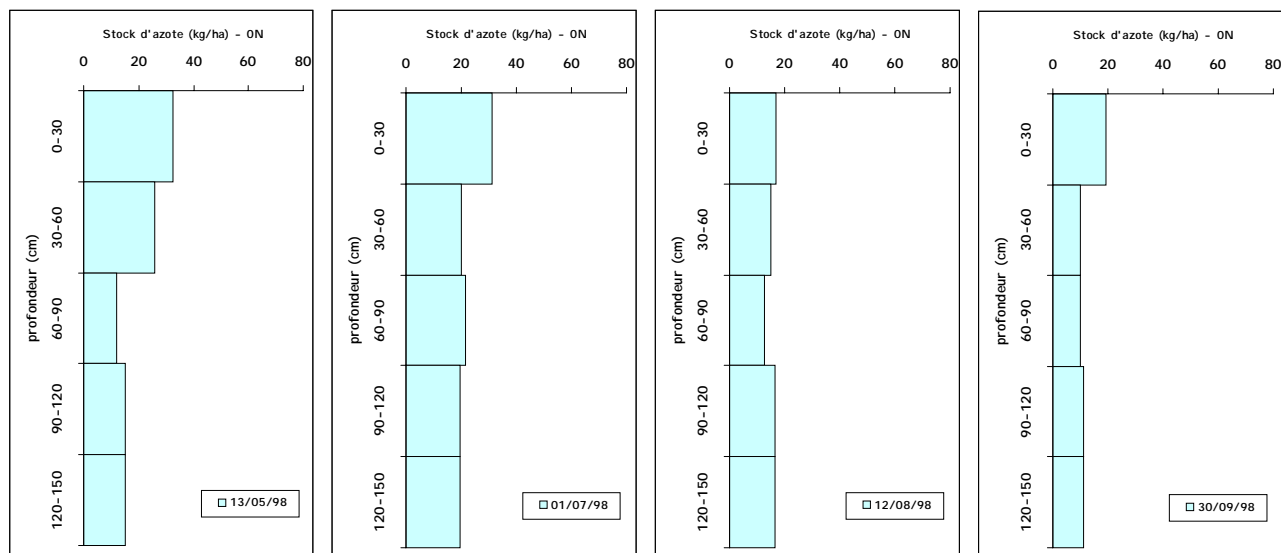


Figure 7 Stock d'azote du sol sur le site Sec en 1998

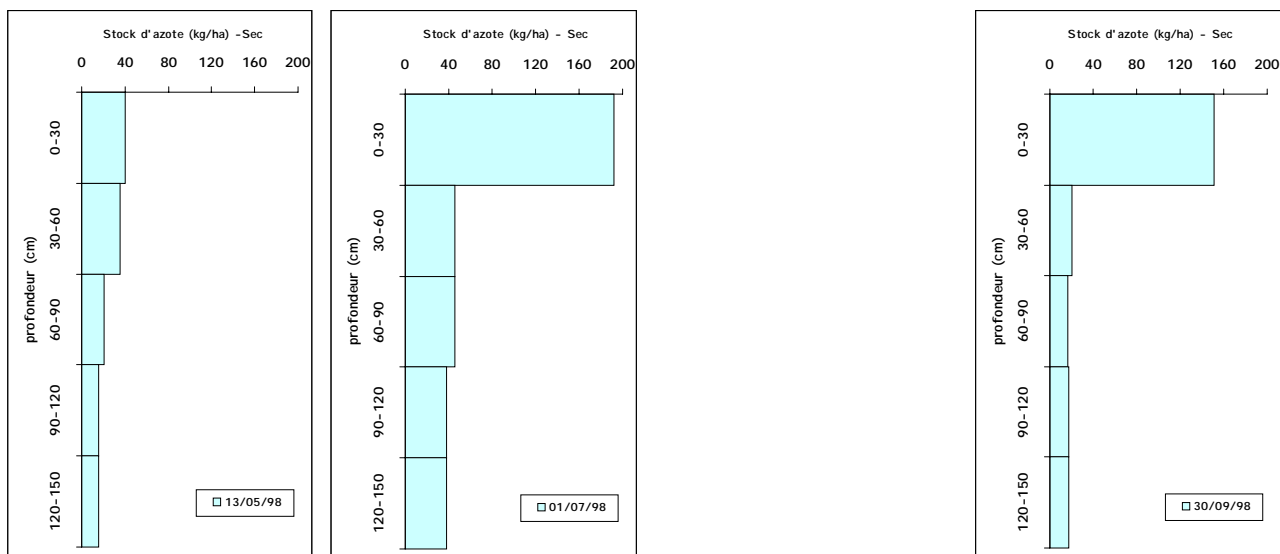
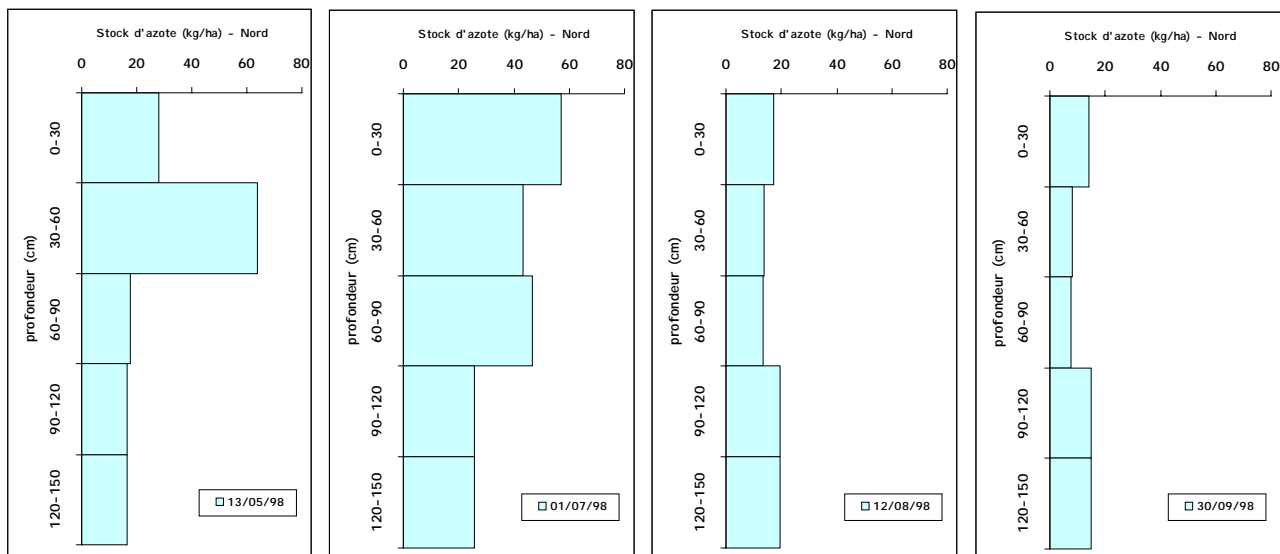


