TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION **1**

CHAPITRE I **4**

POSITION DU PROBLÈME : DU DIAGNOSTIC AGRONOMIQUE A LA DEFINITION DU CAHIER DES CHARGES D'UN OUTIL D'EVALUATION DE STRATEGIES ALTERNATIVES D'IRRIGATION **5**

1. ETUDE PRÉLIMINAIRE : ÉVALUATION DE LA LIXIVIATION DU NITRATE ET DES STRESS HYDRIQUE ET AZOTÉ EN PARCELLES DE CULTURES LÉGUMIÈRES SUR LA ZONE VULNÉRABLE DE LA VISTRENQUE **5**

1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE : POLLUTION NITRIQUE DES EAUX SOUTERRAINES ET ACTIVITES AGRICOLES SUR LA PLAINE DE LA VISTRENQUE 5

1.1.1. Système hydro-géologique *5*

1.1.2. Pollution par le nitrate de la nappe de la Vistrenque *5*

1.1.3. Lien entre activité agricole et pollution nitrique *7*

1.1.4. Actions menées pour maîtriser la pollution nitrique d'origine agricole *7*

1.2. DISPOSITIF 9

1.2.1. Description des « situations agronomiques » évaluées *9*

1.2.2. Mesures réalisées sur les parcelles *13*

1.2.3. Indicateurs de diagnostic *13*

STRESS HYDRIQUE 15

1.3. RESULTATS 16

1.3.1. Gestion de l'eau et de l'azote dans chaque situation *16*

1.3.2. Evolution du potentiel hydrique dans la zone racinaire (ψ_{rz}) comme indicateur dynamique du stress hydrique *18*

1.3.3. Evolution de la concentration en nitrate dans la zone racinaire (C_{rz}) comme indicateur dynamique du stress azoté *22*

1.3.4. Diagnostic de lixiviation du nitrate sous la zone racinaire. *24*

1.4. DISCUSSION 25

1.4.1. Diagnostic des stress hydrique et azoté *26*

1.4.2 Analyse de la lixiviation du nitrate *28*

1.4.3. Analyses des pratiques des agriculteurs *29*

1.5. CONCLUSION 30

1.6. OBJECTIFS DE LA THESE 33

2. DÉFINITION DU CAHIER DES CHARGES D'UN OUTIL D'ÉVALUATION DES RISQUES DE POLLUTION NITRIQUE ET DE PERTES DE RENDEMENT LIÉS AUX PRATIQUES D'IRRIGATION. **34**

2.1. METHODOLOGIE DE L'EVALUATION 34

2.1.1 Principe d'un outil d'évaluation *34*

2.1.2. Qualités d'un outil d'évaluation *34*

2.1.3. Méthodes pour l'élaboration des indicateurs *35*

2.1.4. Conclusion *36*

2.2. COMMENT EVALUER LES RISQUES DE POLLUTION NITRIQUE EN PARCELLES AGRICOLES ? 36

2.2.1. Quelle démarche d'évaluation des risques de pollution nitrique ? *36*

2.2.2. Mesure de la concentration en nitrate de la solution du sol *37*

2.2.3. Modélisation des dynamiques de l'eau et de l'azote dans le sol *41*

2.2.4. Conclusion : choix de la démarche d'évaluation des risques de pollution nitrique *44*

2.3. EVALUATION DES PERTES DE RENDEMENT D'UNE CULTURE DE LAITUES EN FONCTION DU « VECU HYDRIQUE » DE LA CULTURE 45

2.3.1. Démarche d'évaluation *45*

2.3.2. Modélisation de l'impact du stress hydrique sur l'accumulation de biomasse d'une plante. *46*
2.3.3.Choix de l'approche de modélisation de l'impact de stress hydrique sur la production de biomasse de la plante. *47*

3. CONCLUSION : PRÉSENTATION DU TRAVAIL DE RECHERCHE **48**

CHAPITRE II **55**

MATÉRIELS ET METHODES **55**

1. CONDITIONS DE CULTURE ET DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX **55**

1.1.DISPOSITIFS EN PARCELLES AGRICOLES. 55
1.1.1.Caractéristiques des parcelles *55*
1.1.2.Description des cultures *56*
1.1.3. Dispositif de mesure et traitements expérimentaux *57*
1.2.DISPOSITIF EN POTS 58
1.2.1. Conditions de culture *58*
1.2.2.Traitements hydriques appliqués *59*

2.MESURES EFFECTUÉES **60**

2.1. ENVIRONNEMENT CLIMATIQUE 60
2.2. ETAT HYDRIQUE ET AZOTE DU SOL 60
2.2.1. Dispositif sous abri *60*
2.2.2. Dispositif en pots *66*
2.3. MESURES SUR LES PLANTES 68
2.3.1. Fréquence et échantillonage *68*
2.3.2. Biomasse fraîche et sèche *70*
2.3.3. Nombre de feuilles apparues et initiées *70*
2.3.4. Surface des feuilles *70*
2.3.5. Taux de couverture *71*
2.3.6. Profondeur et densité racinaire *71*
2.4. MESURES COMPLEMENTAIRES 72
2.4.1. Propriétés hydrodynamiques des sols *72*
2.4.2. Densité apparente du sol *73*
2.4.3. Evaluation de l'évapotranspiration sous abri *73*

3.TRAITEMENT DES DONNÉES ET ÉTUDES MÉTHODOLOGIQUES **74**

3.1. CONDITIONS CLIMATIQUES 74
3.2.COMPARAISON DES STOCKS D'AZOTE NITRIQUE CALCULES A PARTIR DE MESURES EFFECTUEES AVEC DES TENSIONICS ET SUR DES PRELEVEMENTS DE SOL 75
3.3.ANALYSE DES CINETIQUES D'EXPANSION FOLIAIRE 76
3.3.1. Détermination de la date d'arrêt de l'expansion des feuilles. *76*
3.3.2. Détermination de la date d'arrêt de la phase de croissance exponentielle des feuilles *77*
3.3.3. Calcul de la vitesse d'expansion relative au cours de la phase de croissance exponentielle. *79*
3.4. ANALYSES STATISTIQUES 80

CHAPITRE III **83**

MODÉLISATION DU BILAN HYDRIQUE D'UNE CULTURE DE LAITUES SOUS ABRI FROID : APPLICATION À L'ÉVALUATION DES PERTES D'AZOTE NITRIQUE PAR LIXIVIATION SOUS LA CULTURE. **83**

1.INTRODUCTION : OBJECTIFS ET DÉMARCHE **83**

1.1. OBJECTIFS 83
1.2. SYSTEME A MODELISER, PAS DE TEMPS ET ECHELLE D'ESPACE DE LA MODELISATION 83
1.3. QUEL MODELE UTILISER ? 84

2. DESCRIPTION DES CONCEPTS ET DES FORMALISMES UTILISÉS POUR LA MODÉLISATION DU BILAN HYDRIQUE D'UNE CULTURE DE LAITUES DANS STICS ET PASTIS **85**

2.1. CONSOMMATION EN EAU DE LA CULTURE 86
2.1.1.Principe *86*
2.1.2. Modélisation de l'évolution du taux de couverture *86*
2.1.3. Calcul de l'évapotranspiration maximale (ETM) *87*
2.1.4. Séparation entre évaporation et transpiration potentielle (resp. Ep et Tp) *88*
2.1.5. Calcul de l'évaporation réelle *88*
2.1.6. Calcul de la transpiration réelle (Tr) *89*
2.2. CROISSANCE RACINAIRE 89
2.2.1. Croissance du front d'enracinement. *90*
2.2.2. Croissance de la densité racinaire *90*
2.3. TRANSFERTS DE L'EAU DANS LE SOL 91
2.3.1. PASTIS *91*
2.3.2. STICS *92*
2.4. CONCLUSION 93

3. PARAMÉTRAGE DES MODÈLES 93

3.1. CONSOMMATION EN EAU DE LA CULTURE 93
3.1.1. Evolution du taux de couverture *94*
3.1.2. Estimation du coefficient de réduction de l'évaporation potentielle par un paillage (r_f, 1-couvermulch). *96*
3.1.3. Transpiration réelle de la culture *96*
3.2. CROISSANCE RACINAIRE 96
3.2.1. Progression de le profondeur d'enracinement. *96*
3.2.2. Evolution de la densité racinaire *97*
3.3. PARAMETRES SOL 98
3.3.1. STICS *98*
3.3.2. PASTIS *99*

4. EVALUATION ET COMPARAISON DE STICS ET PASTIS POUR LA MODÉLISATION DU BILAN HYDRIQUE ET DES FLUX D'EAU SOUS LES RACINES D'UNE CULTURE DE LAITUES 101

4.1. CONDITIONS INITIALES ET AUX LIMITES, ET VARIABLES D'ENTREES DES MODELES 101
4.1.1. Conditions initiales *101*
4.1.2. Conditions aux limites (PASTIS) *102*
4.1.3. Variables d'entrées *102*
4.2. CALAGE DE PASTIS 102
4.3. SIMULATION DE LA CONSOMMATION EN EAU DE LA CULTURE 104
4.3.1. Evaluation de la prévision du taux de couverture *104*
4.3.2. Simulation des besoins en eau de la culture *105*
4.4. SIMULATION DE L'ETAT HYDRIQUE ET DES TRANSFERTS D'EAU DANS LE SOL 107
4.4.1.Comparaison des stocks d'eau mesurés et simulés *107*
4.4.2.Comparaison des teneurs en eau pondérales mesurées et simulées par horizon *110*
4.4.3.Simulations des potentiels hydriques du sol *111*
4.4.4. Conclusion. *112*
4.5. COMPARAISON DES FLUX SOUS LES RACINES SIMULES PAR STICS ET PASTIS 114
4.5.1. Flux d'eau journaliers *114*
4.5.2. Flux d'eau cumulés *117*
4.5.3. Comparaison des flux d'azote nitrique et de Nlixi *118*
4.5.4. Conclusion *121*

5. UTILISATION DE STICS POUR LE DIAGNOSTIC DES RISQUES DE POLLUTION NITRIQUE SOUS DES CULTURES DE LAITUES SOUS ABRI FROID 121

5.1. CALCUL DU DRAINAGE (D) 122
5.1.1. Calage, initialisation et variables d'entrées du modèle *122*
5.1.2. Bilan hydrique et drainage simulé *125*
5.2. CALCUL DES QUANTITES D'AZOTE NITRIQUE LIXIVIEES (NLIXI) 127
5.2.1. Diagnostic des risques de pollution nitrique : comparaison entre Nlixi et $R_{NO_3^-}$ *127*
5.2.2. Impact de la gestion de l'eau sur le risque de pollution nitrique. *129*
5.3. CONCLUSION 129

6. DISCUSSION ET CONCLUSION 130

CHAPITRE IV 137

MODÉLISATION DE LA CROISSANCE FOLIAIRE DE LA LAITUE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE, DU RAYONNEMENT ET DE L'ÉTAT HYDRIQUE DU SOL : APPLICATION À LA PRÉVISION DU RENDEMENT D'UNE CULTURE DE LAITUES 137

1. INTRODUCTION : OBJECTIF ET DÉMARCHE..... 137

1.1. OBJECTIF 137
1.2. RELATIONS ENTRE RENDEMENT ET CROISSANCE FOLIAIRE DE LA LAITUE 137
1.2.1. Le nombre de feuilles est un bon indicateur du stade de récolte d'une culture de laitue 137
1.2.2. Le rendement d'une laitue peut être calculé simplement à partir de la surface foliaire de la plante. 139
1.2.3.Intérêt de la modélisation de la croissance individuelle des feuilles..... 139
1.3. CADRE D'ANALYSE ET DE MODELISATION DE LA CROISSANCE INDIVIDUELLES DES FEUILLES DE LA LAITUE. 142
1.3.1. Description 142
1.3.2. Quelles variables environnementales considérer en conditions hydriques non limitantes ? 144
1.3.3. Quelle variable pour caractériser le stress hydrique ? 145
1.4. DEMARCHE DU CHAPITRE 146

2. ANALYSE DU DÉVELOPPEMENT ET DE LA CROISSANCE INDIVIDUELLE DES FEUILLES DE LA LAITUE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE ET DU RAYONNEMENT. 147

2.1. ANALYSE ET MODELISATION DU DEVELOPPEMENT FOLIAIRE 147
2.1.1. Description du schéma de développement foliaire de la laitue..... 147
2.1.2. Le schéma de développement foliaire de la laitue n'est pas stable en temps thermique..... 149
2.1.3. Les vitesses de développement des feuilles dépendent du rapport entre le rayonnement et le temps thermique. 151
2.1.4. Conclusion..... 154
2.2. ANALYSE ET MODELISATION DE L'EXPANSION DES FEUILLES DE LAITUE 155
2.2.1. Analyse de la distribution du RER selon le rang de la feuille..... 155
2.2.2. Evolution de RERp en fonction de l'âge de la plante. 156
2.2.3. Sensibilité de RERp au PAR absorbé par la plante..... 158
2.2.4. Modélisation de l'évolution du RER après la phase de croissance exponentielle..... 159
2.2.5. Conclusion..... 161

3. ANALYSE ET MODÉLISATION DE L'EFFET DE L'ÉTAT HYDRIQUE DU SOL SUR LE DÉVELOPPEMENT ET LA CROISSANCE FOLIAIRE DE LA LAITUE. 162

3.1. CARACTERISATION DES STRESS HYDRIQUES DANS LES ESSAIS SER-2 ET SER-3. 162
3.2. EFFET DE L'ETAT HYDRIQUE DU SOL SUR LE DEVELOPPEMENT 164
3.3. EFFET DE LA CONTRAINTE HYDRIQUE SUR L'EXPANSION DES FEUILLES 166
3.4. CONCLUSION 169

4. ELABORATION ET ÉVALUATION DU MODÈLE DE CROISSANCE FOLIAIRE DE LA LAITUE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE, DU RAYONNEMENT ET DE L'ÉTAT HYDRIQUE DU SOL. 169

4.1. DESCRIPTION DU MODELE 169
4.1.1. Principes généraux 169
4.1.2. Module « Développement foliaire » 172
4.1.3. Module « Expansion foliaire » 173
4.1.4. Module « Rendement » 174
4.2. EVALUATION DU MODELE 174
4.2.1. Paramétrage et initialisation 175
4.2.2. Simulation du développement foliaire 179
4.2.3. Simulation de la croissance foliaire et du rendement..... 179

5. DISCUSSION ET CONCLUSION 186

CHAPITRE V 197

SIMULATION DE L'IMPACT DE STRATÉGIES ALTERNATIVES D'IRRIGATION SUR LES RISQUES DE POLLUTION NITRIQUE ET LE RENDEMENT D'UNE CULTURE DE LAITUES 197

1.OBJECTIFS ET DÉMARCHE 197

1.1.OBJECTIFS 197
1.2.CHOIX DU MODELE DE BILAN HYDRIQUE 198
1.3. ARTICULATION DES MODELES DE BILAN HYDRIQUE ET DE CALCUL DU RENDEMENT 199
1.4.SITUATION ET STRATEGIES ALTERNATIVES EVALUEES 202

2. SIMULATION DU BILAN HYDRIQUE 204

2.1. REGIMES D'IRRIGATION ET VOLUMES D'EAU APPORTEES 204
2.2. STOCKS D'EAU ET POTENTIELS HYDRIQUES DU SOL 205
2.3. FLUX D'EAU ET D'AZOTE EN PROFONDEUR 208

3. CROISSANCE FOLIAIRE, TRANSPIRATION ET RENDEMENT DE LA CULTURE 210

3.1. EVOLUTION DE FTSW DANS LES DIFFERENTES STRATEGIES ET IMPACT SUR LA CROISSANCE FOLIAIRE 210
3.2. IMPACT SUR LA TRANSPIRATION 212
3.3. IMPACT SUR LE RENDEMENT 213

4. DISCUSSION 214

CHAPITRE VI 221

CONCLUSION GÉNÉRALE 221

1. BILAN DES TRAVAUX EFFECTUÉS 221

2. PERSPECTIVES 224

2.1. EXTENSION DE LA DEMARCHE PROPOSEE A LA GESTION DE LA FERTILISATION 224
2.2. MISE EN ŒUVRE DE LA DEMARCHE CHEZ LES AGRICULTEURS 226

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 227

INTRODUCTION

La dégradation de la qualité des ressources d'eau douce, et ses conséquences sur la santé humaine et l'environnement, constitue un enjeu majeur du développement durable. Parmi les pollutions identifiées, celle par le nitrate est la plus répandue et la mieux connue. Elle touche 49 états sur 50 aux USA (United States Environment Protection Agency, 1994), le seuil de 50 mg $NO3.l^{-1}$ est dépassé dans plus de 25% des nappes en Europe (Cellule Prospective et Stratégie, 1999) , et dans 20 à 50% des puits en Afrique et en Inde (FAO, 1996). Dans certaines situations, les teneurs en nitrate atteignent plusieurs centaines de mg $NO3.l^{-1}$.

Les conséquences directes de la consommation d'eau contenant plus de 50 mg $NO_3.l^{-1}$ sur la santé humaine sont contestées (La Recherche, 2001), et sont probablement bien moindres que celles liées à la présence des produits phytosanitaires. Il existe cependant d'autres risques sanitaires et environnementaux liés à l'enrichissement des eaux en nitrate (FAO, 1996 ; Cellule Prospective et Stratégie, 1999). Ainsi l'eutrophisation, qui correspond à l'enrichissement des eaux en matières organiques et minéraux (phosphate et nitrate essentiellement), engendre des déséquilibres au sein des écosystèmes aquatiques qui favorisent le développement massif d'algues dont certaines vont sécréter de substances toxiques dans le milieu (Piriou, 1991). Par ailleurs, cette pollution entraîne des surcoûts pour l'ensemble des utilisateurs de l'eau dus aux nécessaires traitements pour décontaminer l'eau, ou à l'achat d'eau embouteillée par les ménages.

Les sources de pollution nitrique sont diverses mais l'agriculture est unanimement reconnue comme étant la source majeure d'émission d'azote vers les eaux (Haag and Kaupenjohann, 2001). En France, prés de 70% des flux d'azote vers l'eau proviennent de l'activité agricole (Institut Français de l'Environnement, 1998). La plus grande part de cette pollution est diffuse, c'est à dire non localisée dans le temps ni l'espace, ce qui rend difficile sa délimitation et sa maîtrise (Bell et al., 1999). La pollution nitrique d'origine agricole est notamment importante dans les zones de cultures intensives (Strebel et al. 1989, Goulding, 2000), comme par exemple dans le sud de la France où les zones vulnérables définies par application de la Directive Nitrates (CEE 91/676) se situent dans des régions où les cultures irriguées, en particulier le maraîchage, représentent des surfaces importantes (Penel, 1996 ; Feraud et al., 1997 ; Valles et al., 1997). Ainsi pour des cultures de laitues, les pertes d'azote

Rapport-Gratuit.com

par lixiviation estimées en parcelles agricoles varient de 146 kg N/ha sur 6 mois (Jackson et al., 1994) à 243 kg N/ha en 44 jours (Bruckler et al., 1997).

Pour ces cultures, la maîtrise des risques de pollution nitrique passe notamment par l'élaboration de pratiques d'irrigation et de fertilisation moins polluantes (De Cockborne et al., 1997 ; Sexton et al., 1999). Pour être adoptées par les agriculteurs, ces pratiques ne doivent pas entraîner de pertes de rendement, dues à une limitation des apports occasionnant des stress pour les plantes, incompatibles avec leurs objectifs de production. Si ces pertes sont incontournables, il faut pouvoir les prévoir pour initier des négociations entre les agriculteurs et les gestionnaires de l'eau. Cet ajustement des apports pour réduire les risques de pollution tout en limitant les risques pour la production est particulièrement difficile pour les cultures maraîchères, très sensibles notamment au stress hydrique et azoté (Bar-Yosef et Sagiv, 1982a et b ; Burns et Miles, 1992 ; Thompson et Doerge, 1995).

L'objectif de cette thèse est d'élaborer un outil d'évaluation des risques de pollution nitrique et de pertes de rendement en parcelles agricoles pour des cultures intensives. Cette thèse a été réalisée dans le contexte de la maîtrise des risques de la pollution nitrique liés à l'activité agricole et en particulier aux cultures intensives sur la zone vulnérable de la Vistrenque. Elle a été mise en place dans la continuité de travaux menés depuis 1994 par l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier en collaboration, et grâce au financement, de la société Perrier-Vittel France. Les organismes locaux chargés du développement agricole (CTIFL, Chambre d'Agriculture du Gard) et de la gestion des ressources en eaux (DIREN LR, Agence de l'Eau RMC, Syndicat Mixte de la Vistrenque) se sont joints à la démarche à partir de 1999.

Le premier chapitre de ce rapport présente le cahier des charges de l'outil et les questions scientifiques qui en découlent. La démarche adoptée pour définir ce cahier des charges a consisté dans un premier temps à se baser sur les résultats d'un travail de diagnostic en parcelles agricoles réalisé avant la thèse (Gay et Wery, 1998). Ce travail nous a permis de définir les caractéristiques du système à évaluer (limites, composantes, variables d'état et de flux) et les processus sur lesquelles doit porter l'évaluation. Nous avons ensuite défini au travers d'une étude bibliographique les méthodes à élaborer pour évaluer de façon pertinente ces processus.

L'élaboration et le test de ces méthodes est présenté dans les chapitres suivants (chapitre III, IV, V) après avoir détaillé les dispositifs expérimentaux que nous avons mis en place pour cela (chapitre II).

CHAPITRE I

Position du problème : du diagnostic agronomique a la definition du cahier des charges d'un outil d'evaluation de strategies alternatives d'irrigation

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

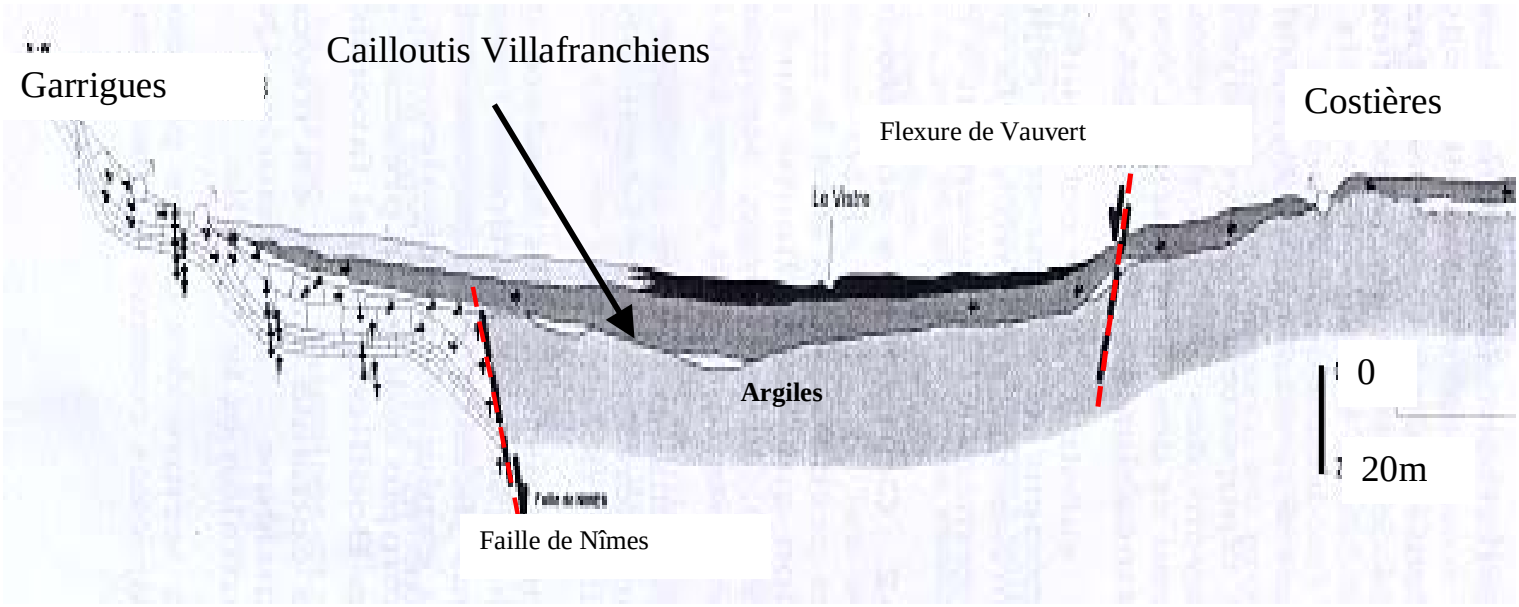


Figure I.1 : Coupe géologique transversale schématique de la plaine de la Vistrenque montrant la localisation de la nappe superficielle

Figure I.2 : Evolution du niveau de la nappe de la Vistrenque mesuré sur un piézomètre situé sur la zone d'étude (DIREN L.R.)

CHAPITRE I

POSITION DU PROBLEME : DU DIAGNOSTIC AGRONOMIQUE A LA DEFINITION DU CAHIER DES CHARGES D'UN OUTIL D'EVALUATION DE STRATEGIES ALTERNATIVES D'IRRIGATION

1. Etude préliminaire : évaluation de la lixiviation du nitrate et des stress hydrique et azoté en parcelles de cultures légumières sur la zone vulnérable de la Vistrenque

(Ce travail a fait l'objet d'un article soumis pour publication à European Journal of Agronomy)

1.1.Contexte de l'étude : pollution nitrique des eaux souterraines et activités agricoles sur la plaine de la Vistrenque

1.1.1. Système hydro-géologique

La plaine de la Vistrenque s'étend sur 400 km² selon un axe nord-est/sud-ouest dans le département du Gard. Elle correspond à un bassin d'effondrement formé à l'ère tertiaire le long de la faille de Nîmes, limité au Nord par le plateau des Garrigues Nîmoises et au Sud par les collines des Costières. Au quaternaire, ce bassin a été recouvert par une couche d'une dizaine de mètres d'alluvions grossières appelées cailloutis villafranchiens. Ces alluvions constituent l'aquifère de la nappe de la Vistrenque (figure I. 1).

Cette nappe se caractérise notamment par sa faible profondeur de quelques mètres seulement. Les années très pluvieuses, elle peut ainsi remonter à moins d'un mètre de la surface (figure I. 2). Cette faible profondeur a favorisé l'exploitation intensive de la nappe pour l'eau potable (> 10 millions de m^3 par an) et pour l'agriculture (> 3.5 millions de m^3 par an).

1.1.2. Pollution par le nitrate de la nappe de la Vistrenque

Cette proximité de la nappe par rapport à la surface constitue un facteur de vulnérabilité de la nappe par rapport aux nombreuses activités présentent sur la plaine, car les temps de transfert d'éventuels polluants de la surface au toit de la nappe vont être courts (Pantel, 2000).

Depuis 1980, des teneurs en nitrate supérieures à la norme de potabilité de 50 mg $NO_3^-.l^{-1}$ ont été fréquemment mesurées. En 1992, la DIREN L.R. et le Syndicat Mixte d'Etude et de Gestion de la Vistrenque ont réalisé un diagnostic de la pollution par le nitrate de la nappe. La

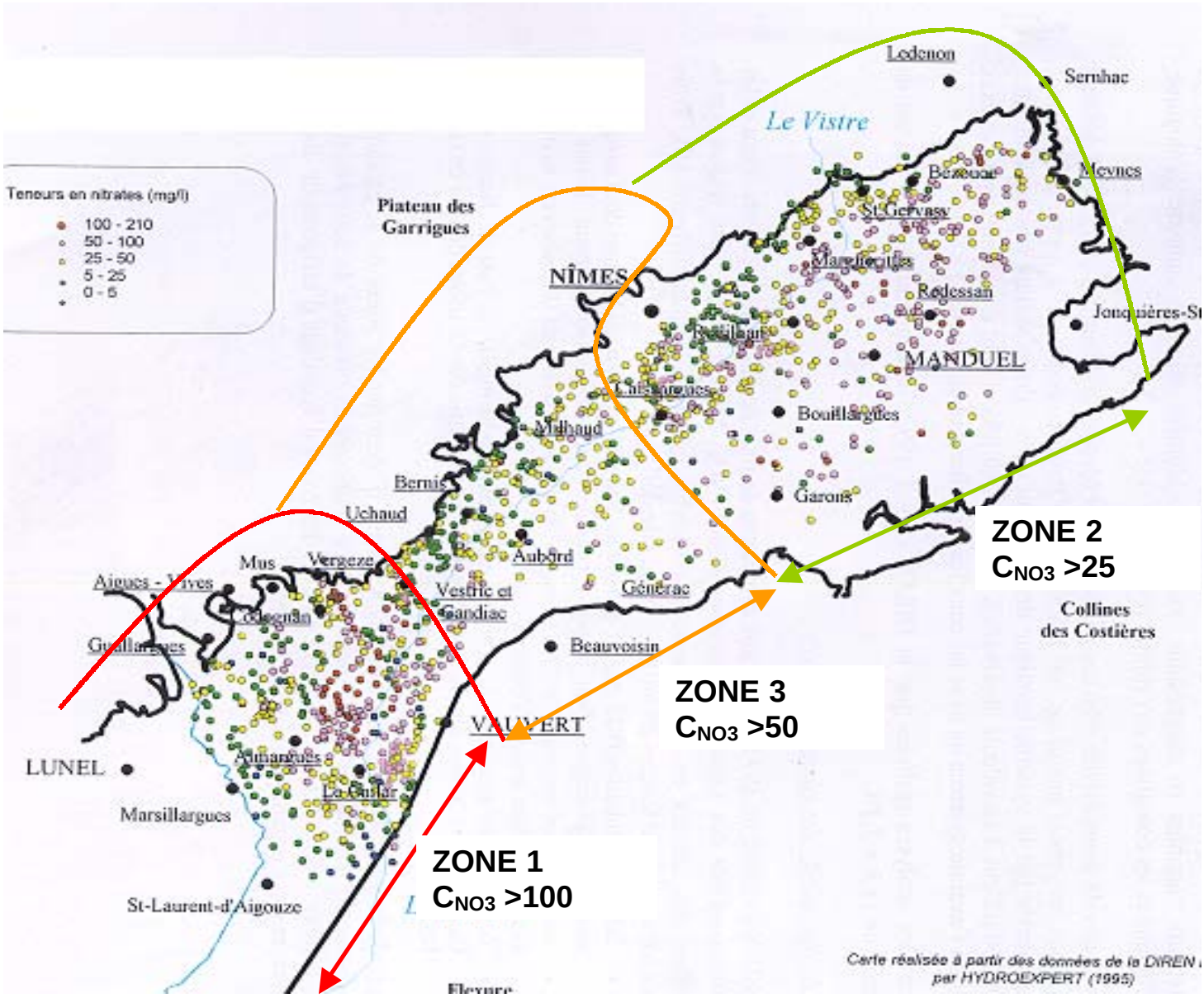


Figure I.3 : Distributions des teneurs en nitrate dans la nappe de la Vistrenque (DIREN Languedoc-Roussillon, 1995)

distribution géographique des teneurs en nitrate permet de distinguer 4 zones selon le niveau de pollution mesuré (figure I. 3). La zone 1, à l'extrémité sud-ouest de la nappe, est celle qui présente les concentrations les plus élevées, fréquemment supérieures à 100 $mg.l^{-1}$ et atteignant plus de 200 mg $NO_3^-.l^{-1}$. La zone 2 correspond à l'extrémité nord-est de la plaine. Les teneurs en nitrate sont moins importantes que sur la zone 1 mais sont en général supérieures au seuil de potabilité de 50 $mg.l^{-1}$. Les zones 3, au centre de la plaine, et 4, qui rassemblent plusieurs petites zones en bordure de la nappe non représentées sur la figure I.3, présentent des concentrations faibles, inférieures à 25 $mg.l^{-1}$. Compte tenu de cette situation, la plaine de la Vistrenque a été classée zone vulnérable par application de la directive Nitrates (91/676 CEE).

1.1.3. Lien entre activité agricole et pollution nitrique

La plaine de la Vistrenque présente par ailleurs une importante activité agricole centrée sur 3 grands types de production : la vigne (32 % des surfaces), les grandes cultures (26% des surfaces) et les productions maraîchères et fruitières (24% des surfaces). La répartition de ces types de production en fonction des 4 zones de pollution définies ci dessus montre en particulier que 40% de la production maraîchère est concentrée sur la zone 1, notamment au niveau des captages où les plus fortes concentrations en nitrate de la nappe ont été mesurées. Cette concordance entre pollution nitrique et maraîchage a également été observée sur d'autres zones vulnérables en Europe (Strebel et al., 1989 ; Goulding, 2000) et notamment en France sur le pourtour méditerranéen (bassin de Carpentras, plaine du Roussillon) (Bertuzzi et al., 1998). De nombreux travaux mettent par ailleurs en évidence des quantités importantes d'azote lixiviées sous les parcelles pour ce type de culture, de 146 kg $N\text{-}NO_3.ha^{-1}$ sur 6 mois pour des laitues de plein champ (Jackson et al., 1994) à près de 500 kg $N\text{-}NO_3.ha^{-1}$ pour des cultures de fraises (Guimera et al., 1995).

1.1.4. Actions menées pour maîtriser la pollution nitrique d'origine agricole.

A partir du milieu des années 90, des actions ont été menées, notamment au niveau de la zone 1, par la Chambre Départementale d'Agriculture (CA30), en collaboration avec le Syndicat Mixte d'Etude et de Gestion de la nappe de la Vistrenque et la Direction Régionale de l'Environnement (DIREN L.R.), pour limiter la pollution nitrique d'origine agricole. Ces actions ont été amplifiées avec la mise en place en 1998 du programme d'actions prévu par la Directive Nitrates et par la pré-labélisation d'une opération FERTI-MIEUX en 1999. L'arrêté préfectoral validant le programme d'actions fixe notamment les prescriptions à caractère

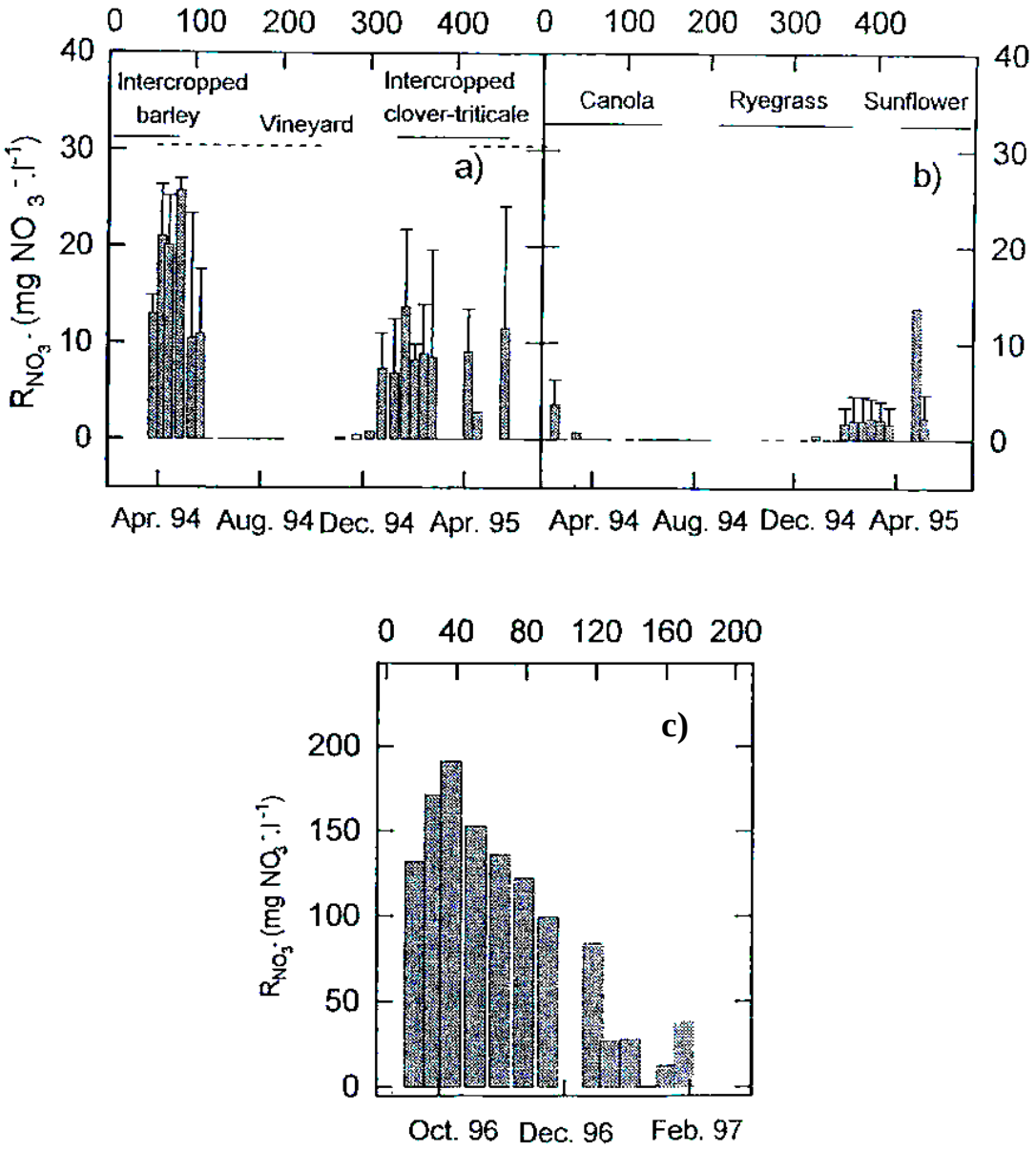


Figure 1.4 : Evolution au cours du temps de l'indicateur de lixiviation du nitrate R_{NO3} calculé par Cuny et al. (1998) pour (a) une culture intercalaire de vigne, (b) une succession colza-raygrass-tournesol, (c) une culture de laitues sous abri. Les barres verticales représentent les périodes de drainage et la concentration en nitrate de l'eau drainée mesurée sous les racines.

obligatoire à respecter sur la zone en matière de pratiques de fertilisation essentiellement. Parallèlement à cela, une société d'eau minérale dont le site industriel se situe à cheval entre les zones 1 et 3 (figure I.3) a également mis en place sur son périmètre d'intervention un programme agri-environnemental ayant pour objectif de maîtriser les risques de pollution des eaux d'origine agricole et développer des systèmes de culture ne présentant aucun risque pour la qualité de l'eau. Une des principales réalisations de ce programme a été de convertir plus de 300 ha en agriculture biologique, essentiellement en grandes cultures et en vigne.