Figure 8 Stock d'azote du sol sur le site Nord en 1998



1.9 STOCK D'AZOTE DU SOL EN 1999

Figure 9 Stock d'azote du sol sur le site Ta-amont en 1999

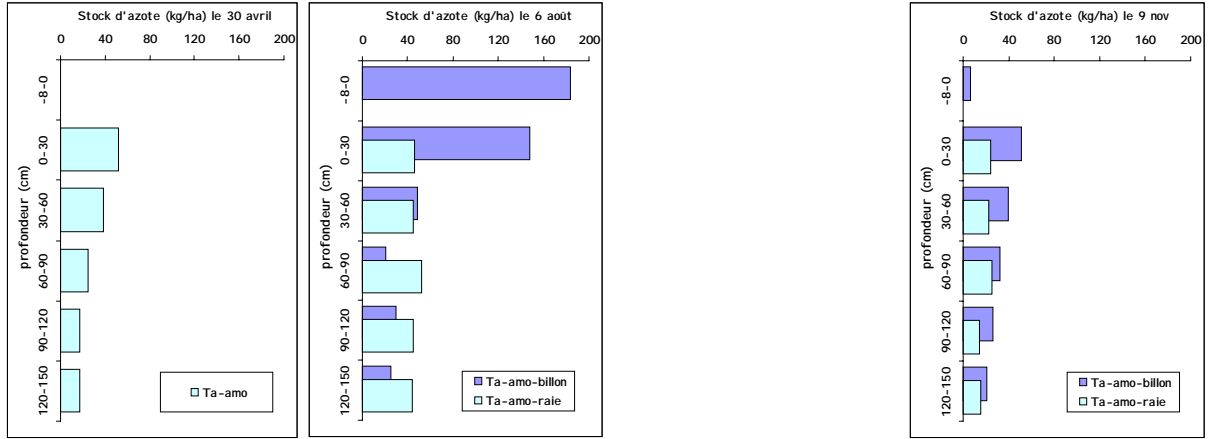


Figure 10 Stock d'azote du sol sur le site Ta-moyen en 1999

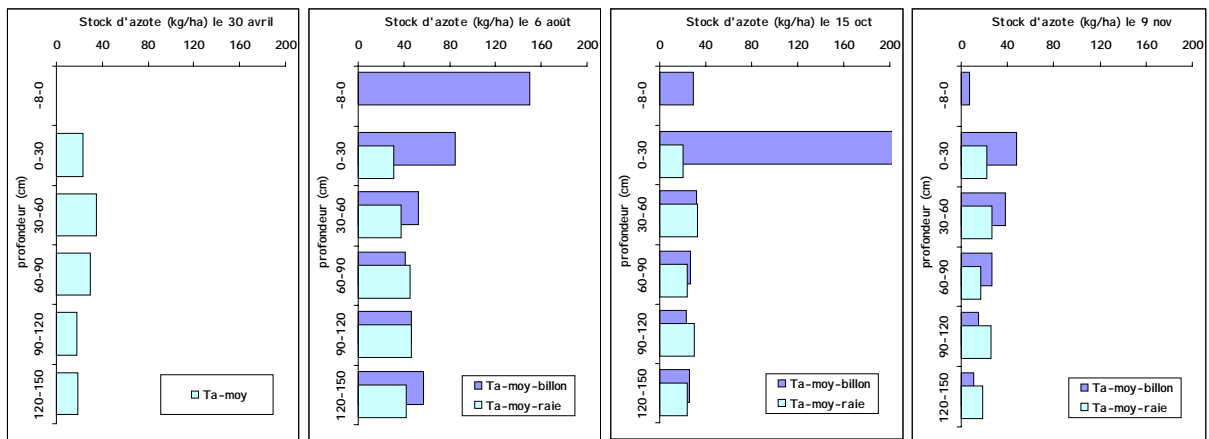


Figure 11 Stock d'azote du sol sur le site Ta-aval en 1999

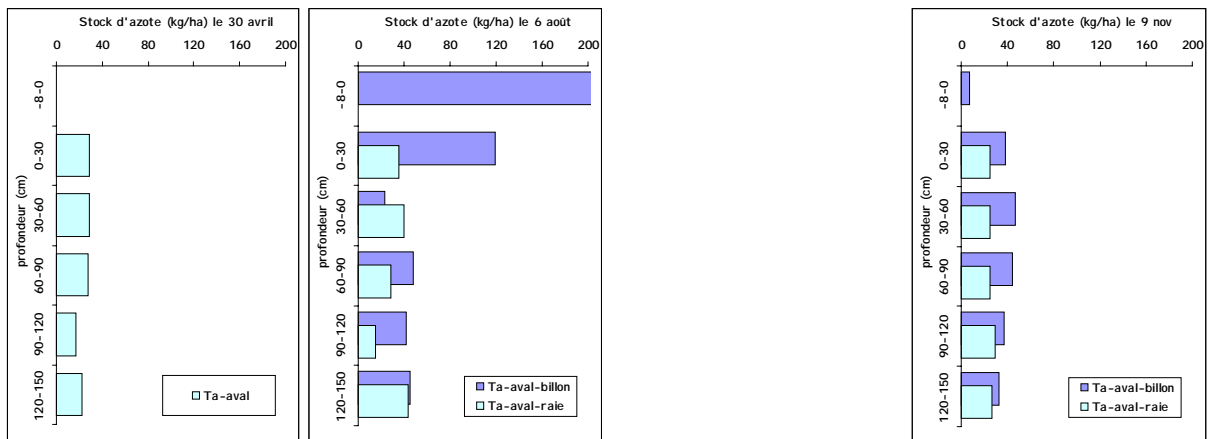


Figure 12 Stock d'azote du sol sur le site Te-amont en 1999

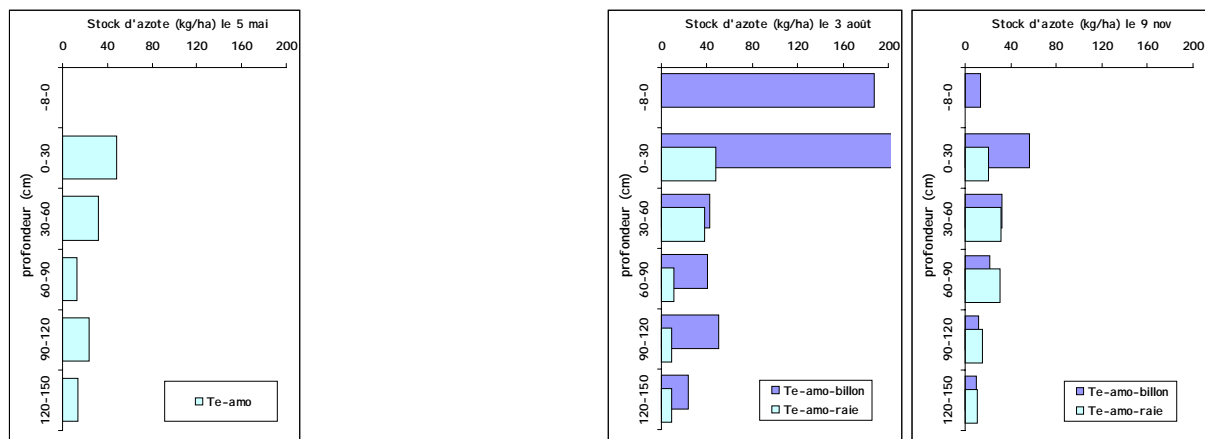


Figure 13 Stock d'azote du sol sur le site Te-moyen en 1999

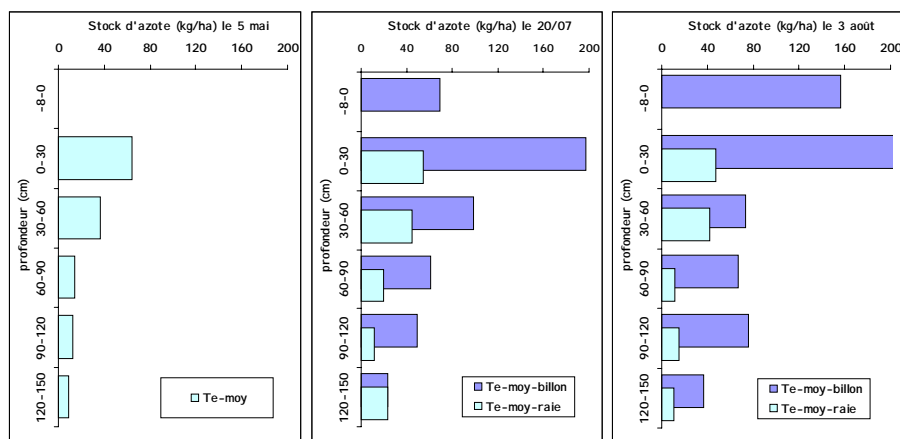
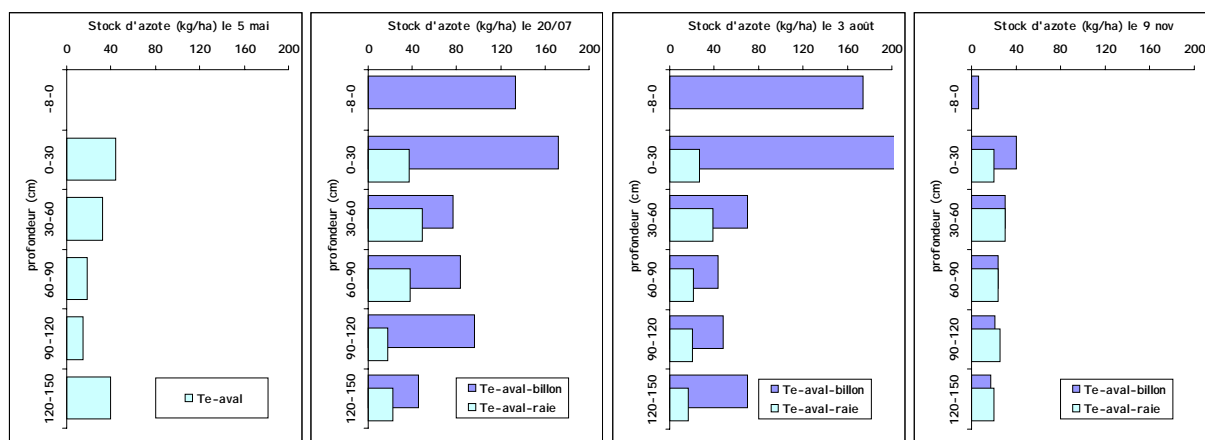


Figure 14 Stock d'azote du sol sur le site Te-aval en 1999



1.10 SUIVI DES IRRIGATIONS

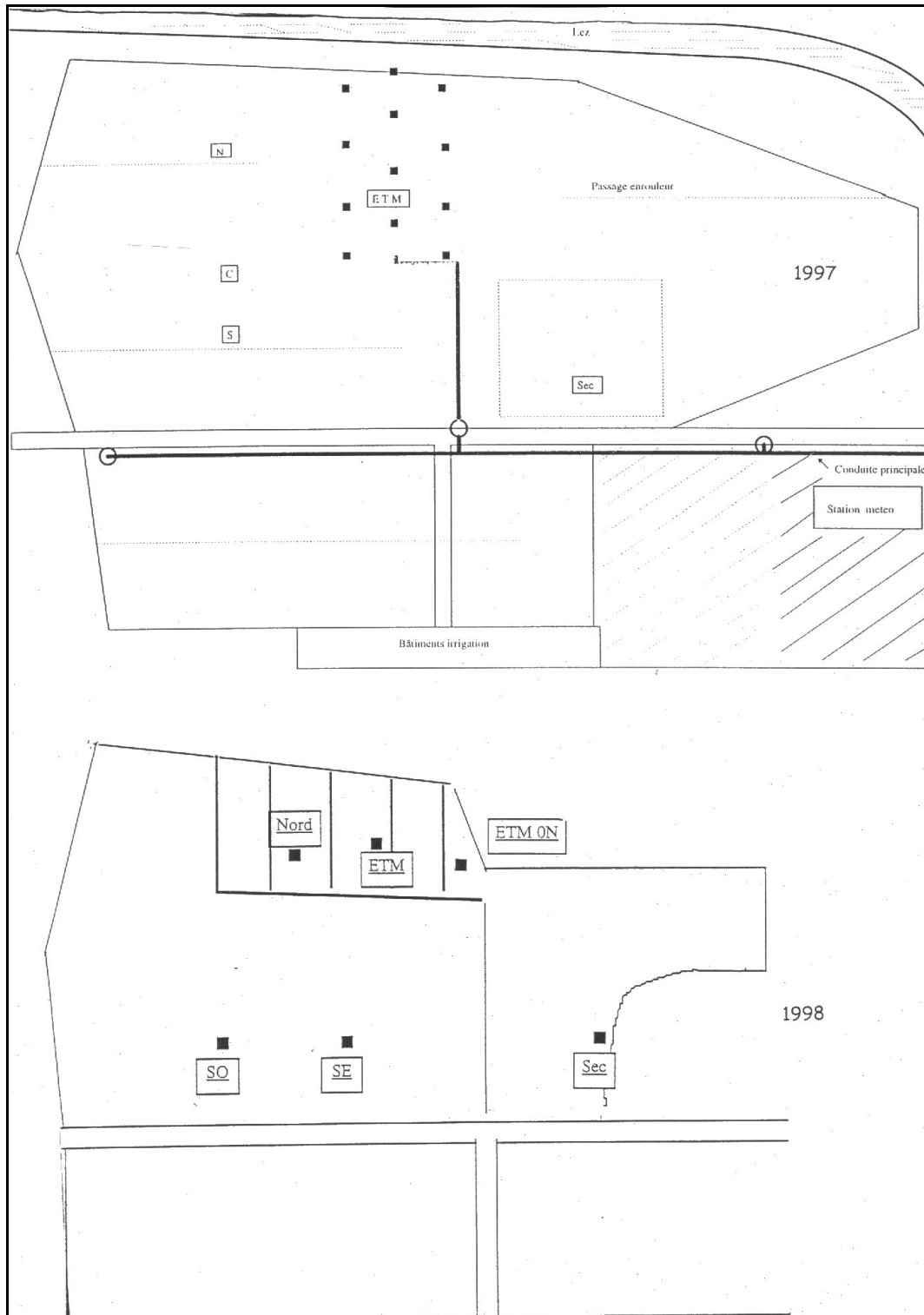
Tableau 14 Résultats du suivi de l'avancement des irrigations à Lavalette, regroupés par block d'arrosage

1 ^{ère} irrigation (08-10 juillet) bloc (raies suivies)	Débit (l/s)		Temps d'arrivée (min)	
	Moyenne	CV (%)	Moyenne	CV (%)
31-45	1,18	6 %	130	18 %
61-75	1,22	7 %	77	21 %
76-90	1,16	8 %	88	30 %
91-100	1,17	4 %	83	18 %
2 ^{ème} irrigation (22-23 juillet) bloc (raies suivies)	Débit (l/s)		Temps d'arrivée (min)	
	Moyenne	CV (%)	Moyenne	CV (%)
6-30	0,76	12 %	267	8 %
1-5, 31-46	0,76	9 %	175	10 %
46-70	0,76	13 %	114	21 %
71-95	0,76	12 %	110	23 %
3 ^{ème} irrigation (23-24 août) bloc (raies suivies)	Débit (l/s)		Temps d'arrivée (min)	
	Moyenne	CV (%)	Moyenne	CV (%)
6-20	1,08	6 %	124	5 %
21-35	1,08	6 %	130	6 %
51-75	0,78	4 %	83	22 %
76-95	0,76	8 %	96	26 %

Tableau 15 Exemple d'avancement de la 3^{ème} irrigation sur le traitement Ta

Raie	Q (l/s)	20 m	30 m	50 m	70 m	90 m	110 m	130 m
52	0.78	7	12	23	38	52	67	96
53	0.83	6	11	23	34	49	59	70
54	0.77	7	12	26	41	61	84	120
55	0.77	8	13	24	36	50	64	84
56	0.78	6	10	21	34	48	60	72
57	0.74	7	13	24	36	51	64	83
58	0.78	7	11	21	32	44	60	83
59	0.78	6	11	21	31	44	58	84
60	0.77	7	11	23	34	46	62	84
61	0.78	6	9	19	28	37	47	60
62	0.75	8	13	23	36	50	69	94
63	0.74	8	13	23	33	46	57	74
64	0.74	10	16	29	47	64	96	125
65	0.78	7	12	22	33	46	58	80
66	0.75	7	13	24	35	49	63	93
67	0.77	8	12	22	32	43	53	71
68	0.78	7	11	20	30	41	53	71
69	0.80	7	11	20	28	39	49	63
70	0.86	7	12	23	34	45	59	84
71	0.74	8	13	22	33	44	55	69
72	0.83	8	13	25	36	49	63	80
73	0.83	6	11	21	30	41	54	73
74	0.83	8	12	25	42	62	83	124
75	0.75	8	12	21	32	43	58	91
moyenne	0.78	7	12	23	34	48	62	85
CV (%)	4	13	11	10	13	14	18	21
après d'élimination des raies singulières (54, 64, 74)								
moyenne	0.78	7	12	22	33	46	59	79
CV (%)	4	11	10	7	8	9	9	13

1.11 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX EN 1997 ET 1998

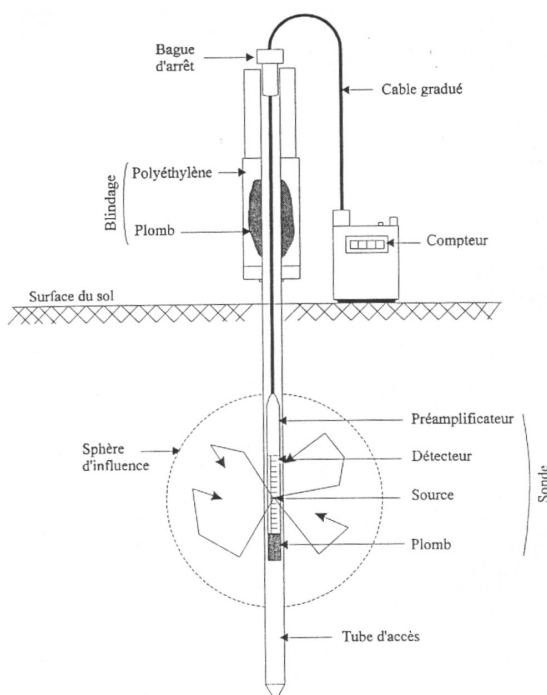


1.12 MESURE DE L'HUMIDITE PAR LA SONDE A NEUTRONS

1.12.1 Principe du fonctionnement

Les humidimètres neutroniques (ou sondes à neutrons) mesurent l'humidité volumique du sol en utilisant la propriété qu'ont les neutrons rapides d'être ralentis (thermalisés) préférentiellement par les atomes d'hydrogène, qui dans le sol sont majoritairement inclus dans les molécules d'eau. La mesure se fait au moyen d'un tube en alliage d'aluminium enfoncé verticalement dans le sol où il est laissé en

Figure 15 Forme du humidimètre neutronique



permanence. Un bon contact entre la terre et le tube est une condition essentielle à la précision de la mesure. La source de neutrons rapides (Radium-Béryllium ou Américium-Béryllium) est amenée à la profondeur désirée, accompagnée du détecteur de neutrons lents. La mesure consiste à compter pendant un temps déterminé (de l'ordre de la minute) le nombre de neutrons thermalisés qui reviennent vers la sonde, et qui est proportionnel à l'humidité volumique du sol.

La mesure par sonde à neutrons prend en compte un volume d'échantillon plus important que les prélèvements à la tarière, annulant ainsi l'effet de certaines micro-

hétérogénéités du sol. Le rayon théorique de la sphère d'influence R (qui en réalité est plutôt un ellipsoïde allongé selon l'axe du tube d'accès) peut varier dans une gamme allant de 7 à 10 cm pour un sol humide, et 10 à 25 cm pour un sol sec (Hillel, 1974). Ce faible pouvoir de résolution spatiale limite sa précision dans la couche de surface et rend l'instrument peu précis à la détection de discontinuités dans la teneur en eau (par exemple les fronts d'humidité ou les limites entre horizons). Les autres caractéristiques des mesures à la sonde à neutron sont présentées au Tableau 16.

Tableau 16 Avantages et inconvénients des sondes à neutron

Avantages	Inconvénients
utilité pour le suivi du bilan hydrique avec précision sur des périodes assez longues	étalonnage de la sonde long et délicat, cause principale des erreurs de mesure
mesures rapides et sans perturbation du sol	coût d'équipement et de sa maintenance élevée

1.12.2 Installation des sites de mesures neutroniques

Dans le cas de l'irrigation à la raie, les sites de mesures comportaient à la fois un tube au milieu du billon et un tube au milieu de la raie. Le tube dans la raie était situé à 1 m environ à l'aval du tube sur le billon pour éviter les répercussions éventuelles de perturbations sur l'écoulement et permettre un accès plus facile pour les mesures. L'humidimètre utilisé est une sonde à neutron SOLO 25 (Nardeux, France).

Des tubes aluminium de diamètre de 41-45 mm ont été utilisés comme tube d'accès. Ils représentent le meilleur matériau existant actuellement pour les mesures à la sonde, étant transparents aux neutrons (interaction neutron-aluminium pratiquement nulle). Le forage du trou a été fait à l'aide d'une tarière manuelle d'un diamètre de 45 mm, jusqu'à la profondeur désirée (différente selon le site). Une fois le forage effectué, le tubage a été introduit en force dans le trou à l'aide d'une planchette de bois (pour protéger les lèvres du tube) et d'un maillet. Pour éviter toutes infiltrations le long du tube ou toute accumulation d'eau en irrigation ou de fortes pluies, nous avons pris la précaution de faire glisser autour du tube de la terre sèche dite « fine » (terre récupérée à proximité et tamisée à 2 mm), lors de l'enfoncement des derniers centimètres, ceci permet, par colmatage, un excellent contact sol-tube.

La partie extérieure du tube (hors du sol) doit être égale ou supérieure à 20 cm, pour permettre à la sonde d'être posée sur son tubage, et à cause des problèmes de localisation du tube si l'expérimentation est faite dans un champ cultivé. En tous cas, il faut absolument éviter de marcher ou piétiner autour du tube d'accès pendant les mesures, sinon le lieu n'est plus représentatif: tassement de la couche superficielle entraînant une diminution très nette de la vitesse d'infiltration et destruction de la végétation.

1.12.3 Etalonnage

Tableau 17 Etalonnage de la sonde à neutrons

profondeur	formule
10 cm	$h=0.985N/N_0+0.046$
15 - 115 cm	$h=0.795N/N_0-0.054$
115 - 270 cm	$h=0.692N/N_0+0.008$

L'étalonnage permet de passer du comptage des neutrons à la mesure d'humidité, en tenant aussi compte des éléments chimiques du sol et de sa densité, raison pour laquelle l'étalonnage est différent selon la profondeur (Tableau 17).

Les mesures dites « de référence » (N_0) permettent tamponner les éventuelles fluctuations du comptage dues à une dérive électronique, nécessitent l'installation d'un fût de 200 litres d'eau au centre duquel est disposé un tube d'accès en aluminium d'environ 1.2 mètres de long. Nous avons effectué dix mesures de référence avant des mesures au champ et dix mesures après.

1.13 MESURE DE L'HUMIDITE PAR METHODE GRAVIMETRIQUE

Cette méthode nécessite de prélever des échantillons du sol à l'aide d'une tarière et de les passer à l'étuve pour déterminer l'humidité. Le seul problème de cette méthode est d'éviter toute manipulation susceptible de perturber l'état hydrique initial. Ainsi on a utilisé pour le stockage et transport des échantillons des contenants pouvant aller directement à l'étuve: boîtes cylindriques en aluminium à couvercle.