Une partie de ces actions a été conduite en partenariat avec l'INRA d'une part et l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier (Agro. M) d'autre part. Les premiers travaux ont été menés par l'INRA Avignon entre 1992 et 1993 sur des cultures de laitues en plein champ chez un agriculteur situé sur la zone 1. Ces travaux, basés sur une approche de modélisation, ont permis de caractériser les flux d'eau et d'azote en cultures maraîchères de plein champ (Bruckler et al., 1997 ; Lafolie et al., 1997). Pour les systèmes étudiés, ils ont notamment montré que les pertes en azote nitrique pouvaient atteindre 200 kg $N\text{-}NO_3.ha^{-1}$ en 2 mois de culture (Bruckler et al., 1997). Les travaux menés par l'Agro M. à partir de 1993 ont permis de mettre au point une méthode robuste de diagnostic de la lixiviation du nitrate en parcelles agricoles utilisant des mesures de potentiel hydrique et de concentration en nitrate de la solution du sol (Cuny et al., 1998). Les premiers suivis effectués avec cette méthode de 1993 à 1996 ont permis d'établir des références sur la lixiviation du nitrate pour les trois types de production les plus rencontrés sur la zone (vigne, grandes cultures et maraîchage). Les résultats de ces suivis montrent le risque élevé de pollution nitrique en cultures maraîchères par rapport aux grandes cultures et à la vigne cultivées sur la zone d'étude (figure I. 4).

A partir de 1996, des parcelles de cultures légumières ont été régulièrement suivies chez différents producteurs situés sur la zone 1 à partir du dispositif de Cuny et al . (1998) complété pour pouvoir évaluer les stress hydriques et les stress azotés en plus de la lixiviation du nitrate. L'objectif de ces suivis était d'évaluer les risques de pollution nitrique et de pertes de rendement liés à des stress hydrique et azoté pour ces cultures dans des systèmes de production différents. Dans la suite nous présentons la méthodologie utilisée et les résultats acquis sur 14 cultures suivies sur 5 exploitations.

1.2. Dispositif

1.2.1. Description des « situations agronomiques » évaluées

Les enquêtes menées auprès des agriculteurs de la zone entre 1993 et 1996 montrent une grande diversité des systèmes de production et des pratiques agricoles en productions

Tableau I. 1 : Description des situations. Les codes des exploitations se réfèrent au tableau I.2. Le type de sol correspond à Limons Argileux (LA) or Argilo-Limoneux (AL) (cf. tableau I.3). Dans la colonne culture, AF signifie Abri Froid, et PC, Plein Champ. Dans le planning de fertilisation, AP signifie Avant Plantation, C, pendant la culture. Les engrais sont organiques (Org) ou minéraux (min).Le système d'irrigation est par aspersion (A) ou par goutte à goutte (G).

					Pratiques de fertilisation				**Pratiques d'irrigation**		
Situations	Exploitation	***Type de sol***	Culture	Jour de plantation et de récolte	Planning de fertilisation	Formulation	Dose (Kg N/ha)	Indicateur de pilotage	Système d'irrigation	Dose (mm)	Nb d'apports
S1	E1	***LA***	Laitues PC	16 Sep. 1996 27 Fev 1997	AP	Org.	100	standard	A	20 mm	1
S2	E1	LA	Laitues PC	20 Fev. 1998 20 Avr. 1998	AP	Org.	100	standard	A	47 mm	5
S3	E1	AL	Laitues AF	2 Dec 1996- 27 Fev. 1997	AP	Org.	100	standard	A	20 mm	1
S4	E1	***LA***	Laitues AF	20 Nov.1997 16 Mar 1998	AP	Org.	100	standard	A	61 mm	16
S5	E1	***LC***	Laitues AF	29 Jan 1999 22 Avr 1999	AP	Org.	100	standard	A	71 mm	13
S6	E1	AL	Tomate AF	2 Avr 1997 27Juil 1997	AP	Org.	100	standard	A + G	inconnu	au moins 1 fois/ semaine
S7	E1	***LA***	Tomate AF	. 2 Avr 1998 27Juill. 1998	AP	Org.	100	standard	A + G	inconnu	au moins 1 fois/ semaine
S8	E2	***LA***	Laitues PC	6 Avr.1996 24 Mai 1996	AP + C	Org. + Min.	120 + 60	standard + aspect culture	A	inconnu	quotidien
S9	E2	***LA***	Laitues PC	12 Mai 1996 21, Juin. 1996	AP + C	Org. + Min.	120 + 30	standard + aspect culture	A	inconnu	quotidien
S10	E2	AL	Laitues AF	17 Fev. 1999 14 Avr. 1999	AP	Org.	80	Analyse de sol	A	88 mm	9
S11	E3	***LA***	Laitues AF	20 Nov 1197 23 Fev 1998	AP	Org.	100	Analyse de sol	A	120 mm	10
S12	E3	***LA***	Melons AF	3 Avr 1998 23 Juin 1998	AP	Org. + Min	100+ inconnu	Analyse sol + aspect culture	A + G	inconnu	au moins 1 fois/ semaine
S13	E4	***LA***	Laitues AF	26 Nov. 1997 15 Mar. 1998	AP + C	Org. + Min.	60 + 40	standard + aspect culture	A	101 mm	14
S14	E5	AL	Melons PC	20 Avr. 1996 .15 Aou 1996	AP + C	Org. + Min.	120+ inconnu	standard + aspect culture	A	300 mm	5

légumières (Chambre d'agriculture du Gard, 1995). Notre objectif dans le choix des parcelles d'étude n'était pas de couvrir cette diversité des conditions de cultures, mais d'obtenir un échantillon de situations contrastées des systèmes de culture maraîchers de la zone d'étude, chaque situation correspondant à une combinaison particulière d'un sol, d'une saison de culture, d'une espèce et d'un itinéraire technique. Pour cela, nous avons choisi 5 exploitations spécialisées en production légumières avec des surfaces et des circuits de commercialisation différents (tableau I. 1). E4 et E5 sont des structures de petite taille (SAU < 10 ha), de type familiale, n'employant peu ou pas de main d'œuvre salariée, et utilisant des circuits de commercialisation courts (marchés locaux). Les 3 autres exploitations sont de taille moyenne (E1 et E3) à grande (E2) avec une main d'œuvre salariée permanente. Leur production est destinée en majorité aux grandes et moyennes surfaces (E2 ,E3), et à l'exportation (E1, E2). L'exploitation E1 est certifiée en Agriculture Biologique.

Le diagnostic a porté sur 14 situations différentes (notées de S1 à S14, tableau I. 2) caractérisées par l'exploitation agricole sur laquelle elle a été suivie, le type de sol de la parcelle, la culture (laitues, tomates ou melons, en extérieur ou sous abri froid), la période de culture, et les pratiques de fertilisation et d'irrigation. Les cultures suivies représentent les 3 principales espèces légumières cultivées sur la zone : la laitue (6 situations sous abri, 4 en plein champ[1]), le melon (une en plein champ et une sous abri) et la tomate (2 sous abri). Les périodes de culture couvrent une année entière depuis des cultures de laitues plantées en septembre jusqu'à des cultures de melons ou de tomates dont la récolte se termine en août. Comme certaines situations correspondent à des cultures successives sur la même parcelle, ces 14 situations représentent 9 parcelles différentes ayant des sols similaires avec une texture de type limono-argileuse à argilo-limoneuse, et un taux de matière organique proche ou supérieur à 2% sauf pour la parcelle 1 (tableau I. 3).

Pour chaque situation, un entretien a été réalisé avec l'agriculteur pour décrire l'itinéraire technique appliquée sur les parcelles suivies notamment en matière de fertilisation et d'irrigation. Certaines parcelles (voir ci-dessous) ont également été équipées de pluviomètres installés à proximité de chaque site de mesures pour déterminer les doses d'irrigation.

[1] On définit une culture de plein champ par opposition aux cultures conduites sous abri froid ou sous serre chauffée. Toutes ces cultures sont menées en pleine terre, on ne considère pas les cultures hors sol dans notre étude.

Rapport-Gratuit.com

Tableauc I.2 . Surface en maraîchage, type de main d'œuvre et de circuit de commercialisation des 5 exploitations choisies pour l'étude, et identification des situations (tab. I.1) suivies sur chaque exploitation.

Exploitation	Surface en maraîchage (ha)	Main d'oeuvre	Circuits de commercialisation	Situations
E1	12	employés	exportation	S1 to S7
E2	> 50	employés	Exportation, grande distribution	S8 to S10
E3	20	employés	grande distribution	S11 ; S12
E4	8	famille	Court, vente directe	S13
E5	5	famille	Court, vente directe	S14

Table I.3. Teneur en cailloux, en argiles, en limons, en sables, en matière organique et en azote total du sol dans l'horizon 0-30 cm des 9 parcelles sur lesquelles les 14 situations ont été suivies..

PARCELLES	SITUATIONS	Taux de cailloux	Argiles (%)	Limons (%)	Sables (%)	Matière organique (%)	Azote total (‰)
1	S1; S2	0.0	29.4	46.1	23.2	1.3	0.9
2	S3; S6	0.9	42.0	39.0	19.0	3.1	1.9
3	S4; S5; S7	11.3	26.3	46.5	27.1	1.9	1.2
4	S8	0.0	22.3	50.0	25.9	2.0	2.1
5	S9	7.4	25.0	46.7	26.3	2.0	1.1
6	S10	0.0	33.8	44.5	21.7	2.4	1.4
7	S11; S12	7.4	27.1	44.2	29.4	3.0	inconnu
8	S13	8.5	30.9	49.1	20.0	2.5	inconnu
9	S14	5.0	27.5	56.1	14.0	2.5	2.1

1.2.2. Mesures réalisées sur les parcelles

Le suivi réalisé sur chaque parcelle a consisté à mesurer le potentiel hydrique (ψ_t) et la concentration en nitrate (C_{NO3}^-) de la solution du sol avec des tensionics (Moutonnet et al., 1993). Le dispositif comprenait 3 sites de mesure par parcelle (A, B et C), situés entre 10 et 20 m de distance, sur un même rang de plantation, en évitant les zones de bordure et de couverture du système d'irrigation. Chaque site de mesure était équipé de 3 tensionics installés à 3 profondeurs différentes. Un appareil était implanté dans la zone où la densité racinaire est la plus forte, les deux autres étaient implantés sous la zone racinaire. Les profondeurs retenues pour les différentes cultures étaient : 20, 50 et 70 cm pour les cultures de laitues, 30, 70 et 90 cm pour les cultures de melons et de tomates.

Le potentiel hydrique du sol était mesuré 1 à 3 fois par semaine avec un capteur électronique de pression (Thony et al., 1988). La fréquence des mesures a été adaptée en fonction de la fréquence des irrigations et des précipitations, pour tenir compte des événements susceptibles de modifier brutalement les flux d'eau. De ce fait, on a estimé dans l'analyse des résultats, que l'évolution de ψ_t était linéaire entre 2 dates de mesure. La solution du sol était extraite tous les 10 jours, temps nécessaire à l'équilibre entre la solution de la bougie poreuse et celle du sol d'après Moutonnet et al. (1993). La concentration en nitrate de la solution était mesurée directement au champ avec un kit d'analyse rapide composé de bandelettes colorimétriques (Merckoquant®) et d'un colorimètre de type Nitrachek® étalonné à chaque série de mesures avec des solutions de concentration en nitrate connues. Ce test rapide montre une bonne corrélation avec les méthodes standard de dosage au laboratoire (Scholefield et al., 1995 ; Sims et al., 1995).

1.2.3. Indicateurs de diagnostic

Les indicateurs ont été calculés pour chaque site de mesure dans un premier temps. Comme proposé par Cuny et al. (1998), chaque situation a ensuite été représentée à chaque date de mesure par la moyenne et l'écart type des 3 sites quand ils montraient la même évolution au cours du cycle. Dans le cas contraire, les sites ont été présentés séparément.

Indicateurs dynamiques des stress hydrique et azoté

Pour évaluer les risques de stress hydrique et azoté, le potentiel hydrique et la concentration en nitrate de la solution du sol mesurés dans la zone racinaire, notés respectivement ψ_{rz} et C_{rz}, ont été utilisés comme indicateurs de la disponibilité en eau et en azote pour la culture, et confrontés à des seuils de stress empiriques.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

A partir des travaux de Belaygue et al. (1996 sur trèfle blanc), les seuils des stress hydrique ont été fixés à –30 kPa pour la croissance végétative et à –60 kPa pour le développement reproducteur. Ces valeurs sont cohérentes avec les recommandations faites pour le pilotage tensiométrique de l'irrigation en cultures légumières (Bar-Yosef and Sagiv, 1982b ; Nishihara et al., 2001). Pour la laitue, dont le cycle cultural ne concerne que la croissance végétative, les seuils de déclenchement des irrigations, déterminés dans des conditions proches de celles de notre zone d'étude, se situent entre -25 et -35 kPa (Bressoud, comm. pers.).

Pour le stress azoté, il existe peu de références établissant au champ les valeurs seuils de C_{rz} pour le pilotage de la fertilisation. Pour des cultures de pomme de terre, Kirkham et al. (1974) suggèrent que la concentration minimale en nitrate de la solution du sol pour la croissance est de 50 mg $NO_3^-.l^{-1}$. Bar-Yosef et Sagiv (1982a) estiment pour des cultures de tomates que l'absorption d'azote est maximum pour des concentration en azote dans le sol de 100 $mg.l^{-1}$ soit environ 440 mg $NO_3^-.l^{-1}$. Par ailleurs, pour des cultures de laitues hors-sol, Letey et al. (1982) n'observent pas de différences dans la croissance et dans l'absorption de l'azote de plantes cultivées entre 22 et 465 mg $NO_3^-.l^{-1}$ dans la solution de culture. En général, les plantes possèdent des systèmes d'absorption du nitrate à haute affinité fonctionnant à des concentrations inférieures à 1 mM NO_3^- (Crawford, 1995). Compte-tenu de ces éléments, et en absence de référence aussi précise que dans le cas de l'évaluation du stress hydrique par le potentiel hydrique du sol, le seuil de stress azoté a été fixé à 1mM de nitrate soit 62 mg $NO_3^-.l^{-1}$ dans la solution du sol.

Indicateur dynamique de la lixiviation du nitrate

Le risque de pollution nitrique des eaux souterraines a été évalué à partir de l'indicateur qualitatif, R_{NO3}^-, proposé par Cuny *et al.* (1998). Cet indicateur est calculé avec les valeurs de ψ_t et de C_{NO3}^- fournies par les deux tensionics implantés sous la zone racinaire. Les valeurs de ψ_t permettent de calculer le gradient de potentiel hydrique entre les 2 profondeurs de mesure. Le signe du gradient indique le sens des flux d'eau : s'il est positif, il y a drainage, s'il est négatif, il y a remontée capillaire, et s'il est nul, il n'y a pas de mouvement d'eau entre les 2 horizons considérés. La valeur de R_{NO3}^- est définie en fonction de ce résultat : quand le gradient est positif, R_{NO3}^- est égal à la moyenne des concentrations en nitrate mesurées aux 2 profondeurs ; quand le gradient est négatif (remontées capillaires) ou nul (plan de flux nul), R_{NO3}^- prend la valeur 0 (Cuny et al., 1998).

Table I.4. : Indicateurs synthétiques de stress hydrique, de stress azoté et de la lixiviation du nitrate pour les 14 situations. Les codes dans la colonne culture correspondent à : laitues de plein champ et sous abri froid (resp. Lait_PC et Lait_AF), tomates sous abri froid (Tom_AF), melons de plein champ ou sous abri froid (resp. Mel_PC et Mel_AF). Les pourcentages représentent le nombre de mesures en dessous un seuil de (-30 kPa et –60 kPa pour le stress hydrique, 62 mg $NO3.l^{-1}$ pour le stress azoté), ou correspondant à un évènement donné (drainage, remontées de nappe) par rapport au nombre total de mesures. Les nombres entre parenthèse correspondent aux écarts types.

		STRESS HYDRIQUE			**STRESS AZOTE**		**LIXIVIATION DU NITRATE**		
Situations	Culture	Jours avec Ψrz<-30 kPa	Jours avec Ψrz<-60 kPa	Ψrz moyen (kPa)	Jours avec Crz < 62 mg $NO3.l^{-1}$	Crz moyen (mg $NO3.l^{-1}$)	Jours avec drainage	Jours avec nappe	moyenne Rno3 >0 (mg $NO3.l^{-1}$)
S1	Lait_PC	0%	0%	-12.8 (3.5)	49%	91 (69)	69%	0%	125 (72)
S2	Lait_PC	4%	0%	-10.9 (8.1)	8%	211 (106)	100%	0%	61 (35)
S3	Lait_AF	0%	0%	-10.6 (1.9)	4%	129 (52)	0%	63%	NA
S4 sites a et b	Lait_AF	7%	0%	-20.1 (6.8)	10%	177 (87)	100%	0%	72 (11)
S4 site c	Lait_AF	21%	0%	-23.8 (8.6)	20%	104 (50)	38%	0%	73 (37)
S5	Lait_AF	8%	0%	-14.0 (10.1)	13%	294 (277)	88%	0%	162 (68)
S6	Tom_AF	0%	0%	-10.4 (1.9)	70%	53 (18)	100%	0%	45 (7)
S7	Tom_AF	17%	3%	-19.3 (15.4)	56%	99 (117)	65%	0%	86 (49)
S8	Lait_PC	0%	0%	-6.6 (1.5)	27%	69 (40)	95%	0%	55 (10)
S9	Lait_PC	10%	0%	-13.8 (14.6)	53%	128 (145)	79%	0%	146 (91)
S10	Lait_AF	4%	0%	-9.6 (8.3)	13%	99 (54)	87%	0%	149 (59)
S11	Lait_AF	0%	0%	-10.8 (2.0)	42%	136 (105)	100%	0%	99 (20)
S12	Mel_AF	45%	17%	-30.4 (26.3)	67%	66 (61)	64%	0%	34 (19)
S13	Lait_AF	0%	0%	-12.3 (3.4)	0%	1236 (644)	100%	0%	641 (152)
S14	Mel_PC	16%	5%	-17.9 (17.3)	77%	53 (87)	89%	0%	63 (7)

Indicateurs synthétiques

Nous avons également calculé, pour chaque parcelle, des indicateurs synthétiques permettant de résumer le résultat du diagnostic pour chaque situation étudiée. Ces indicateurs sont :

- pour le stress hydrique et azoté : le nombre de mesures (en pourcentage du total des mesures réalisées au cours du cycle sur une parcelle) inférieurs aux seuils de stress : -30 et –60 kPa pour le stress hydrique respectivement pour les organes végétatifs et reproducteurs, 62 mg $NO_3^-.l^{-1}$ pour le stress azoté. Nous avons également calculé la moyenne sur l'ensemble du cycle des mesures de ψ_{rz} et de $C_{rz.}$

- pour la lixiviation du nitrate : le nombre de jours de mesure où R_{NO3}^- est positif (en pourcentage du nombre total de jours de mesure sur la parcelle). Le même calcul a été effectué pour le nombre de jours où la présence d'une nappe était détectée comme cela a été montré par Cuny et al. (1998). Nous avons également calculé la concentration en nitrate moyenne de l'eau drainée sur l'ensemble du cycle.

1.3. Résultats

1.3.1. Gestion de l'eau et de l'azote dans chaque situation

Dans 9 situations sur 14 (S1-S7, S10-S11), la fertilisation a été basée sur un apport unique d'engrais organique avant la plantation (tableau I.2). Dans les autres situations, cet apport initial a été complété par des apports en cours de culture, pratiqués sous forme d'engrais minéral amené avec l'eau d'irrigation (ferti-irrigation). Les quantités totales d'azote amenées au cours du cycle ont été calculées à partir des informations fournies par les agriculteurs sur les formes et les doses d'engrais utilisées. Pour les situations S12 et S14, ces renseignements n'ont pas été suffisants pour estimer les apports en cours de culture. Pour les autres situations, les quantités apportées varient entre 80 et 180 kg N/ha. Ces quantités sont inférieures dans toutes les situations, sauf S8 et S9, aux doses maximales recommandées (120 $kgN.ha^{-1}$ pour les cultures de laitues, 380 $kgN.ha^{-1}$ pour celles de tomates et 190 $kgN.ha^{-1}$ pour celles de melons sous serre) dans le programme d'action élaboré dans le cadre de l'application de la Directive Nitrates (DIREN L.R, DDAF. 1998). Toutes les parcelles sont équipées d'un système d'irrigation par aspersion. Un système d'irrigation localisée est utilisé en plus pour S6, S7 et S12. Dans chaque situation, un apport d'eau important (entre 20 et 40 mm environ) a été réalisé avant la plantation. Ensuite les fréquences et les volumes d'irrigation sont variables d'une situation à l'autre. Dans toutes les situations, les agriculteurs connaissaient plus ou moins bien les durées des irrigations mais été incapables de donner les quantités d'eau qu'ils

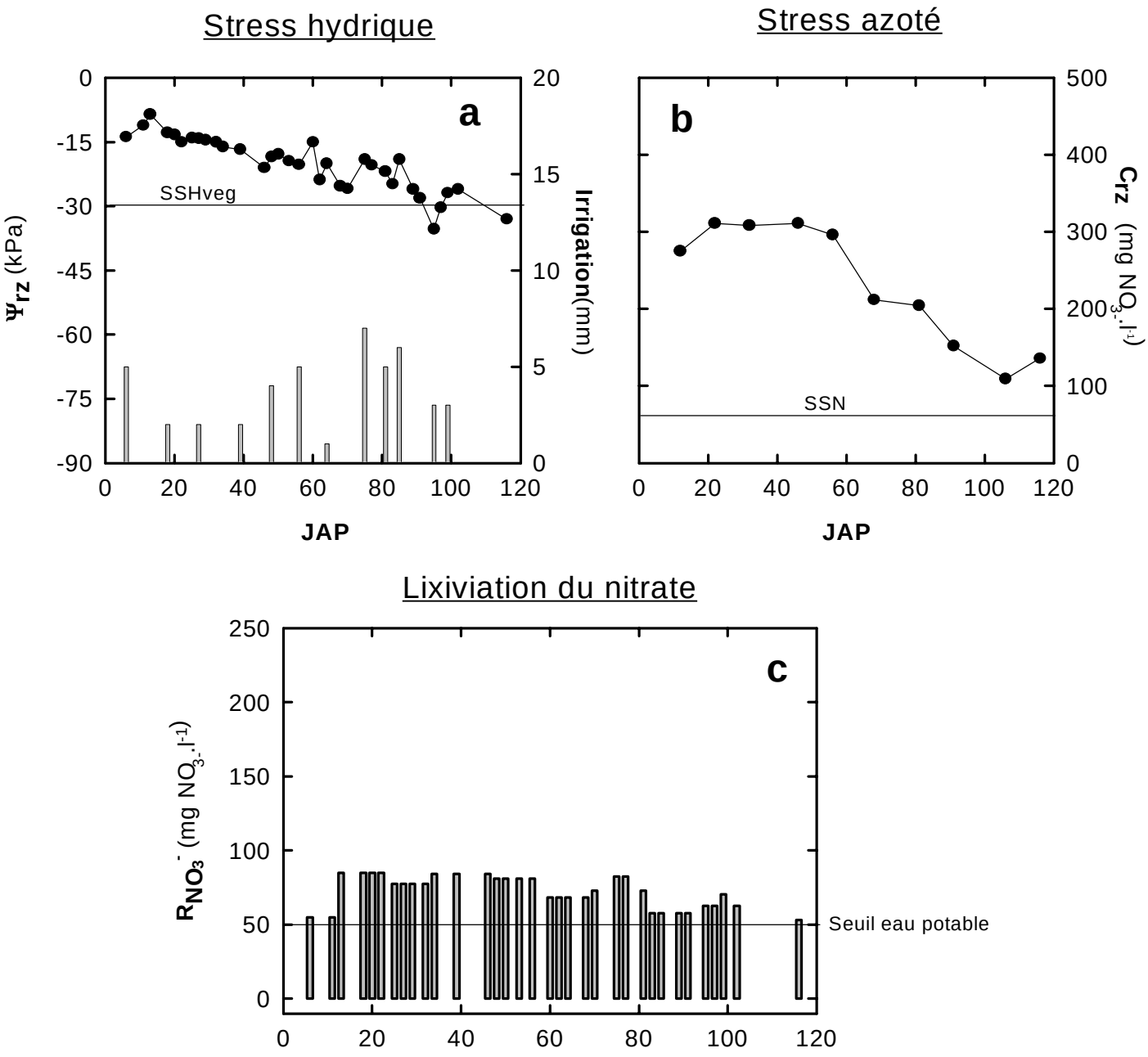


Figure I.5 : Evolution au cours du temps (a) du potentiel hydrique du sol dans la zone racinaire (ψ_{rz}, symboles) et des irrigations (barres), (b) de la concentration en nitrate de la solution du sol dans la zone racinaire (C_{rz}), (c) de l'indicateur de lixiviation du nitrate (R_{NO_3}) calculé entre 50 et 70 cm de profondeur pour les sites a et b de la situation S4. Chaque point représente la moyenne des 2 sites. Les lignes horizontales représentent (a) le seuil de stress hydrique pour la croissance foliaire (SSHveg), le seuil de stress azoté pour la croissance (SSN), le seuil de potabilité de l'eau (SEP).

avaient apportées par irrigation. Elles ont pu seulement être estimées pour les situations où des pluviomètres avaient été installés sur la parcelle (S2, S4, S5, S10, S11, S13).

Au cours de l'entretien avec chaque agriculteur, nous avons également essayé de déterminer le mode de raisonnement appliqué aux pratiques de fertilisation et d'irrigation en essayant de distinguer s'il utilisait des recommandations standard ou s'ils se fiait aux indicateurs de l'état du sol ou de la culture pour ajuster la fréquence et ou les doses des apports. Les apports d'eau et d'azote avant la plantation sont en général effectués de façon systématique sans tenir compte de l'état du sol. Dans trois situations (S10, S11 et S12), le stock d'azote nitrique dans la couche 0-30 cm a été mesuré avant la plantation pour calculer la dose d'engrais à apporter. Cette mesure n'a pas été faite par les agriculteurs eux-mêmes mais par des conseillers techniques indépendants. Dans les 3 situations, la dose d'engrais apportée par les agriculteurs a été supérieure au conseil fourni. Pour les apports en cours de cycle, les agriculteurs ajustent leurs pratiques à partir d'une appréciation visuelle de l'état de la culture (couleur des feuilles, stade de développement) pour la fertilisation et l'irrigation, d'une évaluation au toucher de l'humidité du sol ou en tenant compte du climat (sens des vents dominants, rayonnement) pour l'irrigation.

Dans la suite, nous détaillons l'évolution au cours du temps des indicateurs de diagnostic pour 5 des 14 situations. Les 3 premières (S4, S11, S13 resp. fig. I. 5, I. 6 et I. 7) représentent 3 cultures sous abri froid réalisées à la même période (de novembre 1997 à mars 1998), sur des sols similaires mais par 3 agriculteurs différents, de manière à identifier l'importance du système de production sur le fonctionnement du système sol-plante. Les 2 autres situations étudiées présentent les 2 autres cultures fréquemment rencontrées sur la zone : une culture de tomates sous abri froid (S7, fig. I. 8), et une culture de melons en plein champ (S14, fig. I. 9). Pour ces 5 situations et les 9 autres, les résultats du diagnostic sont par ailleurs présentés au travers d'indicateurs synthétiques dans le tableau I. 4.

1.3.2. Evolution du potentiel hydrique dans la zone racinaire (ψ_{rz}) comme indicateur dynamique du stress hydrique

Comme il a été montré par Cuny *et al.* (1998), le dispositif utilisé permet de caractériser une parcelle par la moyenne des valeurs de ψ_t et C_{NO3}^- obtenues sur les 3 sites de mesure. Ceci est possible quand l'évolution de ces variables au cours du temps est identique entre les 3 sites, malgré des différences en valeurs absolues. C'est le cas pour toutes les situations étudiées sauf S4. Dans cette situation, un des sites (site c) a été traité séparément car il présentait pour

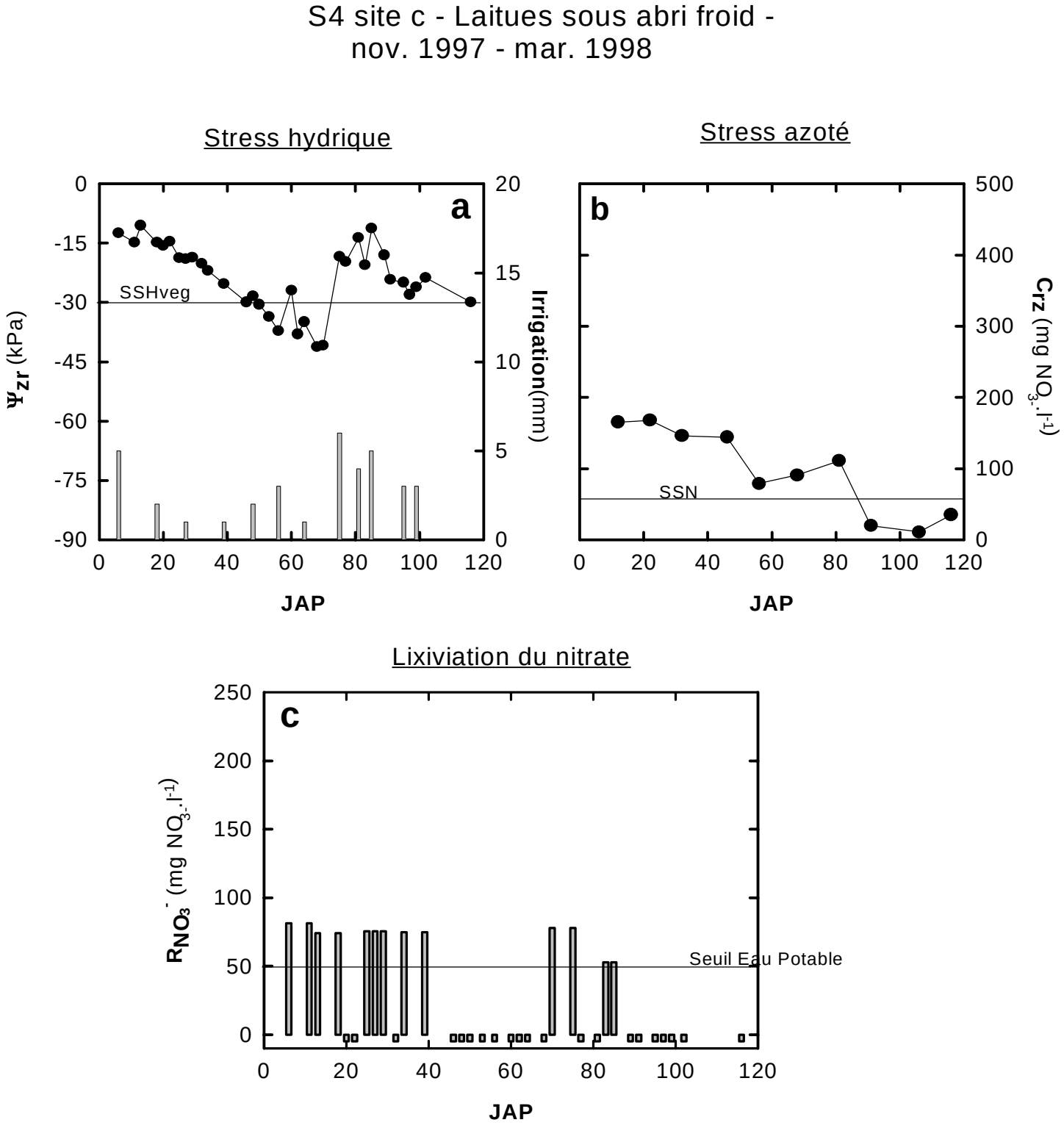


Figure I.6 : Evolution au cours du temps (a) du potentiel hydrique du sol dans la zone racinaire (ψ_{rz}, symboles) et des irrigations (barres), (b) de la concentration en nitrate de la solution du sol dans la zone racinaire (C_{rz}), (c) de l'indicateur de lixiviation du nitrate (R_{NO_3}) calculé entre 50 et 70 cm de profondeur pour les sites c de la situation S4. Les lignes horizontales représentent (a) le seuil de stress hydrique pour la croissance foliaire (SSHveg), le seuil de stress azoté pour la croissance (SSN), le seuil de potabilité de l'eau (SEP).

le potentiel hydrique du sol (fig. I. 10a) un comportement particulier par rapport aux 2 autres sites (sites a et b), dont on a présenté la moyenne (fig. I.5).

Pour les cultures de laitues S11 et S13 (fig. I.7a et I.8a), ψ_{rz} est quasiment constant au cours du cycle et demeure supérieur à –20 kPa, c'est à dire au dessus du seuil de stress hydrique pour la croissance foliaire que nous avons fixé à –30 kPa. Pour la culture de laitue S4, l'évolution de ψ_{root} pour les sites a et b (figure I.5a) montre une diminution progressive au cours du cycle avec des remontées ponctuelles correspondant aux irrigations. Le seuil de –30 kPa est dépassé sur de courtes périodes dans les 20 derniers jours du cycle. Pour ces 3 situations, le risque de stress hydrique est faible. C'est également le cas pour l'ensemble des cultures de laitues (situations S1 à S5, S8 à S11 et S13), et pour une culture de tomates sous abri (S6), pour lesquelles le pourcentage de mesures inférieures à – 30 kPa varie entre 0 et 10% (tab. I.4). La moyenne de ψ_{root} pour ces situations se situe entre –6.6 ± 1.5 kPa (S8) et –20.1 ± 6.8 kPa (S4), soit au dessus du seuil de stress hydrique pour la croissance foliaire. Comme il a été montré pour la parcelle S4, les périodes de stress se situent surtout en fin de cycle, au cours de la période de récolte.

Pour le site c de la situation S4, le pourcentage de mesures inférieures à –30kPa est de 21% contre 7% pour les sites a et b (tab. I.4). Sur ce site, ψ_{root} est inférieur à –30 kPA du 45ème au 70ème JAP (Jour Après Plantation), puis il remonte au dessus ce seuil jusqu'à la fin de la culture (fig. I.6a). Des pluviomètres installés sur chaque site de mesure ont montrés que les doses d'irrigation reçues au niveau de ce site étaient 40% inférieures à celle des 2 autres sites au cours de la première moitié du cycle. Ce problème a été signalé au producteur au cours de la phase de stress, ce qui lui a permis de détecter et corriger un dysfonctionnement du système d'aspersion au niveau de ce site. Malgré cela, la culture a montré un retard de croissance sur cette zone du tunnel qui a entraîné un retard dans la récolte par rapport aux deux autres sites.

Pour la culture de tomates sous abri S7 (fig. I.9a), et pour les cultures de melons S12 et S14 (fig. I.10a) l'évolution de ψ_{root} présente deux phases distinctes. De la plantation au début de la récolte (55 DAP pour S7 et S12, 45 DAP pour S14), ψ_{rz} se situe autour de –10 kPa, au dessus des seuils de stress (-30 kPa pour la période végétative, -60 kPa pour la période reproductrice). A partir du début de la récolte, ψ_{rz} diminue et dépasse le seuil de –30 kPa. Pour S7 et S14 (fig. I.9a et I.10a), ψ_{root} évolue alors en dent de scie, avec des périodes de dessèchement jusqu'à des valeurs de potentiels proches de –60 kPa, suivies de périodes de réhumectation à des potentiels supérieures à –30 kPa correspondant à des irrigations, ou à des précipitations dans le cas de S14. Pour la culture de melons sous abri froid S12 (fig. I.10a),

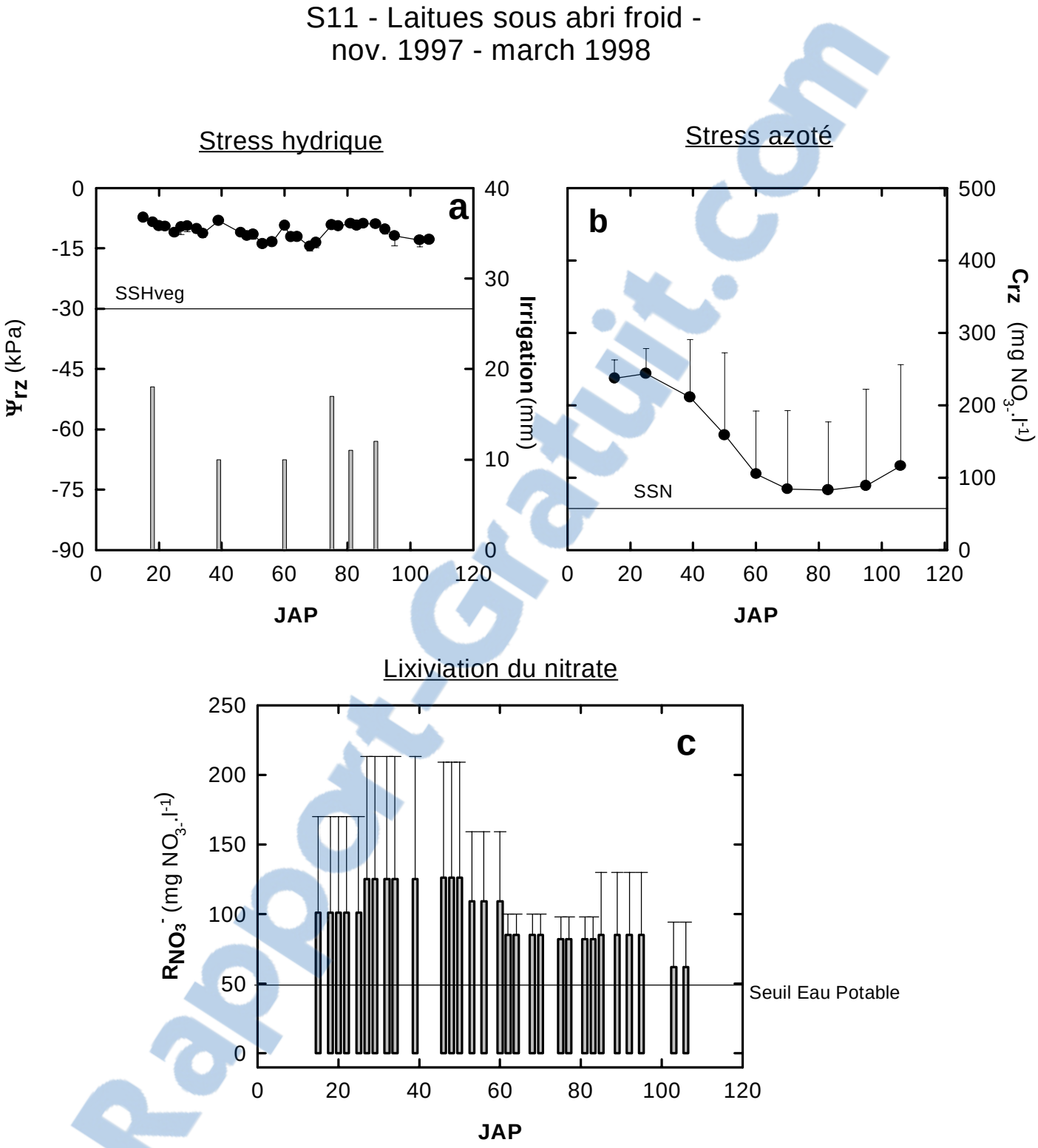


Figure I.7 : Evolution au cours du temps (a) du potentiel hydrique du sol dans la zone racinaire (ψ_{rz}, symboles) et des irrigations (barres), (b) de la concentration en nitrate de la solution du sol dans la zone racinaire (C_{rz}), (c) de l'indicateur de lixiviation du nitrate (RNO_3) calculé entre 50 et 70 cm de profondeur pour la situation S11. Chaque point représente la moyenne des 3 sites. Les lignes horizontales représentent (a) le seuil de stress hydrique pour la croissance foliaire (SSHveg), le seuil de stress azoté pour la croissance (SSN), le seuil de potabilité de l'eau (SEP).