Après avoir pesé les échantillons tout de suite après leur prélèvement, ces derniers ont été séchés dans l'étuve, avec ventilation forcée sans courant d'air excessif, à une température de 105°C pendant 24 heures (habituellement suffisante pour la disparition par convention de l'eau présent). Cette durée est vérifiée dans le cas des gros échantillons par un seconde passage à l'étuve. Après le séchage, les échantillons ont été pesés à nouveau et la variation de masse est alors égale à la teneur en eau du sol à l'origine.

Tableau 18 Avantages et inconvénients de la méthode gravimétrique

avantages	inconvénients
méthode relativement simple frais réduits	longue durée de la réalisation et l'interprétation des mesures nombre élevé d'échantillons nécessaires pour avoir une bonne précision à un endroit donné l'échantillonnage est possible qu'une seule fois nécessité des mesures de la densité apparente pour avoir l'humidité volumique méthode destructrice

La notion de «sol sec» est assez subjective en raison de la nature des sols, des minéraux et matières organiques qui le composent. L'eau qui est éliminée lors du séchage représente l'eau «libre», mais éventuellement l'eau hygroscopique. Malgré ses défauts (Tableau 18), la gravimétrie constitue la méthode de référence par rapport à laquelle toutes les autres sont calées.

1.14 MESURE DE L'HUMIDITE PAR LES SONDES TDR

1.14.1 Principe du fonctionnement

Le principe de base de la méthode TDR repose sur la détermination de la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique le long d'un guide d'onde. Ce guide est constitué de deux tiges parallèles en acier inoxydable (Figure 16) insérées dans le sol sur une longueur L . La vitesse de propagation de l'onde est fonction de la constante diélectrique (K_a) du milieu dans lequel l'onde se propage, et K_a apparente du sol dépend très fortement de sa teneur en eau.

L'appareil mesure le temps de parcours de l'onde: la réflexion de l'onde sur l'extrémité des tiges au but de temps t permet de déterminer $v=L/t$ et donc K_a pour la tranche de sol considérée:

$$K_a = \left(\frac{cT}{2L} \right)^2 \quad \text{Équation 1}$$

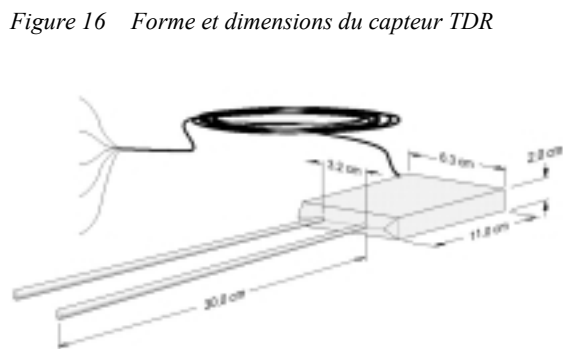
L = longueur des guides d'ondes (m)

T = temps de parcours (s)

c = vitesse de la lumière dans le vide ($3 \cdot 10^8$ m/s)

Une relation empirique entre la constante diélectrique et la teneur en eau volumique permet alors de déterminer cette dernière. Les constantes diélectriques des 3 phases constituant le sol sont très différentes: liquide=80, solide=5, gazeuse=1. En mesurant la vitesse de propagation, on a donc une valeur de la permittivité globale du sol qui intègre les différents constituants de celui-ci.

La précision de la sonde CS-615 (Campbell) utilisée à Lavalette, est de ± 2.5 % de l'humidité volumique en cas des sols typiques. La résolution dépend des instructions utilisées dans le central d'acquisition, elle va de 0.0001 à 1 % de l'humidité volumique. La sonde est utilisable pour une large gamme d'humidité: des sols secs aux sols saturés. Par contre, une salinité élevée affecte la précision de la sonde. En cas où la conductivité électrique du sol dépasse le 20 dS/m, la sonde nécessite d'un étalonnage préalable (Quinones et al., 1991). De plus, les mesures par la sonde dépendent de la température (Campbell, 1997).



La courbe de calage calculée pour le sol de Lavalette (Quinones et al., 2000) est:

$$\varepsilon_v = -0.5963 + 0.0941\delta - 0.1877\delta^2$$

Équation 2

τ période de retour d'impulsion [milliseconde]

θ_v humidité volumique

Un grand nombre de calage simple et effectif est disponible pour le calcul de l'humidité du sol par TDR (Todoroff, 1993; Topp & Reynolds, 1998), par contre, l'application du TDR pour l'estimation de la conductivité des solutés du sol comme une mesure indirecte de la concentration ionique est plus problématique (Wraith, 1998, Kachanoski, et al., 1994). Les avantages et inconvénients des mesures TDR sont rassemblées dans le au Tableau 19.

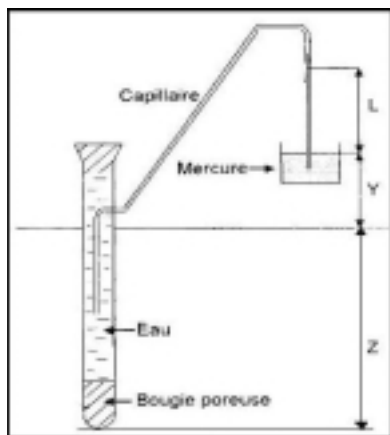
Tableau 19 Avantages et inconvénients des sondes TDR (d'après Lorre et Peret, 1996)

Avantages	inconvénients
méthode non destructive pour suivre l'évolution de la teneur en eau du sol dans le temps à une profondeur donnée	échantillonnage doit être aussi large que possible pour réduire les effets de la variation spatiale de l'humidité du sol
haute sensibilité aux variations de la teneur en eau du sol	volume de mesure varie directement avec la longueur des tiges
mise en place rapide, ne nécessitant pas de connaissances particulières en électronique	difficulté de mise en place des aiguilles en sol caillouteux (obstacle) ou fraîchement travaillé (contact)
lecture directe de l'humidité volumique sans étalonnage particulier pour chaque sol	les poches d'air autour des tiges sont une source d'erreur de mesure
automatisation de la mesure et enregistrement à intervalle régulier, permettant d'obtenir un nombre élevé de données (couplage de l'appareillage TDR avec une centrale d'acquisition)	difficultés dans les sols hétérogènes où les perturbations du milieu lors de l'insertion des tiges sont conséquentes et se répercutent sur la qualité des mesures
possibilité d'effectuer de nombreuses mesures sur une même parcelle en employant un multiplexeur et plusieurs paires d'aiguilles-sonde	accès à une teneur en eau volumique sur l'ensemble d'une couche de sol, de la surface à la profondeur z, liée à la longueur des aiguilles
temps de montée du signal relativement court	coût élevé
gamme de mesure: 0 % à saturation	
entretien réduit	

1.15 MESURE DE LA CHARGE HYDRAULIQUE PAR LES TENSIOMETRES

Le suivi des charges hydriques à l'aide de tensiomètres permet de déterminer la position du plan de flux nul et le sens de l'écoulement.

1.15.1 Principe du fonctionnement



Les tensiomètres ne mesurent pas la teneur en eau mais sont états de liaison avec le sol. Leur fonctionnement repose sur l'équilibre hydrostatique qui tend à s'établir entre l'eau du sol et l'eau de la bougie au travers de sa paroi poreuse. La bougie placée dans le sol à profondeur de mesure voulue restitue de l'eau au sol lorsque celui-ci tend à se dessécher et il se produit, par rapport à la pression atmosphérique ambiante, une dépression mesurée par le manomètre. Si le sol est réhumidifié, la dépression provoque un retour de l'eau dans le tensiomètre et le manomètre indique le nouvel équilibre obtenu (Cemagref, 1990). La charge hydrique

(H) est donc définie comme la différence entre la pression de l'eau dans le sol et la pression atmosphérique, exprimée en hauteur de colonne d'eau.

Le tensiomètre est un système constitué d'un tube généralement en plastique transparent avec à sa base une bougie poreuse en céramique. Ce tube comporte deux ouvertures: l'une sert à la saturation en eau et à la purge en air, l'autre est destinée à la lecture de la pression de l'eau pouvant être reliée à divers systèmes.

Pour nos mesures au Mexique nous avons utilisé le type **capteur-aiguille**. Il s'agit d'un transducteur de pression muni d'une aiguille hypodermique avec laquelle on perce le bouchon du tensiomètre. L'équilibre des pressions entre l'eau du tensiomètre et le capteur se fait par l'intermédiaire de l'aiguille. Le capteur délivrant un signal électrique, un étalonnage préalable permet à l'appareil de mesure de fournir la valeur de charge hydraulique dans le sol, en mbar (Droesch, 1988).

Les **tensiomètres à mercure** ont été utilisés sur Lavalette. Le tube de réservoir dans ce cas est relié à un manomètre à mercure constitué par un réservoir de mercure dans lequel plonge un capillaire. Ces tensiomètres classiquement utilisés en science du sol ont des risques de pollution beaucoup plus importants que les autres types de tensiomètres. Des autres caractéristiques des tensiomètres sont présentées dans le Tableau 20.

Tableau 20 *Avantages et inconvénients des tensiomètres*

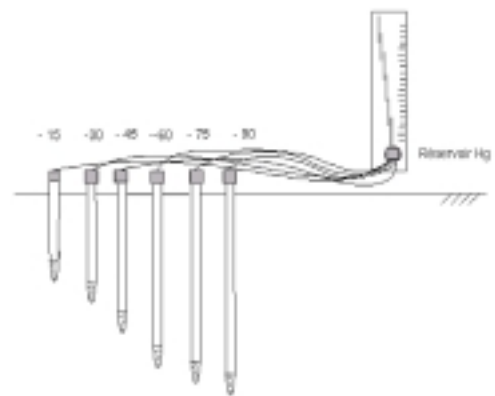
avantages	Inconvénients
appareillage simple et de peu coûteux, sauf lorsqu'il s'agit d'automatiser les mesures	plage de mesure de 0 à -850 mbar, couvrant seulement une partie de la teneur en eau disponible pour la plante
mise en place relativement rapide, très peu destructive	pas de mesures fiables dans la gamme la plus significative de succion pour les plantes (1 à 15 bars)
étalonnage n'est pas nécessaire si l'on se contente des valeurs de la succion	nécessité d'une surveillance du circuit hydraulique pour repérer la présence de bulles d'air (purges fréquentes nécessaires)
mesures précises	sensibilité des parties aériennes du tensiomètre à la température (dilatation et gel)
les mesures à poste fixe et sur de longues durées (plusieurs années) ne posent pas de problèmes majeurs	mise en place délicate dans les sols caillouteux en raison de la granulométrie du sol, du faible diamètre du trou à réaliser et de la fragilité de la bougie poreuse

1.15.2 Installation des tensiomètres

Les tensiomètres ont été installés à l'aide une barre métallique, de même diamètre que le tensiomètre. Le tensiomètre a été placé de force à la profondeur voulue, en assurant un contact étroit entre la bougie poreuse et le sol (en introduisant au fond du trou environ 2-3 cm³ de boue épaisse, confectionnée avec des éléments fins du sol en place, introduite dans le trou).

Il faut ajouter que lors de la préparation correcte des tensiomètres, la difficulté majeure réside dans la nécessité d'obtenir une saturation complète de tous les pores de la bougie, ainsi que d'éliminer toutes les bulles de gaz dans l'eau. Pour cette raison on a rempli appareil avec de l'eau distillée dégazée puis on a saturé la bougie poreuse au cours de cycles de succion nulle (bougie placée dans l'eau).

Figure 17 *Installation des tensiomètres*



1.16 MESURE D'AZOTE MINERAL DU SOL PAR BOUGIE POREUSE

La **concentration en azote de l'eau drainée** (la concentration en azote de la solution du sol en limite d'enracinement) a été mesurée à l'aide des bougies poreuses.

1.16.1 Principe de fonctionnement

Les bougies poreuses sont constituées d'une céramique poreuse, collée sur une canne d'accès en PVC opaque, qui est introduite dans le sol dont on veut prélever la solution liquide disponible. Cette extraction est rendue possible grâce à une dépression créée à l'intérieur de la canne d'accès par une pompe à vide. La solution est récupérée par un tube capillaire. Les prélèvements peuvent s'effectuer jusqu'à plus de trois mètres de profondeur.

Une dépression supérieure (en valeurs négatives) à -850 mbar interdit toutes extractions de solution dans ce sol et la rapidité dans les prélèvements de solution est inversement proportionnelle aux potentiels hydriques en présence. Donc, pour fonctionner un tel système doit présenter une dépression interne toujours supérieure au potentiel hydrique du sol (SDEC, 1999). La solution provient d'une sphère d'influence qui dépend du sol, de son état hydrique et de la dépression appliquée. La taille réduite du collecteur ne permet pas de prendre en compte la variabilité spatiale du milieu (Duwig, 1998) et les mesures sont soumises à la variabilité des propriétés physiques du sol (Addiscott, 1990). Des autres caractéristiques des bougies poreuses sont présentées dans le Tableau 21.

Tableau 21 Caractéristiques des bougies poreuses (Duwig, 1988, Addiscott, 1996, Grossamann et Udluft, 1995)

avantages	inconvénients
installation peu destructive	le flux d'eau à travers des macropores pose des problèmes
relativement facile d'utilisation et peu onéreuse	doute quant à la représentativité des échantillons vis-à-vis de la solution s'écoulant dans le sol, du à la hétérogénéité du sol
	le céramique n'est pas chimiquement inerte, ce qui peut poser un problème pour la mesure de l'ammonium.

1.16.2 Installation

L'installation adéquate de bougies est très importante, car l'installation incorrecte peut conduire aux résultats erronés. Nous avons pris des précautions lors de la mise en place des bougies poreuses pour assurer un bon contact entre la bougie et le sol, en remplissant le trou pour éviter que l'eau ne soit conduite autour de l'assemblage. D'autres part, nous avons fait attention lors de l'application de la dépression pour ne pas extraire l'eau immobile du sol dont la concentration en azote est différente de celle de l'eau mobile ce qui peut poser des problèmes pour l'estimation des pertes d'azote (Addiscott, 1990).

ANNEXE 2 GENERALITEES

2.1 SUR LE MAÏS

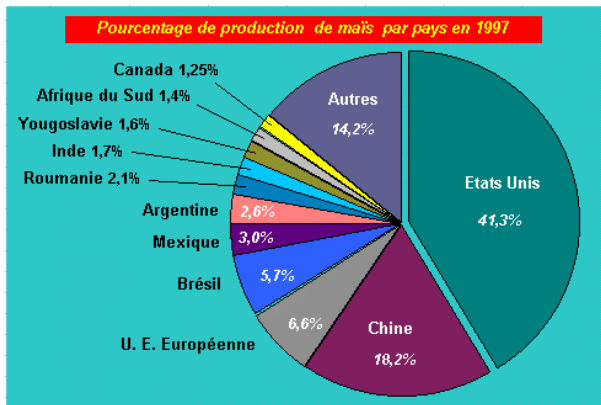
2.1.1 Un peu d'histoire

Le maïs dans ses formes primitives date d'au moins 80 mille ans. Son origine se trouve dans les régions du Mexique. Ce sont les amérindiens qui ont le mérite d'avoir sélectionné les meilleures espèces et ont fait de cette plante leur nourriture de base. Les grains ancêtres de la téosinte avaient une apparence très différente du maïs d'aujourd'hui: ces grains étaient petits, et les premiers épis n'avaient que quelques centimètres de long et huit rangées de grain. Puis sa longueur et sa grosseur s'est accrue au cours des milliers d'années en augmentant graduellement les rendements de chaque récolte. Ainsi par cette méthode, le maïs a été adapté à des périodes de croissance de plus en plus courtes.

Lorsque Christophe Colomb arrive au nouveau monde au XV siècle, il en apporte avec lui pour cultiver en Europe. La consommation du maïs se limite au début à l'Espagne, l'Italie, et les Balkans. La culture du maïs se répand ensuite partout dans le monde. C'est à la fin de la seconde guerre mondiale que la culture du maïs se développe, particulièrement en France. Les Etats-Unis produisaient alors plus de la moitié de la production mondiale et exportent 20% vers des autres pays.

Avec les connaissances en génétique il a été possible de tripler les rendements grâce à la création de maïs hybride. De nos jours les nouvelles connaissances permettent de développer des plants transgéniques en y incorporant en laboratoire les caractéristiques recherchées.

La figure donne les quantités de maïs produites par les principaux pays producteurs en 1997.



2.1.2 Petit lexique du maïs

2.1.2.1 Maturité à la récolte

Théoriquement c'est le moment où le grain ou le fourrage est mûr. La maturité du fourrage se mesure en % de Matière Sèche. L'optimum de récolte se situe entre 29 % et 35 % de matière sèche. En dehors de cette fourchette, on rencontre des problèmes de conservation.

La maturité du grain se mesure en % d'humidité. On cherche à récolter le plus sec possible. Dans le nord, on récolte à 32 ou 36 % d'humidité. Dans le sud, on peut descendre à 25 % certaines années. Pour définir la précocité d'une variété, on définit une maturité théorique: 32 % d'humidité (groupes 1/2 précoces, 1/2 tardifs, tardifs et très tardifs) et 35 % (groupes très précoces et précoces).

2.1.2.2 PMG : poids de mille grains

Le PMG représente le poids de 1000 grains à un pourcentage d'humidité connu. C'est un moyen de distinguer les variétés à gros grain (PMG élevé) de celles à grain plus petits (PMG faible).

2.1.2.3 Précocité d'une variété

C'est une expression de la durée du cycle de développement d'une plante de maïs entre le semis (effectué au printemps) et la récolte à maturité (à l'automne). Une variété très précoce a un cycle court par opposition à une variété tardive dont le cycle est long. Les variétés sont ainsi réparties entre 6 groupes: très précoces, précoces, 1/2 précoces, 1/2 tardifs, tardifs et très tardifs.

Pour chaque variété, la durée du cycle est essentiellement déterminée par les besoins en unité de chaleur de la plante (somme des températures). Plus la variété est précoce, moins elle a besoin d'unités de chaleur pour atteindre la maturité. Le potentiel d'unités de chaleur est plus faible dans le nord, on y cultive donc des variétés précoces. Les variétés plus tardives (à cycle long) sont cultivées dans les régions du sud. Au cas si le semis est retardé dans les régions du sud, on peut avoir recours à une variété plus précoce que celle prévue à l'origine.

2.1.2.4 Somme des températures

Variété précoce

0

820° base 6

Variété tardive

0

1120° base 6

Semis

Floraison

d'après Bloc et al., 1984.

Le semis est utilisé dans la prévision des organes végétatifs puis reproducteurs à base 6 en faisant soustrayant 6 à la température minimale à 30°) et de la température minimale

journalière. Sur le graphique, on distingue bien la variété la plus précoce qui ne nécessite que 820°C (base 6) pour atteindre la floraison, de la variété la plus tardive dont les besoins en unité de chaleur sont bien supérieurs: 1120° C (base 6).

2.2 SUR LES FERTILISANTS

2.2.1 Engrais azotés ammoniacaux: ammoniac anhydre et urée

Ces engrais contiennent de l'azote sous forme d'ions NH_4^+ et sont parfaitement utilisable par la plante. Ils sont, en général, enfouis par des façons superficielles. Dans la terre, les ions NH_4^+ sont retenus dans le sol tant que les conditions de milieu (température, aération, humidité, pH) sont défavorables à l'activité des microorganismes. Leur transformation en nitrates s'effectue rapidement dès que les conditions redeviennent plus favorables. Les engrais azotés ammoniacaux limitent les risques de lessivage et ont une action soutenue.

L'ammoniac anhydre est un engrais azoté liquide. C'est un gaz dans les conditions normales de pression-température et il devient liquide à -33°C ou sous une forte pression. Il est léger (600 g/l) et contient 82 % de son poids en azote. Utilisé seul, il doit être impérativement injecté dans le sol entre 10 et 15 cm de profondeur, au moyen d'outils à dents. Un litre de liquide libère dans le sol 350 litres de gaz, qui diffuse radialement à environ 10 cm du point d'application et dans tous les sens. Il faut donc une profondeur suffisante et un sol assez compact pour éviter le dégagement dans l'atmosphère.

L'inconvénient est le besoin d'un matériel d'injection spécialisé assez coûteux (citerne résistant à pression, pompe et régulateur de débit, scarificateur). Cependant, l'utilisation de l'ammoniac anhydre permet d'intervenir tard, dans l'entre-range d'une culture sarclée déjà en place (Duthil, 1971). Comme tous les autres engrais ammoniacaux, c'est un engrais de fond, c'est-à-dire qu'il doit être incorporé longtemps avant la période d'utilisation par la culture.