Rapport-Gratuit.com

ψ_{rz} diminue progressivement jusqu'à –60 kPa, sans remonter périodiquement à des valeurs plus élevées comme dans les cas précédents. Au cours de cette période, entre le début de la récolte et l'arrêt de la culture, le seuil de stress hydrique pour la croissance foliaire est fréquemment dépassé (17% des mesures <-30 kPa pour S7, 45% pour S12, et 16% pour S14), alors que le seuil de stress hydrique pour le développement reproducteur est plus rarement atteint (5% des mesures <-60 kPa pour S7, 17% pour S12 et 3% pour S14) (tab. I.4).

1.3.3. Evolution de la concentration en nitrate dans la zone racinaire (C_{rz}) comme indicateur dynamique du stress azoté

Pour la culture de laitue S13, C_{rz} est stable au cours du premier mois après la plantation, à des valeurs moyennes autour de 700 mg $NO_3^-.l^{-1}$ (fig. I.8b). Les teneurs augmentent ensuite pour atteindre plus de 1000 mg $NO_3^-.l^{-1}$ à 45 DAP, elles se stabilisent puis croissent de nouveau, plus progressivement, au cours du 3ème mois de culture pour arriver à 1500 mg $NO_3^-.l^{-1}$ à la récolte. Ces deux augmentations de C_{root} correspondent aux 2 apports de nitrate de chaux réalisés en cours de culture à 40 et 78 JAP. Dans cette situations, les mesures de C_{rz} sont en permanence bien supérieures au seuil de stress azoté de 62 mg $NO_3^-.l^{-1}$, la moyenne de C_{rz} sur le cycle est de 1236 ± 644 mg $NO_3^-.l^{-1}$ (tab. I.4).

Pour les autres situations, le pourcentage de mesures inférieures à 62 mg $NO_3^-.l^{-1}$ varie entre 4 et 77% (tab. I.4). La moyenne des valeurs de C_{rz} sur le cycle est supérieure au seuil de stress pour 11 de ces situations (de 66 à 294 mg $NO_3^-.l^{-1}$), et légèrement inférieure à ce seuil pour les 2 situations restantes (53 mg $NO_3^-.l^{-1}$ pour S6 et S14) (tab. I.4). Ces valeurs présentent en fait une forte hétérogénéité dans le temps comme en témoignent les écartypes élevés (tab. I.4). Dans ces situations, l'évolution de C_{rz} au cours du cycle est similaire à celle observée pour S4, S7, S11 et S14 (fig. I.5b et I.6b, I.7b, I.9b, I.10b). Les concentrations les plus élevées (entre 160 et 300 mg $NO_3^-.l^{-1}$) sont observées en début de cycle. Elles diminuent ensuite après le premier mois de culture pour S7, S11 et S14, et après 2 mois pour S4. Pour les cultures de laitues (S4, S11), cette chute est progressive jusqu'à la fin du cycle, les concentrations sont alors de 100 mg $NO_3^-.l^{-1}$ en moyenne. Sur certaines placettes, le seuil de 62 mg $NO_3^-.l^{-1}$ est atteint à la fin de la culture (fig. I.6b). Pour les cultures de tomates et de melons (S7, fig. I.9b et S14, fig. I.10b), la baisse est rapide jusqu'à la moitié du cycle et les teneurs se stabilisent alors jusqu'à la récolte à des valeurs faibles, inférieures à 10 mg.l-1 pour S7 et autour de 25 mg $NO_3^-.l^{-1}$ pour S14. Ces cultures présentent les risques de stress azoté les plus important avec plus de 50% des mesures de C_{rz} inférieures au seuil de 62 mg $NO_3^-.l^{-1}$ (70% pour S6, 56% pour S7, 67% pour S12 et 77% pour S14) (tab. I.4).

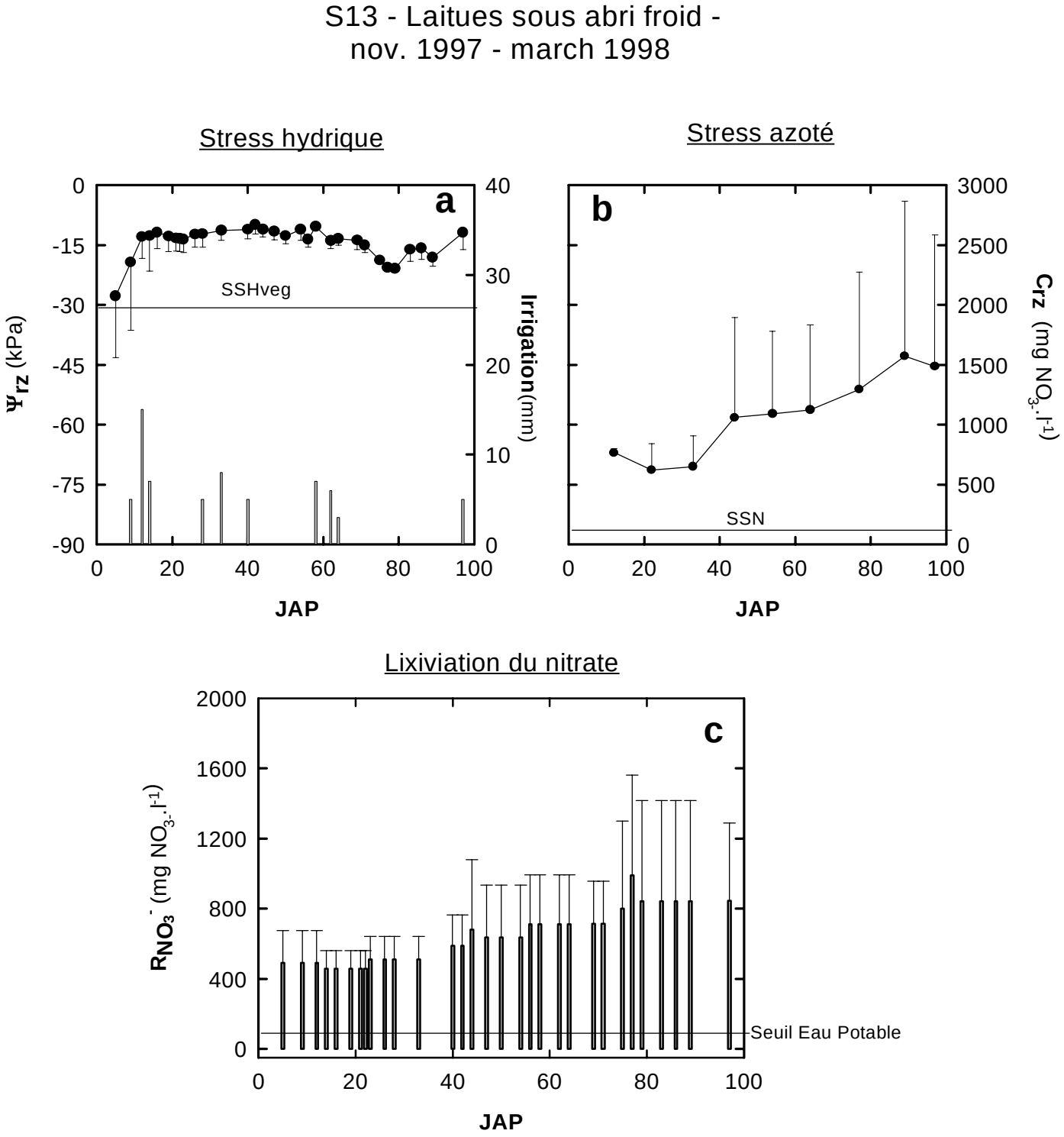


Figure I.8 : Evolution au cours du temps (a) du potentiel hydrique du sol dans la zone racinaire (ψ_{rz}, symboles) et des irrigations (barres), (b) de la concentration en nitrate de la solution du sol dans la zone racinaire (C_{rz}), (c) de l'indicateur de lixiviation du nitrate (R_{NO_3}) calculé entre 50 et 70 cm de profondeur pour la situation S13. Chaque point représente la moyenne des 3 sites. Les lignes horizontales représentent (a) le seuil de stress hydrique pour la croissance foliaire (SSHveg), le seuil de stress azoté pour la croissance (SSN), le seuil de potabilité de l'eau (SEP).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.3.4. Diagnostic de lixiviation du nitrate sous la zone racinaire.

Les périodes de drainage (R_{NO3}^- >0) couvrent quasiment la totalité de la durée du cycle pour S4, S11, S13 et S14 (figures I.5c, I.7c, I.8c, I.10c). Pour S4, S11 et S14, les valeurs de R_{NO3}^- évoluent peu au cours du temps contrairement à la situation S13 pour laquelle elles augmentent régulièrement de la plantation à la récolte. La concentration moyenne en nitrate de l'eau drainée sur le cycle est supérieure au seuil de potabilité de l'eau de 50 mg $NO_3^-.l^{-1}$ pour toutes ces situations (72 ±11 mg $NO_3^-.l^{-1}$ pour S4, 99 ± 20 pour S11, 641 ± 152 pour S13 et 63 ± 7 pour S14) (tab. I.4). Le risque de pollution par le nitrate de la nappe superficielle est donc important pour ces situations.

Pour la culture de tomates S7 (fig. I.9c), les flux en profondeur (R_{NO3}^- <0) s'inversent en milieu de cycle au cours de la phase où les ψ_{rz} diminuent et passent en dessous de –300 mbars (fig. I.9a). Malgré cela, la lixiviation du nitrate demeure importante puisque les périodes de drainage occupent les deux tiers du cycle, avec une concentration en nitrate moyenne de l'eau drainée de 86 mg $NO_3^-.l^{-1}$ (tab. I.4).

Pour le site c de la situation S4 ,le drainage a lieu jusqu'à 40 DAP (fig. I.6c), puis les flux en profondeur s'inversent (R_{NO3}^-<0) entre 40 et 70 DAP. Le drainage reprend alors jusqu'à 85 DAP et puis s'annule à nouveau jusqu'à la fin du cycle. Le pourcentage de jours de mesure où R_{NO3}^- est positif est de 38% contre 100% pour les 2 autres sites de S4 (tab. I.4). L'inversion du gradient de potentiel hydrique (R_{NO3}^- <0) entre le 40ème et le 75ème DAP correspond à la période de stress hydrique pour la culture induite par un asperseur défectueux qui a été remplacé ensuite (fig. I.6a).

Sur 8 des 9 autres situations (S1, S2, S5, S6, S8-S10 et S12), le pourcentage de jours où R_{NO3}^- >0 est supérieur à 60% des mesures effectuées, avec des concentrations en nitrate moyenne des flux drainants variant entre 34 ± 9 (S12) et 662 ± 68 mg $NO_3^-.l^{-1}$(S5). Pour S3, l'absence de lixiviation est lié à la remontée de la nappe superficielle au contact de la zone racinaire. Dans cette situation, déjà analysée dans un article précédent (Cuny *et al.*, 1998), la présence de la nappe a pu être identifiée grâce aux mesures de potentiel hydrique à 70 cm, et a été confirmée par des données piézométriques.

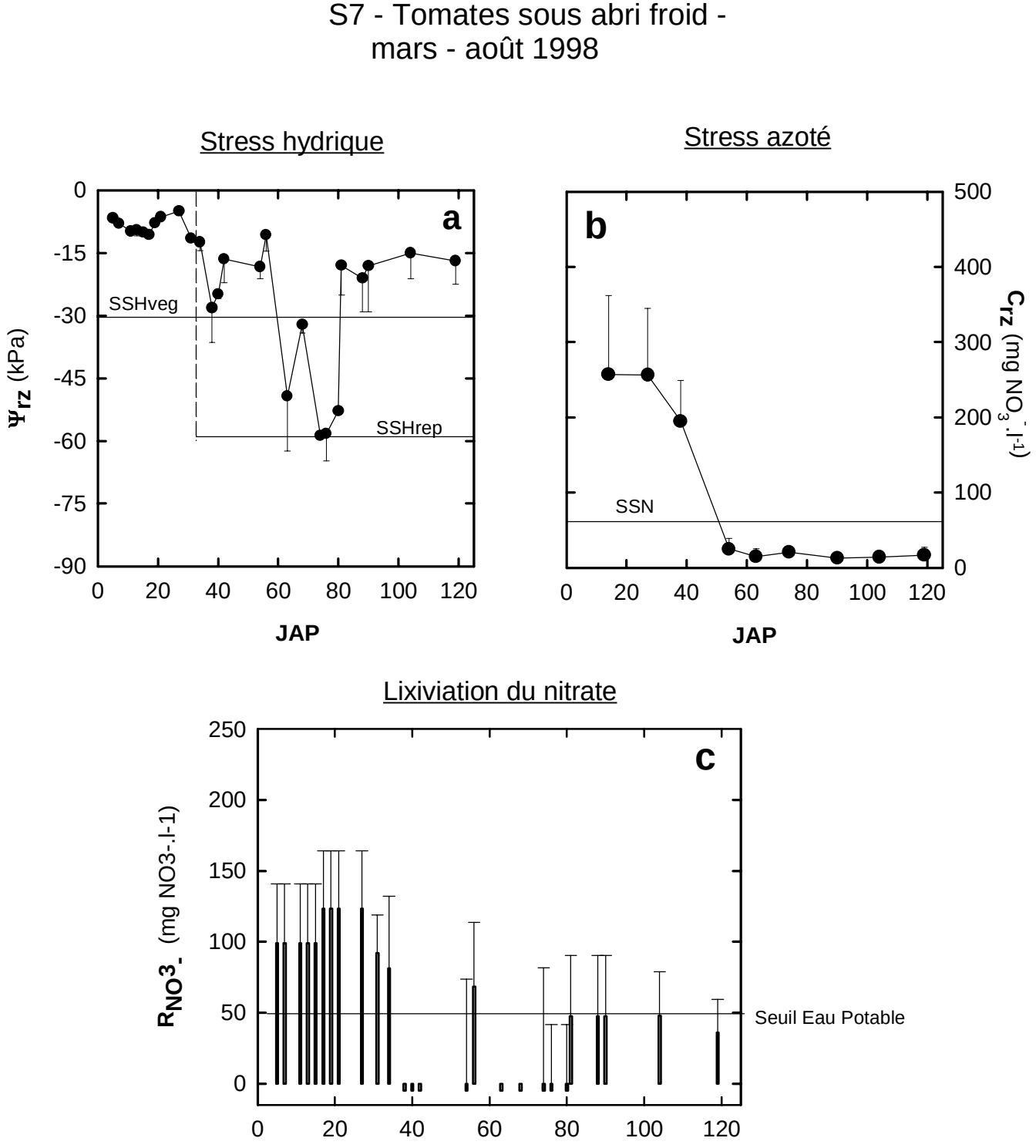


Figure I.9 : Evolution au cours du temps (a) du potentiel hydrique du sol dans la zone racinaire (ψ_{rz}, symboles) et des irrigations (barres), (b) de la concentration en nitrate de la solution du sol dans la zone racinaire (C_{rz}), (c) de l'indicateur de lixiviation du nitrate (R_{NO_3}) calculé entre 70 et 90 cm de profondeur pour la situation S7. Chaque point représente la moyenne des 3 sites. Les lignes horizontales représentent (a) le seuil de stress hydrique pour la croissance foliaire et le développement reproducteur (SSHveg, SSHrep), le seuil de stress azoté pour la croissance (SSN), le seuil de potabilité de l'eau (SEP).

1.4. Discussion

1.4.1. Diagnostic des stress hydrique et azoté

Les indicateurs dynamiques et synthétiques de l'état hydrique (ψ_{rz}) et azoté du sol dans la zone racinaire (C_{rz}) ont été utilisés pour l'évaluation des stress hydrique et azoté pour la culture.

Selon ces indicateurs, on observe des stress dans 8 situations sur 13, mais ce sont des stress temporaires et modérés qui n'ont probablement eu aucun effet important sur le rendement, sauf dans le cas du site c de S4. Pour des cultures à cycle court comme la plupart des espèces légumières, ces types de stress vont réduire la croissance foliaire, la production de biomasse et le rendement s'ils ont lieu en début de cycle (Burns, 1991 ; Burns and Miles, 1992). Dans toutes les situations (sauf pour le site c de S4), ψ_{rz} et C_{rz} ne descendent jamais en dessous des seuils de stress au cours de la première moitié du cycle pour les laitues et avant le début de la récolte pour les cultures de melons et de tomates (fig. I.5 à I.10). Dans le cas du site c de S4, ψ_{rz} est inférieur au seuil pendant 20 jours en début de cycle (fig. I.6a) ce qui a provoqué une baisse de rendement et un retard dans la date de récolte de la zone de l'abri concerné. Cette situation illustre la sensibilité de la laitue à des stress hydriques temporaires et d'intensité modéré (ψ_{rz} est demeuré > à 50 kPa) en début de culture. Dans les autres cultures de laitues, les stress tardifs observés ont certainement eu des effets mineurs sur le rendement car, comme nous le verrons plus loin (cf. chapitre V), ils ont lieu pendant le développement des feuilles qui représentent moins de 20% du poids frais final. D'autre part, les mesures de C_{rz} montrent que le nitrate devient limitant pour la croissance en fin de cycle. Alt et Struwe (1982) (cités par Dapoigny, 1997) suggèrent qu'un déficit d'azote dans le sol à cette période favorise la mobilisation du nitrate interne et va limiter l'accumulation de nitrate dans les tissus. On peut donc considérer que l'état azoté du sol est alors optimal pour la qualité des laitues car elle permet de réduire la concentration en nitrate dans les feuilles à la récolte pour laquelle il existe des seuils notamment pour l'exportation (De Tourdonnet, 1998).

Les cultures de melons et de tomates ont subi des niveaux de stress hydriques plus élevés que les laitues, mais ces stress peuvent considérés comme modérés et acceptables pour le développement des fruits car ψ_{rz} n'est jamais descendu en dessous du seuil de –60 kPa fixé pour ce processus. Selon Bissuel-Belaygue et al. (2002a et b) sur le trèfle blanc, Turner and Rawson (1982) sur le tournesol et Izzeldin et al. (1980) sur la laitue pour la production de semences, ce type de contrainte hydrique permet de ralentir la croissance végétative sans

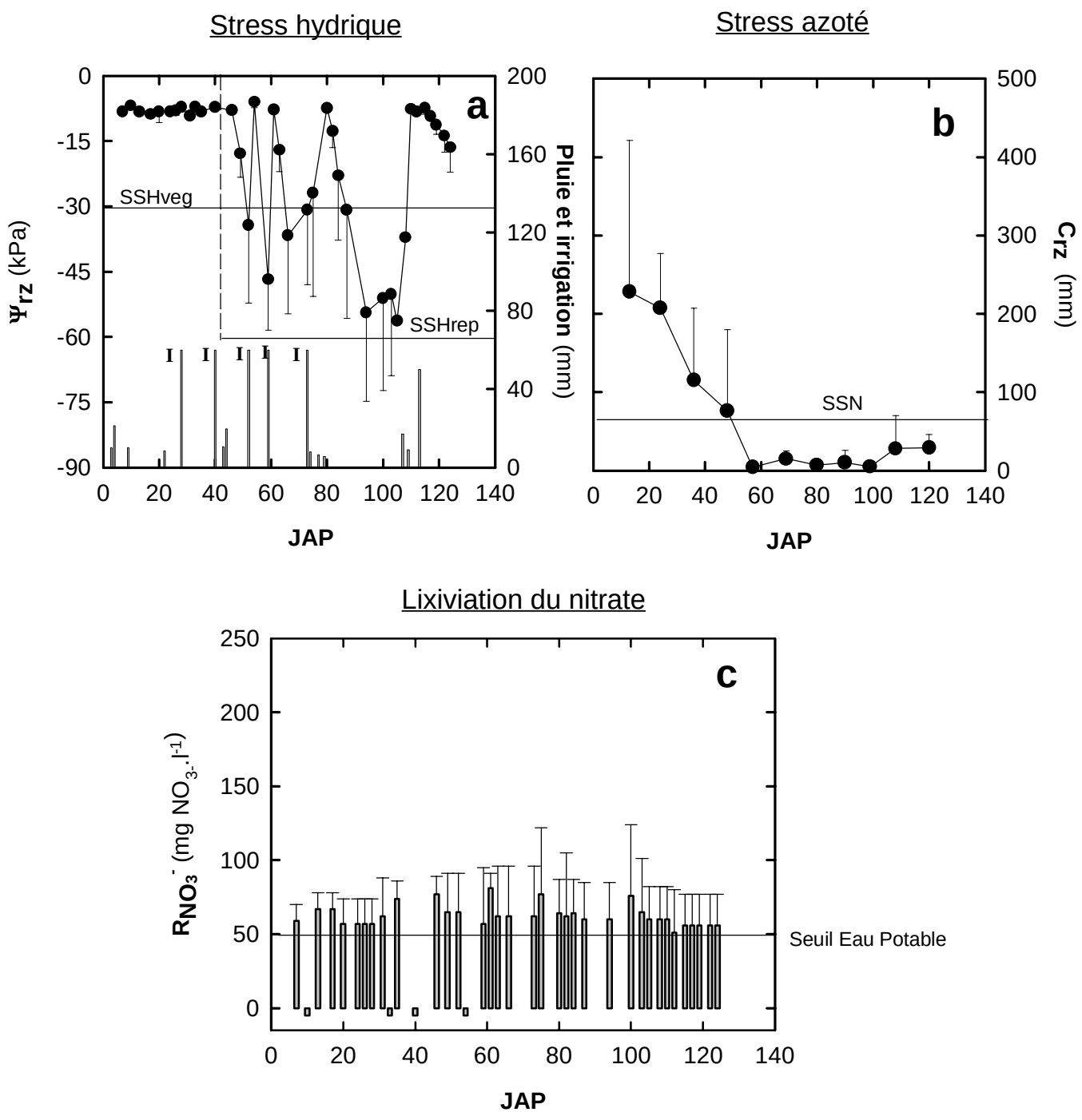


Figure I.10 : Evolution au cours du temps (a) du potentiel hydrique du sol dans la zone racinaire (ψ_{rz}, symboles) et des irrigations (barres), (b) de la concentration en nitrate de la solution du sol dans la zone racinaire (C_{rz}), (c) de l'indicateur de lixiviation du nitrate (R_{NO_3}) calculé entre 70 et 90 cm de profondeur pour la situation S14. Chaque point représente la moyenne des 3 sites. Les lignes horizontales représentent (a) le seuil de stress hydrique pour la croissance foliaire et le développement reproducteur (SSHveg, SSHrep), le seuil de stress azoté pour la croissance (SSN), le seuil de potabilité de l'eau (SEP).

avoir d'effet significatif sur le développement reproducteur et l'assimilation de carbone, et donc sur le rendement et la qualité des grains.

Les valeurs de C_{rz} après la récolte sont par contre très faibles pendant près de 2 mois dans chaque situation alors que la culture est en pleine production (fig. I.9b et I.10b). Selon notre seuil, le stress est important, alors que les agriculteurs ne semblent pas constater de pertes de rendement. Des évolutions similaires de la teneur en nitrate dans les 30 premiers cm du sol ont été observés pour des cultures de maïs à fort niveau de rendement (Salardini et al., 1992 ; Cosserat et al., 1990). Salardini et al. (1992) montre par ailleurs que le rendement des cultures de maïs qu'ils suivent est mieux corrélé à la quantité d'azote minéral dans la couche 0-60 cm que la quantité dans la couche 0-20 cm. Ces résultats suggèrent que l'évaluation de la disponibilité en azote pour la culture doit tenir compte de la profondeur d'enracinement au cours du cycle. Pour les cultures de melons et de tomates, les racines peuvent atteindre facilement 80 cm contrairement à des cultures de laitues dont l'enracinement est limité aux 40 premiers cm du sol (Greenwood et al., 1982). Notre indicateur de stress azoté à partir d'une mesure de la concentration en nitrate à 30 cm surestime donc probablement les risques de stress azoté pour des cultures à enracinement profond comme le melon et la tomate. Pour ces deux cultures, on peut donc considérer que les stress hydriques ou azotés observés correspondent à des états du sol favorables recherchés par les agriculteurs pour favoriser le développement des fruits au détriment des feuilles.

1.4.2 Analyse de la lixiviation du nitrate

Une seule situation ne présente aucun risque de pollution nitrique des eaux souterraines. Il s'agit de la situation S3, déjà analysée dans un précédent article (Cuny et al., 1998), pour laquelle l'absence de risque, selon cet indicateur, s'explique par la présence de la nappe au niveau des tensionics implantés sous les racines. Toutefois, on ne peut totalement exclure le risque de pollution de la nappe dans cette situation compte tenu de sa proximité de la surface (<1m). Dans les 13 autres situations, les risques sont élevés. Ils se caractérisent par des périodes de drainage occupant plus de 60 % de la durée du cycle et des teneurs moyennes en nitrate de l'eau drainée au cours du cycle entre 34 et 641 mg NO_3^-. l^{-1}, supérieures à la norme de 50 mg NO_3^-. l^{-1} dans 11 situations sur 13. Ce diagnostic rejoint les observations faites par Bruckler et al. (1997) dans cette région, et dans d'autres pays (Demyttenaere et al., 1990 ; Jackson et al.,1994 ; Guimerà et al., 1995) sur les niveaux de risques de pollution nitrique élevés en parcelles de cultures légumières, ou en cultures irriguées. Ces niveaux de risques sont par ailleurs largement supérieurs à ceux enregistrés sur des parcelles de vigne ou de

grandes cultures non irriguées sur la zone étude (Cuny et al., 1998). Dans ces situations, malgré les épisodes de drainage fréquents, les concentrations en nitrate de l'eau drainée sont largement inférieures à celles observées en cultures légumières. En dehors de la situation S13, qui présente des valeurs de R_{NO3}^- 4 à 10 fois plus élevées que pour les autres situations, les risques de pollution ne sont pas différents entre les situations en agriculture conventionnelle et celles en agriculture biologique. Ces résultats sont en accord avec les conclusions de Kirchmann et Bergstrom (2001) sur la comparaison des pertes en azote pour les deux modes de culture. Nos résultats montrent également que les risques de lixiviation du nitrate sont aussi importants en culture de plein champ qu'en culture sous abri, alors que pour ces dernières les flux d'eau sont à priori plus faciles à contrôler à cause de l'absence de pluies.

On constate par ailleurs, que l'absence de drainage (R_{NO3}^- =0) dans certaines situations correspond généralement avec les périodes au cours desquelles ψ_{root} diminuent et atteint le seuil de –30 kPa, comme le montre la situation S4c (fig I.6). Ces périodes au cours desquelles le sol se dessèche en surface sont essentiellement localisées en fin de cycle, alors que les teneurs en nitrate sont les plus faibles (fig. I.5, I.6, I.7, I.9 et I.10). Par contre, on observe toujours du drainage en début de cycle quand les concentrations en nitrate dans la zone racinaire sont élevées.

1.4.3. Analyses des pratiques des agriculteurs

L'analyse du fonctionnement des dynamiques de l'eau et de l'azote dans et sous la zone racinaire aboutit au même diagnostic pour toutes les situations suivies malgré la diversité des cultures et des systèmes de production. Dans tous les cas, les agriculteurs ajustent leurs apports d'eau et d'azote pour éviter tout risque de stress hydrique ou azoté (cas des cultures de laitues), ou pour optimiser ce risque au bénéfice de la production de fruits, donc du rendement (cas des cultures de melons et de tomates). La seule situation pour laquelle un stress hydrique a été observée (site c de la situation 4) correspond à un dysfonctionnement du système d'irrigation, réparé dés que le problème a été signalé au producteur. Cette absence de risque est d'abord due à des apports massifs d'eau et d'azote avant la plantation qui créent un environnement avec des teneurs en eau et azote élevées autour des racines. Ces pratiques conduisent systématiquement à une importante lixiviation du nitrate au cours de la première moitié du cycle.

Selon la terminologie de Bellon et al. (2001), ces pratiques correspondent à des pratiques standard, répétées d'une culture à l'autre, définies par les agriculteurs à partir de leur expérience personnelle ou de conseils techniques, et appliquées sans tenir compte de l'état

hydrique et azoté du sol. A l'opposé, les interventions en cours de cycle vont être effectuées après une évaluation de l'état du milieu et de la culture par les agriculteurs. Pour la fertilisation, les apports en cours de cycle sont rares, et représentent des quantités faibles par rapport à l'apport initial. Ceci explique la chute de C_{rz} observée dans toutes les situations (sauf S13) dés que la croissance de la culture s'accélère. Les apports d'eau sont plus fréquents en cours de cycle, en quantité variable selon les situations mais aboutissent au même comportement du système sol-plante. Ces irrigations vont maintenir un état hydrique non limitant (pour les laitues) ou optimum par rapport à la production de fruits (pour les tomates et les melons) dans la zone racinaire. Les indicateurs visuels et les règles de décision utilisés par les agriculteurs leur permettent donc d'éviter ou d'optimiser les déficits hydriques pour les cultures.

1.5. Conclusion

Les indicateurs de diagnostic élaborés à partir des mesures effectuées avec les tensionics dans et sous la zone racinaire ont été utilisés dans une gamme de situations agronomiques variées pour évaluer le comportement du système sol-plante avec des critères intéressant à la fois les agriculteurs (stress hydrique et azoté pour la culture) et les gestionnaires de l'eau (lixiviation du nitrate). Dans les situations étudiées, un diagnostic aussi précis et pertinent nécessiterait certainement plus de temps et de dépenses pour être réalisé à partir d'enquêtes auprès des agriculteurs (Bellon et al., 2001), ou de modèles de culture (Stockle et al., 1994 ; Lafolie et al., 1997). L'analyse des pratiques des agriculteurs en fonction de ces indicateurs indique que leur gestion des apports d'eau et d'azote, basée sur l'état visuel de la plante et de la surface du sol, permet d'**éviter ou optimiser les stress subis par les plantes**. Dans le même temps, leurs pratiques **maximisent les risques de pollution nitrique** dont ils ne peuvent se rendre compte. **Au delà de ce diagnostic, l'agronome doit pouvoir proposer à l'agriculteur des solutions techniques pour réduire les risques de pollution nitrique liés à ces pratiques**. Les actions menées pour lutter contre la pollution des eaux par le nitrate d'origine agricole sont généralement centrées sur une meilleure gestion de l'azote à l'échelle du cycle et de la rotation (Machet et al., 1997 ; Meynard et al., 1997). Dans les situations que nous avons étudiées, les doses d'engrais apportées aux cultures (tab. I.2) sont inférieures aux recommandations faites dans le programme d'actions de la directive Nitrates (120 $kgN.ha^{-1}$ pour les cultures de laitues, 380 $kgN.ha^{-1}$ pour celles de tomates et 190 $kgN.ha^{-1}$ pour celles de melons sous serre ; DIREN, LR., DDAF, 1998) dans 10 situations sur 14. Les doses n'ont pu être déterminées dans deux des quatre situations restantes (S12 et S14) et elles sont

supérieures à ces normes dans les deux autres (S8 et S9) sans que le risque de pollution nitrique soit plus élevé dans ces situations que dans les autres (tab I.4). De façon générale, aucune relation claire n'apparaît entre la quantité d'azote fournie à la culture et la lixiviation du nitrate. Cela peut s'expliquer par la non prise en compte du stock d'azote minéral avant la plantation pour calculer la dose d'engrais a apporter, alors que ces stocks sont parfois largement suffisants pour couvrir les besoins de la plante comme c'était le cas dans S10. Une première solution pour améliorer les pratiques de fertilisation dans les situations étudiées consisterait donc à ajuster les apports d'engrais aux besoins de la culture en fonction des autres sources d'azote minéral pour les plantes. La méthode du bilan prévisionnel issue des travaux de Rémy et Hébert (1977), et largement développée en grandes cultures, est un outil intéressant pour cela mais est encore peu utilisée en cultures maraîchères. La mise en œuvre de cette méthode nécessite d'estimer les principales entrées et sorties d'azote minéral du système en dehors de la fertilisation. Une des principales difficultés de cette méthode réside dans la prévision de la minéralisation de l'azote organique du sol, qui constitue une source non négligeable de nitrate potentiellement lixiviable (Mac Donald et al., 1989 ; Bel et al., 1999). Si de nombreuses références sur la minéralisation sont disponibles en grandes cultures (Mary et Recous, 1994 ; Recous et al., 1997), il en existe peu pour les cultures légumières pour lesquelles ce processus est certainement quantitativement important compte tenu des conditions favorables d'humidité (stock plein), de température (abri + paillage plastique) et de teneur en matière organique des sols (cf. tab. I.3) dans ces systèmes (De Cockborne et al., 1997, Bertuzzi et al., 2002). Dans nos situations, la difficulté de prévision du nitrate produit par minéralisation est amplifiée par l'utilisation importante de fertilisants organiques (engrais + amendements, cf. tab. I.2) de formes et d'origine très variées dont on ne connaît pas le potentiel de fourniture d'azote minéral (Robin, 1997 ; Nicolardot et al., 1998 ; Robin et Berling, 1998). La méthode ZENIT (Thicoïpe et Roger-Estrade, 1991), inspirée de la méthode du bilan et mise au point pour plusieurs cultures maraîchères dont la laitue (CTIFL, 1999), permet de prendre en compte indirectement la minéralisation en proposant de fractionner le calcul du bilan et les apports selon les stades de développement de la culture à partir d'une mesure du stock d'azote minéral à ces stades. Cette approche nécessite de pouvoir réaliser des apports en cours de culture ce qui n'est pas faisable dans toutes les situations que nous avons étudiées, notamment pour l'exploitation E1 en agriculture biologique pour laquelle l'interdiction d'utiliser des engrais minéraux de synthèse rend difficile le fractionnement des apports. Pour ce mode de production, la fertilisation basée uniquement sur des produits

Rapport-Gratuit.com

organiques apportés à la plantation pose un problème de synchronisation de la disponibilité en azote minéral du sol et des besoins de la plante (Pang et Letey, 2000).

La réduction de la lixiviation du nitrate par la gestion des apports d'azote a donc des limites dans les situations étudiées, d'autant plus que les possibilités techniques sont restreintes dans certains modes de production comme en agriculture biologique (exploitation E1). D'autres solutions sont envisageables à l'échelle de la succession culturale comme notamment l'introduction de cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN) dans les rotations (Jackson et al., 1993; Bressoud, 2002).

En cultures irriguées, une meilleure gestion des irrigations peut également permettre de réduire les risques de pollution en cours de cycle en limitant les périodes de drainage (Snyder et al., 1984 ; Sexton *et al.*, 1989; Musharrafieh et al., 1995 ; Leenhardt et al., 1998). Cela est d'autant plus vrai pour les cultures menées sous abri pour lesquelles la gestion des apports d'eau ne dépend pas du régime des précipitations comme pour les cultures de plein champ (Cataluna, 1998), et concerne quasi exclusivement le cycle cultural puisque aucun apport n'est effectué en interculture. Peu d'actions sont menées dans le cadre des programmes d'action de lutte contre la pollution nitrique d'origine agricole pour promouvoir des pratiques d'irrigation plus respectueuses de l'environnement. Les méthodes qui existent pour piloter les apports d'eau (bilan hydrique, tensiométrie) ont été développées pour optimiser la production sans prendre véritablement en compte l'impact sur la qualité des eaux. Pour être acceptées par les agriculteurs, les pratiques d'irrigation permettant de limiter le drainage, donc la lixiviation du nitrate, doivent également garantir le maintien d'un niveau de rendement et de qualité des produits suffisants en minimisant les stress pour la culture. La mise au point de telles stratégies limitant à la fois les risques pour l'environnement et pour la production est difficile en cultures légumières car les espèces concernées sont très sensibles aux stress hydriques (Bar-Yosef et Sagiv, 1982b; Thompson et Doerge, 1995 ; Fabeiro et al ., 2002). Cette difficulté est bien illustrée par le cas du site c de S4. Dans cette situation, la diminution de ψ_{rz} au cours de la première moitié du cycle a permis de supprimer le drainage mais a engendré un stress hydrique temporaire (20 jours) et modéré (-30 kPa< ψ_{rz} <-45 kPa), et une perte de rendement pour la culture. Il est donc nécessaire de déterminer la sensibilité du rendement de la culture au stress hydrique pour pouvoir développer des pratiques d'irrigation permettant de diminuer les risques de pollution en limitant les risques pour la production.