L'urée est un engrais organique, classé avec les ammoniacaux. Jusqu'à ce qu'elle soit hydrolysée en ammoniac, l'urée n'est pas retenue par le sol et l'eau de drainage peut l'entraîner en profondeur. Il s'agit donc d'un engrais dont l'action demeure assez rapide mais non immédiate. L'urée commerciale est un engrais léger (146 litres aux 100 kg) et concentré (contient 46 % d'azote ammoniacal), qui diminue les frais de transport. Très soluble, elle convient aux pulvérisations foliaires et aux irrigations fertilisantes (Duthil, 1971).

2.2.2 Engrais azotés ammoniaco-nitriques: ammonitrate

Les engrais azotés ammoniaco-nitriques réunissent l'action rapide des nitrates et la durée d'action de l'ammoniaque. Les **ammonitrates** sont constitués de nitrates d'ammoniaque fixé sur un support de CaCO_3 . Ce sont les engrais azotés les plus employés à cause de leur prix et de leur souplesse d'emploi. Ils contiennent 33 % de son poids en azote mi-nitrique et mi-ammoniacal.

2.3 A PROPOS DE L'IRRIGATION GRAVITAIRE

2.3.1 Périmètre irrigué

En irrigation, on appelle périmètre irrigué toute la surface, quelque soit sa nature (terre, routes, villages, etc.), dominée par le canal principal et susceptible d'en recevoir de l'eau par gravité. La partie du périmètre d'irrigation susceptible d'être arrosée avec profit s'appelle le périmètre irrigable; la fraction qui en est effectivement arrosée est le périmètre irrigué.

2.3.2 Types d'irrigation

Différents d'une région à l'autre, d'une époque à l'autre, les systèmes d'arrosage sont, le plus souvent grouper en cinq familles (Soltner, 1987): le ruissellement, la submersion, l'infiltration l'aspersion et goutte-à-goutte. Dans toutes ces méthodes l'eau s'infiltré, dans plusieurs elle ruisselle ou submerge plus ou moins longtemps le sol. Une autre classification peut donc aussi être adoptée, qui distingue deux grandes familles: ❶ l'irrigation de surface, qui fait ruisseler l'eau sur le sol avant qu'elle ne s'y infiltre, et ❷ l'irrigation sous pression, qui cherche à éviter le ruissellement.

2.3.3 Types de conduites de l'arrosage à la raie

Parmi ces pratiques, présentées par le Tableau 22, les plus récentes (les deux dernières) sont été développés pour accroître l'efficacité, en diminuant les pertes par percolation et par la distribution. Les différences entre ces techniques, et par conséquent leurs avantages et inconvénients respectifs, concernent la variation spatiale et temporelle du taux d'infiltration et du temps d'avancement.

Tableau 22 Types d'irrigation gravitaire

raie ouverte	L'eau est laissée s'écouler dans un fossé, appelé fossé de colature.
raie bouchée	Les raies sont bouchées à leur extrémité aval.
simple débit	L'ensemble de l'arrosage est effectué avec un débit unique.
double débit	L'arrosage se compose d'un débit d'attaque fort pendant la phase d'avancement puis d'un débit d'entretien plus faible.
irrigation intermittente	Succession d'ouvertures et de coupures de la distribution en eau. Une vanne placée sur le système de distribution distribue l'eau, sur deux blocs de n raies chacun, de façon intermittente.
irrigation d'une raie sur deux	Une raie sur deux est arrosée afin de réduire les pertes en eau par percolation lors du premier arrosage. 1 ^{ère} irrigation: raies tassées par le tracteur, 2 ^{ème} irrigation: sillons non tassés.

2.3.4 Matériels d'irrigation gravitaire

Le choix d'un matériel d'irrigation se fonde sur des critères technico-économique (Tableau 23).

Tableau 23 Critères du choix du matériel d'irrigation (d'après Cemagref, 1990)

Elément à considérer	Caractéristiques
dessert en eau	débit (quantité, régularité, disponibilité), charge utile, propreté de l'eau, nature et nombre de prises
Parcelle	Surface, longueur et écartement des raies, débit nécessaire par raie
Culture	besoin en eau pendant la période d'irrigation
main-d'œuvre	quantité et compétence

Le Tableau 24 présente les principales caractéristiques des différents matériaux de distribution d'eau. Pour l'arrosage du maïs, il est recommandé d'utiliser avant tout les tubes à vannettes, puis les siphons et la transirrigation de surface, et finalement les gaines souples.

Tableau 24 Matériel de distribution de l'eau

matériel	Caractéristiques
Tubes à vannettes	Les orifices percés dans un tuyau rigide sont munis de vannettes coulissantes. Avantages: bon réglage du débit de tête, pose facile du système. Inconvénients: difficultés de le franchir et stocker (problème d'encombrement).
Siphons tubulaires	Les raies sont alimentées à partir d'un canal en terre par siphonnage à l'aide de tuyaux mobiles de petits diamètres rigides ou semi-rigides. Avantages: faible investissement, répartition correcte des débits. Inconvénients: manutention des siphons, risque de désamorçage des tuyaux et de rupture de l'arroseur.
Trans-irrigation	Il compte d'un tuyau enterré ou non, percé d'orifices calibrés disposés en face des raies, posé en pente régulière. Il conduit l'eau, poussée par un piston, déplaçant ainsi la main d'eau successivement vers chaque orifice. Avantages: entièrement automatisé, ne demande pas de travail pendant les arrosages et permet d'ajuster les débits, Inconvénients: coût sensiblement plus élevé que des autres techniques, besoin d'une étude hydraulique préalable.
Gaine souple	Les manchettes fixées en dérivation sur une gaine souple permettent de répartir l'eau dans les sillons. Avantages: installation assez rapide, les machines agricoles peuvent aisément franchir la gaine. Inconvénients: réglage du système peu précis, risques de bouchage.

Les **systèmes** aux tuyaux fixes ou mobiles à **vannettes** permettent un contrôle précis des caractéristiques d'écoulement et assurent un débit connu avec une précision acceptable en tête de chaque raie d'arrosage. Les rampes à vannettes peuvent être utilisés à partir d'une charge de 30 cm; une charge résiduelle de 20 cm au-dessus des vannettes facilite le débit. Ces équipements fonctionnent sous très basse pression tout en bénéficiant des avantages des systèmes en charge, en matière de régulation et de possibilités d'automatisation. Leur alimentation peut être commandée par des vannes à commande hydrostatique ou électromécanique, susceptibles d'être asservies à un programmeur.

En cas d'utilisation des **siphons tubulaires** les raies sont alimentées à partir d'un canal en terre par siphonnage à l'aide de tuyaux mobiles de petits diamètres rigides ou semi-rigides. La majorité des siphons est réalisée en PVC rigide, dans une gamme de diamètre qui va de 20 à 43 cm. Lorsque les siphons sont bien dimensionnés, on obtient une distribution en tête homogène, avec la possibilité de moduler le débit d'un arrosage à l'autre ou au cours d'un même arrosage, en jouant simplement sur le nombre de siphons alimentant les raies, en utilisant des diamètres différents ou en plaçant des bouchons percés à la sortie.

2.3.5 Aménagement de la parcelle pour l'irrigation à la raie: pente, longueur

La mise en état d'arrosage gravitaire peut se faire de deux manières: ❶ les sillons sont exécutés avant les semailles, lors du premier labour, ensuite on sème les plantes sur les billons, ou ❷ les labours se font à plat: on sème en ligne, puis quand arrive le moment de butter les plantes on creuse les raies d'arrosage au moyen du buttoir.

L'arrosage gravitaire exige un aménagement important du terrain pour assurer des pentes des lignes d'écoulement suffisamment faibles, continues et régulières. Plus les raies sont longues, meilleur doit être la qualité du planage, ce dernier étant une condition impérative de la qualité de l'arrosage (Hlavec, 1994). Son coût de premier établissement est généralement élevé, et il nécessite un entretien régulier, source de charges d'exploitation non négligeables.

La longueur de la raie doit être compatible avec l'infiltration. On a intérêt à avoir des raies suffisamment longues si on veut faciliter les opérations culturales et diminuer les temps de main-d'œuvre. Néanmoins il ne faut pas tomber dans l'excès inverse : car des raies trop longues interdisent de conduire des irrigations dans les bonnes conditions, même si elles sont bien planées (RNED-AFEID, 1995). D'autre part, la surface du sillon étant plus ou moins rugueuse, elle peut freiner l'avancement de l'eau, surtout pendant la 1^{ère} irrigation. La rugosité dépend de l'état du sol au moment du billonage.

L'amélioration de la répartition de l'eau impose souvent des raies courtes et donc une multiplication des arroseurs qui peut encore alourdir le travail d'aménagement à la parcelle. La pente naturelle du terrain, la disposition du parcellaire peuvent de plus constituer des facteurs limitants non négligeables. Si on veut modifier la pente et/ou la longueur, il faut tenir compte de la perméabilité du sol, car ces trois paramètres sont liés. Les raies sont autant plus courtes que la perméabilité est forte, mais on peut aussi jouer sur la pente pour augmenter ou diminuer la longueur (Tiercelin, 1998).

2.3.6 Avantages et inconvénients de l'irrigation à la raie

On emploie l'irrigation à la raie principalement sur les cultures plantées en ligne, labourées et désherbées. Elle convient particulièrement aux plantes craignant une submersion du collet ou de la tige, puisque les cultures sont disposées sur des lits entre les raies (Bennour, 1996). Cette technique d'irrigation convient le mieux aux sols de texture moyenne à modérément fine, ayant une réserve utile relativement élevée et une conductivité hydraulique suffisante, qui assure une bonne mobilité de l'eau aussi bien horizontalement que verticalement. Autre avantage est que le tassement et la dégradation de structure dus à l'eau n'affectent qu'une partie de la surface.

Même si les frais d'aménagement sont réduits, le calcul et la mise au point de la procédure d'arrosage à la raie sont délicats. L'application pratique exige une bonne maîtrise technique de la conduite de l'eau par l'agriculteur. La conduite de l'eau, surtout dans les systèmes traditionnels, exige des manipulations fréquentes et une surveillance à peu près permanente. Le besoin en main d'œuvre est donc important durant toute la saison d'arrosage, et exige une qualification professionnelle suffisante pour que l'efficacité de l'irrigation soit acceptable.