1.6. Objectifs de la thèse

L'objectif du travail de thèse est d'élaborer un outil permettant d'évaluer les risques de pollution nitrique et les pertes de rendement liés aux pratiques d'irrigations en cultures irriguées. La méthode proposée devra permettre (i) de porter un **diagnostic** sur les risques de pollution nitrique et les pertes de rendement liés aux pratiques des agriculteurs, (ii) de réaliser un **pronostic** de l'impact, pour ces deux critères d'évaluation, de stratégies d'irrigation alternatives définies en fonction des résultats du diagnostic pour les situations où les niveaux de ces critères ne seraient pas conformes aux objectifs de production et/ou de préservation de la qualité de eaux (figure I. 11).

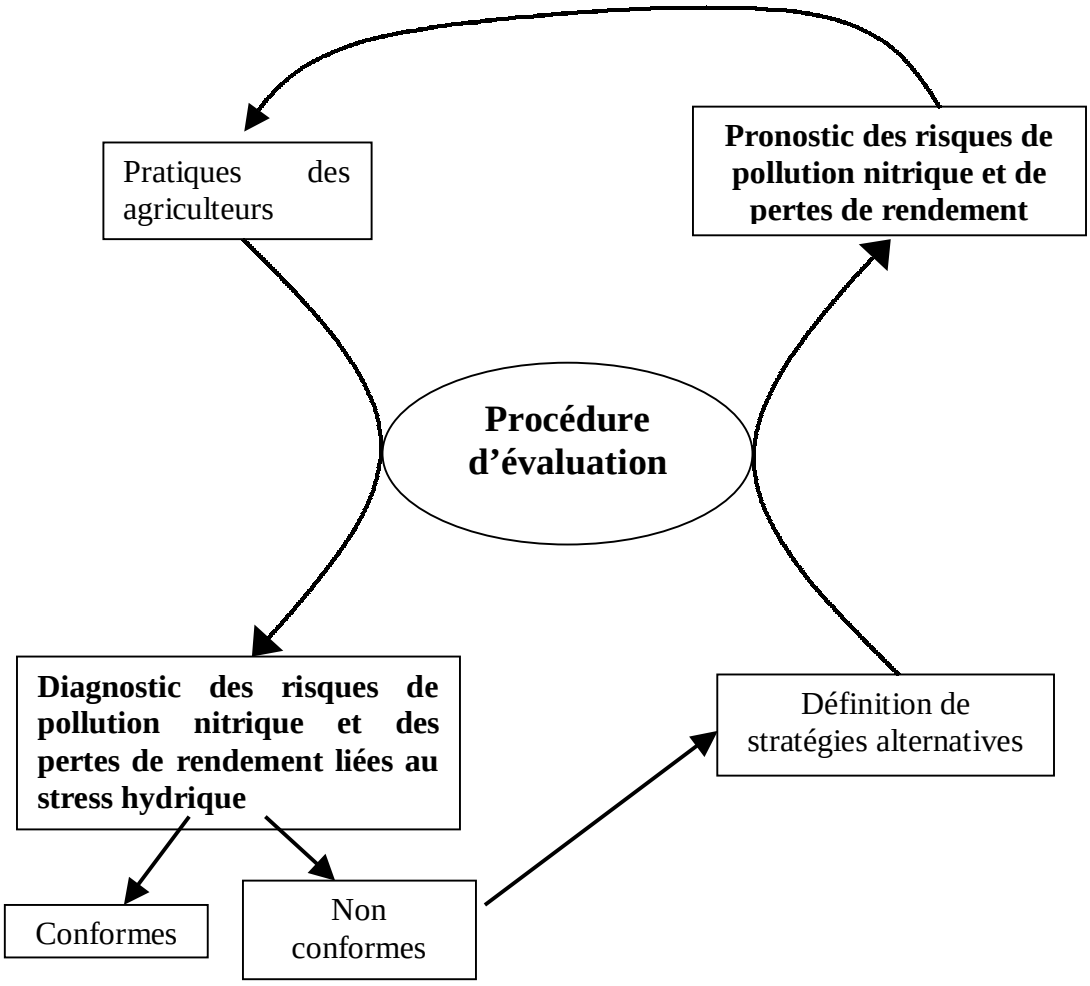


Figure I.11 : Principe de la démarche de diagnostic -pronostic des pratiques d'irrigation

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

La démarche que nous proposons serait applicable à plusieurs cultures légumières, mais le travail de thèse a été centré sur les cultures de laitues sous abri froid pour des raisons essentiellement d'ordre méthodologique. Un travail important d'analyse et de modélisation du fonctionnement d'une culture de laitues sous abri froid pour des systèmes de culture proches de ceux de notre zone d'étude avait été réalisé par De Tourdonnet (1998). Il existait des possibilités de collaboration avec des stations du CTIFL[2] et de l'INRA travaillant sur cette culture.

Dans la partie suivante, nous définissons, à partir des résultats de l'étude présentée ci dessus et de la bibliographie, le cahier des charges de cet outil de diagnostic-pronostic sur les pratiques d'irrigation.

2. Définition du cahier des charges d'un outil d'évaluation des risques de pollution nitrique et de pertes de rendement liés aux pratiques d'irrigation.

2.1. Méthodologie de l'évaluation

2.1.1 Principe d'un outil d'évaluation

Les critères de performance agronomique et environnemental utilisés par les agriculteurs et les gestionnaires de l'eau résultent de processus biophysiques complexes qui ne peuvent être quantifiés directement et de manière simple en parcelles agricoles. La démarche d'évaluation va consister à caractériser des variables d'état du système permettant de décrire ces processus, puis à élaborer à partir de ces variables les indicateurs sur lesquels va porter l'évaluation proprement dite, c'est à dire la comparaison avec les critères de performances de l'agrosystème que les acteurs utilisent (Wery et al., 2001). La méthode d'élaboration de l'indicateur de lixiviation du nitrate $R_{NO_3^-}$ illustre bien cette procédure: les potentiels hydriques et les concentrations en nitrate mesurées sous les racines constituent les variables d'état du système qui permettent de calculer l'indicateur $R_{NO_3^-}$ qui est comparé avec le seuil de potabilité de l'eau qui correspond au critère de référence pour les gestionnaires de l'eau.

2.1.2. Qualités d'un outil d'évaluation

L'élaboration d'un outil d'évaluation s'articule donc autour des questions (i) du choix des indicateurs pertinents du point de vue du ou des évaluateurs, (ii) du choix des variables d'état

[2] CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes.

du système nécessaires pour bâtir ces indicateurs, (iii) du choix des méthodes d'acquisition de ces variables. Le choix des indicateurs, et par conséquent des variables d'état, doit être **pertinent** à deux niveaux : (i) celui du fonctionnement du système biophysique pour rendre compte de la manière la plus fidèle des processus en jeu. La pertinence à ce niveau va dépendre des variables d'état et des procédures utilisées pour le calcul des indicateurs; (ii) celui du mode de décision des acteurs (agriculteurs, gestionnaires de l'eau) qui vont piloter les pratiques agricoles. Cela implique que l'indicateur soit élaboré à l'échelle d'espace et au pas de temps correspondants aux critères de performances de l'agrosystème utilisé par ces acteurs. Les méthodes d'acquisition des variables d'état du système doivent être à la fois **robustes et pratiques** pour pouvoir être mises en œuvre dans le cadre d'une démarche d'évaluation en parcelles agricoles (Sulser et al., 2001). Elles doivent être utilisables dans une large gamme de situations agronomiques[3] , être peu coûteuses en temps et en matériel, faciles à mettre en œuvre sans gêner les interventions culturales, et fournir des résultats rapidement pour pouvoir réaliser l'évaluation dans un délai compatible avec les prises de décision des acteurs.

2.1.3. Méthodes pour l'élaboration des indicateurs

On distingue trois types de méthodes d'acquisition des variables d'état pour élaborer des indicateurs. La plus simple à mettre en œuvre, mais également la plus indirecte, consiste à estimer ces variables à partir de données sur les itinéraires techniques et les caractéristiques du milieu disponibles sur l'exploitation ou à partir d'un entretien avec l'agriculteur (Benoît, 1992 ; Bockstaller et al., 1997). Cette procédure est utilisée pour construire des indicateurs dont l'objectif est généralement de pouvoir comparer un nombre important de situations à un moindre coût. La qualité de l'évaluation est limitée par la qualité des renseignements obtenus, qui dépend directement de la capacité des agriculteurs à décrire précisément leurs pratiques (Bellon et al., 2001), ou de leur réticence à fournir certaines informations quand il s'agit de réaliser une expertise environnementale de leur exploitation (Yiridoe, 2000). L'utilisation de ces indicateurs nécessite par ailleurs de les valider sur des données mesurées ou simulées de l'impact des pratiques sur le fonctionnement du système (Benoît, 1992).

L'utilisation de variables mesurées permet d'élaborer des indicateurs quantitatifs à domaine de validité plus large (Girardin et al ; 1999) comme le stock d'azote minéral du sol en début de période de drainage ; (Vereijken, 1997). La principale difficulté de ce type d'approche est de mettre au point des dispositifs de mesure robustes et facilement applicables en parcelles agricoles. Fujisaka (1991) souligne cependant l'importance de ce type de mesure pour réaliser

[3] Chacune étant définie comme une combinaison sol-climat-espèce-itinéraire technique.

une évaluation plus précise des pratiques agricoles et comme support concret pour le dialogue avec l'agriculteur sur ses pratiques.

La modélisation est le troisième type de méthode utilisable pour l'acquisition des variables d'état du système, notamment dans le cas où la mesure de ces variables est impossible ou requière des dispositifs trop lourds. Pour être opérationnels pour l'évaluation en parcelles agricoles, les modèles doivent avoir été validés pour les systèmes étudiés et avoir besoin d'un nombre restreint de paramètres pour fonctionner. L'utilisation de modèle est par ailleurs essentielle pour l'évaluation a priori (pronostic) de pratiques alternatives conçues en fonction des résultats de l'évaluation des pratiques des agriculteurs (Sebillotte, 1990 ; Aubry *et al.*, 1997 ; Rossing *et al.*, 1997). Cette approche se développe de plus en plus au détriment de l'approche expérimentale classique car elle permet de tester un grand nombre de possibilités techniques et de conditions climatiques.

2.1.4. Conclusion

Compte tenu de cette analyse, nous pouvons préciser le contenu de la procédure d'évaluation indiquée dans la figure I.11. L'objectif de l'évaluation est de diagnostiquer d'une part, de prédire d'autre part, les risques de pollution nitrique et de pertes de rendement en fonction des pratiques d'irrigation des agriculteurs et alternatives pour des cultures de laitues sous abri froid. Les processus biophysiques qui vont être affectés par les pratiques d'irrigation, et dont doit rendre compte la procédure d'évaluation, sont l'impact de l'état hydrique du sol sur le rendement des plantes et la lixiviation du nitrate sous la zone racinaire. A l'autre extrémité de la procédure, les critères de performance des acteurs du système sont le rendement pour l'agriculteur et la concentration en nitrate de la nappe pour le gestionnaire de l'eau. Pour réaliser l'évaluation, il nous faut définir les variables d'état et les indicateurs pertinents caractérisant les processus biophysiques et compatibles avec les critères de décision, et les procédures permettant d'acquérir les variables et de calculer les indicateurs. Dans ces procédures, l'utilisation de modèles est indispensable pour pouvoir réaliser un pronostic de stratégies alternatives.

2.2. Comment évaluer les risques de pollution nitrique en parcelles agricoles ?

2.2.1. Quelle démarche d'évaluation des risques de pollution nitrique ?

L'indicateur $R_{NO_3^-}$ utilisé dans l'étude préminaire (§ 1) n'est pas un indicateur suffisant pour évaluer le risque de pollution nitrique à la parcelle. En effet, même s'il permet de déterminer le sens des flux d'eau et la teneur en nitrate de l'eau drainée, il ne donne pas les quantités

d'eau drainée ni les quantités d'azote perdues. Cette lacune peut être la cause d'un biais dans le diagnostic car selon les volumes d'eau drainés, la quantité d'azote perdue ne sera pas la même pour deux parcelles présentant la même concentration en nitrate sous les racines (Cuny *et al.*, 1998). L'indicateur des risques de pollution nitrique le plus pertinent à la sortie de notre système est la quantité d'azote nitrique lixivié en dessous des racines (Nlixi, kg $N\text{-}NO_3^-.ha^{-1}$). Cet indicateur est indispensable pour l'évaluation du risque aux niveaux supérieurs d'évaluation que sont l'exploitation et le bassin d'alimentation (Mary et al., 1997). Il est par ailleurs cohérent avec les critères de raisonnement de la fertilisation azotée (exprimée en kg $N\text{-}NO_3^-.ha^{-1}$).

D'un point de vue métrologique, seuls les dispositifs lysimétriques (Ballif et Muller, 1990) permettent de mesurer directement les flux de nitrate sous les parcelles. La lysimétrie est considérée comme la méthode de référence pour évaluer les risques de pollution nitrique à la parcelle (Addiscott, 1990 ; Scokart et al., 1990 ; Webster et al., 1993) mais le coût et la lourdeur de ces dispositifs limitent leur utilisation pour l'évaluation des pratiques. Il n'existe par ailleurs pas d'outils applicables en parcelles permettant de mesurer directement les flux d'eau dans le sol. Le sens de ces flux peut être estimé simplement à partir de mesures de potentiel hydrique (Cuny et al., 1998) mais le calcul des volumes d'eau drainées nécessite la détermination de la conductivité hydraulique du sol qui n'est pas facile à caractériser au champ. On distingue en fait deux méthodes pour quantifier la lixiviation du nitrate à l'échelle de la parcelle. La première consiste à combiner des concentrations en nitrate de la solution du sol sous les racines à un modèle de bilan hydrique simulant le drainage (Webster et al., 1999). La deuxième consiste à modéliser conjointement la dynamique de l'eau et de l'azote dans les sols (De Willigen, 1991).

Dans la suite nous présentons les outils disponibles pour mesurer la concentration en nitrate de la solution du sol et modéliser les dynamiques de l'eau et de l'azote.

2.2.2. Mesure de la concentration en nitrate de la solution du sol

Méthodes de mesure

La mesure de la concentration en nitrate (CNO3) est assez souvent utilisée en parcelles agricoles. Cette mesure consiste à extraire la solution du sol puis à doser le nitrate soit par des méthodes de laboratoire (Black, 1965) soit par des méthodes d'analyse rapide (Sims et al., 1995). La solution du sol peut être extraite sur un échantillon de sol prélevé à la tarière (Lafleuriel, 1990), ou au travers d'une céramique poreuse implantée dans le sol (Poss et al.,

1995). Le principe de l'extraction de la solution du sol sur un échantillon de sol consiste à mélanger l'échantillon à un liquide extractif, généralement une solution de KCl. Ce mélange est agité pendant une heure puis filtré ou mis à décanter au frais avant analyse (Lafleuriel, 1990). L'extraction de la solution du sol à l'aide de céramiques poreuses peut être réalisée (i) en appliquant à l'intérieur de la céramique une dépression supérieure au potentiel hydrique du sol (extraction active), (ii) en laissant s'équilibrer une solution d'eau déminéralisée introduite dans la céramique avec la solution du sol par diffusion passive des ions nitrate (extraction passive). Le premier mode d'extraction correspond au fonctionnement des bougies poreuses, le deuxième à celui des tensionics (Moutonnet et al., 1993).

L'utilisation de ces méthodes pour l'évaluation des risques de pollution nitrique pose deux questions : (i) celui de l'échantillonnage des mesures, (ii) celui de la signification de la mesure de concentration.

Problème de l'échantillonage

La question de l'échantillonnage est liée au problème de la variabilité spatiale des teneurs et des flux de nitrate dans le sol au niveau d'une parcelle agricole (Addiscott, 1996). Des variations importantes du stock et des flux de nitrate ont ainsi été observées pour des cultures de laitues de plein champ (Lafolie et al., 1997) et sous abri froid (De Tourdonnet et al., 2001). Dans le cadre d'une expérimentation sur une culture de laitues sous abri froid mise en place en liaison avec notre travail de thèse, la moyenne des stocks d'azote nitrique sur 0-50 cm mesurés en 39 points répartis sur une grille d'une maille de 1m x 1m était de 170.8 kg N-$NO3.ha^{-1}$ avec un écart-type de 104.1 kg N-$NO3.ha^{-1}$ représentant un coefficient de variation de 61% (Bertuzzi, comm. pers.). Lindeman (1986) (cité par Lafleuriel, 1990) a montré que le nombre de prélèvements de sol qu'il est nécessaire d'effectuer pour représenter correctement le stock d'azote nitrique dépend de la variabilité spatiale de ce stock. Selon ses résultats, l'incertitude sur la moyenne des stock calculés pour chaque échantillon diminue de 51 à 11% pour un nombre d'échantillons variant de 4 à 36.

Dans le cadre d'une démarche d'évaluation en parcelles agricoles, le choix du nombre de points de mesure doit également tenir compte du coût de la mesure, du temps nécessaire à la mesure et à la gène qu'elle peut engendrer sur la parcelle. Pour les prélèvements de sol, le nombre de 10 à 12 échantillons par parcelle recommandé par la norme AFNOR X31/115 (AFNOR, 1999) semble de fait un bon compromis entre les préoccupations de représentativité et de mise en œuvre pratique de la mesure. Pour les bougies poreuses et les tensionics, le nombre de points de mesure est généralement plus faible compte tenu du prix des appareils

(30 à 60 euros l'unité). Benoît et al.(1993) ont utilisé 7 bougies poreuses pour évaluer les risques de pollution nitrique dans une parcelle agricole. Dans la démarche de Cuny et al. (1998), que nous avons utilisée dans l'étude préliminaire, le nombre de 3 sites de mesure représente le dispositif minimum qui puisse être utilisé. Malgré le faible nombre de mesures, les dispositifs utilisant des céramiques poreuses présentent l'avantage de pouvoir suivre l'évolution de la concentration en nitrate de la solution du sol en un point donné contrairement aux prélèvements de sol qui sont destructifs et de ce fait introduisent dans les cinétiques temporelles observées un bruit lié à la variabilité spatiale (Lord et Shepherd, 1993). **On peut donc dire que si les prélèvements de sol permettent de mieux rendre compte de l'hétérogénéité spatiale de la teneur en nitrate des sols à l'échelle de la parcelle, les dispositifs avec des céramiques poreuses permettent de mieux caractériser l'évolution de ces teneurs au cours du temps.**

Signification de la mesure de concentration en nitrate

Selon les auteurs, la comparaison des concentrations en nitrate mesurées à partir des prélèvements de sol et des céramiques poreuses donne des résultats très différents. Webster et al. (1993) et Grossman et Udluft (1991) montrent que les concentrations mesurées sur les échantillons sont plus élevées que celles mesurées sur les solutions extraites des céramiques. Ces résultats sont conformes à l'idée généralement admise selon laquelle les céramiques ne permettent de prélever que l'eau la plus mobile du sol considérée comme moins concentrée que l'eau contenue dans l'ensemble du volume poral du sol. Néel (1996) trouve que les teneurs mesurées sur les céramiques sont supérieures à celles obtenues sur les échantillons de sol, et donc que la phase mobile de l'eau est plus concentrée que la totalité de la solution du sol. Selon cet auteur, cela peut s'expliquer par un phénomène d'exclusion anionique dû à la présence de charges négatives à la surface de la matrice poreuse qui repousserait les anions vers le centre des pores. Enfin, Moutonnet et al. (1993) et Poss et al. (1995) n'observent pas de différences entre les deux méthodes de mesure.

Ces résultats très contrastés suggèrent la prudence dans la comparaison des mesures de concentrations en nitrate de la solution du sol avec ces deux méthodes. Par rapport à l'évaluation des risques de pollution nitrique, Webster et al. (1993) ainsi que Magid et Christensen (1993) montrent, sur des expérimentations mettant en œuvre plusieurs dispositifs de mesure de la lixiviation du nitrate, que les teneurs en nitrates mesurées avec des céramiques poreuses sont proches de celles obtenues avec des lysimètres. Selon Poss et al. (1995) les mesures effectuées avec les tensionics représenteraient la concentration des flux

tandis que celles réalisées avec les bougies poreuses représenteraient la composition instantanée de la solution du sol. **Les dispositifs à céramiques poreuses seraient donc plus adéquats que les prélèvements de sol pour évaluer la concentration en nitrate de l'eau drainée.**

Problèmes méthodologiques liés à l'utilisation des deux méthodes

En dehors de la question de l'échantillonnage, les prélèvements de sol ne posent aucun problème méthodologique particulier. L'inconvénient majeur de cette méthode est son aspect destructif qui introduit dans le suivi temporel une erreur due à la variabilité spatiale.

Les bougies poreuses et les tensionics permettent de faire des suivis en un point donné et peuvent être laissés en place pour suivre des successions culturales ou des cultures pérennes sur plusieurs mois voire plusieurs années. Ces suivis posent toutefois le problème du travail du sol qui peut détériorer le dispositif. Pour résoudre ce problème, Benoît et al (1995) ont utilisé un dispositif complètement enterré à 1 m de profondeur comprenant 7 bougies reliées à un abri de mesure situé à 30 m de distance au bord de la parcelle par des tubes souples protégés dans un tuyau en PVC. Ce dispositif ne présente aucune gêne pour les interventions culturales mais il est lourd à mettre en œuvre et à entretenir. Une autre solution consiste à baliser et protéger les sites de mesure pour éviter qu'ils ne soient endommagés par le travail du sol et à reproduire manuellement le travail du sol autour des appareils de mesure (Cuny et al., 1998). En cultures maraîchères, cette solution est difficilement applicable, en particulier sous abri, du fait du mode de culture en planches et de l'utilisation de paillage. Il faut donc retirer et réinstaller les appareils à la fin de et au début de chaque culture. C'est un inconvénient par rapport aux systèmes laissés en place car l'installation des bougies poreuses et des tensionics est une phase délicate qui doit être réalisée soigneusement pour éviter que des cheminements préférentiels de l'eau ne se fassent le long des appareils (Lord et Shepherd, 1993) ou que la teneur en nitrate du sol à la profondeur de mesure ne soit faussée par des apports exogènes au cours de l'installation (Cuny et al., 1998). Les céramiques poreuses présentent également l'inconvénient de ne fonctionner que dans une gamme de potentiel hydrique limitée entre 0 et -80 kPa. Les suivis présentés dans la section 1 montrent que l'absence de mesure au delà de ce seuil n'est pas gênant pour le diagnostic des risques de pollution nitrique car il n'y a alors plus de drainage sous les racines.

Conclusion

La concentration en nitrate de l'eau drainée sous les racines peut donc être facilement mesurée en parcelles agricoles à partir de dispositif simples, robustes et peu coûteux adaptés à une démarche d'évaluation des risques de pollution nitrique. Le dimensionnement du dispositif de mesure doit tenir compte de la variabilité spatiale connue ou supposée des teneurs et des flux de nitrate. Les mesures effectuées avec des bougies poreuses et des tensionics représenteraient mieux la teneur en nitrate de l'eau drainée que les mesures faites sur des échantillons de sol.

2.2.3. Modélisation des dynamiques de l'eau et de l'azote dans le sol

Modélisation des transferts d'eau

De nombreux modèles existent pour simuler la dynamique de l'eau dans le système sol-plante. Ces modèles différent essentiellement par la manière dont ils représentent la consommation en eau de la culture et les transferts d'eau dans le sol (Leenhardt et al., 1995). Le choix des formalismes utilisés pour simuler l'évapotranspiration de la culture n'influe pas sur la modélisation du drainage, à condition que ces formalismes soient correctement paramétrés et validés sur des données expérimentales. Par contre, la simulation des flux d'eau en profondeur va être très sensible au type de modèle utilisé pour les transferts hydriques dans le sol. On distingue classiquement les modèles basés sur une représentation analogique de ces processus et ceux basés sur une représentation mécaniste (Addiscott and Wagenet, 1985 ; De Willigen, 1991 ; Maraux, 1994 ; Leenhardt et al., 1995).

Dans les modèles analogiques, le sol est considéré comme un empilement de réservoirs horizontaux se remplissant et se vidant successivement les uns dans les autres de la surface vers les couches profondes du sol en fonction de la capacité de chaque réservoir à stocker l'eau (Burns, 1974 ; Addiscott, 1977 ; Brisson et al., 1992). La capacité de stockage maximum d'un réservoir est égale à la quantité d'eau du réservoir à la capacité au champ. Les modèles mécanistes sont bâtis sur des équations dérivant de la Loi de Darcy qui décrit l'écoulement de l'eau dans un milieu non saturé (Richards, 1931). Dans ces modèles, les flux d'eau dépendent des gradients de potentiel hydrique et de la conductivité hydraulique du sol. Il existe également des modèles « intermédiaires » basés sur une approche de type réservoir tenant compte de la conductivité hydraulique du sol entre les différents compartiments (Gabrielle et al., 1995).

Rapport-Gratuit.com

Les modèles de type réservoir fonctionnent relativement bien et simulent correctement le drainage pour des sols sableux. Pour des sols à textures plus fines, ces modèles donnent de moins bons résultats car ils ne permettent pas de rendre compte des phénomènes de remontées capillaires qui peuvent être quantitativement importants dans le bilan hydrique (Katerji et al., 1984 ; Gabrielle et al , 1995 ; Maraux and Lafolie, 1998). Leur domaine de validité et d'application est donc réduit aux situations où ces phénomènes sont peu importants, ce qui exclu par exemple les situations dans lesquelles une nappe remonte au contact des racines. Dans ces situations, les modèles mécanistes sont plus potentiellement performants (Lafolie, 1995).

Malgré cela, l'utilisation des modèles mécanistes dans le cadre de démarches d'évaluation en routine des pratiques des agriculteurs à la parcelle est rare. La mise en œuvre de ces modèles nécessite en effet la détermination des propriétés hydrodynamiques du sol[4] dont la mesure est laborieuse et coûteuse, donc difficilement compatible avec les contraintes de telles démarches. A l'opposé, les modèles analogiques requièrent des paramètres sols, comme les teneurs en eau à la capacité au champ ou au point de flétrissement, facilement mesurables à la parcelle et disponible dans les analyses de sols couramment pratiquées. De ce fait, ces modèles sont fréquemment employés pour l'évaluation ou la prévision des risques de pollution nitrique en parcelles agricoles sans, par ailleurs, avoir forcément été validés sur les quantités d'eau drainée (Jackson et al., 1994 ; Stockle et al., 1994 ; Mayol et al., 2001).

Modélisation de la dynamique de l'azote dans le sol

La concentration en nitrate de la solution du sol résulte de processus physiques de transfert et de processus biochimiques de transformations de l'azote organique et minéral du sol (Lafolie et al., 1997. Nicolardot et al., 1997). Comme pour les transferts hydriques, de nombreux modèles plus ou moins complexes existent pour représenter ces processus (De Willigen, 1991).

Au niveau des transferts du nitrate, les modèles les plus simples considèrent que le nitrate contenu dans le sol se mélange complètement avec l'eau et suit les mouvements de l'eau (Burns, 1974). Dans les modèles mécanistes, le mouvement du nitrate est régi par l'équation de convection-dispersion qui rend compte des processus de convection (entraînement des ions avec l'eau), de dispersion hydrodynamique, traduisant les différences de vitesse d'écoulement

[4] Les propriétés hydrodynamiques d'un sol sont représentées par la relation entre le potentiel hydrique et la teneur en eau volumique du sol (courbe de rétention ou relation $\psi(\theta)$), et la relation entre la teneur en eau volumique et la conductivité hydraulique du sol (relation $k(\theta)$).

de l'eau selon la taille des pores, et de diffusion des ions en fonction des gradients de concentration présents dans le sol (Lafolie, 1995). Certains de ces modèles considèrent deux phases liquides : une phase d'eau mobile dans laquelle les nitrates sont soumis à la convection et à la diffusion, et une phase immobile dans laquelle les nitrates ne migrent que par diffusion (Lafolie, 1995).

Les processus biochimiques affectant la concentration en nitrate du sol sont l'absorption par les racines, la minéralisation de la matière organique, l'organisation de l'azote minéral, la dénitrification et la fixation atmosphérique. La fixation symbiotique est généralement considéré comme négligeable pour les sols cultivés en France sauf pour les cultures de légumineuses. La dénitrification correspond à la transformation de l'azote nitrique en azote gazeux. Elle se produit préférentiellement à des températures élevées et en conditions d'anoxie (Cellier et al., 1997 ; Germon et Couton, 1999). Les flux d'azote résultant de ce processus sont de ce fait également considérés comme négligeable pour des sols bien drainés. En cultures maraîchères, l'utilisation d'un paillage plastique et les irrigations fréquentes peuvent cependant créer des conditions favorables à la dénitrification. Pour des cultures de laitues de plein champ, Bruckler et al. (1997) simulent des taux de dénitrification pouvant atteindre 5.7 kg $N0_3$-N.jour^{-1}. La minéralisation de la matière organique est le processus quantitativement le plus important du cycle biochimique de l'azote dans les sols cultivés. Pour des cultures de laitues sous abri, différents travaux ont montré que la minéralisation pouvait fournir plus de 30% des quantités d'azote minéral nécessaires à la croissance de la culture (De Tourdonnet , 1998 ; Bertuzzi et al., 2002).

Les modèles simulant les transformations biochimiques de l'azote se distinguent essentiellement par le nombre de compartiments organiques considérés et par la prise en compte ou non des transformations du carbone (De Willigen, 1991 ; Nicolardot et al., 1997). Le modèle LIXIM par exemple (Mary et al., 1999) ne prend en compte que deux compartiments de matière organique, l'humus et les résidus organiques, et ne considère que la transformation de l'azote. A l'opposé, le modèle CANTIS (Garnier et al., 2001) simule les transformations du carbone et de l'azote de cinq pools de matière organique. L'intérêt de ce type de modèle complexe est de pouvoir simuler les transformations de l'azote pour une large gamme de situations incluant des formes de matière organique variées. Le principal inconvénient de ces modèles est qu'ils nécessitent un nombre important de paramètres pour caractériser chaque pool de matière organique et les processus impliqués dans leur transformation (Jarvis et al., 1996). Quel que soit le modèle, la modélisation de la minéralisation nécessite, pour chaque nouvelle situation, de déterminer la capacité de

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

minéralisation du sol de la parcelle et des différentes formes de matières organiques apportées (résidus de culture, fertilisants organiques). Des modèles simples existent pour prédire la minéralisation de certains produits organiques en fonction de caractéristiques biochimiques simples à déterminer (Nicolardot et al., 2001). Mais pour beaucoup de produits (notamment les fertilisants organiques, qui sont fréquemment employés en maraîchage), ce type d'approche n'est pas disponible et la capacité de minéralisation doit être déterminée au laboratoire à partir de cinétiques d'incubation (Robin, 1997 ; Nicolardot et al., 1998 ; Robin et Berling, 1998).

Conclusion

De nombreux modèles existent pour simuler les dynamiques de l'eau et de l'azote dans le sol, et pour prévoir les flux de nitrate sous les racines. On distingue en général parmi ces modèles ceux qui sont basés sur un représentation simplifiée des principaux phénomènes en jeu et ceux construits autour de relations mécanistes. Les premiers sont faciles à paramétrer mais ont souvent des domaines de validité restreints, tandis que les seconds sont, compte tenu de leur caractère mécaniste, applicables à des situations très variées mais leur utilisation en parcelles agricoles est limitée par l'accessibilité aux paramètres. De Willigen (1991) a comparé 14 modèles plus ou moins complexes simulant les dynamiques de l'eau et de l'azote dans le système sol-plante. Les conclusions de son travail sont que les modèles les plus simples ne donnent pas forcément de moins bons résultats que les modèles mécanistes, et que les principales lacunes de l'ensemble des modèles résident dans la simulation des processus biologiques du sol impliqués dans le cycle de l'azote.

2.2.4. Conclusion : choix de la démarche d'évaluation des risques de pollution nitrique

L'évaluation des quantités d'azote nitrique lixiviées sous les racines nécessite de quantifier le flux d'eau drainant sous les racines (D) et la concentration en nitrate de l'eau drainée (C_{NO_3}). L'utilisation d'un modèle de bilan hydrique est indispensable pour quantifier le drainage. La question qui se pose à ce niveau porte sur le choix du type de modèle entre les modèles mécanistes et les modèles analogiques. Les premiers présentent l'avantage de rendre compte des phénomènes de remontées capillaires qu'on observe dans nos situations mais posent le problème du paramétrage des propriétés hydrodynamiques du sol. Les seconds sont plus simples d'emploi mais présentent des limites conceptuelles qui ne leur permet pas de simuler les remontées capillaires. Un modèle mécaniste (PASTIS, Lafolie, 1991) a été adapté récemment pour simuler le bilan hydrique d'une culture de laitue sous abri froid (De

Tourdonnet, 1998). Ce travail a été par ailleurs exploité pour adapter également un modèle analogique générique pour cette culture (STICS, Brisson et al., 1998, 2002). **Nous proposons dans notre travail de comparer ces deux modèles pour leur capacité à simuler le bilan hydrique et les flux d'eau sous les racines d'une culture de laitue, et leur compatibilité avec les contraintes d'une démarche d'évaluation en parcelles agricoles.**

Le couplage d'un modèle simulant les transferts hydriques et d'un modèle simulant la dynamique de l'azote dans le système sol-plante est un outil intéressant pour prendre en compte l'ensemble des facteurs liés aux systèmes de culture et au milieu qui affectent les flux de nitrate sous les racines (DAISY, Hansen et al., 1991 ; CROPSYST, Stockle et al., 1994; STICS, Brisson et al., 1998 ; Franko et Mirschel, 2001). **Pour notre démarche d'évaluation des pratiques d'irrigation, nous avons considéré que la modélisation de la dynamique de l'azote n'était pas indispensable** dans un premier temps. Pour le diagnostic des risques de pollution nitrique, on dispose en effet de mesures de concentration en nitrate de la solution du sol extraite à l'aide de tensionic, ces mesures ayant été acquises dans la première phase du diagnostic (fig. I.11). A partir des résultats bibliographiques discutés au § 2.2.2 nous considérons ces mesures comme représentatives de la teneur en nitrate de l'eau drainée (Poss et al., 1995). **Nous proposons donc d'évaluer les risques de pollution nitrique en combinant la modélisation des flux d'eau et la mesure des concentrations en nitrate sous les racines à l'aide des tensionics.** Dans une étape ultérieure il sera possible, moyennant un travail important de paramétrage des modules azote des modèles STICS et PASTIS, d'essayer de remplacer les mesures de concentration en nitrate par la modélisation, dans des conditions compatibles avec le cahier des charges de l'outil d'évaluation (notamment diversité des sols et des fertilisants).

2.3. Evaluation des pertes de rendement d'une culture de laitues en fonction du « vécu hydrique » de la culture

2.3.1. Démarche d'évaluation

L'indicateur de stress hydrique utilisé dans l'étude préliminaire (§ 1) permet d'identifier les périodes de stress mais ne donne aucune information sur les conséquences de ces contraintes sur la production. Pour cela, il est nécessaire de disposer de relations quantitatives traduisant les effets du stress hydrique sur le rendement de la culture.

L'approche la plus simple consiste à établir des relations statistiques entre l'indicateur de stress et le rendement, mais ce type de relation n'est généralement pas robuste et est spécifique des conditions dans lesquelles elles ont été établies (Hanks et Rassmussen, 1982 ;

Thompson et Doerge, 1996). Par ailleurs, ces relations ne tiennent pas compte des différences de sensibilité du rendement en fonction de la position de la contrainte au cours du cycle (Begg and Turner, 1976). Ainsi, dans les situations étudiées dans la section 1, des potentiels hydriques dans la zone racinaire inférieurs au seuil de stress ont souvent été observés en fin de cycle (tableau I.4) sans que ces contraintes n'aient eu de conséquences importantes sur le rendement. Par contre, lorsque ce seuil a été atteint en milieu de cycle sur le site c de la situation S4 , les conséquences sur la production se sont traduites par une diminution de poids frais significative malgré le rétablissement rapide de l'état hydrique du sol à un niveau non limitant.

L'utilisation de modèles dynamiques de fonctionnement des cultures permet d'intégrer ces différences de réponse au stress en fonction des phases de développement des plantes (Cabelguenne et al., 1999). Ces modèles sont par ailleurs bâtis sur une description plus ou moins mécaniste des processus intervenant dans l'élaboration du rendement en fonction des variables du milieu qui permet de les appliquer dans une gamme de situations plus large que les relations statistiques évoquées plus haut (Cavero et al., 2000).

Il existe de nombreux modèles simulant le développement et la croissance d'une laitue (Van Holsteijn, 1980a et b ; Pearson et al., 1997 ; Tei et al., 1996a et b ; Hunt et al., 1984 ; De Tourdonnet, 1998) mais aucun d'entre eux ne rend compte de l'impact des stress hydriques sur le fonctionnement de la plante. Peu de travaux ont par ailleurs été menés sur l'analyse quantitative de l'effet du stress hydrique sur les processus déterminants le rendement d'une laitue (Gallardo et al., 1996). Le rendement d'une laitue correspondant au poids frais de la plante, l'évaluation des pertes de rendement en fonction de l'état hydrique du sol nécessite de modéliser l'impact du stress hydrique sur l'accumulation de biomasse fraîche.

2.3.2. Modélisation de l'impact du stress hydrique sur l'accumulation de biomasse d'une plante.

La production de biomasse d'une plante dépend du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par la plante (PARa, fonction de l'indice foliaire de la plante, LAI), et de sa conversion en biomasse, fonction de l'activité photosynthétique de la plante (Monteith, 1977). Ces deux processus peuvent être affectés par un stress hydrique et entraîner une réduction de la biomasse produite (De Costa et al., 1997). Les modèles de culture se distinguent essentiellement par la manière de simuler le LAI et de rendre compte des effets du stress hydrique sur cette variable (Jamieson et al., 1998). La première approche consiste à calculer le LAI en fonction de la quantité d'assimilats issus de la photosynthèse, alloués aux feuilles et

transformés en surface par un coefficient de masse surfacique (CORNGRO, Childs et al., 1977 ; SUCROS, SWHEAT, Jamieson et al., 1998). Dans ce type de modèle, le stress hydrique n'affecte que la photosynthèse. L'effet sur le LAI est indirect via la quantité d'assimilats disponibles pour la croissance. Cette approche qui relie la croissance foliaire au bilan de carbone de la plante est remise en cause par plusieurs travaux qui montrent que la croissance foliaire est réduite par un stress hydrique avant que la photosynthèse ne soit affectée (Passioura, 1994 ; Tardieu et al., 1999). Granier (1998) montre ainsi chez le tournesol que la surface foliaire de la plante peut être réduite de 45% par un stress hydrique sans que la photosynthèse n'ait été diminuée.