Il est aussi important l'adaptation des dispositifs de répartition et distribution de l'eau à des manœuvres fréquentes et rapides qui supposent une véritable automatisation de la desserte en tête des parcelles. Il existe aussi des contraintes d'aménagement parcellaire, en matière de planage et établissement des pentes d'écoulement (Soltner, 1987). Par exemple dans les sols en pente il peut avoir des risques d'érosion si le débit est mal réglé. De plus, dans les sols à forte salinité: la remontée capillaire peut concentrer les sels dans les billons. Peut-être le plus important des inconvénients de l'irrigation à la raie est la difficulté d'avoir une bonne répartition de l'eau est les pertes d'eau qui peuvent être importantes (en colature ou par infiltration profonde).

2.3.7 Voies d'amélioration de l'irrigation à la raie

Les recherches menées sur les méthodes d'arrosage suivent deux voies: une amélioration substantielle de l'efficacité et de la qualité de répartition de l'eau sur la parcelle, et d'autre part la recherche de solutions aux problèmes d'automatisation et d'adaptation à l'état réel des besoins d'irrigation. Les efforts d'optimisation de la longueur de raie et d'ajustement du débit délivré, calibré par l'emploi de siphons notamment, ont permis une certaine amélioration, mais conduisent vite à des raies courtes, génératrices d'accroissement des coûts d'aménagement parcellaire et des besoins en main d'œuvre pour l'arrosage.

Les recherches entreprises ont montré que l'envoi dans une raie de fractions de doses successives, séparées par des temps de ressuyage, en appliquant des débits instantanés notablement plus élevés que dans la pratique traditionnelle d'application continue de la dose, permet de réduire très sensiblement le volume d'infiltration excédentaire dans la partie supérieure de la raie par réduction du temps durant lequel une lame d'eau s'y applique. L'irrigation alternée (en irriguant une raie sur deux en alternance) permet d'augmenter l'efficacité de l'application de l'eau, et en conséquence de réduire le drainage et le lessivage d'azote (Kang et al., 2000). Un enjeu de la modernisation de l'irrigation est la réduction de la pénibilité du travail et la diminution du coût de la main d'œuvre. L'évolution du matériel de distribution est significative de ce double point de vue, permettant à la fois d'atténuer la pénibilité du travail et d'accroître l'efficacité de l'arrosage par un meilleur réglage du débit.

2.4.2 Bilan agricole

2.4.2.1 Bilan agricole au niveau national

Avec un territoire de 1 967 183 km², dont 231 000 km² de zones maritimes, le Mexique occupe le 14^{ème} rang des Etats les plus grands de la planète. Toutefois, en raison de la diversité de ses climats et de sa géographie (80 % du pays est montagneux et 20 % désertique), la Surface Agricole Utile (SAU) est de 108,3 millions d'hectares, dont 31 millions sont effectivement cultivés.

L'agriculture mexicaine occupe un quart de la population active et participe à hauteur de 7 % dans le PIB national. Sur 31 millions d'hectares de SAU cultivée, 35 % correspondent à des exploitations de moins de 2 hectares qui pratiquent une agriculture de subsistance. Les céréales représentent 25 % de la production agricole nationale.

Tableau 25 La production céréalière nationale en 1998 en MT

culture	Mais	Blé	haricot	riz	sorgho	orge	oléagineux
production (MT)	18.4	3,2	1,2	0,5	6,4	0,37	0,7

source : Commission de l'agriculture

Les céréales sont cultivées dans pratiquement tout le pays bien que quelques régions concentrent une bonne partie de la production. Ainsi, 50,2 % de la production de maïs se fait dans le Chiapas, Jalisco, México, **Sinaloa** et Veracruz. La surface agricole utile irriguée est de 6,3 millions d'hectares. 60 % sont contrôlés par 10 % des producteurs qui utilisent une technologie de pointe y compris la biotechnologie, pour développer des cultures à hauts rendements, vouées à l'exportation.

Le désengagement progressif de l'Etat dans les activités agricoles et la signature de l'Alena ont accentué l'abîme entre cultures modernes et cultures traditionnelles. Faute d'accès au crédit, l'agriculture traditionnelle, peu compétitive, régresse au profit des cultures d'exportation.

La consommation de céréales est destinée principalement à l'alimentation humaine (57 % du maïs -de préférence jaune-, 82 % du blé) à l'exception du sorgho destiné à l'alimentation animale (Tableau 26).

Tableau 26 Consommation des céréales de base

Culture	Mais	Blé	Haricot	Riz
Consommation /habitant (kg)	284	60	18	6

source: SAGAR

2.4.3 l'Etat de Sinaloa

Localisé dans le Nord-Ouest du pays, l'Etat de Sinaloa, avec un peu plus de 58 000 km², est bordé à l'ouest par la Mer de Cortés, au nord par les Etats de Sonora et Chihuahua, au sud par l'Etat de Nayarit et à l'est par celui de Durango.



Sinaloa a plus de 600 km de côtes. Le relief tourmenté de Sinaloa, traversé du nord au sud par la Sierra Madre Occidentale, fait que son climat peut varier entre des extrêmes de chaleur sur les plaines côtières au froid des hauteurs de la Sierra. Largement arrosé par un réseau hydrographique dense, l'Etat de Sinaloa a mis à profit ces vastes ressources en eau pour développer une agriculture qui reste la principale activité économique et construire une série de barrages d'une capacité totale de plus de 23 milliards de m³.

La population totale de l'Etat n'est que de 2,5 millions d'habitants (un peu plus de 2,5% de la population totale). La capitale de Culiacán a environ 700 000 habitants.

De la population active de l'Etat (1 million de personnes soit 40 % de la population totale) 36 % travaille dans la secteur agriculture (y comprise l'élevage, forêt, pêche et chasse). Le PIB de l'Etat est, avec un peu plus de 8 milliards de dollars, équivalent à 2,2 % du PIB mexicain. L'agriculture génère 12.6 % du PIB de l'Etat.

Malgré son potentiel hydraulique, celui que l'on appelle l'Etat des 11 barrages souffre actuellement d'une sécheresse qu'il n'avait pas connue depuis des années (les barrages en seraient à rendus 14 % de leur capacité maximale. Plus de 14 millions d'hectares sont dédiés aux activités agricoles (*Tableau 27*).

Tableau 27 Répartition de la surface agricole (million de ha)

cultures irriguées	cultures non irriguées	élevage	forêts	autres
1,9	1,7	5,5	2,6	2,7

La production agricole est tout d'abord celle de légumes (tomates, chile, concombres, courgettes, et aubergines), qui fait près de 35 % du total de la production nationale (Sinaloa est le premier producteur de légumes). Importante également, la culture du maïs, sorgho, haricot sec, soja, blé, pois chiche, cartame, et du riz.

2.4.4 Fertilisation à El carrizo (Mexique)

Tableau 28 Résultats d'enquête sur l'utilisation des fertilisants sur le périmètre irrigué El Carrizo (Diaz-Magana, 1997)

automne - hiver 1996-97	Module 1	Module 2	Module 3	Module 4
variété du maïs	Cargill C-920 Asgrow A-7597	Cargill C-920 Asgrow A-7545	Cargill C-920 Asgrow A-7545	Cargill C-920 Asgrow A-7545 H-509
Labours	Planages à léser Sous-solage (30 cm) Herse (2 fois) Planage	Sous-solage (40 cm) Herse (30 cm, 3 fois) planage Marquage de raies (30-35 cm)	Sous-solage (50 cm) Herse (30 cm, 3 fois) planage Marquage de raies (30-35 cm)	Sous-solage (40 cm) Herse (30 cm, 2 fois) planage Marquage de raies (30-35 cm)
fertilisation pré-semis	Sulfate d'ammoniac (100-150 kg/ha) Urée (100-150 kg/ha)	Sulfate d'ammoniac (120 kg/ha) Urée (150 kg/ha) Phosphore (100 kg/ha)	Sulfate d'ammoniac (60 kg/ha) Urée (150 kg/ha) Phosphore (100 kg/ha)	Sulfate d'ammoniac (60 kg/ha) Phosphore (100 kg/ha)
fertilisation après semis	Ammoniaque anhydre (157-100 U N/ha, injection) en irrigation 1, 2, 3, 4	ammoniaque anhydre (200-300 U N/ha, injection)	ammoniaque anhydre (200 + 80 U N/ha, avant irrigation 1 et 2, injection)	ammoniaque anhydre (150-300 U N/ha, injection)
fertigation	20 l/ha Guanfluss-N en 200 mm d'eau	2.5 l/ha Guanfluss-N en 200 mm d'eau		En 150-200 mm d'eau
Rendement	7-9 t/ha	5-8 t/ha	9 t/ha	7-8.5 t/ha

2.4.5 Scénarios d'irrigation a la raie pour « El Carrizo »

Tableau 29 Caractéristiques des arrosages avec un débit = 1.4 l/s

	TC	TL	Rn	Cu	Pc	Dose max	Dose min	Dose brute	100	200	300	400	450	θ0
1	780	306	54	86	37	113	89	164	111	107	102	96	93	0.32
2	660	340	57	83	30	107	80	128	105	100	95	88	85	0.30
3	540	372	62	79	22	100	70	113	99	93	86	79	75	0.28
4	540	390	63	79	20	103	71	101	101	95	89	81	77	0.27
5-6	480	390	65	77	15	97	66	101	95	90	83	75	71	0.27

2.5 QUELQUES MODELES DE « QUALITE DE L'EAU »

Une révision de la littérature sur les modèles de simulation de la pollution d'origine agricole nous a permis de construire le tableau suivant avec les caractéristiques principales de ces modèles. Cette présentation n'a pas la prétention d'être exhaustive, mais le but est de montrer qu'il existe une grande quantité de modèles dans le domaine mentionné. Ces modèles, même s'ils diffèrent en certaines caractéristiques, ils se ressemblent et très souvent utilisent les mêmes techniques de calculs.

Ces modèles en général ont été développés afin d'évaluer l'impact des activités agricoles sur la qualité des eaux et le choix des pratiques culturales à mettre en oeuvre pour réduire la pollution diffuse d'origine agricole. Ils ont pour but de prévoir les pertes de sols, de fertilisants et de pesticides causées par l'écoulement de l'eau.