Une seconde approche de modélisation consiste à simuler séparément la photosynthèse et la croissance foliaire (EPIC, Cabelguenne et al., 1999 ; STICS, Brisson et al., 1998). Le LAI est alors simulé en fonction de la température, et est affecté directement et indépendamment de la photosynthèse par le stress hydrique.

Une troisième approche de modélisation de la croissance foliaire a été proposée par Lecoeur et al. (1996b) et Tardieu et al. (1999) mais n'a pas été développée pour le moment dans le cadre d'un modèle de prévision du rendement. L'objectif de cette approche est d'améliorer la prévision de la croissance foliaire en fonctions des principales conditions environnementales (température, rayonnement, état hydrique de l'eau et de l'air) notamment dans le cas de contraintes courtes et d'intensité modérées qui ne vont pas affecter le bilan de carbone de la plante. Cette approche est basée sur la modélisation du développement et de la croissance de chaque feuille en fonction de la température (Granier et Tardieu, 1998b), du rayonnement (Granier et Tardieu, 1999a), de l'état hydrique du sol (Lecoeur et al., 1995) et de l'air (Ben Haj Salah et Tardieu, 1996).

2.3.3.Choix de l'approche de modélisation de l'impact de stress hydrique sur la production de biomasse de la plante.

Pour notre démarche, le choix du type d'approche utilisée pour simuler l'effet du stress hydrique sur la croissance foliaire doit être discuté en fonction de la nature des contraintes hydriques (intensité, durée, position dans le cycle) susceptibles d'être rencontrées en conditions de culture et compatibles avec les objectifs de maintien du rendement.

Pour la laitue, de nombreux travaux portant sur la mise au point de pratiques d'irrigation pour optimiser l'irrigation montrent que les meilleurs rendements sont obtenus avec un sol maintenu à la capacité au champ au cours du cycle (Majmudar et Hudson, 1957 ; Sammis et al., 1988 ; Dullforce et Garcia, 1974 ; Sale, 1966 ; Thompson et Doerge, 1996 ; Sutton et

Merit, 1993). Le cas du site c de la situation S4 suivi dans l'étude préliminaire confirme que le rendement de la laitue est très sensible à un dessèchement temporaire (20 jours) et modéré du sol dans la zone racinaire (le potentiel hydrique n'est pas descendu en dessous de -45 kPa) se produisant au cours de la première moitié du cycle. Des stress de la même intensité mais plus tardifs semblent avoir moins d'impact sur la production (situation S9).

Les contraintes dont il faut pouvoir rendre compte pour notre démarche sont donc temporaires, modérées et précoces. Les effets de ce type de contrainte sur le LAI sont souvent mal représenté dans les modèles classiques basés sur la seconde approche présentée ci dessus qui simulent l'effet des stress directement sur l'évolution du LAI (Steduto, 1995 ; Jamieson et al., 1998). Ces lacunes viendraient d'une sous estimation de l'intensité des stress précoces et de leurs effets sur la croissance foliaire (Steduto, 1995). L'effet de ce type de contrainte sur la croissance individuelle des feuilles peut par contre être représentée à partir d'un modèle basé sur la simulation de la vitesse relative de croissance de chaque feuille en réponse aux facteurs de l'environnement (Granier et Tardieu, 1999b).

Nous proposons donc de bâtir un modèle de prévision du poids frais d'une laitue en fonction de l'état hydrique du sol basé sur la modélisation de la croissance individuelle des feuilles. Nous faisons l'hypothèse que ce type de modèle est, dans les conditions de production de la laitue, plus performant que les modèles classiques pour simuler le rendement de la culture.

L'effet des stress azotés ne sera pas considéré dans ce travail car l'étude préliminaire a montré que les concentrations en nitrate de la solution du sol n'étaient jamais limitantes dans les conditions agricoles, même pour les parcelles faisant l'objet d'apports raisonnés. Une limitation des apports d'eau pour réduire le drainage devrait plutôt augmenter ces concentrations sans pour autant réduire les flux d'eau et donc d'azote dans la plante.

3. Conclusion : présentation du travail de recherche

L'objectif de la thèse est d'élaborer une démarche d'évaluation de l'impact des pratiques d'irrigation sur les risques de pollution nitrique et les pertes de rendement en fonction de l'état hydrique du sol pour des cultures de laitues sous abri froid. Cet outil doit permettre de porter un diagnostic sur les pratiques des agriculteurs et de réaliser un pronostic sur des stratégies d'irrigation alternatives. D'un point de vue méthodologique, cette démarche se base sur la **combinaison d'outils de métrologie et de modèles dynamiques** (figure I. 12).

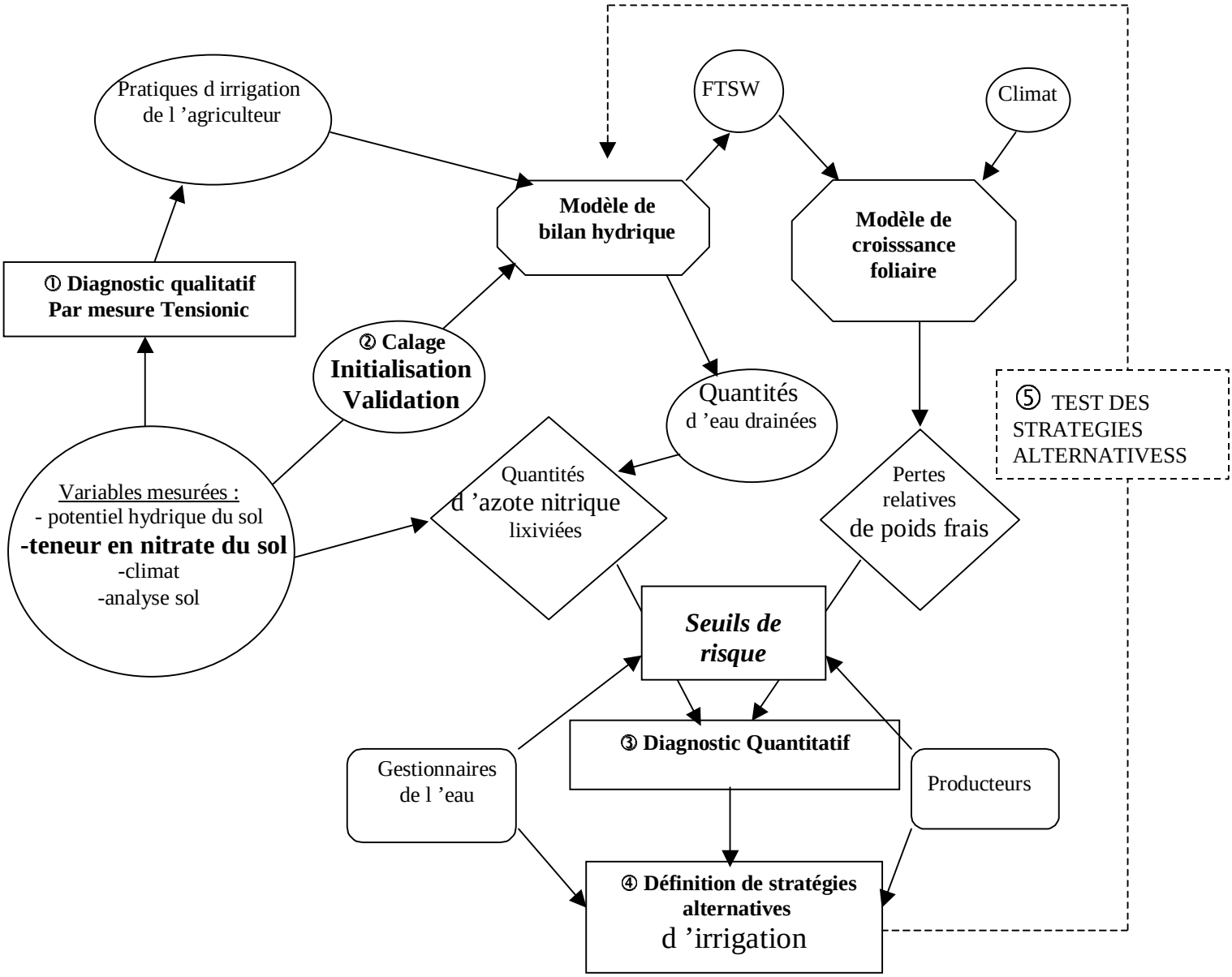


Figure I.12 : Schéma la démarche de diagnostic –pronostic de l'impact des pratiques d'irrigation sur les risques de pollution nitrique et le pertes de rendement liées au stress hydrique.

Le rôle de la métrologie est de fournir un premier diagnostic qualitatif rapide sur le fonctionnement du système sol-plante en relation avec les pratiques des agriculteurs (cf. section 1). Ce diagnostic est par ailleurs le moyen d'entamer le dialogue avec l'agriculteur à partir d'une information concrète issue de leur parcelle et à laquelle ils n'ont pas accès en temps normal. Dans un second temps, les modèles (bilan hydrique, production de biomasse) sont utilisés pour quantifier le diagnostic en générant des variables d'état indispensable au calcul d'indicateurs cohérents avec les critères de décision de l'agriculteur (pertes de rendement) ou des gestionnaires de l'eau (quantités de nitrate lixiviées). Les variables mesurées dans la première étape sont réutilisées içi pour l'initialisation, le calage ou la validation des modèles sur les parcelles agricoles. Ce deuxième diagnostic (diagnostic quantitatif) permet de déterminer si les pratiques d'irrigation sont compatibles avec les objectifs de production et de préservation de la qualité de l'eau, et de définir le cas échéant des stratégies d'irrigation alternatives. La dernière étape de la démarche consiste à tester ces stratégies en les introduisant comme données d'entrées des modèles utilisés pour le diagnostic. Dans cette démarche les stratégies sont définies en concertation avec l'agriculteur pour tenir compte de ses contraintes pratiques et de son mode de décision, ce qui augmente les chances d'application future des stratégies évaluées.

Par rapport à cette démarche, nous avons défini **deux problématiques** de recherche. La première concerne la **modélisation du bilan hydrique d'une culture de laitues**. La principale question posée sur ce thème est de savoir **quel type de modèle** (mécaniste ou analogique), **est le plus adapté pour simuler le bilan hydrique et les flux d'eau sous les racines d'une culture de laitues sous abri froid pour le diagnostic des risques de pollution nitrique.** Pour répondre à cette question nous avons modifié, paramétré, testé et comparé les modèles STICS et PASTIS pour une culture de laitues sous abri froid (chapitre III).

La deuxième problématique concerne la **modélisation de la production de biomasse de la laitue en fonction de l'état hydrique du sol**. Parmi les voies possibles de modélisation de l'effet du stress hydrique sur la production de biomasse, nous avons décidé de développer un modèle basé sur la **simulation de la croissance individuelle des feuilles** en fonction de la température, du rayonnement et de l'état hydrique du sol (chapitre IV).

Le chapitre V présente comment ce modèle de production de biomasse peut être couplé au modèle de bilan hydrique pour simuler et évaluer des stratégies alternatives d'irrigation compatibles avec le modèle d'action de l'agriculteur.

Ces trois chapitres s'appuient sur les résultats d'essais menés en parcelles agricoles sur des cultures de laitues sous abri froid, et en conditions semi contrôlées sur des plantes cultivées en pots présentés dans le chapitre II.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE II

Materiels et methodes

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

CHAPITRE II

MATERIELS ET METHODES

1. Conditions de culture et dispositifs expérimentaux

Deux types de dispositifs ont été utilisés pour traiter les questions posées à partir des résultats du chapitre I. Nous avons d'une part suivi quatre cultures de laitues sous abri froid, trois en parcelles agricoles sur les exploitations E1 (essai VIS-01) et E2 (essais VIS-99 et VIS-00) décrites dans le chapitre I, et une sur le domaine expérimental du lycée agricole François Pétrarque à Avignon (essai AVI-01). L'essai VIS-99 correspond à la situation S10 étudiée dans la phase de diagnostic du chapitre précédent. L'essai AVI-01 a été conduit par P.Bertuzzi (unité Climat-Sol-Environnement INRA Avignon) dans le cadre du réseau expérimental CTIFL-INRA sur la laitue mis en place au cours de l'automne 2000. Les objectifs de cet essai dépassaient le cadre de la thèse et nous ne présenterons donc que la partie du dispositif ayant servi à collecter les données utilisées dans les chapitres suivants. D'autre part, nous avons mis en place trois essais sur des cultures en pots installées dans la serre du Laboratoire d'Ecophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux (LEPSE), sur le campus INRA - AGRO Montpellier (essais SER-1, SER-2, SER-3). Les essais en parcelles agricoles ont principalement servi pour le paramétrage et le test des modèles de bilan hydrique (chapitre III) et de croissance foliaire (chapitre IV). Ce dernier modèle a cependant été principalement élaboré à partir des résultats des essais en pots.

1.1.Dispositifs en parcelles agricoles.

1.1.1.Caractéristiques des parcelles

Dans les 4 essais en parcelles agricoles, les cultures ont été menées sous des tunnels plastiques de 8 m de large sur 80 m de long, soit une surface de 640 m². Ces tunnels étaient composés d'arceaux espacés de 2 à 3 m et recouverts d'un film en polyéthylène translucide.
Chaque tunnel était équipé d'un système d'irrigation par aspersion composé d'une rampe centrale portant des asperseurs espacés de 6 m dans VIS-99 et VIS-00, de deux rampes latérales situées à 1.50 m des bords du tunnel avec des asperseurs espacés de 3m dans VIS-01 et AVI-01.

Une analyse des caractéristiques physico-chimique du sol a été effectuée pour chaque parcelle sur un échantillon de sol de la couche 0-30 cm prélevé avant la préparation des parcelles. Les sols sont des limons argileux avec des taux de matière organique supérieurs à 20 $g.kg^{-1}$ sol sec (tableau II.1).

Tableau II. 1 : Granulométrie, teneur en matière organique et rapport C/N de la matière organique dans l'hoizon 0-30 cm pour les sols des parcelles correspondants aux essais sous abri.

Essai	Argiles ($g.kg^{-1}$ sol sec)	Limons ($g.kg^{-1}$ sol sec)	Sables ($g.kg^{-1}$ sol sec)	MO ($g.kg^{-1}$ sol sec)	C/N
VIS-99	338	445	217	23	9.9
VIS-00	183	612	206	32	8.8
VIS-01	340	454	207	30	14.2
AVI-01	292	546	162	26	10.6

1.1.2.Description des cultures

La variété Sensaï a été utilisée dans les 4 essais sous abri ainsi que dans les essais en pots. L'installation de la culture a été réalisée par repiquage de jeunes plants élevés en pépinière. Le tableau II.2 donne les dates de plantation et de récolte des plantes dans chaque essai. Les essais VIS-99, VIS-00 et AVI-01 correspondent à des cultures de printemps tandis que l'essai VIS-01 correspond à une culture d'hiver. La densité de plantation était de 14 $plantes.m^{-2}$ dans toutes les situations.

Tableau II. 2 : Dates de plantation, de récolte et durée de la culture pour les essais sous abri froid

Essai	Date de plantation	Date de récolte	Durée de la culture (jours)
VIS-99	22/2/1999	12/4/1999	49
VIS-00	13/01/2000	15/3/2000	63
VIS-01	27/10/2000	24/01/2001	89
AVI-01	08/02/2001	01/04/2001	52

Dans les 4 essais, les cultures ont été conduites en planches « à plat » (sans buttage) dans AVI-01, surélevées d'une dizaine de cm par rapport au niveau du sol de la parcelle dans VIS-99, VIS-00 et VIS-01. Ce dernier mode de conduite, fréquemment utilisé dans la zone d'étude, facilite le drainage du sol et permet d'obtenir un meilleur état sanitaire de la culture. Les tunnels étaient divisés en 3 planches de 2m de large dans VIS-99 et VIS-00, en 4 planches

de 1.50m de large dans VIS-01 et en 2 planches de 3.50m de large dans AVI-01 séparées dans chaque cas par des passe-pied de 0.50m de large.

Les planches étaient recouvertes d'un paillage en polyéthylène noir avec une macro perforation (trou de 5cm de diamètre) à la densité de plantation, et une micro perforation sur l'ensemble du film pour permettre l'infiltration de l'eau. L'utilisation d'un paillage permet de maîtriser les adventices, de protéger les plantes contre les maladies du collet, de réchauffer le sol et de limiter l'évaporation du sol (CTIFL, 1997).

La fertilisation a été réalisée dans chaque cas en un seul apport avant la plantation sous forme d'engrais minéral dans AVI-01, et d'engrais organique dans les 3 autres essais. Ces apports correspondaient à 80, 40, 40 et 75 kgN.ha-1 pour respectivement VIS-99, VIS-00, VIS-01 et AVI-01.

Dans chaque essais, l'ensemble des opérations techniques a été effectué par le personnel de l'exploitation considérée sauf pour l'irrigation dans VIS-01 que nous avons géré nous même.

1.1.3. Dispositif de mesure et traitements expérimentaux

Dans chaque essai, le dispositif comprenait une ou plusieurs placettes de mesure par parcelle, localisées sur une des planches de culture et composée chacune :

- d'un ou deux sites de suivi non destructif de l'état hydrique et azoté du sol, et de la croissance des plantes, de 2m de longueur environ sur la largeur de la planche,
- d'une zone de prélèvements d'échantillons de sol et de plantes d'une dizaine de mètres de longueur sur laquelle une grille de points de prélèvement espacés de 50cm à 1m avait été repérée au début de la culture.

Essais VIS-99 et VIS-00

Dans VIS-99 et VIS-00, 3 placettes de mesures (sites A, B et C) ont été délimitées selon le dispositif utilisé dans l'étude de diagnostic. Elles étaient localisées sur la planche centrale à environ 10m des extrémités du tunnel et espacées de 15m environ. Chaque site de mesures non destructives était équipé de tensionics (SDEC, Reignac sur Indre, France) : 5 dans VIS-99 implantés à 10, 20, 30, 60 et 80cm de profondeur, 6 dans VIS-00 implantés à 5, 10, 20, 30, 45, 60 cm de profondeur. Deux pluviomètres avaient également été installés à proximité des tensionics.

Essai VIS-01

Dans VIS-01, le dispositif était composé de 2 placettes de mesure (P1 et P2) de 20 m de long sur la largeur de la planche situées sur une des 2 planches centrales du tunnel. Chaque placette

comprenait deux sites de mesures non destructives équipés chacun de 6 tensionics (5, 10, 20, 30, 45 et 60cm) et de 2 pluviomètres.

L'objectif principal de cet essai était de recueillir des données pour tester le modèle de croissance foliaire sur une culture sous abri en conditions hydriques limitantes. Pour cela, le système d'irrigation avait été aménagé pour pouvoir arroser les 2 zones du tunnel, correspondant aux deux placettes, indépendamment l'une de l'autre et différencier ainsi les régimes d'irrigation. Cet objectif n'a pu être réalisé à cause de la faible demande climatique au cours de l'essai qui n'a pas permis de différencier l'état hydrique du sol des 2 traitements, et d'une attaque de bremia, qui n'a pu être maîtrisée avec les moyens de lutte autorisés en agriculture biologique, qui a touché plus de la moitié des plantes du tunnel notamment sur la placette P2.

Essai AVI-01

Une seule placette de mesure, localisée sur une des 2 planches de culture, a été suivie. Le site de mesure non destructive était équipé d'un tube d'accès vertical pour une sonde à neutrons, de 6 guides d'ondes pour une sonde TDR insérés horizontalement à 5, 15, 25cm de profondeur (2 répétitions par profondeur), de 6 tensiomètres à mercure implantés à 15, 45 et 55cm (2 répétitions par profondeur) et de 4 pluviomètres. Cet essai comprenait également un dispositif d'estimation de l'évapotranspiration à partir de lysimètres de sol non remanié contenant une plante chacun.

1.2.Dispositif en pots

1.2.1. Conditions de culture

Les essais ont été menés dans la serre du LEPSE sur le campus INRA - AGRO Montpellier. Cette serre offrait la possibilité de contrôler partiellement la température par un système d'ouvrant et de refroidissement, et le rayonnement par un système de lampes au sodium.

Les plantes ont été cultivées dans des pots en polypropylène noir de 5 litres (∅ 23cm, hauteur 17.8cm) dans SER-1 et SER-2 et dans des pots en PVC de 7 litres (∅ 15cm, hauteur 40cm) dans SER-3. Les pots étaient remplis d'une couche de 5 cm de billes d'argile pour faciliter le drainage puis de terre fine jusqu'à 5cm du bord du pot. Cette terre avait été prélevée dans les 20 premiers cm de sol d'une parcelle de l'exploitation E1 puis tamisée à 6mm. La texture de ce substrat est de type limoneuse (19.7% d'argiles, 35.9% de limons, 44.4% de sables).

Après remplissage, les pots ont été disposés sur des caillebotis en plastique à une densité de 14 pots.m^{-2} identique à la densité de plantation sous abri. Avant la mise en place de la culture,

un apport d'engrais ternaire 15-15-15 équivalent à une dose d'azote de 150 kgN.ha-1, et un apport d'eau pour amener le sol à la capacité au champ ont été réalisés pour chaque pot.
Dans les essais SER-1 et SER-2, des jeunes plants de laitue élevés en pépinière ont été repiqués dans les pots (1 plant par pot) le 12/4/1999 et le 22/9/1999 respectivement. Ces essais ont été arrêtés quand les plantes bien alimentées en eau présentaient une pomme bien formée et bien remplie. Dans SER-3, 3 graines ont été semées par pot le 7/2/2001. Au stade 3 feuilles, 2 plantes par pot ont été éliminées de manière à conserver des plantes les plus homogènes possibles en taille. Cet essai a été arrêté à la fin du dessèchement du sol des plantes soumises au déficit (cf. ci-dessous).

1.2.2.Traitements hydriques appliqués

Dans SER-1, l'ensemble des pots a été maintenu à la capacité au champ tout au long de la culture. Les apports d'eau étaient réalisés par l'intermédiaire d'un système de goutte-à-goutte, avec un goutteur par pot, contrôlé par une électrovanne.
Dans SER-2, les plantes ont été réparties en 3 lots soumis à 3 régimes hydriques différents. Pour le premier lot, noté Témoin, l'état hydrique a été maintenu à une humidité pondérale de 30%, équivalente à la capacité au champ. Pour les deux autres lots, notés S1 et S2, les apports d'eau ont été stoppés quand l'enracinement des plantes a atteint la moitié de la profondeur de sol. Ils ont été repris quand la teneur en eau pondérale du sol, mesurée par pesée des pots, a atteint 20% pour le lot S1 et 15% pour le lot S2, de manière à maintenir le sol à ces valeurs seuils pendant 10 jours. L'état hydrique des pots des lots S1 et S2 a alors été ramené au niveau de celui du lot Témoin jusqu'à la fin de la culture. Pendant la phase de différenciation des régimes hydriques, les apports d'eau étaient calculés après pesée des pots en fonction de l'état hydrique recherché. En dehors de cette phase, ils ont été assurés par un système de goutte-à-goutte comme dans SER-1.
Dans SER-3, deux lots de plantes ont été constitués. Le premier, noté Témoin, a été irrigué de manière à maintenir le sol à un état hydrique non limitant pour les plantes. Pour le second, noté Déficit, les apports d'eau ont été arrêtées à partir du 19/3/2001. Le sol s'est alors progressivement desséché jusqu'à épuisement de la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW).

2.Mesures effectuées

2.1. Environnement climatique

Dans chaque essai, des capteurs de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) (Li-Cor, Lincoln, USA), de la température et de l'humidité relative de l'air (HMP35, Vaisala, Helsinki, Finlande), ainsi que de rayonnement global (Rg) (SP1110 pyranometer, Campbell Scientific, Shepsed, UK), ont été installés à 1m au dessus du couvert. La température au niveau de l'apex des plantes a également été mesurée dans tous les essais à l'aide de thermocouples en cuivre constantan (3 dans les essais sous abri, 6 dans les essais SER-1 et SER-3, 9 dans SER-2). Dans les essais en pots, ces thermocouples étaient répartis au sein du dispositif pour évaluer les variations des conditions de température en fonction de la position du pot. Dans les essais sous abri, des thermocouples ont aussi été utilisés pour mesurer la température du sol à 3 profondeurs (0, 5 et 15cm).

L'ensemble de ces capteurs était relié à une centrale d'acquisition automatique des données (CR10X, Campbell Scientific, Shepsed, UK) qui stockait toutes les 30 minutes la moyenne des mesures collectées toutes les 20 secondes.

2.2. Etat hydrique et azoté du sol

2.2.1. Dispositif sous abri

Potentiel hydrique du sol et concentration en nitrate de la solution du sol

Le potentiel hydrique et la concentration en nitrate de la solution du sol ont été mesurés à 5 profondeurs dans VIS-99 (10, 20, 30, 60 et 80cm), et 6 profondeurs dans VIS-00 et VIS-01 (5, 10, 20, 30, 45 et 60cm) au niveau des sites de suivi non destructif avec des tensionics (SDEC, Reignac sur Indre, France).

Les appareils ont été installés 24h avant la plantation de la culture, après avoir trempés pendant 48h dans de l'eau déminéralisée pour saturer les bougies poreuse en eau. L'ensemble des bouchons et des capillaires permettant de réaliser les mesures et de prélever la solution de la bougie avaient été changés avant l'installation pour garantir l'étanchéité de l'appareil. Les trous pour installer les tensionics étaient d'abord forés à l'aide d'une tarière Edelman d'un diamètre légèrement supérieur à celui de la bougie jusqu'à 10cm de la profondeur d'implantation. Ils étaient terminés ensuite avec une tarière vrille du diamètre de la bougie. Les appareils étaient alors introduits en force dans le sol jusqu'à la profondeur désirée. Pour terminer, le trou était rempli d'une boue faite avec la terre prélevée en profondeur et de l'eau

déminéralisée pour éviter toute pollution de la zone de prélèvement de la solution du sol par du nitrate .

Les mesures de potentiel hydrique du sol étaient effectuées tous les 2 à 3 jours à partir de la plantation des cultures, entre 8 et 10h du matin, à l'aide d'un capteur portatif de pression (SMS 2500, Reignac sur Indre, France). Ce capteur a été régulièrement vérifié et étalonné par la société SDEC, et sur le dispositif d'étalonnage de l'unité Climat-Sol-Environnement de l'INRA Avignon (figure II.1).

La solution du sol était prélevée tous les 9 à 12 jours à l'aide d'une seringue et stockée à l'abri de la lumière. La concentration en nitrate était mesurée à l'aide d'un kit d'analyse rapide composé de bandelettes colorimétriques et d'un colorimètre de type Nitrachek (Challenge Agriculture, Ambillou, France). A chaque série de mesure, l'appareil était contrôlé avec des solutions étalons de concentrations connues. Nous avons vérifié que cette méthode d'analyse rapide donnait des résultats en bonne corrélation avec une méthode standard de dosage au laboratoire basées sur le dosage avec un spectrophotomètre des nitrites après réduction du nitrate au contact du cadmium (Figure II. 2) conformément aux résultats de Scholefield et al. (1995), Sims et al. (1995) et Freixinos et Raynal-Lacroix (1999).

Teneur en eau volumique

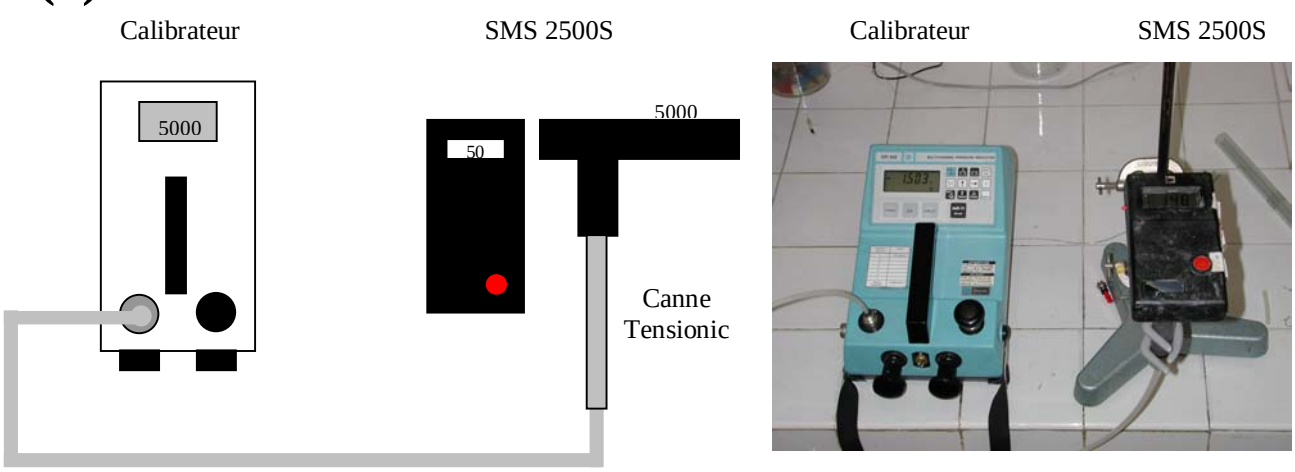
La teneur en eau volumique a été mesurée deux fois par semaine dans l'essai AVI-01 seulement. Une sonde à neutrons et une sonde TDR ont été utilisées. Avec la sonde à neutrons, les mesures étaient effectuées tous les 10 cm entre 10 et 50 cm de profondeur. Avec la TDR, les mesures étaient faites à 5, 15 et 25 cm. Les deux appareils ont été étalonnés à partir de mesures gravimétriques (figure II. 3).

Teneur en eau pondérale

Dans tous les essais, des prélèvements de sols ont été réalisés à intervalle régulier à partir de la plantation au niveau des zones délimitées sur chaque placette pour les suivis destructifs (tableau II.3). A chaque date de prélèvement, 3 à 5 échantillons de sol étaient prélevés par placette sur 60 cm de profondeur dans VIS-99, VIS-00 et VIS-01, 50cm dans AVI-01 et partagés en 3 horizons (tableau II.3). La position des points de prélèvement était tirée aléatoirement dans la grille préalablement établie sur la zone de prélèvement.

Rapport-Gratuit.com

(a)



(b)

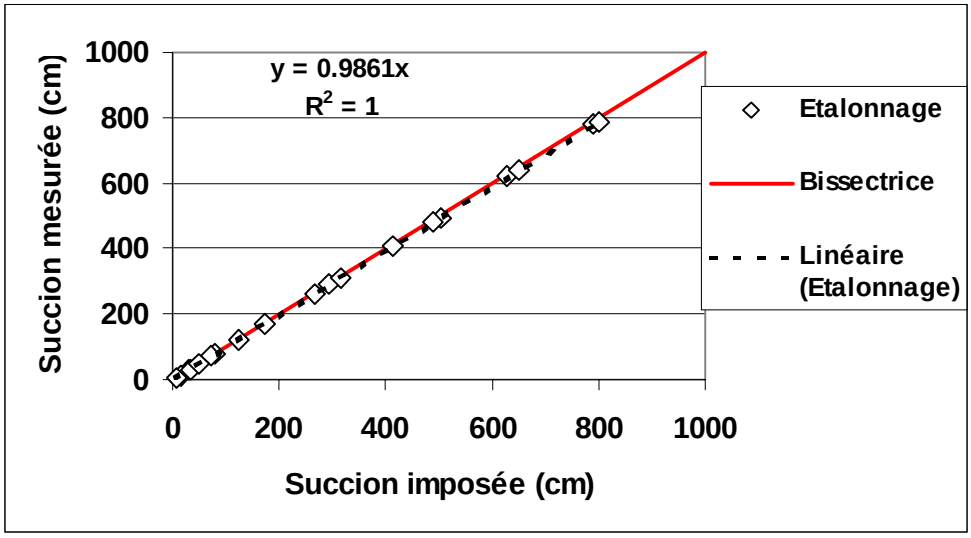


Figure II.1 : Schéma du dispositif d'étalonnage du capteur portatif de pressions de l'unité CSE de l'INRA Avignon (a), comparaison de la succion imposée et mesurée (b)

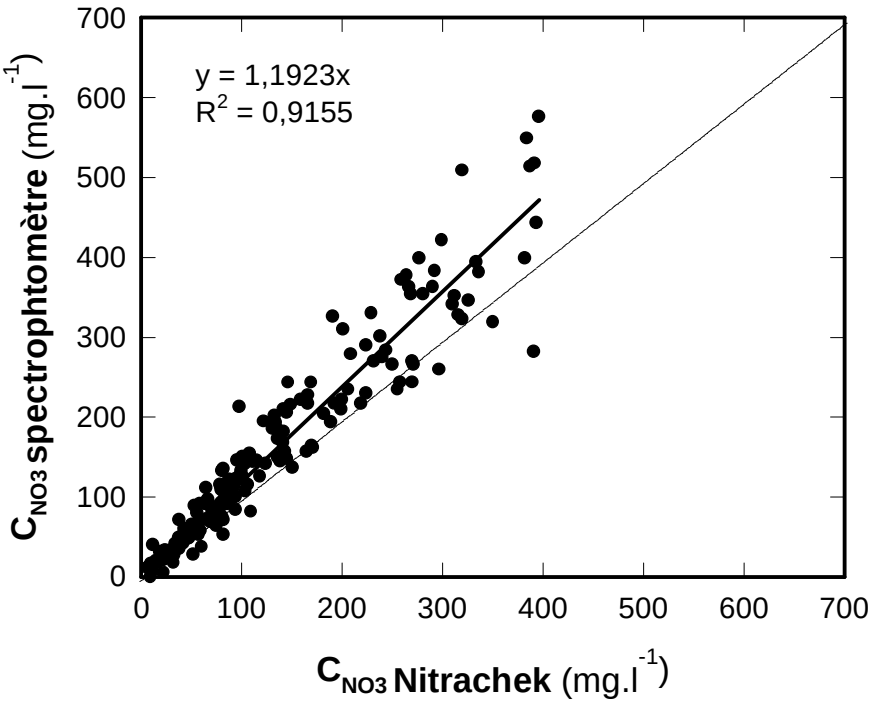


Figure II.2 : Relation entre la concentration en nitrate (C_{N03}) mesurée avec un kit d'analyse rapide (bandelette+Nitrachek), et analysée au laboratoie avec un spectrophotomètre.

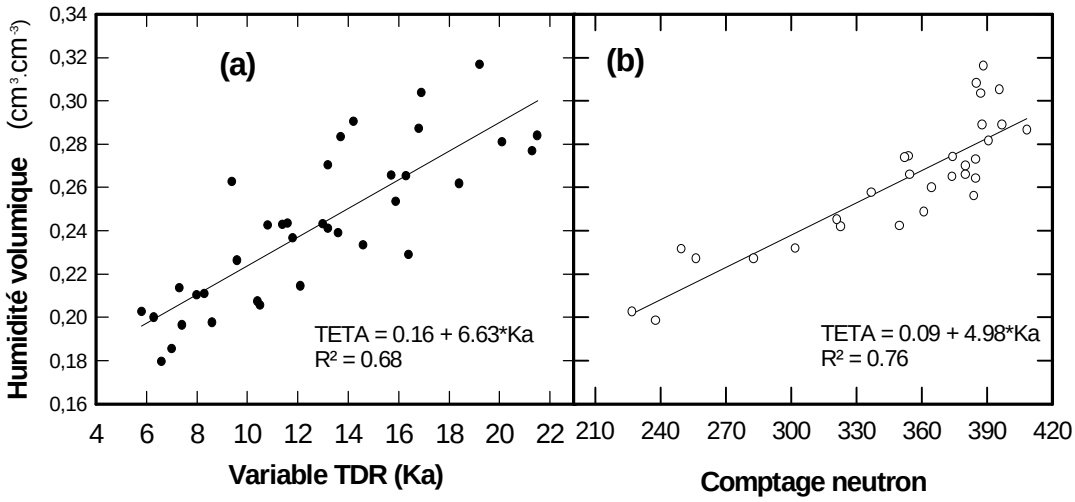


Figure II.3 : Courbes d'étalonnage de la sonde TDR (a) et de la sonde à neutron (b) utilisées dans l'essai AVI-01.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau II. 3 : Fréquence et échantillonnage des prélèvements de sol dans les essais sous abri froid. Dans chaque essai, les prélèvements ont débuté le jour de la plantation de la culture.

	Fréquence des mesures	Nombres de dates de prélèvements	Nombre de points de prélèvements par placette	Horizons prélevés
VIS-99	En même temps que les prélèvements de solution du sol (environ 10 jours)	6	3	0-15 cm 15-30cm 30-60 cm
VIS-00		7	3	0-20 cm 20-40 cm 40-60 cm
VIS-01	Hebdomadaire	11	4	0-15 cm 15-30cm 30-60 cm
AVI-01	Hebdomadaire	8	5	0-10 cm 10-25 cm 25-50 cm

Après prélèvement, les échantillons étaient conservés hermétiquement dans des boîtes en aluminium ou dans des sacs thermostables. Ils étaient ensuite pesés au laboratoire pour déterminer le poids frais du sol (Pf_sol), et mis à sécher 48h à 105°C puis pesés à nouveau pour mesurer le poids sec (Ps_sol). La teneur en eau pondérale du sol (Hp) a été ensuite calculée par la formule :

$$Hp = \frac{Pf_sol - Ps_sol}{Ps_sol} x100 \qquad \textbf{Eq. II. 1}$$

Comparaison des méhtodes de mesure de la teneur en nitrate du sol.

Dans les essais VIS-99 et AVI-01, des mesures complémentaires ont été effectuées après la récolte des plantes pour comparer sur les sols de nos essais les teneurs en nitrate mesurées à l'aide de tensionics à celles mesurées sur des échantillons de sol.

Le protocole de mesure a consisté à prélever le même jour au niveau de chaque site de tensionic, la solution du sol avec les tensionics, et trois échantillons de sol dans une couche de 10 à 15cm centrée sur la profondeur d'implantation de la bougie poreuse de ces appareils (tableau II. 4). Ces mesures ont été effectuées sur les 3 sites de suivi tensionic 10 jours après la récolte dans VIS-99, et sur 3 des 4 sites équipés de tensionics 10 et 20 jours après a récolte dans VIS-01.

Après prélèvement, chaque échantillon de sol était partagé en deux sous-échantillons. Le premier sous échantillon était utilisé pour déterminer l'humidité pondérale du sol (Hp). Le second était utilisé pour le dosage du nitrate selon le protocole suivant :

- tamisage à 4mm
- prélèvement de 50g de terre fine et mélange avec 100ml d'eau distillée
- agitation mécanique du mélange pendant 20min
- filtrage du mélange de manière à obtenir une solution claire
- dosage avec un kit d'analyse rapide (bandelettes + colorimètre)

La formule permettant de calculer la quantité d'azote nitrique contenu dans l'horizon de prélèvement (Q_N-sol, kg $N_NO_3.ha^{-1}$) à partir de la concentration en nitrate (C_{NO_3}_ext) ainsi mesurée est :

$$Q_N_sol = C_{NO_3}_ext \times \frac{(2+H)}{(1-H)} \times \frac{14}{62} \times Da \times Tf \times p \times 10 \qquad \textbf{Eq.II. 2}$$

Avec H= humidité pondérale de l'échantillon par rapport au poids frais ($g.g^{-1}$)

p et Da = épaisseur et densité apparente de l'horizon considéré (cm et $g.cm^{-3}$)

Tf = pourcentage de terre fine

La fraction 14/62 représente le rapport de masse atomique entre l'azote et le nitrate.

La formule permettant de calculer le stock d'azote nitrique à partir de la concentration en nitrate de la solution du sol extraite avec les tensionics est :

$$Q_N_tensio = C_{NO_3}_tensio \times hp \times \frac{14}{62} \times Da \times Tf \times p \times 10 \qquad \textbf{Eq. II. 3}$$

Avec hp = humidité pondérale de l'échantillon par rapport au poids sec

Tableau II.4 : Profondeurs de prélèvement de la solution du sol à l'aide de tensionics et des échantillons de sol pour la comparaison des deux méthodes de mesure de la teneur en nitrate des sols.

	Profondeur d'implantation des bougies poreuses (cm)	**Horizon prélevé (cm)**
VIS-99	10	0-15
	20	15-25
	30	25-35
	60	55-65
VIS-01	5	0-15
	10	
	20	15-25
	30	25-35
	45	35-50

2.2.2. Dispositif en pots

Suivi par pesée

Dans chaque essai, le poids de sol sec contenu dans chaque pot a été calculé au remplissage des pots à partir du poids de terre fraîche mesuré par pesée et de la teneur en eau pondérale mesurée sur un échantillon de sol. Au cours de chaque essai, la teneur en eau moyenne de chaque pot a ainsi pu être suivie à partir de pesées régulières des pots. Ces mesures étaient faites tous les 2 à 3 jours excepté au cours des périodes de différenciation des régimes hydriques dans SER-2 et SER-3. Pendant ces périodes, les pots dans ces 2 essais étaient pesés tous les jours, le matin dans SER-1 vers 9h00, le matin à 9h00 et le soir à 18h00 dans SER-3. A partir de ces pesées, nous avons également calculé le volume d'eau transpiré quotidiennement par chaque plante pendant la phase de différenciation des régimes hydriques. Ce volume est égal à la différence entre le poids de la veille plus la dose d'irrigation reçue et le poids du jour. Dans ce calcul, nous avons estimé que l'évaporation du sol était nulle car les plantes couvraient complètement la surface du sol au moment de la différenciation des régimes hydriques.

Teneur en eau pondérale

Dans SER-1 et SER-2, 3 à 6 pots par lot étaient prélevés tous les 2 à 3 jours pour des mesures sur les plantes et sur le sol. Pour chaque pot, la teneur en eau pondérale était mesurée sur 2 échantillons de 100g de sol pris entre 0 et 7.5 cm de profondeur, et 7.5 et 15cm de profondeur.

Potentiel hydrique du sol

Dans chaque essai, 30 pots ont été équipés de 30 tensionics de 10cm de longueur. Le potentiel hydrique du sol était mesuré tous les jours. La solution du sol était prélevée tous les 10 à 15 jours. La concentration en nitrate était mesurée par la méthode d'analyse rapide présentée en 2.2.1.

Calcul de la Fraction d'Eau Transpirable du Sol (FTSW).

Dans les essais SER-2 et SER-3, l'état hydrique du sol a été caractérisé par la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW) définie comme le rapport entre la quantité d'eau du sol transpirable pour la plante à l'instant t (ASWt), et la quantité totale d'eau transpirable par la plante (TTSW). TTSW correspond au stock d'eau entre une borne maximum (Hmax), généralement considérée égale à l'humidité à la capacité au champ, et une borne minimum

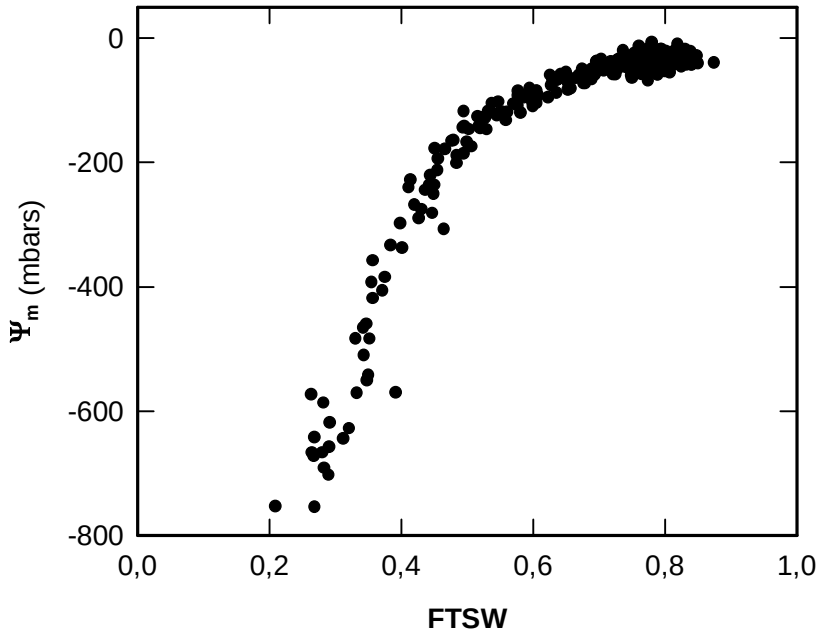


Figure II.4 : Relation entre la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW) et le potentiel matriciel du sol (ψ_m) établie à partir des mesures effectuées au cours de l'essai SER-3.

correspondant à l'humidité du sol à laquelle la plante ne peut plus prélever d'eau dans le sol (Hmin) (Lacape et al., 1998). D'après Sinclair et Ludlow (1996) pour des cultures en pots, Hmin est atteint quand la transpiration de plantes soumises à un déficit hydrique représente 10% de la transpiration de plantes bien alimentées en eau. Pour le substrat utilisé dans nos essais les bornes mini et maxi de TTSW étaient respectivement de 9 et 30%. Elles ont été déterminées au cours de l'essai SER-3. Hmin a été mesurée par gravimétrie sur des échantillons de sol issus de pots du lot Déficit donc les plantes ne transpiraient plus que 10% du niveau des témoins. L'humidité à la capacité au champ a été estimée sur 10 pots sans plante qui ont été abondamment arrosés de manière à engendrer du drainage à la base des pots puis recouverts d'un film plastique pour limiter l'évaporation du sol et pesés quotidiennement. On a estimé que le sol était à la capacité au champ quand les variations de poids sur 2 jours consécutifs étaient inférieures à 10g. Des échantillons de sol ont alors été prélevés dans les pots pour déterminer leur teneur en eau par gravimétrie.

La figure II. 4 montre la relation entre FTSW et le potentiel matriciel du sol établie à partir des mesures effectuées dans l'essai SER-3. Pour des valeurs de FTSW élevées (entre 1 et 0.5) le potentiel matriciel diminue peu (de 0 à –20 kPa), puis sa chute est rapide pour des FTSW

inférieures à 0.5. jusqu'à la limite de décrochement des tensionics qui est atteinte pour des FTSW de l'ordre de 0.2.

Potentiel de base

Le potentiel de base correspond au potentiel hydrique foliaire en fin de nuit. On estime alors que le potentiel hydrique des feuilles est en équilibre avec le potentiel hydrique du sol au niveau des racines. Le potentiel de base est de ce fait considéré comme un bon indicateur du niveau de stress hydrique subi par la plante (Katerji et al., 1988 ; Lacape et al , 1998).
Dans SER-2, le potentiel de base a été mesuré à 3 dates sur 6 plantes de chaque lot : le premier jour de la différenciation des régimes hydriques, au cours de la phase de stabilisation des contraintes aux valeurs seuils, après la remise en eau. Dans SER-3, il a été mesuré 3, 9 et 14 jours après l'arrêt des apports d'eau pour le lot Déficit sur 12 plantes de ce lot et 6 plantes du lot Témoin. Les mesures ont été effectuées avec une chambre à pression (Soil moisture, Santa Barbara, USA) selon la méthode proposé par Scholander et al. (1965) sur une feuille ayant terminée sa croissance. Après prélèvement, la feuille était rapidement ensachée afin de limiter les pertes d'eau. La feuille de laitue n'ayant pas de pétiole, l'extrémité de la nervure centrale était délicatement taillée pour pouvoir être introduite dans la chambre à pression.

2.3. Mesures sur les plantes

2.3.1. Fréquence et échantillonage

Dispositifs sous abri.

Le tableau II. 5 présente le type, la fréquence et l'échantillonnage des mesures effectuées dans les essais sous abri froid. En dehors du taux de couverture, toutes les mesures indiquées dans ce tableau ont été effectuées sur des plantes prélevées sur les zones de mesures destructives de chaque placette selon la grille utilisée pour les prélèvements de sol.
Le taux de couverture a été suivi en dynamique sur 6 plantes par placette repérées sur les sites de mesures non destructives.
Dans l'essai AVI-01, le profil de densité racinaire a également été mesuré à la moitié du cycle et à la récolte sur des plantes en dehors des placettes de mesure.

Tableau II.4 : Mesures destructives effectuées sur les plantes dans les essais sous abri. Les valeurs indiquent le nombre de jours ou les stades de mesure de la variable correspondante.

Variable mesurée	Modalité	VIS-99	VIS-00	VIS-01	AVI-01
Poids frais, poids sec des plantes, nombre de feuilles apparues	Fréquence	hebdomadaire	hebdomadaire	hebdomadaire	hebdomadaire
	Nombre de plantes par placette	6	6	8	10
Nombre de feuilles initiées	Fréquence	-	hebdomadaire	-	hebdomadaire
	Nombre de plantes par placette	-	6	-	10
Surface des feuilles	Fréquence	plantation et récolte	hebdomadaire	15 jours	hebdomadaire
	Nombre de plantes par placette	6	6	8	6
Poids frais et sec des feuilles	Fréquence	récolte	récolte	récolte	récolte
	Nombre de plantes par placette	6	6	8	6
Profondeur des racines	Fréquence	-	-	-	hebdomadaire
	Nombre de plantes par placette	-	-	-	10
Taux de couverture	Fréquence	hebdomadaire	hebdomadaire	hebdomadaire	hebdomadaire
	Nombre de plantes par placette	6	6	12	6

Dispositifs en pots

Dans les essais SER-1 et SER-2, la croissance et le développement des plantes ont été suivies de manière destructive. La fréquence des prélèvements était dans les deux essais de 2 à 3 jours. Dans SER-1, 6 plantes étaient prélevées à chaque fois. Dans SER-2, 6 plantes étaient prélevées avant la différenciation des régimes hydriques, puis 3 à 6 plantes par lot étaient prélevées à partir de ce stade. Les mesures effectuées sur ces plantes étaient : le taux de couverture, le poids frais et le poids sec de la plante entière, le nombre de feuilles apparues et initiées et la surface de toutes les feuilles apparues. Le poids frais et le poids sec des toutes les feuilles apparues étaient mesurés à la récolte. Dans SER-1, nous avons également mesuré la surface de toutes les feuilles initiées en plus des feuilles apparues pour les 8 premières dates de prélèvement.

Dans SER-3, la longueur et la largeur de toutes les feuilles en croissance ont été mesurées tous le jours sans détruire les plantes sur 18 plantes du lot Déficit et 9 plantes du lot Témoin à partir de la différenciation des régimes hydriques jusqu'au flétrissement des plantes du lot déficit. Le poids frais, le poids sec de la plante, le nombre de feuilles apparues et la surface de toutes les feuilles ont alors été mesurés. La profondeur d'enracinement a également été mesurée après ouverture des colonnes de sol. En dehors de ce dispositif, 2 à 3 plantes ont été

prélevées à 3 dates au cours de la différenciation des régimes hydriques pour mesurer la longueur, la largeur et la surface des feuilles apparues, et la profondeur d'enracinement.

2.3.2. Biomasse fraîche et sèche

Les plantes étaient pesées immédiatement après leur prélèvement pour déterminer leur poids frais. Le poids sec était mesuré après séchage 2 jours à 60°C.

2.3.3. Nombre de feuilles apparues et initiées

Le nombre de feuilles apparues est un stade communément utilisé dans la bibliographie pour suivre le développement foliaire de la laitue (Bensink, 1973 ; Bruno et Papy, 1992). Ces stade correspond au nombre de feuilles de longueur supérieures à 1c. Le nombre de feuilles initiées correspond au nombre de feuilles apparues plus le nombre de feuilles de longueur inférieure à 1cm. Ces feuilles sont difficilement visibles à l'œil nu. Elles ont été identifiées par dissection de l'extrémité apicale de la tige sous une loupe binoculaire (Leica M75, Wetzlar, Allemagne) offrant un grossissement maximum de 160

2.3.4. Surface des feuilles

Deux méthodes ont été utilisées pour mesurer la surface des feuilles. La plus directe consistait à photocopier les feuilles étalées sur du papier blanc puis à numériser ces photocopies à l'aide d'une caméra CCD (Sony DXC-151 AP, Japon). La surface des feuilles était alors mesurée par un logiciel d'analyse d'image calibré à partir d'un étalon placé sous la caméra (Media Cybernetics- Optimas V6.5, Silver Spring, USA). Cette méthode a également été appliquée dans l'essai SER-1 pour mesurer la surface des feuilles de longueur inférieure à 1cm. Dans ce cas, la caméra était branchée sur la loupe binoculaire. Les feuilles étaient d'abord séparées de l'extrémité apicale puis étalées sur une lame de verre, avant d'être numérisée et traitée par analyse d'image.

L'autre méthode utilisée est indirecte mais plus rapide et permet surtout d'évaluer la surface de la feuille sans la couper. Elle est basée sur l'utilisation d'une relation empirique entre le produit de la longueur par la largeur du limbe (LxW) d'une feuille et sa surface (SFi) mesurée selon la méthode précédente. Pour la laitue, nous avons établi cette relation à partir de données issues des essais SER-1, SER-2, VIS-00 et AVI-01 dans lesquelles le produit LxW a été déterminé en plus de la mesure de SFi par analyse d'images (figure II. 5). Cette relation a été appliquée parallèlement à la méthode directe pour mesurer la surface des feuilles notamment en fin de cycle dans les différents essais, et surtout dans l'essai SER-3 pour suivre

l'évolution au cours du temps de la surface de chaque feuille à partir des mesures de longueur et de largeur des feuilles.

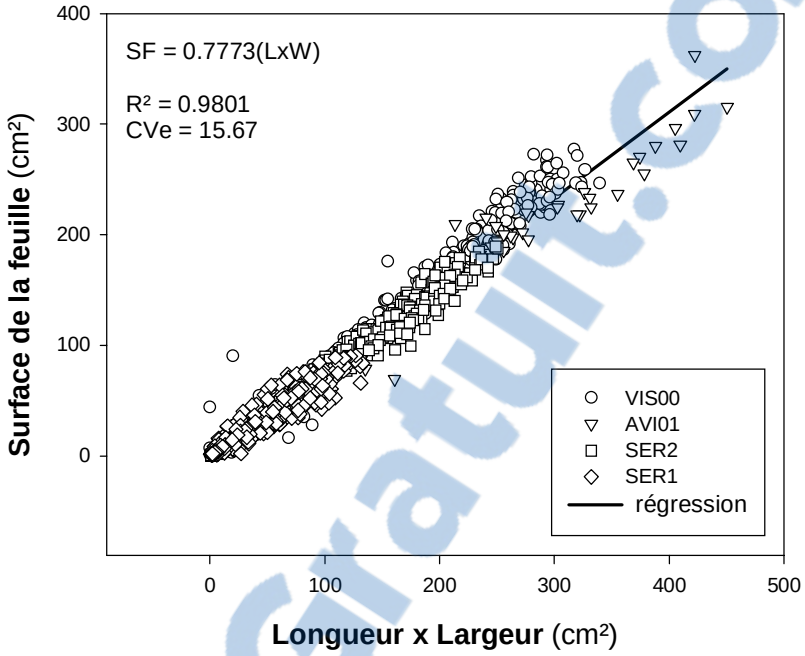


Figure II.5 : Relation entre le produit de la longueur (L) par la largeur (W) du limbe et la surface de la feuille établie à partir des mesures effectuées dans les essais SER-1, SER-2, AVI-01 et VIS-00.

2.3.5. Taux de couverture

Le taux de couverture (TC) d'une laitue correspond au rapport entre la surface de la plante projetée verticalement sur le sol (S, cm²) et la surface au sol disponible pour la plante fonction de la densité de plantation (D, plants.m^{-2}):

$$TC = \frac{S \times D}{10000} \qquad \textbf{Eq. II. 4}$$

Nous l'avons mesuré à partir de photographies en vue verticale, à 1.50 m de hauteur, des laitues et d'un logiciel d'analyse d'images (Media Cybernetics- Optimas V6.5, Silver Spring, USA). Sur chaque photo, un étalon de 20cm était placé à côté de la plante pour pouvoir calibrer le logiciel.

2.3.6. Profondeur et densité racinaire

Dans l'essai AVI-01, la profondeur maximum atteinte par les racines a été mesurée à chaque date de prélèvement destructif de sol et de plantes. Au niveau des points de prélèvements, une

Rapport-Gratuit.com

tranchée était creusée jusqu'à 40cm de profondeur à l'aplomb de l'emplacement des 2 plantes prélevées. La profondeur d'enracinement était alors mesurée à partir de la surface du sol
Dans cet essai, deux profils de densité racinaire ont également étaient observées en milieu de cycle (jour 66) et à la récolte. Pour cela 2 fosses de 1m de large et 1m de profondeur ont été creusées dans la largeur du tunnel à l'aplomb d'un rang de plantes. Le profil ainsi dégagé était alors délicatement travaillé avec un couteau pour mettre en évidence les racines. Les racines étaient ensuite repérées sur une grille de 50cm de profondeur présentant un maillage carré de 2cm de côté. La densité racinaire était estimée pour chaque couche de 2cm par la proportion de cases dans lesquelles au moins une racine était présente.

2.4. Mesures complémentaires

2.4.1. Propriétés hydrodynamiques des sols

Dans les essais VIS-00, VIS-01 et AVI-01, la relation entre la teneur en eau volumique et la conductivité hydraulique du sol ($K(\theta)$) a été déterminée par la méthode de WIND (Tamari et al., 1993) au laboratoire de science du sol de l'unité CSE de l'INRA Avignon. Cette méthode consiste à mesurer simultanément et en continu le potentiel hydrique et la teneur en eau d'un cylindre de sol non remanié prélevé sur le terrain, au cours d'une phase de dessèchement après saturation du sol en eau. La relation $K(\theta)$ est établie par ajustement des paramètres d'un fonction log-polynomiale sur les évolutions des variables d'état hydrique mesurées.
Dans chaque essai, deux placettes avaient été balisées à la plantation pour le prélèvement des cylindres. Deux cylindres de 15cm de diamètre et 7.5cm de hauteur ont été prélevés par placette : un dans la couche de sol travaillé (entre 10 et 20 cm de profondeur), le second dans l'horizon non travaillé (entre 35 et 45 cm de profondeur).
La courbe de rétention $\psi(\theta)$ a également été établie dans chaque essai (y compris VIS-99) à partir des mesures de potentiel hydrique et de teneur en eau pondérale du sol réalisées in situ. Dans AVI-01, nous avons utilisé les mesures de teneur en eau volumique et de potentiel hydrique effectuées aux mêmes profondeurs sur le site de mesure non destructive. Dans les essais VIS-99, VIS-00 et VIS-01, nous avons associé les mesures d'humidité pondérale par couche et les mesures de potentiel hydrique mesurées pour cette couche comme indiqué dans le tableau II.6.

Tableau II. 6 : Mesures de teneur en eau pondérale et de potentiels hydriques utilisées pour établir la courbe de rétention dans les essais VIS-99, VIS-00 et VIS-01.

	Couche de sol	Mesures de potentiel utilisées
VIS-99	0-15	10
	15-30	moyenne 20 et 30cm
	30-60	moyenne 30 et 60cm
VIS-00	0-20	moyenne 5, 10, 20cm
	20-40	moyenne 20 et 30cm
	40-60	moyenne 45 et 60 cm
VIS-01	0-15	moyenne 5 et 10cm
	15-30	moyenne 20 et 30cm
	30-60	moyenne 45 et 60cm

2.4.2. Densité apparente du sol

La densité apparente du sol a été mesurée in situ dans les essais VIS-00, VIS-01 et AVI-01 avec une sonde gamma selon la méthode décrite par Bertuzzi et al. (1987). Pour cette mesure, 3 placettes ont été balisées à la plantation en dehors des zones de mesures destructives, et préservées du piétinement au cours de l'essai. Sur ces placettes, la densité a été mesurée après la récolte entre 0 et 45cm de profondeur avec un pas de 5cm.

2.4.3. Evaluation de l'évapotranspiration sous abri

Dans l'essai AVI-01, l'évapotranspiration de la culture a été estimée avec des mini-lysimètres (Trambouze, 1996). Les mini-lysimètres utilisés étaient des cylindres en PVC de 15 cm de diamètre et 40 cm de hauteur fermés à leur base par une grille et un géotextile non imperméable. Ces cylindres étaient remplis de sol non remanié de la parcelle étudiée. Pour cela, ils avaient été enfoncés dans le sol à l'aide d'une massette puis extraits après ouverture du sol alentour avant de les replacer à proximité du site de mesure non destructive dans des trous creusés à cet effet. Chaque lysimètre contenait une plante et avait été recouvert avec le même paillage plastique que celui utilisé sur le reste de la parcelle. En cours de culture, les mini-lysimètres étaient pesés tous les matins. Ils étaient également pesées en fin d'après midi lorsque un apport d'eau avait été fait en début de journée. On vérifiait alors que le volume

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

d'eau reçu par les lysimètres correspondait à celui mesuré au niveau des pluviomètres. Si ce n'était pas le cas, on faisait un apport complémentaire en fonction du poids du lysimètre.

3.Traitement des données et études méthodologiques

3.1. Conditions climatiques

Le tableau II. 7 présente les valeurs moyennes ou cumulées au cours de chaque essai des variables climatiques mesurées. Ce tableau donne également la somme de température depuis la plantation, ou temps thermique (TT), et l'ETP (pour les essai sous abri). Le temps thermique est une variable essentielle pour l'analyse de la croissance des plantes. Le temps thermique du jour j est égal à la température moyenne du jour moins une température minimale, appelée température de base[5], en deçà de laquelle la croissance est nulle. Pour la laitue, la température de base utilisée est 3.5°C (Bensink, 1971). L'ETP sous abri a été calculée à partir de la formule de De Villele (1989) qui relie l'ETP sous un abri plastique au rayonnement extérieur :

$$\text{ETPabri} = 0.67 \times \frac{\text{Rg} \times \text{T}}{\text{L}} \qquad \text{Eq. II. 5}$$

où Rg = rayonnement global à l'extérieur de l'abri cumulé à l'échelle de la journée($J.m^{-2}$),
T est le coefficient de transmission de la couverture plastique (sans unité),
L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau = 251.04 $J.cm^{-2}.mm^{-1}$
Le coefficient T varie en fonction de la qualité et de l'âge du plastique. Sa valeur se situe en général autour de 0.70. Dans nos essais, nous avons directement mesuré le rayonnement global sous l'abri (Rg_abri) égal au produit Rg x T.
Les températures moyennes ont été plus fortes dans les essais en pots par rapport aux essais sous abri dans lesquelles elles sont similaires. Dans les essais en pots, les consignes de régulation de la température ont volontairement été fixées à des valeurs élevées par rapport à celles observées sous abri pour limiter le déclenchement du système de refroidissement. En effet, ce système est responsable d'un fort gradient transversal de température et d'humidité de l'air dans la serre qui peut avoir des conséquences importantes sur les vitesses de croissance des plantes.

[5] La température de base est en fait déterminée à partir d'un ajustement statistique sur un modèle linéaire reliant la température moyenne et les vitesses de croissance ou de développement sur une période donnée (Granier et Tardieu, 1998b). La plante peut donc croître faiblement en dessous de cette valeur.

Les conditions de rayonnement ont été très variables dans nos essais. On observe notamment que les niveaux de rayonnement ont été en moyenne plus faibles dans les essais en pots que dans les essais sous abri. Cela s'explique par la structure de la serre verre qui limite davantage la transmission du rayonnement par rapport aux abris plastiques des abris plastiques.

Le rayonnement et l'ETP cumulés dans l'essai VIS-01 sont particulièrement faibles par rapport aux 3 autres essais sous abri. L'ETP journalière moyenne est 2 à 4 fois plus faible dans cet essai. Les conditions climatiques sous l'abri découlent de conditions climatiques exceptionnelles à l'échelle de la zone d'étude au cours de l'hiver 2000-2001 (non montré). Cet hiver a été caractérisé par un climat doux et humide avec des températures moyennes plus élevées que la normale et un ensoleillement très faible.

Tableau III.7 : Conditions climatiques dans les essais. La température est donnée en moyenne sur la durée de la culture avec l'écart type entre parenthèses. Les autres variables sont données en cumul sur le cycle. PARinc = rayonnement photosynthétiquement actif incident ; Rg = rayonnement global.

ESSAI	Durée du cycle (jours)	Température (°C)	Temps thermique cumulé (°Cj)	PARinc cumulé ($mol.m^{-2}$)	Rg cumulé (MJ.m-2)	ETP (mm)	ETPjour (mm)
SER-1	37	17.8 (2.89)	529	670	-	-	-
SER-2	42	19.2 (1.58)	650	316	-	-	-
SER-3	48	16.6 (0.22)	537	500	-	-	-
VIS-99	49	11.3 (2.00)	423	817	547	149	3.05
VIS-00	63	9.9 (3.07)	384	755	411	98	1.56
VIS-01	89	10.0 (2.90)	603	477	260	70	0.79
AVI-01	52	12.2 (2.43)	460	772	417	111	2.01

3.2.Comparaison des stocks d'azote nitrique calculés à partir de mesures effectuées avec des tensionics et sur des prélèvements de sol

La figure II. 6 présente les résultats de la comparaison des stocks d'azote nitrique dans le sol calculés à partir des teneurs en nitrate mesurées sur des échantillons de sol (Q_{N_ext}) et sur la solution du sol extraite avec des tensionics (Q_{N_tensio}) dans les essais VIS-99 et AVI-01.

Aucune relation nette n'apparaît entre Q_{N_ext} et Q_{N_tensio}. Les stocks calculés à partir des mesures avec les tensionics sont systématiquement plus faibles que ceux calculés sur les échantillons de sol malgré la variabilité observée sur Q_{N_ext}. L'écart entre Q_{N_tensio} et Q_{N_ext} varie de 0 à 57 kg N-NO3-.ha-1. Ces résultats confirment l'hypothèse généralement acceptée selon laquelle les bougies poreuses ou les tensionics ne prélèvent que la part la plus mobile de l'eau considérée moins concentrée en nitrate que la totalité de la solution du sol extraite sur

les échantillons de sol (Webster et al., 1993). Comme nous l'avons vu dans le chapitre I (section 2.2.3), cette hypothèse ne fait pas l'objet d'un consensus, les résultats de la comparaison des deux méthodes d'extraction et de mesure de la teneur en nitrate du sol étant très contradictoires selon les auteurs (Moutonnet et al., 1993, Poss et al., 1995, Néel, 1996).
Dans notre démarche, nous utilisons les tensionics pour déterminer la teneur en nitrate de l'eau drainée et pas pour mesurer des stocks d'azote total. Plusieurs auteurs s'accordent pour dire que les tensionics sont particulièrement bien adaptés pour ce type d'utilisation (Magid et Christensen, 1993 ; Webster et al., 1993).

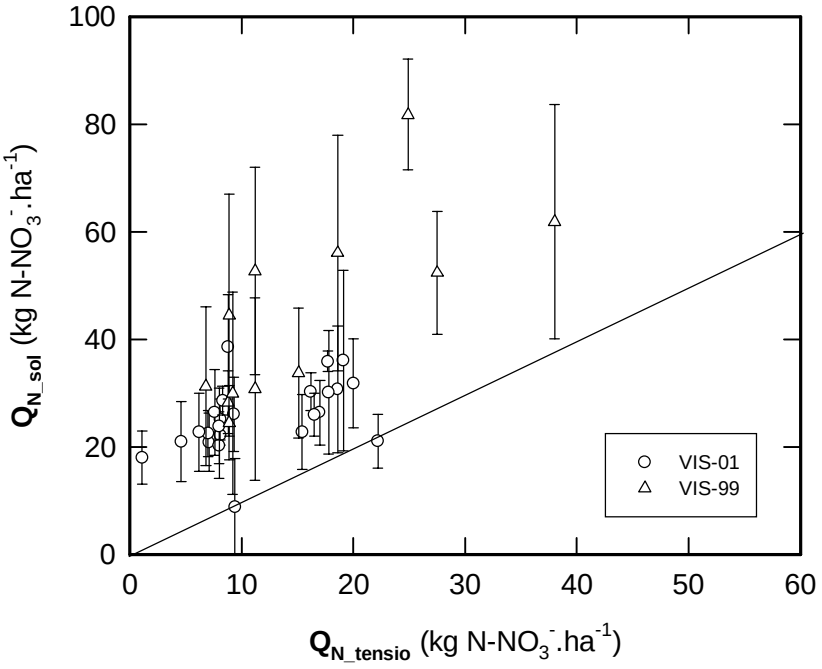


Figure II.6 : Comparaison des stocks d'azote calculés dans les essais VIS-01 et VIS-99 à partir des concentration en nitrate de la solution du sol prélevée avec les tensionics (Q_{N_tensio}) et extraite sur des échantillons de sol (Q_{N_sol}). Les valeurs de Q_{N_sol} représentent la moyenne des 3 prélèvements effectués sur les sites de mesure, les barres d'erreur représentent l'écart type. La ligne représente la première bissectrice.

3.3.Analyse des cinétiques d'expansion foliaire

3.3.1. Détermination de la date d'arrêt de l'expansion des feuilles.

Dans les essais SER-1, SER-2, VIS-00 et AVI-01, l'évolution de la surface foliaire de chaque feuille a été ajustée par l'équation logistique suivante :

$$SF = \frac{SF\max}{(1+\exp\left(\frac{4\times Vi\times(TTi-TT)}{SF\max}\right)} \qquad \textbf{Eq. II. 6}$$

avec SFmax = surface finale de la feuille

Vi = vitesse au point d'infexion

TTi = temps thermique au point d'inflexion

A partir de cet ajustement la date de la fin de l'expansion d'une feuille est calculée comme le temps thermique auquel la plante a atteint 98% de sa taille finale.

Dans nos essais, cette relation n'a pu être ajustée correctement que pour les 35 à 40 premières feuilles. Au delà, les feuilles étaient trop jeunes et le nombre de points de mesures de surface trop faible pour effectuer cet ajustement.

3.3.2. Détermination de la date d'arrêt de la phase de croissance exponentielle des feuilles

La vitesse relative d'expansion des feuilles (RER) à été calculée comme la pente de la relation entre le logarithme népérien de la surface de la feuille et le temps thermique (Granier et Tardieu, 1998a). L'évolution au cours du temps du RER montre une évolution en deux phases (Figure II. 7). Après l'initiation, le RER est maximum et quasi constant puis il décroît progressivement jusqu'à la fin de l'expansion de la feuille. Au cours de la première phase, l'expansion de la feuille est exponentielle, elle est considérée comme linéaire ensuite (Granier et Tardieu, 1998a). La détermination du temps thermique à la transition entre les deux phases (noté TTfp, pour Temps Thermique à la Fin du Plateau de RER) est essentielle à la modélisation de la croissance foliaire (cf. chapitre IV).

Essai SER-1

Dans l'essai SER-1, la croissance de la surface des feuilles 4 à 35 a été suivie de l'initiation à la fin de l'expansion ou presque. Nous disposons donc de cinétiques complètes de RER au cours du temps. Ces cinétiques peuvent être décrites par les relations suivantes :

$$\text{Pour } TT < TTfp \qquad RER = RERp \qquad \textbf{Eq. II. 7}$$

$$\text{Pour } TT > TTfp \qquad RER = \alpha \exp(-\beta TT)$$

La valeur de TTfp pour chaque feuille a été déterminée en cherchant l'ajustement de ces équations sur les données observées qui permettait d'obtenir la plus petite somme des carrés des écarts.

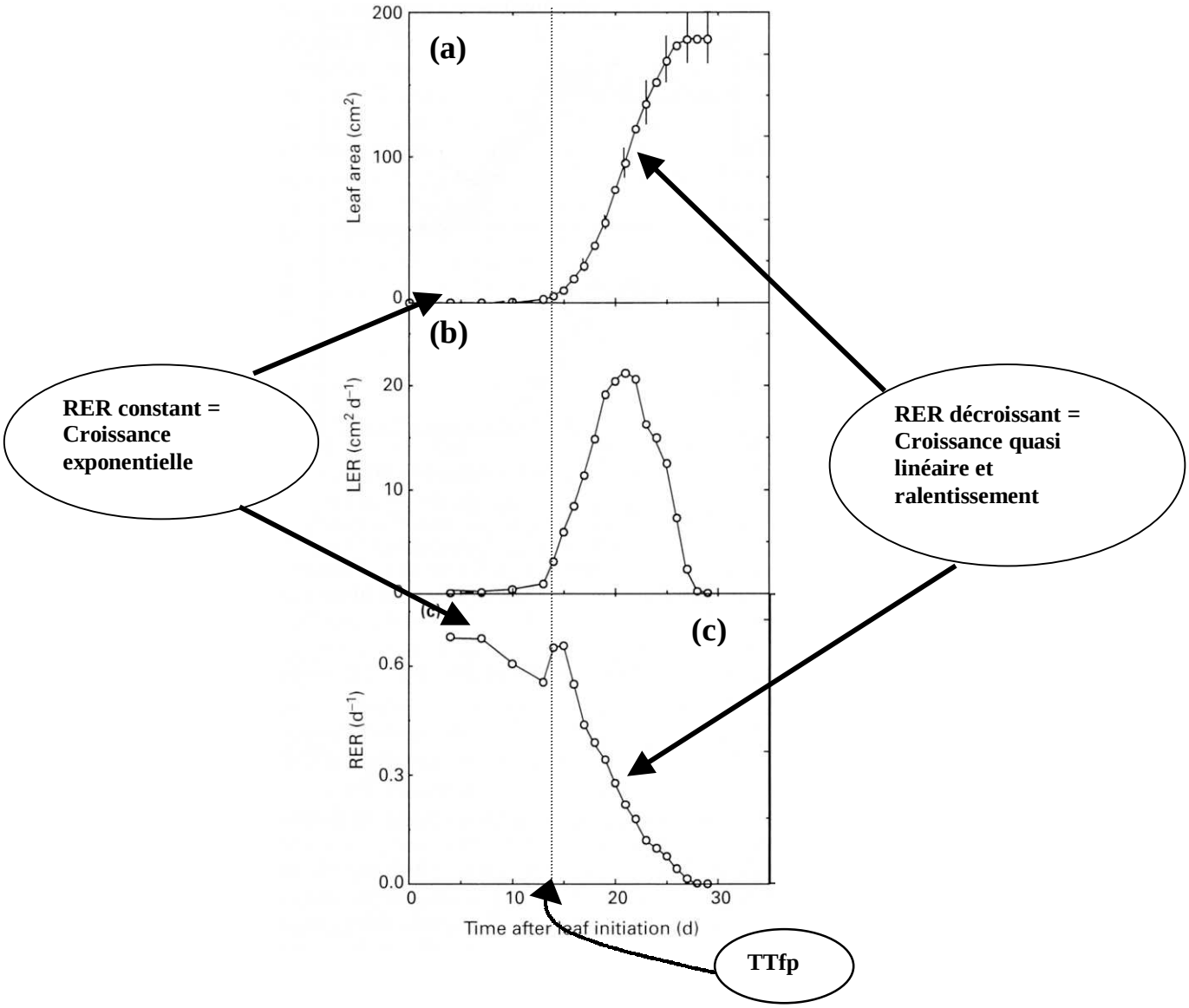


Figure II.7 : Evolution en fonction du temps thermique depuis l'initiation de la feuille de la surface foliaire (a), de la vitesse absolue d'expansion (LER) (b), et de la vitesse relative d'expansion (RER) (c) de la feuille 8 de tournesol (extrait de Tardieu et al.,1999). Les pointillés séparent la phase de croissance exponentielle de la phase quasi-linéaire et de ralentissement de l'expansion. TTfp est le temps thermique à la transition entre ces deux phases ou temps thermique à la fin du plateau de RER.

Essais SER-2, AVI-01 et VIS-99

Dans les essais SER-2, VIS-00 et AVI-01, la surface des feuilles a été mesurée à partir de l'apparition des feuilles qui se situe après la fin de la phase de croissance exponentielle (cf. chapitre IV). Les cinétiques de RER sont donc incomplètes et ne permettent pas de déterminer directement TTfp. Dans ces conditions, TTfp peut être estimé à partir du temps thermique au point d'inflexion de la logistique décrivant l'évolution de la surface foliaire (TTi). Dans l'essai SER-1, on constate en effet pour les feuilles 10 à 35 que la relation entre TTi et TTfp est quasiment linéaire (figure II. 8). Il a été montré sur tournesol (Lecoeur, comm. pers.) que cette relation est stable pour des conditions de croissance des feuilles très différentes. Dans SER-2, VIS-00 et AVI-01, nous avons donc calculé TTfp à partir de la régression linéaire déterminée sur les données de la figure II.8 et de TTi.