Les sous-modèles hydrologiques des modèles de transfert de solutés se différencient selon le nombre de processus pris en compte et selon les zonations spatiales verticale et horizontale. Les principaux processus hydrologiques des transports des polluants sont le ruissellement, l'écoulement hypodermique ou subsuperficiel, la percolation et l'écoulement souterrain. En réalité, les modèles de simulation sont capables de décrire seulement une partie des voies de transport et très peu entre eux parviennent à décrire les processus hydrologiques complets. La pris en compte du ruissellement peut être importante lorsqu'on s'intéresse aux matières en suspension ou phosphore.

modèle	type	échelle	temps	pas de temps	éléments simulés	
					polluants	hydrologie
ACTMO	conc.	petit BV	continu	heure	MES, N, pest	R, EH, P
AGNPS	conc.	BV dist.	événementiel	min.→jour	MES, N, P, pest, path	R, EH, P
ANSWERS	conc.	BV dist.	événementiel	min.→jour	MES, N, P	R, EH, P
ARM	conc.	petit BV	continu	5-15 min.	MES, N, P, pest	R, EH, P
BASINS	conc.	BV dist.	continu	jour	MES, N, P, pest, path	R, EH, P
BICHE	conc.	BV glob.	continu	jour	N	ES, P
CNS	conc.	BV glob.	continu	mois	MES, N, P	ES, P
CREAMS	conc.	parcelle	continu	jour	MES, N,P, pest	R, EH, P
EPIC	conc.	parcelle	continu	jour	MES, N,P, pest	R, EH, P
GLEAMS	conc.	parcelle	continu	jour	MES, N,P, pest	R, EH, P
HSPF	conc.	BV dist.	continu	min.→jour	MES, N,P, pest,	R, EH, P
LEACHM	conc.	parcelle	continu	jour	N, P, pest	P
MORELN	conc.	BV dist.	continu	jour	N	R, EH, P
NTRM	conc.	parcelle	continu	jour	N	ES, P
NLEAP	conc.	parcelle	continu	jour	MES, N, P	R, EH, P
RZWQM	conc.	parcelle	continu	jour	MES, N, P, Pest, path	R, P
SPNM	conc.	BV dist.	continu	jour	MES, N, P	EH, P
STICS	conc.	parcelle	continu	jour	N	P
SWAT	conc.	BV dist.	continu	jour	N, P, pest	R, EH, P
SWRRBWQ	conc.	BV dist.	continu	jour	MES, N, P, pest	R, EH, P
WAVE	méc.	parcelle	continu	min.→jour	N, P	P

ACTMO	Agricultural Chemical Transport Model	MES	matière en suspension
AGNPS	Agricultural Non-point source Pollution Model	N	Azote
ANSWERS	Simple event grid model for watershed	P	Phosphate
ARM	Agricultural Runoff Management model	pest	Pesticide
BASINS	Tool for maneging watersheds	path	Pathogène
BICHE	Bilan Chimique des Eaux	dist.	Distribué
CNS	Cornell Nutrient Simulation model	conc.	Conceptuel
CREAMS	Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems	méc.	Mécaniste
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator	BV	bassin versant
GLEAMS	Ground water Loading Effects of Agricultural Management Systems	R	Ruissellement
HSPF	Hydrology Simulation Procedure - Fortran	EH	écoulement hypodermique
LEACHM	Leaching Estimation and CHEmical Model	ES	écoulement superficiel (R+EH)
MORELN	Model of production and leaching of nitrates	P	Percolation
NTRM	Nitrogen Tillage - Residue Management model		
NLEAP	Nitrate Leaching and Economic Analysis Package		
RZWQM	Root Zone Water Quality Model		
SPNM	Sediment – Phosphorus - Nitrogen Model		
STICS	Modèle de simulation de culture, bilan hydrique, bilan azoté		
SWAT	Soil Water and Actual Transpiration		
SWRRBWQ	Simulator for Water Ressources in Rural Basins -Water Quality		
WAVE	Water and Agrochemicals in the soil and Vadose Environnement		

2.6 PARAMETRES DU STICS (BRISSON ET AL., 1998)

Tableau 30 Variables et paramètres du module de développement de la culture

Variable externe	Technique	sol	plante	valeur	Variable interne	Variable de sortie
LATITUDE	IPLT		TDMAX	6	TCULT	I LEV
			TDMIN	28	TSOL	I AMF
	STDRPSEN		535		I LAX	
	STSENMAT		320		I DRP	
	TGMIN		8		I SEN	
	STPLTGER		35		I MAT	
	BELONG		0.022		I REC	
	CLONG		2.04			
	H2OGRAIN		0.32			
	DESSECGRAIN		$1.03 \cdot 10^{-3}$			
	STLEVAMF		200-250			
	STAMFLAX		445-650			
	STLEVDRP		230-320			
	ELMAX		8			

Tableau 31 Variables et paramètres du module de bilan hydrique

Variable externe	Technique	sol	Plante	valeur	Variable interne	Variable de sortie
TETP	AIRG	HCC(H)	EXTIN		LAI	ES
TRR	EFFIRR	HMIN(H)	KMAX	1.2	ZRAC	EP
		DA(H)	PSISTO	12	LRAC(Z)	SWFAC
		ARGI	PSITURG	5		TURFAC
		QO				DRAIN
						HR(H)
						HUR(Z)
					XMLCH	
					RESMES	

Tableau 32 Variables et paramètres du module d'azote

	Technique	sol	Plante	valeur	Variable interne	Variable de sortie
	ANIT	NORG	ADIL	3.40	EP	INNS
	CONCIRR	ARGI	BDIL	0.37	HUR(Z)	AZ(H)
	EFFN	CALC	ADILMAX	6.32	TSOL(Z)	QNPLANTE
	QRES	PROFHUM	BDILMAX	0.41	LRAC(Z)	QLES
	JULTRAV		VMAX1	0.0018	MASEC	QMINH
	PROFTRAV		KMABS1	50		QMINR
	CSURNRES		VMAX2	0.017		
			KMABS2	25000		

<u>ANNEXE 1</u>	<u>SUIVI AGRONOMIQUE A LA VALETTE</u>	1
1.1	<u>INTERVENTIONS SUR LA PARCELLE EXPERIMENTALE EN 1999</u>	1
1.2	<u>HUMIDITES DU SOL SUR LAVALETTE EN 1997 ET 1999</u>	3
1.2.1	<u>Humidités mesurées par TDR (site Ta-moyen)</u>	4
1.3	<u>SUIVI DE L'INDICE FOLIAIRE (LAI)</u>	6
1.4	<u>MESURES DE TEMPERATURE DE SURFACE</u>	7
1.5	<u>MESURE DES COMPOSANTES DU RENDEMENT</u>	8
1.6	<u>PRODUCTION EN MATIERE SECHE</u>	8
1.7	<u>TENEUR EN AZOTE DE LA PLANTE</u>	9
1.8	<u>STOCK D'AZOTE DU SOL EN 1998</u>	10
1.9	<u>STOCK D'AZOTE DU SOL EN 1999</u>	12
1.10	<u>SUIVI DES IRRIGATIONS</u>	14
1.11	<u>DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX EN 1997 ET 1998</u>	15
1.12	<u>MESURE DE L'HUMIDITE PAR LA SONDE A NEUTRONS</u>	16
1.12.1	<u>Principe du fonctionnement</u>	16
1.12.2	<u>Installation des sites de mesures neutroniques</u>	17
1.12.3	<u>Etalonnage</u>	17
1.13	<u>MESURE DE L'HUMIDITE PAR METHODE GRAVIMETRIQUE</u>	18
1.14	<u>MESURE DE L'HUMIDITE PAR LES SONDES TDR</u>	19
1.14.1	<u>Principe du fonctionnement</u>	19
1.15	<u>MESURE DE LA CHARGE HYDRAULIQUE PAR LES TENSIOMETRES</u>	21
1.15.1	<u>Principe du fonctionnement</u>	21
1.15.2	<u>Installation des tensiometres</u>	22
1.16	<u>MESURE D'AZOTE MINERAL DU SOL PAR BOUGIE POREUSE</u>	23
1.16.1	<u>Principe de fonctionnement</u>	23
1.16.2	<u>Installation</u>	23
<u>ANNEXE 2</u>	<u>GENERALITEES</u>	24
2.1	<u>SUR LE MAIS</u>	24
2.1.1	<u>Un peu d'histoire</u>	24
2.1.2	<u>Petit lexique du maïs</u>	25
2.1.2.1	<u>Maturité à la récolte</u>	25
2.1.2.2	<u>PMG : poids de mille grains</u>	25
2.1.2.3	<u>Précocité d'une variété</u>	25
2.1.2.4	<u>Somme des températures</u>	25
2.2	<u>SUR LES FERTILISANTS</u>	27
2.2.1	<u>Engrais azotés ammoniacaux: ammoniac anhydre et urée</u>	27
2.2.2	<u>Engrais azotés ammoniac-nitriques: ammonitrate</u>	27
2.3	<u>A PROPOS DE L'IRRIGATION GRAVITAIRE</u>	28
2.3.1	<u>Périmètre irrigué</u>	28
2.3.2	<u>Types d'irrigation</u>	28
2.3.3	<u>Types de conduites de l'arrosage à la raie</u>	28
2.3.4	<u>Matériels d'irrigation gravitaire</u>	28
2.3.5	<u>Aménagement de la parcelle pour l'irrigation à la raie: pente, longueur</u>	30
2.3.6	<u>Avantages et inconvénients de l'irrigation à la raie</u>	30
2.3.7	<u>Voies d'amélioration de l'irrigation à la raie</u>	31
2.4	<u>SUR LE MEXIQUE</u>	32
2.4.1	<u>Situation du périmètre irrigué de El Carrizo au Mexique</u>	32
2.4.2	<u>Bilan agricole</u>	33
2.4.2.1	<u>Bilan agricole au niveau national</u>	33
2.4.3	<u>l'Etat de Sinaloa</u>	34
2.4.4	<u>Fertilisation à El carrizo (Mexique)</u>	35
2.4.5	<u>Scénarios d'irrigation a la raie pour « El Carrizo »</u>	35
2.5	<u>QUELQUES MODELES DE « QUALITE DE L'EAU »</u>	36
2.6	<u>PARAMETRES DU STICS (BRISSE ET AL., 1998)</u>	38