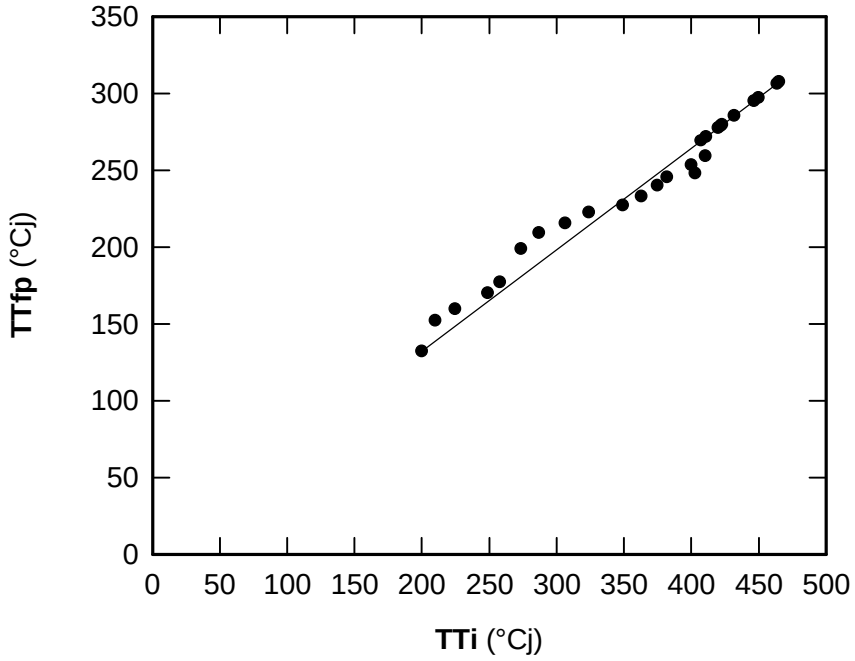


Figure II.8 : Relation entre le temps thermique au point d'inflexion (TTi) de la logistique décrivant la croissance individuelle des feuilles et le temps thermique à la fin de la phase de plateau de RER (TTfp) établie sur les feuilles de rang 10 à 35 dans l'essai SER-1.

3.3.3. Calcul de la vitesse d'expansion relative au cours de la phase de croissance exponentielle.

Dans l'essai SER-1, la vitesse relative d'expansion au cours de la phase de croissance exponentielle (notée RERp) des feuilles 10 à 35 a été déterminée en ajustant l'équation II.4 sur les données observées.

Dans les essais SER-2, AVI-01, RERp a été calculé pour les feuilles de rang 4 à 35 à partir de la surface des feuilles au moment de leur apparition (SFapp), qui correspond – à peu près - pour ces feuilles à la fin de la phase exponentielle, de leur surface au moment de l'initiation (SFini) estimée d'après les observations dans SER-1 à 0.0002 cm², et de la durée en temps thermique de la phase entre l'initiation et l'apparition de la feuille calculée à partir du schéma de développement (cf . chapitre IV). Le calcul est le suivant :

$$RERp = \frac{\ln(SFapp) - \ln(SFini)}{TTapp - TTini} \qquad \textbf{Eq. II. 8}$$

3.4. Analyses statistiques

Les analyses de variance ont été réalisées avec la procédure GLM (General Linear Model) du logiciel SAS.

Les régressions linéaires et non linéaires ont été effectuées en utilisant la macro Solveur d'Excel. La procédure d'ajustement des paramètres a consisté à rechercher la solution permettant de minimiser la somme des carrés des écarts entre données observées et estimées. Pour chaque ajustement nous avons calculé le coefficient de détermination (R^2) ainsi que le coefficient de variation de l'erreur (CVe). Ce coefficient rend compte de la variabilité non expliquée par le modèle.

CHAPITRE III

Modélisation du bilan hydrique d'une culture de laitues sous abri froid : application à l'évaluation des pertes d'azote nitrique par lixiviation sous la culture.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE III

MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE D'UNE CULTURE DE LAITUES SOUS ABRI FROID : APPLICATION A L'EVALUATION DES PERTES D'AZOTE NITRIQUE PAR LIXIVIATION SOUS LA CULTURE.

1.Introduction : objectifs et démarche

1.1. Objectifs

Comme nous l'avons montré dans le chapitre I, l'évaluation des risques de pollution nitrique en parcelle agricole nécessite de déterminer les quantités d'azote nitrique lixiviées (Nlixi) au delà du système racinaire de la culture. En effet, le diagnostic des risques basés sur l'observation du sens et de la concentration en nitrate des flux d'eau profond (variable R_{NO3^-}) peut présenté un biais dans des situations où, pour une même évolution des gradients et une même teneur en nitrate de l'eau drainée, le volume d'eau drainé est très différent. La démarche que nous proposons pour calculer Nlixi consiste à combiner des mesures de la concentration en nitrate de la solution du sol (C_{NO_3}) sous les racines et un modèle de bilan hydrique pour calculer le volume d'eau drainé (D) à la profondeur de mesure. L'objectif de ce chapitre est donc de valider un modèle de bilan hydrique pour le calcul des flux d'eau en profondeur sous des cultures de laitues sous abri froid, et de l'appliquer pour compléter le diagnostic des risques de pollution nitrique pour les situations étudiées dans la phase de diagnostic.

1.2. Système à modéliser, pas de temps et échelle d'espace de la modélisation

L'objet à modéliser est le système biophysique sol-plante composé de la culture de laitue et d'un compartiment de sol découpé en 2 horizons d'épaisseur variable dans le temps : le premier est défini par la zone de sol prospecté par les racines, l'autre par la zone entre la limite du système racinaire et la profondeur d'implantation du tensionic le plus profond. Les états de ce système sont sous l'influence du climat (rayonnement, température, ETP) et des interventions culturales (irrigation), qui vont constituer les variables d'entrée du modèle. Compte tenu de la fréquence des mesures de C_{NO_3} (10 jours) imposée par le mode de fonctionnement des tensionics, le pas de temps de la modélisation doit être au maximum celui

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

de la décade pour pouvoir suivre l'évolution de C_{NO_3}. Toutefois, le diagnostic dynamique des risques de pollution nitrique au cours de la culture nécessite de tenir compte de la fréquence des interventions culturales et des événements climatiques susceptibles de modifier les flux d'eau. Ainsi, les suivis effectués chez les producteurs montrent que les irrigations peuvent être quotidiennes notamment en début de cycle. De ce fait, le pas de temps de la modélisation devra être au minimum de la journée.

L'échelle d'espace de la modélisation du bilan hydrique et de notre approche d'évaluation est la parcelle agricole. Mais en raison des problèmes d'hétérogénéité des états du milieu (sol, climat), des apports d'eau et d'azote sous un abri froid (De Tourdonnet, 1998), l'échelle d'espace de la modélisation que nous avons choisi est la placette de mesure. Cette placette correspond à la zone de quelques m² équipée de tensionics du dispositif utilisé dans l'étude préliminaire (chapitre I). Nous reviendrons dans les conclusions et perspectives générales de la thèse sur la question de la prise en compte de l'hétérogénéité.

1.3. Quel modèle utiliser ?

Nous avons vu dans le chapitre I (section 2.2.4) qu'il existe deux grands types de modèles de transfert hydrique dans le sol : les modèles analogiques, dans lesquels le sol est représenté comme une succession de réservoirs horizontaux, et les modèles mécanistes, basés sur l'équation de Richards. Les premiers sont facilement applicables en parcelles agricoles connaissant les teneurs en eau caractéristiques du sol (capacité au champ et point de flétrissement). Le principal inconvénient de ces modèles est qu'ils ne peuvent pas rendre compte des phénomènes de remontées capillaires. Dans nos situations, cela peut être une limite à l'utilisation de ce type de modèle car on observe fréquemment une inversion des sens des flux d'eau sous les racines en fin de cycle après une longue période de drainage des que les potentiels en surface descendent en dessous de –30 kPa. Il arrive par ailleurs que la nappe remonte au niveau du tensionic le plus profond comme dans la situation S3. L'utilisation d'un modèle mécaniste apparaît plus appropriée pour pouvoir rendre en compte de ces situations mais pose le problème du paramétrage des propriétés hydrodynamiques du sol. La question est alors de savoir si un tel modèle peut être paramétré et utilisé dans le cadre d'une démarche opérationnelle en parcelles agricoles. Dans le cas où les propriétés hydrodynamiques ne peuvent être déterminées, il est par ailleurs intéressant de savoir si un modèle analogique, plus facile à paramétrer, est valable pour simuler le bilan hydrique et le drainage d'une culture de laitues sous abri froid.

Pour répondre à ces questions, nous avons paramétré (section 3), testé et comparé (section 4) un modèle mécaniste (PASTIS, Lafolie, 1991) et un modèle analogique (STICS, Brisson et al., 1998) adaptés pour simuler le bilan hydrique d'une culture de laitue sous abri froid. La comparaison des deux modèles a porté sur leur capacité à simuler le bilan hydrique et les flux d'eau sous les racines d'une culture de laitue, et leur compatibilité avec les contraintes d'une démarche d'évaluation en parcelles agricoles. Dans la section 5, nous utilisons STICS pour compléter le diagnostic des risques de pollution nitrique les situations étudiées dans le chapitre I correspondant à des cultures de laitues sous abri froid, pour lesquelles nous ne disposons pas de caractérisation des propriétés hydrodynamiques. Nous présentons au préalable (section 2) les formalismes développés dans ces deux modèles pour la simulation du bilan hydrique d'une culture de laitue.

2. Description des concepts et des formalismes utilisés pour la modélisation du bilan hydrique d'une culture de laitues dans STICS et PASTIS

PASTIS a été initialement conçu pour simuler les transferts d'eau et de solutés dans le sol. Il ne comporte pas à l'origine de module pour la simulation du fonctionnement d'une culture. Ce module a été développé en fonction des besoins des différents utilisateurs (Maraux and Lafolie, 1998 ; De Tourdonnet, 1998). De Tourdonnet (1998, 2001) a notamment élaboré et paramétré un module permettant de simuler la croissance, et les besoins en eau et en azote d'une culture de laitue sous abri froid.

STICS est une modèle de fonctionnement des cultures simulant le comportement du système sol-culture. Il a été conçu pour être opérationnel en conditions agricoles. Le modèle est organisé en modules traitant de la croissance et du développement de la culture, du fonctionnement du sol en interaction avec le système racinaire, et de l'impact des pratiques culturales sur le système. C'est un modèle générique qui, à partir de formalismes classiques, est adaptable à des types de cultures variés (Tayot et al., 1999 sur maïs et sorgho ; Brisson et al., 1999 sur banane). L'adaptation de STICS pour la laitue a été réalisée en 2001 (Brisson et al., 2002).

Dans les 2 modèles, le schéma de modélisation du bilan hydrique fait intervenir 3 modules :

- un pour le calcul de la consommation en eau de la culture,
- un pour la simulation de la croissance racinaire,
- et un pour les transferts d'eau dans le sol.

2.1. Consommation en eau de la culture

2.1.1.Principe

Le calcul de la consommation en eau d'une culture de laitue est basé sur les mêmes principes dans STICS et PASTIS. L'approche utilisée sépare le calcul de l'évaporation et de la transpiration à partir d'une démarche de type coefficient cultural pour le calcul des besoins n eau (ETM = Kc x ETP). Dans STICS, le formalisme générique proposé calcule ce coefficient à partir de l'indice foliaire par analogie à la loi de Beer. Ce formalisme n'est pas adapté pour une culture de laitue qui ne respecte pas l'hypothèse d'homogénéité du couvert imposée par la loi de Beer. Le modèle a donc été modifié en incorporant le taux de couverture (TC) dans le calcul de Kc, comme cela a été fait dans PASTIS (De Tourdonnet, 1998). Le taux de couverture correspond au rapport entre la surface projetée au sol de la laitue (S, cm^2)) et la surface de sol disponible par plante, fonction de la densité de plantation (D plants.ha^{-1}), soit :

$$TC = \frac{S \times D}{10000} \qquad \textbf{Eq. III. 1}$$

La simulation de l'évolution de TC au cours du temps est donc nécessaire au calcul des besoins en eau.

2.1.2. Modélisation de l'évolution du taux de couverture

PASTIS (De Tourdonnet, 1998)

A partir des travaux de Van Holsteijn (1980), De Tourdonnet propose un ajustement de l'évolution de TR en fonction du temps thermique à partir d'une équation logistique à 3 paramètres,

$$TC = \frac{TC\max}{1 + \exp(-a \times (TT - b))} \qquad \textbf{Eq. III. 2}$$

où TT est le temps thermique, en base 3.5°C , cumulé depuis la plantation, TCmax est la valeur du plateau final de la courbe, a représente la pente au point d'inflexion et b l'abscisse au point d'inflexion.

STICS

La même équation est utilisée dans STICS mais le temps thermique est remplacé par une échelle temporelle variant entre 0 et 2 appelée ULAI qui est l'unité de développement foliaire utilisée dans STICS

$$TC = \frac{TCmax}{1 + \exp(penterecouv \times (infrecouv - ULAI))} \qquad \textbf{Eq. III. 3}$$

où penterecouv et infrecouv sont analogues aux paramètres a et b.

ULAI est fonction des stades de développement, eux-mêmes fonction du temps thermique cumulé depuis la plantation (TT) :

si TT < STLEVAMF

$$ULAI = \frac{infrecouv \times somcour}{STLEVAMF}$$

si STLEVAMF < TT < STLEVAMF + STAMFLAX

$$ULAI = infrecouv + (2 - infrecouv) \times \frac{somcour}{STAMFLAX} \qquad \textbf{Eq. III. 4}$$

si TT > STLEVAMF + STAMFLAX

$$ULAI = 2$$

où STLEVAMF est la somme de température entre le stade levée (LEV) et le stade accéleration maximale de la croissance foliaire (AMF), STAMFLAX est la somme de température entre le stade AMF et le stade TC maximum, et somcour est le temps thermique cumulé entre 2 stades de développement.

2.1.3. Calcul de l'évapotranspiration maximale (ETM)

L'évapotranspiration maximale est égale au produit de l'ETP de référence (ETPr) et du coefficient cultural (Kc)

$$ETM = Kc \times ETPr \qquad \textbf{Eq. III. 5}$$

Kc est calculé à partir du taux de couverture (TC). Pour PASTIS,

$$Kc_{PASTIS} = (K\max - K\min) \times \frac{TC}{TC\max} + K\min \qquad \textbf{Eq. III. 6}$$

où Kmax et Kmin sont respectivement les valeurs maximum et minimum de Kc, et TRmax le taux de couverture maximum.

Pour STICS ,

$$Kc_{STICS} = \frac{TC}{TC_{K\max}} \times (K\max - 1) + 1 \qquad \text{pour } TC < TC_{Kmax} \qquad \textbf{Eq. III. 7}$$

$$Kc_{STICS} = Kmax \qquad \text{pour } TC > TC_{Kmax}$$

où TC_{Kmax} représente le taux de couverture à partir duquel Kc = Kmax.

2.1.4. Séparation entre évaporation et transpiration potentielle (resp. Ep et Tp)

PASTIS

L'évaporation potentielle (Ep) est fonction de TC et de l'ETM (Heinen, 1997):

$$Ep = ETM \times \exp(-\alpha TC) \times r_f \qquad \textbf{Eq. III. 8}$$

où r_f est un facteur adimensionnel variant de 0 à 1, qui permet de tenir compte de la réduction de Ep due à la présence d'un paillage (plastique, végétal) sur le sol. La transpiration potentielle de la culture (Tp) est alors calculée simplement par,

$$Tp = ETM - Ep \qquad \textbf{Eq. III. 9}$$

STICS

Dans STICS, Ep est calculé à partir de l'ETPr et de TC ,

$$Ep = ET\,Pr \times (1 - TC) \times (1 - couvermulch) \qquad \textbf{Eq. III. 10}$$

où couvermulch est un paramètre pour tenir compte de la présence d'un paillage sur le sol. Comme pour PASTIS, Tp est ensuite calculé par différence entre ETM et Ep, mais cette différence est pondérée dans STICS par un terme, reposant sur le paramètre β, rendant compte de l'augmentation de la demande au niveau du couvert induite par l'assèchement du sol sous la végétation (Brisson et al., 1992).

$$Tp = (ETM - Ep) \times [\beta - (\beta - 1)] \times \frac{Ea}{Ep} \qquad \textbf{Eq. III. 11}$$

où Ea est l'évaporation réelle du sol (cf ci-dessous).

2.1.5. Calcul de l'évaporation réelle

Dans PASTIS, l'évaporation est limitée par rapport à Ep quand le sol atteint un potentiel hydrique limite (ψ_{lim}). Cette contrainte est prise en compte par une procédure décrite par Neumann et al. (1975, cité par Lafolie, 1991).

Dans STICS, l'évaporation est potentielle après une pluie ou une irrigation jusqu'à ce que le cumul d'évaporation journalière atteigne un seuil Q0. Au delà de ce seuil, l'évaporation est réduite en fonction du climat et du type de sol.

2.1.6. Calcul de la transpiration réelle (Tr)

PASTIS

Dans PASTIS, quand le sol se dessèche, la transpiration de la culture est limitée via l'absorption racinaire. L'absorption racinaire est modélisée selon l'approche développée par Feddes et al. (1978 cités par Lafolie, 1991) :

$$\Gamma(z) = \alpha_p(\psi)\frac{Tm(t)}{L(t)} \times \rho(z) \qquad \textbf{Eq. III. 12}$$

où, $\Gamma(z)$ est le terme de puits racinaire de l'équation de Richards (voir 2.4.1)

$\alpha_p(\psi)$ est une fonction traduisant l'effet du stress hydrique sur l'absorption

Tm(t) est la transpiration maximale au temps t

L(t) est la longueur totale du système racinaire

$\rho(z)$ est la densité racinaire à la profondeur z

Les valeurs de L(t) et $\rho(z)$ sont fournies par le module de croissance racinaire (cf. 2.3.). La fonction $\alpha_p(\psi)$ est définie par morceaux en fonction du potentiel hydrique (h) du sol à la profondeur z ,

si $h1<h(z)<0$	il y a asphyxie, l'absorption est nulle,
si $h2<h(z)<h1$	l'absorption augmente progressivement,
si $h3<h(z)<h2$	l'absorption est maximum,
si $h4<h(z)<h3$	le stress hydrique apparaît, l'absorption, donc l'alimentation en eau de la plante, diminuent progressivement en fonction de h,
si $h(z)<h4$	l'absorption est nulle.

STICS

Le rapport entre la transpiration réelle de la culture et la transpiration maximale dépend de la teneur en eau disponible dans la zone racinaire (TETA). Tant que TETA est supérieur au seuil critique TETSTOMATE , la transpiration n'est pas limitée Tr/Tp =1. Ce rapport décroît linéairement en fonction de TETA quand il est inférieur à TETSTOMATE. Le seuil TETSTOMATE dépend à la fois de la demande climatique, de la densité racinaire et du potentiel critique de fermeture des stomates (paramètre PSISTO) (Brisson, 1998).

2.2. Croissance racinaire

La méthode proposée dans PASTIS pour modéliser l'évolution de la profondeur et de la densité racinaire au cours du temps consiste à reconstituer ces cinétiques à partir d'un fichier

d'observations et d'un module d'interpolation et d'extrapolation linéaire. Cette approche nécessite donc d'avoir des mesures du profil de densité racinaire pour chaque nouvelle situation qu'on souhaite modéliser. De telles observations ne sont pas envisageables dans le cadre de l'utilisation du modèle pour l'évaluation en parcelles d'agriculteurs.

Pour améliorer la prévision de la croissance racinaire dans PASTIS, son module de croissance racinaire a été remplacé par celui de STICS. Ce module calcule d'une part la croissance du front d'enracinement, et la croissance de la densité racinaire d'autre part.

2.2.1. Croissance du front d'enracinement.

La croissance journalière du front d'enracinement (DELTAZ) est calculée en fonction du temps thermique (TT, en base 3.5°C) et de la vitesse de progression du front racinaire (CROIRAC). Elle dépend également de l'humidité (fonction HUMIRAC pour la sécheresse, EFANOX pour l'anoxie) et de la densité apparente du sol (EFDA).

$$DELTAZ = CROIRAC \times TT \times HUMIRAC \times EFANOX \times EFDA \qquad \textbf{Eq. III. 13}$$

2.2.2. Croissance de la densité racinaire

STICS propose deux options pour la simulation de la croissance de la densité racinaire : par profil type, ou par densité vraie. Dans l'option par profil type, la forme du profil de densité racinaire est prédéfinie, et est toujours la même au cours du temps. L'option par densité vraie peut être préférée pour des cultures ou pour des sols pour lesquels ce profil type n'est pas adapté. C'est l'option par profil type qui a été incorporée dans PASTIS, et utilisée dans STICS, pour la modélisation de cultures de laitues sous abri froid. Compte tenu de la faible profondeur d'enracinement des laitues, on peut estimer que ce formalisme est suffisant.

Le profil type de densité racinaire a une forme sigmoïdale décrite par 3 paramètres : Zlabour, Zprlim et Zpente. Ces paramètres sont définis à partir d'un profil de référence. Zlabour correspond à la profondeur de la couche labourée, dans laquelle on suppose que la densité racinaire est optimale (appelée LVOPT). Zpente est la profondeur à laquelle l'efficacité d'absorption des racines est réduite de moitié. Zprlim est la profondeur du front racinaire pour le profil de référence.

A partir de ces paramètres, l'évolution du profil de densité racinaire efficace, LRAC(Z), en fonction de la profondeur atteinte par le système racinaire (Zrac) est décrite par l'équation suivante :

$$LRAC(Z) = \frac{LVOPT}{1 + \exp(-S \times (Z - Zdemi))}$$

$$S = \frac{-4.6}{Zlabour - Zpente}$$

$$Zdemi = \max\left(Zrac - Zpr\lim + Zpente, \frac{1.4}{S} \right)$$

Eq. III. 14

2.3. Transferts de l'eau dans le sol

2.3.1. PASTIS

L'équation de Richards

L'équation de Richards décrit l'écoulement mono-dimensionnel de l'eau dans un sol homogène non saturé.

$$C(\psi(z)\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\psi(z)\frac{\partial H}{\partial z} \right] - \Gamma(z)$$

Eq. III. 15

où,

t représente le temps (en heure)

z est la profondeur, comptée positivement vers le bas (en m)

ψ est le potentiel matriciel du sol (en m)

$H = \psi - z$, est le potentiel hydrique total du sol (en m)

C est la capacité capillaire du sol (en m^{-1})

K est la conductivité hydraulique du sol (en $m.h^{-1}$)

Γ est un terme de puits représentant l'absorption racinaire (en h^{-1}) (cf 2.2.6)

Propriétés hydrodynamiques du sol

La résolution de l'équation de Richards nécessite de déterminer les relations entre potentiel matriciel et teneur en eau volumique (courbe de rétention $\psi(\theta)$) et entre conductivité hydraulique et humidité volumique ($K(\theta)$). Ces deux relations définissent les propriétés hydrodynamiques d'un sol. Elles dépendent du type de sol et doivent donc être caractérisées pour chaque nouvelle parcelle.

Le formalisme utilisé dans PASTIS pour décrire relation $\psi(\theta)$ est celui proposé par Van Genuchten (1980) :

$$\frac{\theta - \theta r}{\theta s - \theta r} = \frac{1}{\left[1 + \left(\alpha|\psi|^n\right)\right]^{(1-1/n)}}$$

Eq. III. 16

Rapport-Gratuit.com

Avec

θs = humidité volumique à saturation ($m^3.m^{-3}$)

θr = humidité volumique résiduelle ($m^3.m^{-3}$)

α (m^{-1}) et n , paramètres de forme de la courbe

La relation $K(\theta)$ est décrite par une fonction log-polynomiale à 4 paramètres (a_0, a_1, a_2, a_3),

$$Log_{10}(K) = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 \qquad \textbf{Eq. III. 17}$$

Résolution numérique de l'équation

La résolution numérique de l'équation de Richards nécessite de définir un maillage du profil de sol, les conditions aux limites supérieure et inférieure du profil et les conditions initiales. Le maillage du sol se traduit par une grille verticale à pas variable (entre 0.1 et 2cm) sur la profondeur considérée. La définition de ce maillage doit respecter certains principes : placer un nœud du maillage aux interfaces entre les différentes couches ; réduire le pas au voisinage du sol et des interfaces entre couches. Les conditions initiales sont définies en teneur en eau ou en potentiel pour chaque nœud du maillage à partir de mesures effectuées en certains point du profil puis extrapolées par couche.

Les conditions aux limites peuvent être fixées soit en flux soit en potentiel. En surface, une condition de potentiel est imposée quand le sol est inondé. En dehors de cette situation particulière, la condition limite de surface est imposée en flux soit par les apports d'eau (pluies, irrigations), soit par l'évaporation. A la limite inférieure, la condition de flux est rarement utilisée. Ce peut être le cas en présence d'un horizon imperméable sous le système. Le flux imposé est alors nul. En condition de potentiel, le potentiel est déterminé soit par la profondeur du toit de la nappe, soit par des mesures effectuées à la limite du système étudié.

Le pas de temps de calcul du modèle est variable de $1/100^e$ de seconde à une heure. Il est ajusté automatiquement par le programme pour tenir compte des variations rapides de K et de C , notamment lors d'une irrigation, afin de conserver une bonne précision de calcul (Maraux, 1994 ; Findeling, 2001). Les variables de sortie du modèle sont ensuite intégrées à l'échelle de la journée.

2.3.2. STICS

Les transferts d'eau sont basés sur une analogie de type réservoir. Les sol est décomposé en horizons successifs (5 au maximum) chacun caractérisé par son humidité pondérale à la

capacité au champ (Hcc), son humidité pondérale minimum (Hmin), et sa densité apparente (Da). Les conditions initiales nécessaires à la modélisation sont les humidités pondérales par horizon.

Les transferts d'eau sont modélisés par couche élémentaire horizontale de 1cm dont les caractéristiques correspondent pour chacune à celles de l'horizon auquel elle appartient. En l'absence d'apport, il n'y a pas de mouvement d'eau. Lors d'un apport, les transferts se font par remplissage successif des couches. Lorsque l'humidité d'une couche atteint Hcc, la quantité d'eau excédentaire est drainée vers la couche immédiatement inférieure et ainsi de suite.

2.4. Conclusion

Cette description des formalismes utilisés dans STICS et PASTIS pour simuler le bilan hydrique d'une culture de laitue sous abri froid montre les différences fondamentales qui distinguent ces deux modèles sur la modélisation des transferts d'eau dans le sol. Par contre les modules de consommation en eau de la culture sont proches : ils font intervenir tous les deux le taux de couverture (TC) au lieu de l'indice foliaire pour le partage entre évaporation et transpiration. La nécessité d'adapter ce nouveau concept aux formalismes génériques préexistants dans STICS, a débouché sur des équations légèrement modifiées par rapport à celles utilisées dans PASTIS. Nous vérifierons dans la section 4, l'impact de ces différences sur les simulations des consommations en eau de la culture.

3. Paramétrage des modèles

Les paramètres nécessaires aux modules « consommation en eau de la culture » et « croissance racinaire » ont été estimés à partir des résultats de l'essai AVI-01 et de la bibliographie. Les paramètres sols ont été estimés pour les 4 essais sur des cultures sous abri à partir de mesures réalisées in situ ou au laboratoire.

3.1. Consommation en eau de la culture

Seule la fonction décrivant l'évolution du taux de couverture en fonction du temps thermique et le coefficient r_f, traduisant la réduction de l'évaporation par un paillage à la surface du sol, ont été l'objet d'un paramétrage à partir de nos données expérimentales. Pour les autres relations permettant de calculer la consommation en eau de la culture, nous avons utilisé les paramètres existants donnés par Lafolie et al. (1997) et De Tourdonnet (1998) pour

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

PASTIS, et par Brisson et al. (2002) pour STICS. Les valeurs de ces paramètres sont données dans le Tableau III. 1 et sont, pour certains, discutés ci-dessous.

Tableau III. 1 : Valeurs des principaux paramètres utilisés dans PASTIS et STICS pour la modélisation des besoins en eau d'une culture de laitue.

Fonction	Paramètres	STICS	PASTIS
Coefficient cultural Eq. III.6 et III.7	Kmax	1.2	
	Kmin	-	0.5
	TC_{KMAX}	1	-
Evaporation potentielle Eq. III.8 et III.10	α	-	1.995
	r_f ou (1-couvermulch)	de 0 à 0.5 (optimisation)	
Evaporation réelle cf. 2.15	ψ_{lim} (bars)	-	2.5
	Qo (mm)	12	-
Transpiration réelle cf. 2.1.6	h1/ h2/ h3/ h4 (bars)		0/0/0.3/15
	Psisto (bars)	15	

3.1.1. Evolution du taux de couverture

La figure III. 1 montre l'évolution, en fonction du temps thermique depuis la plantation, du taux de couverture mesuré et simulé selon le formalisme PASTIS paramétré par De Tourdonnet (1998). On constate un écart important entre les données expérimentales et ce modèle. Le modèle prédit une durée de mise en place de TC plus longue et un TCmax plus faible que ceux observés. Ces différences peuvent être dues à la variété qui n'est pas la même que dans notre essai, ou aux conditions de culture puisque De Tourdonnet a établi sa relation à partir de plantes cultivées en pots.

En conséquence, nous avons ajusté les paramètres de l'équation III.2, qui décrivent l'évolution de TC en fonction du temps thermique pour PASTIS et STICS, sur les données observées. Les résultats de ces ajustements sont données dans le tableau III.2 et représentés dans la figure III.1. On remarque que les évolutions de TC décrites par les 2 modèles sont très proches malgré des différences dans les formalismes utilisés.

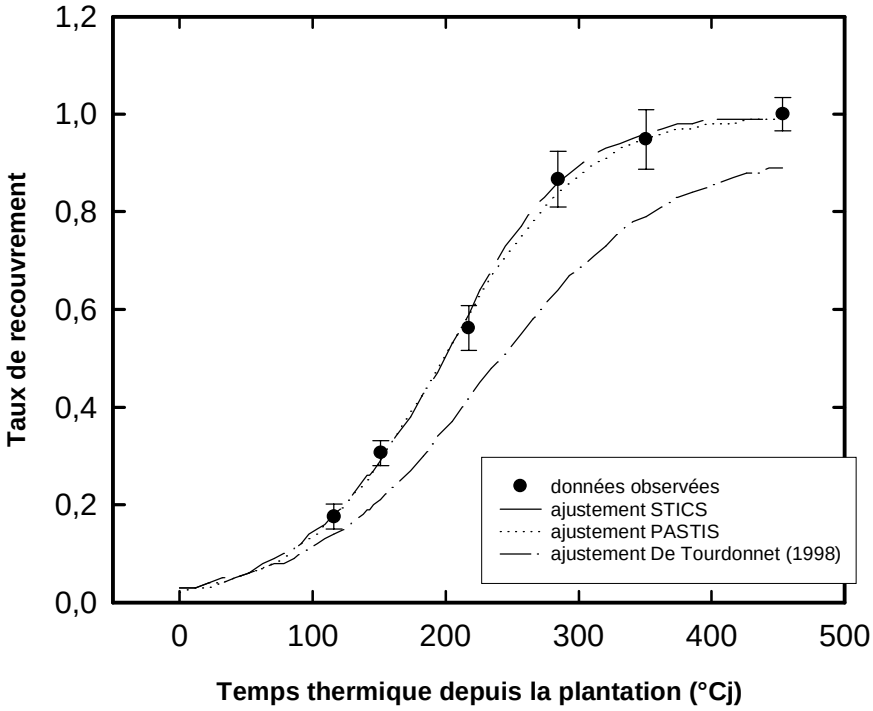


Figure III.1 : Evolution du taux de couverture en fonction du temps thermique depuis la plantation au cours de l'expérimentation AVI-01. Symboles : données observées. Pointillés : ajustement PASTIS. Traits : ajustement STICS.

Tableau III. 2 : Paramètres des fonctions de taux de couverture de STICS et PASTIS ajustés sur les données expérimentales de AVI-01, et donnés par De Tourdonnet (1998) pour PASTIS.

Paramètres (STICS/PASTIS)	**STICS**	**PASTIS**	**PASTIS De Tourdonnet (1998)**
TCmax	1	1	0.92
penterecouv/a	4.5 ($ulai^{-1}$)	0.0186 ($°Cj^{-1}$)	0.0152 ($°Cj^{-1}$)
infrecouv/b	0.85 (ulai)	200 (°Cj)	230 (°Cj)
Stlevamf	200 (°Cj)	-	-
Stamflax	250 (°Cj)	-	-
R^2	0.998	0.998	0.959
CVe	2.36 %	2.62 %	-

3.1.2. Estimation du coefficient de réduction de l'évaporation potentielle par un paillage (r_f, 1-couvermulch).

Dans notre zone d'étude, les cultures de laitues sous abri sont conduites sur des sols recouverts d'un paillage plastique. Cette technique présente plusieurs avantages dont la maîtrise des risques de maladies du collet et des adventices, le réchauffement du sol et la limitation de l'évaporation (CTIFL , 1997). Nous n'avons pas trouvé de références bibliographiques permettant de paramétrer le modèle pour ce dernier aspect. De Tourdonnet (1998) estime que le paillage bloque complétement l'évaporation, tandis que Lafolie et al. (1997) fixent le paramètre r_f de l'équation III .8 à 0.4 par optimisation sur les valeurs mesurées des potentiels hydriques simulés par PASTIS. A défaut d'une quantification expérimentale de ce paramètre, nous avons procédé de la même façon dans nos simulations avec PASTIS pour déterminer r_f (cf. 4.2) . Le paramètre couvermulch de STICS a ensuite été déduit par la relation couvermulch = 1- r_f.

3.1.3. Transpiration réelle de la culture

Les résultats de l'étude préliminaire (partie I) montrent que l'état hydrique du sol est maintenu à des humidités proches de la capacité au champ, et est rarement limitant pour la croissance des laitues. Dans ces conditions, on peut émettre l'hypothèse que la transpiration réelle de la culture est également peu limitée par rapport à la transpiration potentielle. En conséquence, les fonctions de réduction de Tp de STICS et de PASTIS n'ont pas été paramétrées spécifiquement pour des laitues sous abri froid. Ceci est acceptable pour le calcul du drainage et des quantités d'azote nitrique lixiviées pour les situations suivies dans la phase de diagnostic. Par contre, cette hypothèse risque de n'être plus valable pour tester des stratégies d'irrigation visant à réduire les apports d'eau pour limiter les risques de pollution nitrique, qui vont créer des situations temporaires de déficit hydrique pour la culture. Nous traiterons de cette question dans les parties IV et V.

3.2. Croissance racinaire

3.2.1. Progression de le profondeur d'enracinement.

Les mesures de profondeur d'enracinement (Zrac) effectuées au cours du cycle montrent une évolution quasi linéaire en fonction du temps thermique depuis la plantation. La profondeur maximale atteinte est de 35 cm en fin de cycle. La vitesse de progression du front d'enracinement (paramètre CROIRAC) a été calculée comme la pente de la régression linéaire entre les valeurs mesurées et le temps thermique (Fig. III. 2).

CROIRAC = 0.08 cm.°j^{-1}

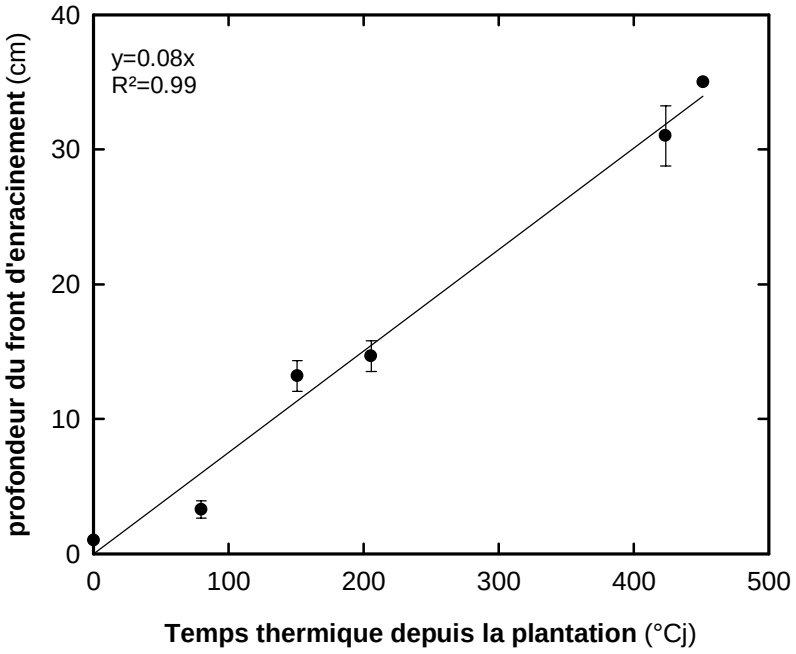


Figure III.2 : Evolution en fonction du temps thermique depuis la plantation de la profondeur du front d'enracinement observée au cours de l'essai AVI-01

3.2.2. Evolution de la densité racinaire

Les profils de densité racinaire observés à la moitié du cycle, et à la récolte de l 'essai AVI-01 montrent que l'enracinement de la laitue se fait essentiellement dans les 15 premiers cm de sol (Fig. III. 3). Au delà, la densité racinaire est divisée par 2, et on ne trouve plus de racines après 35 cm. Ces données confirment les indications communément fournies sur l'enracinement superficiel des laitues (CTIFL, 1997). Elles correspondent par ailleurs aux observations réalisées par d'autres auteurs (De Tourdonnet, 1998 ; Stirzaker et al., 1993 ; Burns, 1980 ; Montagu et al., 1998).

Le profil de densité racinaire de référence a été paramétré à partir des 2 profils observés, en fixant la densité racinaire maximale (LVOPT) à 2 cm.cm^{-3} d'après les travaux de De Tourdonnet (1998). Les paramètres du profil ajustés sont les suivants :

Zlabour = 10 cm

Zpente = 17 cm

Zprlim = 35 cm

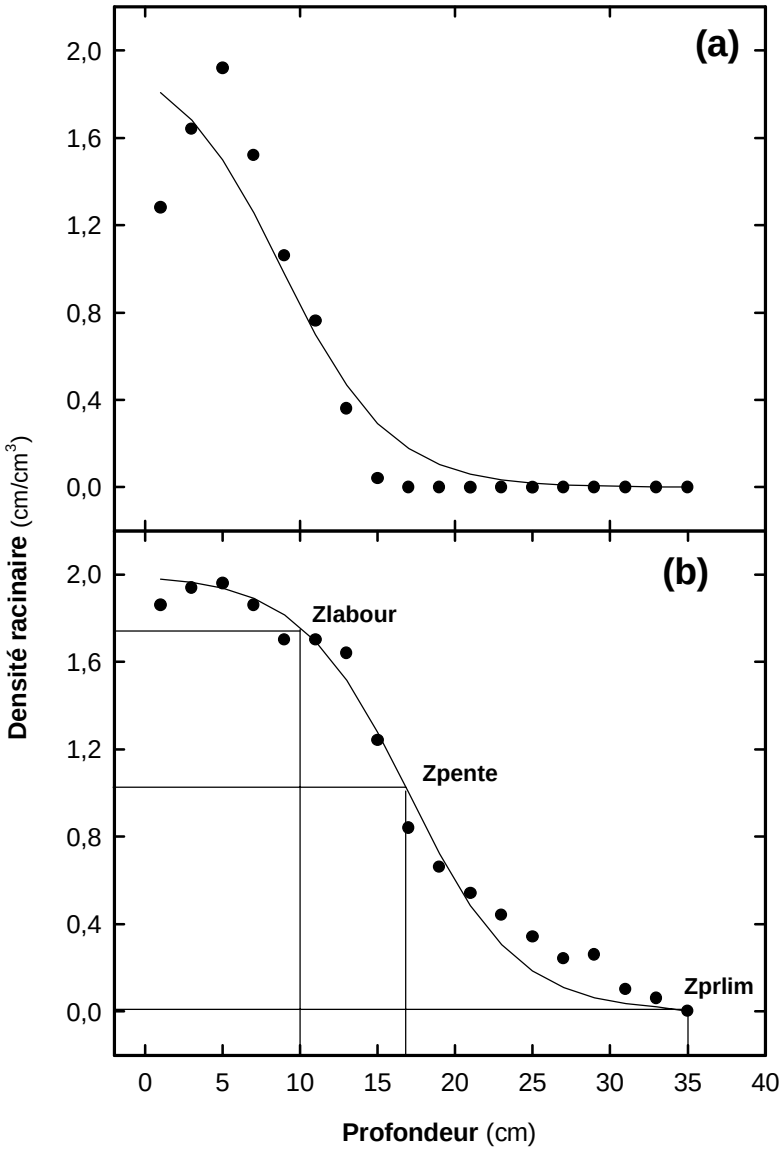


Figure III.3. : Profils de densité racinaire observés et ajustés à la moitié du cycle (jour 66) et (b) à la récolte.

3.3. Paramètres sol

La limite inférieure du compartiment sol a été fixée à 50 cm de profondeur pour l'essai AVI-01 et à 60 cm pour les essais VIS-99, VIS-00 et VIS-01.

3.3.1. STICS

Pour chaque essai, le sol a été divisé en 3 couches caractérisées chacune par ses humidités caractéristiques (Hcc et Hmin) et sa densité apparente (tableau III. 3). Pour chaque horizon Hcc a été mesurée par gravimétrie sur des échantillons de sol prélevés in situ, en début de cycle, 2 à 3 jours après une irrigation. Pour Hmin, nous avons pris la valeur de l'humidité au point de flétrissement permanent mesurée au laboratoire. Pour les essais AVI-01, VIS-00 et VIS-01, la densité apparente de chaque horizon correspond à la moyenne des densités

mesurées à la sonde gamma dans cet horizon. Pour VIS-99, la densité apparente a été estimée à partir de données disponibles pour une parcelle de la même exploitation ayant un type de sol proche de la parcelle étudiée.

Tableau III. 3 : Humidités caractéristiques par horizon pour STICS

Essai	Horizon	Hcc %	Hmin %	Da (T/m3)
AVI-01	0-10 cm	22.0	11.0	1.16
	10-25 cm	22.0	11.0	1.31
	25-50 cm	21.0	11.0	1.49
VIS-99	0-15 cm	23.0	11.5	1.18
	15-35 cm	23.0	11.5	1.25
	35-60 cm	21.5	11.5	1.54
VIS-00	0-20 cm	23	11.7	1.18
	20-40 cm	22.5	11.7	1.43
	40-60 cm	22	11.7	1.54
VIS-01	0-15 cm	25	14	1.03
	15-30 cm	25	14	1.22
	30-60 cm	23	15	1.45

3.3.2. PASTIS

Maillage et compartimentation du sol

Le maillage défini pour nos simulations est à un pas de 0.5 cm sur le 2 premiers cm de sol et de 1 cm ensuite. Comme pour STICS, le sol a été découpé en 3 horizons pour lesquels on a défini les valeurs des paramètres des relations $\psi(\theta)$ et $K(\theta)$.

Propriétés hydrodynamiques

Courbe de rétention $\psi(\theta)$

Les paramètres du modèle de Van Genuchten ont été déterminés par ajustement de l'équation III.16 sur les couples de données potentiels/humidité mesurés *in situ* comme le montre la figure III. 4 pour les essais VIS-99 et VIS-00.

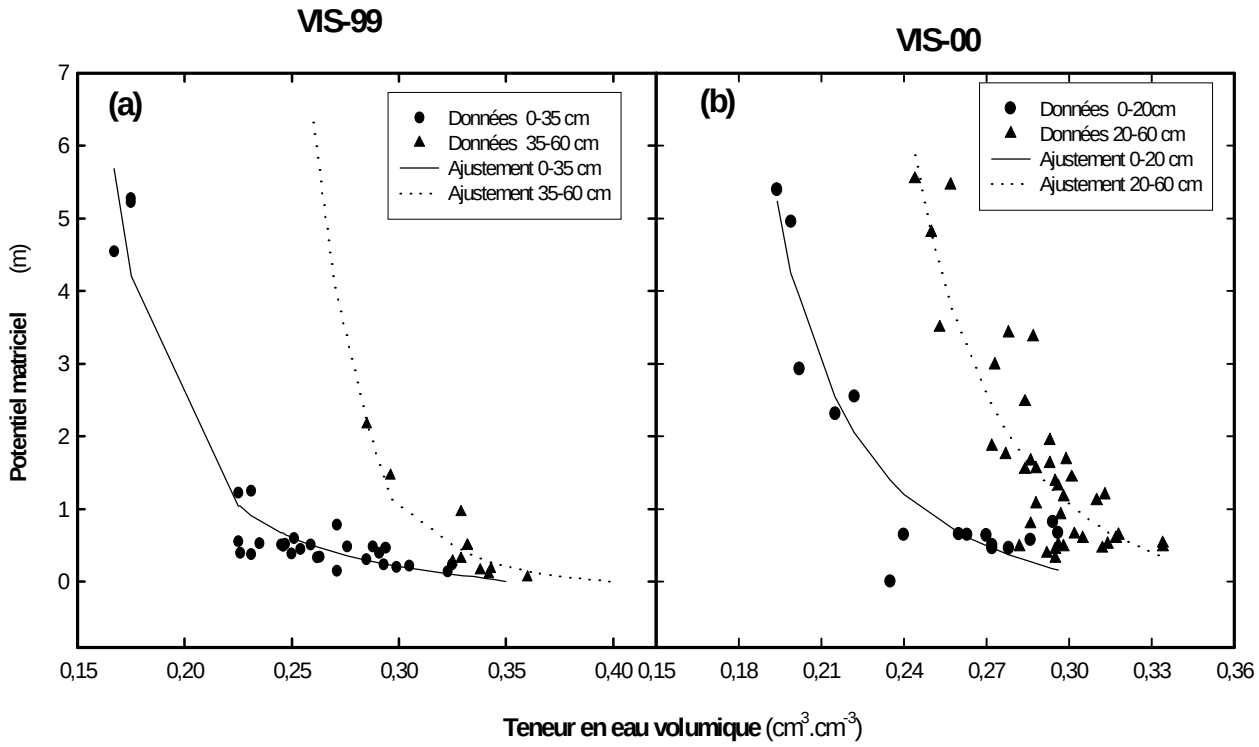


Figure III.4 : Courbes de rétention ajustées sur les couples potentiel hydrique/teneur en eau volumique du sol mesurés in situ pour ls différents horizons définis pour les essais (a) VIS-99 et (b) VIS-00

Tableau III. 4 : Paramètres des relations ψ(θ) et K(θ) pour chaque horizon dans les essais AVI-01, VIS-99, VIS-00 et VIS-01

Essais	Horizon	Courbe de rétention ψ(θ)				Conductivité hydraulique K(θ)			
		θs	θr	α	n	a_0	a_1	a_2	a_3
AVI-01	0-10 cm	0.3511	0	0.6228	1.0804	-11.30	-5.51	12.11	216.31
	10-25 cm								
	25-50 cm	0.3721	0.2110	0.5040	1.2457				
VIS-99	0-15 cm	0.35	0.1	5.569	1.379	-6	-3.076	186.28	530.79
	15-35 cm								
	35-60 cm	0.40	0.10	14.474	1.139				
VIS-00	0-20 cm	0.31	0.10	2.756	1.300	-11.698	-8.479	0 .123	215.49
	20-40 cm								
	40-60 cm	0.36	0.10	2.542	1.217				
VIS-01	0-15 cm	0.42	0	3.9534	1.1859	-11.95	-3.26	-6.54	70.97
	15-30 cm								
	30-60 cm								

Relation K(θ)

Pour les essais AVI-01, VIS-00 et VIS-01, les paramètres de la relation K(θ) ont été initialement déterminés par la méthode de WIND. Pour l'essai VIS-99, ces paramètres ont été établis, comme pour la densité apparente, à partir des données disponibles sur une parcelle de la même exploitation présentant le même type de sol. Le Tableau III. 4 donne la valeur des paramètres des relations ψ(θ) et K(θ) obtenus par ces procédures pour les 4 essais

4. Evaluation et comparaison de STICS et PASTIS pour la modélisation du bilan hydrique et des flux d'eau sous les racines d'une culture de laitues

L'essai AVI-01 ayant été utilisé pour le paramétrage des fonctions de taux de couverture et de croissance racinaire, les simulations réalisées pour cette situation constituent un test du modèle permettant de contrôler son fonctionnement sur un certain nombre de variables synthétiques mesurées au cours du cycle. Pour les autres essais, seuls les paramètres sol ont été modifiés. Les résultats des simulations permettent donc d'évaluer à la fois le paramétrage de certaines fonctions spécifiques comme le taux de couverture, et le fonctionnement général des modèles .

4.1. Conditions initiales et aux limites, et variables d'entrées des modèles

4.1.1. Conditions initiales

STICS

Les teneurs en eau pondérales initiales par horizon ont été calculées à partir du profil d'humidité volumique mesuré le premier jour de la simulation pour AVI-01, et ont été définies pour chaque placette des 3 autres essais à partir de la moyenne des 3 ou 4 valeurs d'humidité pondérale mesurées sur la placette en début de cycle.

PASTIS

Les conditions initiales ont été définies en humidité volumique pour AVI-01, en potentiel hydrique pour les autres situations à partir des profils mesurés pour chaque placette le premier jour de chaque simulation.

Rapport-Gratuit.com

4.1.2. Conditions aux limites (PASTIS)

La condition à la limite inférieure a été imposée en potentiel à partir des mesures tensiométriques à 50 cm pour AVI-01, et à 60 cm pour les autres essais. La condition limite à la surface a été imposée en flux à partir de l'évapotranspiration et des irrigations.

4.1.3. Variables d'entrées

Les variables d'entrées nécessaires à la modélisation du bilan hydrique dans STICS et PASTIS sont la température (pour la simlulation du taux de couverture et de la croissance racinaire) et l'ETP journaliers de la parcelle, ainsi que le calendrier des irrigations. Dans STICS les irrigations sont décrites par la dose apportée, dans PASTIS, elles sont décrites par l'heure du début, l'heure de fin et l'intensité de chaque apport. La température et l'ETP ont été respectivement mesurée et calculée à l'échelle de la parcelle, tandis que les doses d'irrigation ont été mesurées pour chaque site de mesure.

4.2. Calage de PASTIS

Dans toutes les situations, les premières simulations avec PASTIS montraient des écarts importants entre les potentiels hydriques ou les teneurs en eau volumiques observés et simulés. Pour corriger cela, nous avons procédé au calage de certains paramètres du modèle afin de réduire ces écarts. Cette procédure de calage est fréquente dans l'utilisation de modèles mécanistes comme PASTIS pour lesquels certains paramètres cruciaux pour le fonctionnement du modèle sont difficilement mesurables, ou dont la mesure est entachée d'une forte incertitude (Maraux, 1994 ; Findeling, 2001).

Dans notre cas, la relation $K(\theta)$ (eq. III.17) n'a pas été déterminée par des mesures in situ mais sur des cylindres de sol non remanié par la méthode de Wind (Tamari et al., 1993). Cette méthode présente un certain nombres de limites liées essentiellement à la conservation et à la manipulation de l'échantillon qui peuvent entraîner une modification des propriétés hydrodynamiques du sol. Nous avons donc effectué un calage des paramètres de la relation $K(\theta)$ sur les données de potentiel hydrique observées. Le calage a notamment porté sur le paramètre a_0 de cette relation, qui détermine la conductivité hydraulique à saturation. Dans la pratique, cette procédure a consisté à comparer l'évolution des potentiels hydriques mesurés et simulés pour différentes valeurs de a_0. Nous ne cherchions pas à obtenir le paramétrage le plus fin du modèle, mais que le modèle reproduise au mieux les évolutions des données observées. Le calage a été réalisé sur les données tensiométriques du site B pour VIS-99 et VIS-00, et du site P1 pour VIS-01.

Le tableau III. 5 donne les valeurs de a_0 avant et après calage pour les différents horizons caractérisés dans chaque essai. Pour VIS-01, les différences entre potentiels hydriques observés et simulés n'ont pu être corrigées par le calage des propriétés hydrodynamiques. Ce problème a été attribué à une mauvaise détermination de la courbe de rétention in situ. Une nouvelle caractérisation au champ de cette relation a été mise en place, mais les données ne sont pas encore disponibles. En conséquence, les simulations avec PASTIS n'ont pu être effectuées sur cette situation.

Tableau III.5 : Valeurs du paramètre a_0 de la relation K(θ) avant et après calage pour les essais AVI-01, VIS-99 et VIS-00.

Essais	Horizon	a_0 avant calage	a_0 après calage
AVI-01	0-10 cm	-11.30	-11.45
	10-25 cm		-11.50
	25-50 cm		-11.80
VIS-99	0-15 cm	-6	-6
	15-35 cm		-6
	35-60 cm		-7
VIS-00	0-20 cm	-11.698	-11.198
	20-40 cm		-11.698
	40-60 cm		-11.698

Les propriétés hydrodynamiques du sol étant calées, nous avons dans un deuxième temps procédé au calage du paramètre r_f déterminant la réduction de l'évaporation potentielle du sol par le paillage plastique (cf. 3.1.2). Ce paramètre joue un rôle important sur les flux d'eau sortant du système et donc sur le drainage. Une surestimation ou une sous-estimation de l'évaporation risquent d'induire respectivement une sous- ou une sur estimation des quantités d'eau drainées. Comme précédemment, la procédure de calage a consisté à réduire l'écart entre potentiels hydriques observés et simulés. Les valeurs finalement retenues pour r_f ont été 0.5 pour AVI-01 et 0 pour VIS-99 et VIS-00. Cela signifie que l'évaporation potentielle du sol a été réduite de 50% pour AVI-01, et a été complètement bloquée pour VIS-99 et VIS-00.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4.3. Simulation de la consommation en eau de la culture

4.3.1. Evaluation de la prévision du taux de couverture

La figure III. 5 montre l'évolution du taux de couverture (TC) observée et simulée pour les essais VIS-99, VIS-00 et VIS-01 avec PASTIS. Nous n'avons pas représenté les évolutions simulées par STICS car, comme on l'a vu précédemment, les prévisions de TC des deux modèles sont proches (cf.3.1.1).

La prévision de TC est bonne pour VIS-99 . Le modèle sous-estime légèrement les TC observés pour VIS-00, et il les restitue très mal pour l'essai VIS-01. Dans ce cas, la mise en place du TC est beaucoup plus longue que celle simulée par le modèle. Le Trmax est atteint en 600°Cj contre 420°Cj prévu par le modèle.

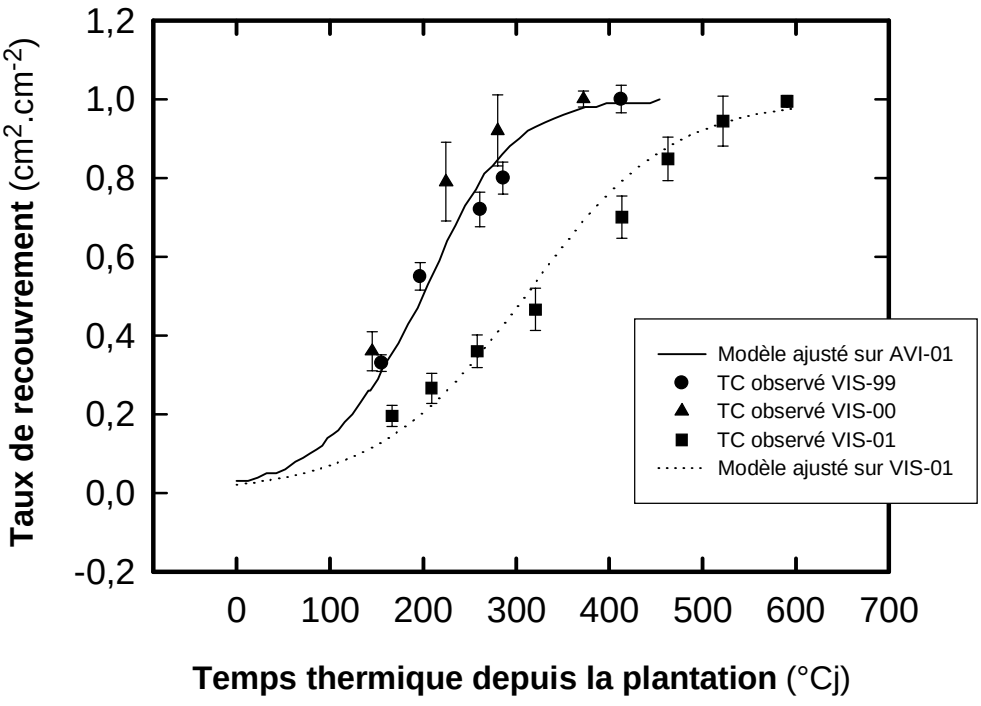


Figure III.5 : Evolution du taux de couverture observés (points) et simulés (traits) pour les essais VIS-99, VIS-00 et VIS-01.

Le temps thermique seul ne permet donc pas de modéliser l'évolution de TC dans nos situations. Van Holsteijn (1980) arrive aux mêmes conclusions en comparant les cinétiques de TR de 5 variétés de laitues cultivées en automne ou à la fin de l'hiver. A la suite de Nichols (1970), Van Holsteijn (1980) propose de tenir compte de la somme du rayonnement reçu par la culture pour expliquer, au delà de l'effet de la température, les différentes cinétiques de TC observées. Le Tableau III. 6 donne pour les 4 essais sous abri le temps thermique et le PAR incident (PARinc) cumulés au cours du cycle. On constate que le PARinc cumulé pour VIS-

01 est très inférieur aux valeurs obtenues pour les 3 autres essais entre (755 et 877 mol.m^{-2}). Ces différences de rayonnement s'expliquent en partie par les périodes de l'année au cours desquelles les essais ont été menés. VIS-99 et VIS-00 correspondent comme AVI-01 à des cultures implantées à la fin de l'hiver entre le mois de janvier et de février, et récoltées entre mars et avril, à une période où l'intensité lumineuse et la durée du jour augmentent. VIS-01 correspond par contre à une culture d'automne-hiver, plantée fin octobre et récoltée en janvier, quand la durée du jour diminue. Il semble donc que le rayonnement influe également sur la mise en place du taux de couverture dans nos situations.

Tableau III.6 : Temps thermique et PAR incident cumulé de la plantation à la récolte des essais AVI-01, VIS-99, VIS-00 et VIS-01.

Essai	Temps thermique cumulé (°Cj)	PAR incident cumulé (mol.m^{-2})
AVI-01	463	771
VIS-99	423	877
VIS-00	384	755
VIS-01	604	477

Nous présentons dans le chapitre V un modèle de développement et de croissance foliaire de plantes de laitue qui permet de simuler le taux de couverture de la plante en fonction de la lumière et de la température. Ce modèle n'a pas pour l'instant été intégré dans STICS et PASTIS. Nous avons donc effectué les simulations en utilisant le paramétrage réalisé sur les données AVI-01 pour VIS-99 et VIS-00, et en ajustant les paramètres de l'équation III.4 sur les données mesurées pour VIS-01 .

4.3.2. Simulation des besoins en eau de la culture

Evaluation de la prévision de l'ETR (AVI-01)

La figure III. 6 montre l'évolution de l'ETR journalier simulé par STICS et PASTIS et estimé à partir des pertes d'eau mesurées sur les mini-lysimètres dans l'essai AVI-01. Nous pouvons estimer que ces pertes représentent l'ETR s'il n'y a pas de drainage à la base des cylindres. Pour cela, nous avons exclu les mesures effectuées les 2 jours suivant une irrigation. Par ailleurs, nous avons également écarté les mesures effectuées après le jour 74 (2 semaines avant la récolte) car, à partir de cette date, le taux de couverture des plantes dans les mini-lysimétres est devenu significativement différent des plantes du reste du tunnel.

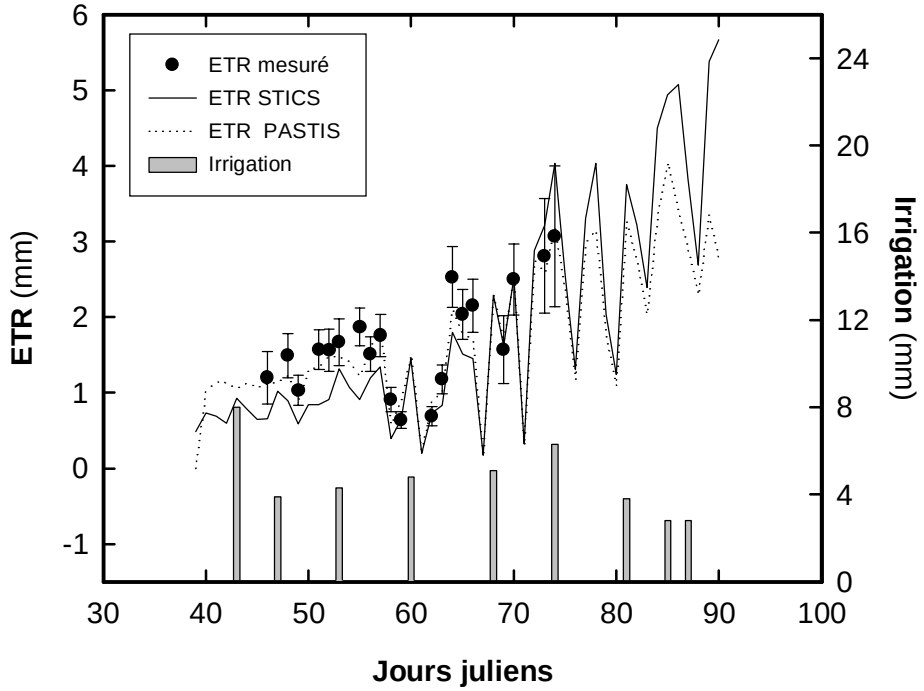


Figure III.6 : Evolution au cours du cycle de l'ETR observé et simulé par PASTIS et STICS pour l'essai AVI-01.

Les modèles reproduisent correctement la dynamique de la consommation en eau par la culture observée. L'ajustement entre valeurs mesurées et simulées montre que PASTIS donne de meilleurs résultats que STICS (resp. R^2=0.88 et R^2=0.71). On constate que STICS a notamment tendance à sous estimer l'ETR en début en cycle, et à la surestimer en fin de cycle par rapport à PASTIS. L'ETR cumulée au cours du cycle est de 91 mm pour PASTIS ET 98 mm pour STICS.

Simulation de la consommation en eau par la culture pour les essais VIS-99, VIS-00 et VIS-01

Pour les essais VIS-99, VIS-00 et VIS-01, l'évaporation étant complètement bloquée par le paillage, la consommation en eau de la culture se limite à la transpiration. On observe une évolution parallèle des cinétiques de transpiration potentielle (Tpot) cumulées au cours de la culture simulées par STICS et PASTIS pour le site B de l'essai VIS-00 (figure III.7). En fin de cycle, le cumul de Tpot est de 68.9 mm avec STICS et de 61.5 mm avec PASTIS. On observe la même chose pour la situation VIS-99 avec des cumul de Tpot de 107.1 mm avec STICS et 96.4 mm avec PASTIS. Les simulations du taux de couverture étant très proches entre les deux modèles, on peut penser que ces écarts proviennent des différences dans les formalismes utilisés pour calculer Tpot.

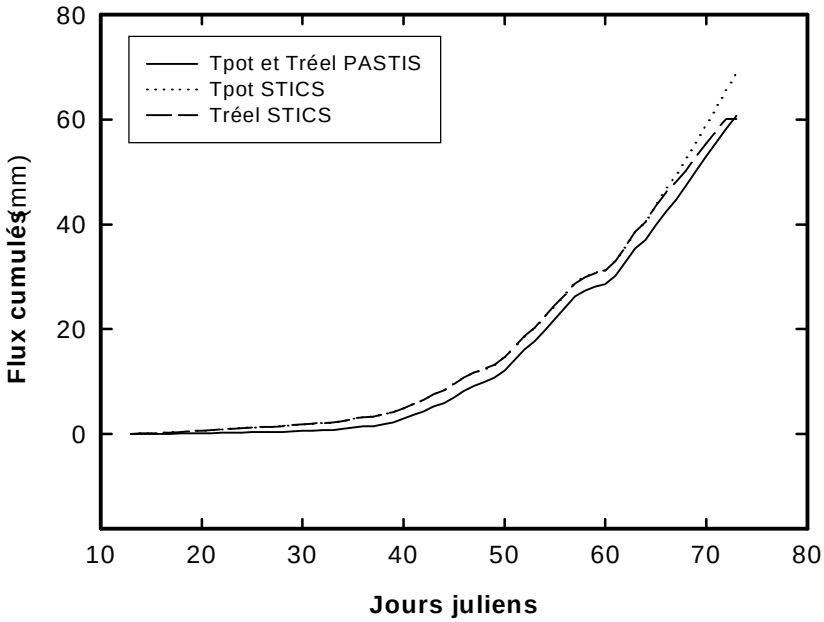


Figure III.7 : Comparaison des fux de transpiration potentielle et réelle cumulés simulés par STICS et PASTIS pour le site B de l'essai VIS-00

Dans tous les essais, on observe par ailleurs que Tréel devient inférieure à Tpot en fin de cycle dans toutes les simulations avec STICS mais pas avec PASTIS comme l'illustre le cas du site B de VIS-00 sur la figure III.7 . Comme on le voit sur cette figure, Tréel devient inférieur à Tpot dans les 15 derniers jours du cycle. Cette réduction de Tréel signifie que STICS simule un stress hydrique pour la transpiration des plantes à cette période là, donc que la teneur en eau dans la zone racinaire a atteint la valeur seuil TESTOMATE (cf. 2.1.6). Le fait que PASTIS ne simule pas de stress hydrique peut s'expliquer par les différences dans les formalismes et le paramétrage utilisé, mais peut également provenir d'une différence dans la simulation des teneurs en eau dans le sol.

4.4. Simulation de l'état hydrique et des transferts d'eau dans le sol

4.4.1.Comparaison des stocks d'eau mesurés et simulés

La figure III. 8 présente l'évolution des stocks d'eau mesurés et simulés par STICS et PASTIS dans l'horizon 0-50 cm pour AVI-01, et 0-60 cm pour les autres essais. Pour VIS-99, VIS-00 et VIS-01, un seul site de mesure a été présenté pour chaque site, l'évolution des stocks étant quasi identique pour les autres sites .

Les données mesurées montrent que le stock initial est proche du stock à la capacité au champ dans toutes les situations. Le stock varie peu ensuite au cours des 2 premiers tiers du cycle, puis il baisse jusqu'à la récolte. Cette évolution des stocks est similaire à la dynamique au cours du cycle des potentiels hydriques mesurés dans les situations étudiées dans la partie I.

Elle s'explique en partie par la gestion des irrigations. On constate en effet que la fréquence et les doses d'irrigation sont plus élevées en début de cycle, alors que les besoins en eau de la culture sont plus faibles qu'en fin de cycle.

Les ajustements entre les stocks mesurés et les stocks simulés montrent que PASTIS restitue mieux les stocks d'eau que STICS (resp. R^2=0.904 et R^2=0.881). Cela s'observe notamment sur les simulations effectuées sur l'essai AVI-01, pour lequel STICS simule un dessèchement plus important que dans la réalité en fin de cycle alors que PASTIS restitues très bien les stocks jusqu'à la récolte (Figure III.8a). L'écart entre les stocks finaux calculés par PASTIS et STICS (stock_pastis - stock_stics = 22mm) ne peut s'expliquer seulement par la différence entre les ETR simulés (ETRpastis – ETRstics = -8mm). Cet écart peut par contre s'expliquer par des remontées capillaires en fin de cycle, qui vont compenser en partie les besoins en eau de la culture non couverts par les stocks, dont STICS ne peut pas rendre compte contrairement à PASTIS.

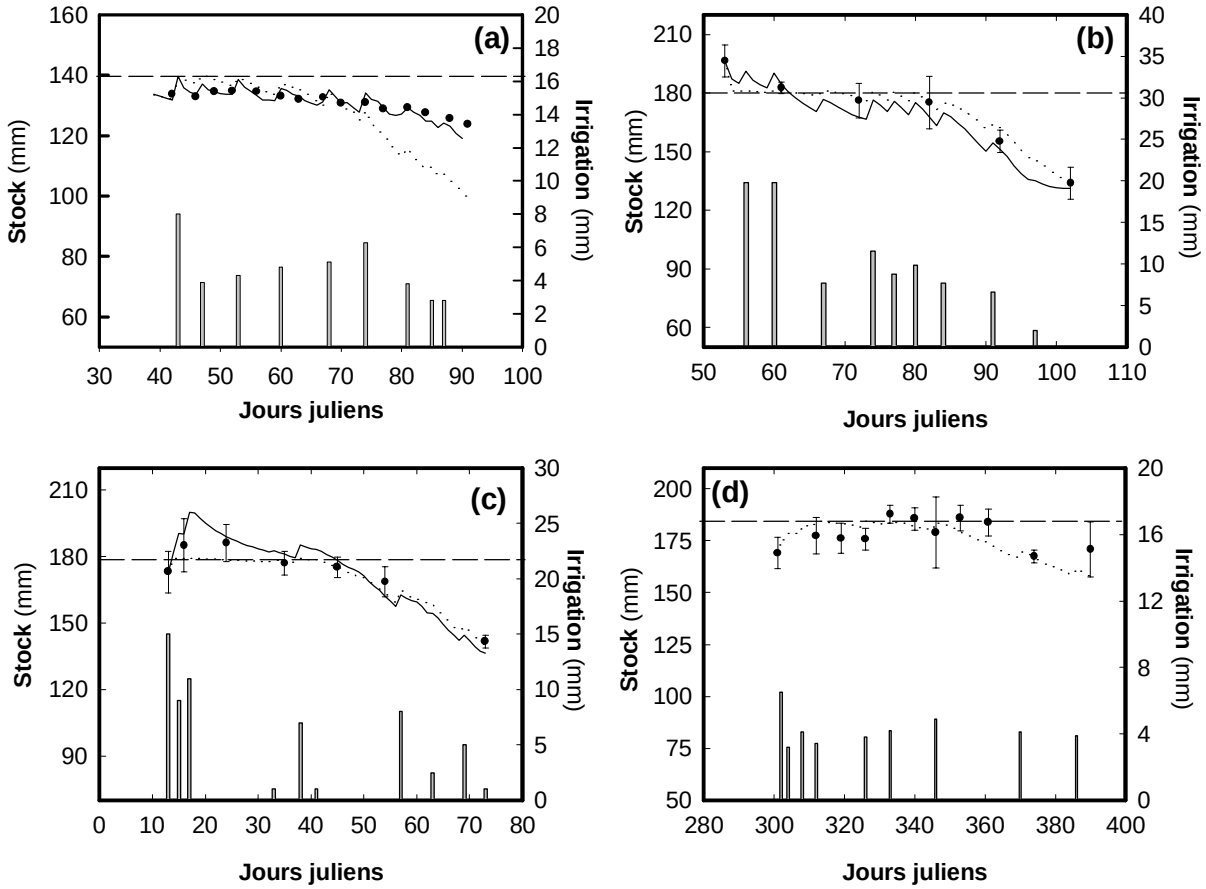


Figure III.8 : Evolution des stocks d'eau dans le profil observés (point) et simulés par PASTIS (trait plein) et par STICS (pointillés). (a) essai AVI-01, (b) essai VIS-99 site B, (c) essai VIS-00 site B, (d) essAi VIS-01 site P1. Les barres verticales représentent les irrigations. Les lignes horizontales marquent le stock à la capacité au champ.

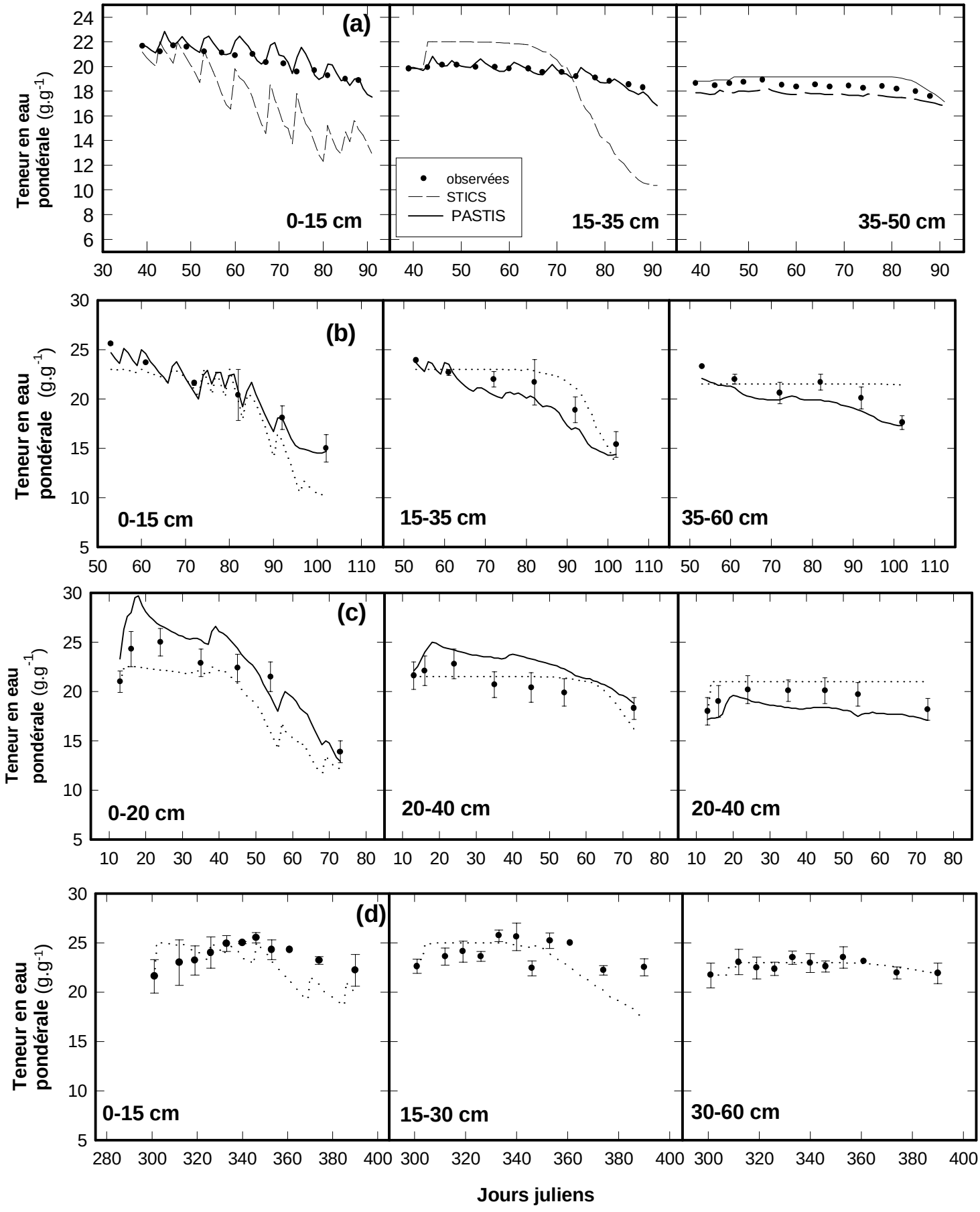


Figure III.9 : Evolution des teneurs en eau pondérales par horizon observées (symboles) et simulées par PASTIS (trait plein) et par STICS (pointillés) pour (a) AVI-01, (b) le site B de VIS-99, (c) le site B de VIS-00, (d) le site P1 de VIS-01.

La figure III.8c illustre une autre différence de comportement entre PASTIS et STICS sur la simulation effectuée pour le site B de l 'essai VIS-00. Dans ce cas, on constate, sur la première moitié du cycle, que, suite à une irrigation, le stock simulé par STICS ne varie pas et demeure autour de 180 mm tandis que le stock simulé par PASTIS dépasse cette valeur pour atteindre 200 mm. Cette différence est due à un problème inhérent aux formalismes utilisés dans les modèles de type réservoir. Dans ces modèles, la borne supérieure du réservoir est généralement déterminée par l'humidité à la capacité au champ. Le stock simulé ne peut dépasser cette limite contrairement à ce qu'il se passe dans la réalité puisque le sol va pouvoir stocker de l'eau transitoirement jusqu'à saturation de son espace poral. C'est ce dont rend compte PASTIS dans l'exemple présenté. Cette restriction au stockage de l'eau imposé par STICS va par ailleurs avoir des conséquences sur le drainage, puisque l'eau en excès par rapport à la capacité au champ du réservoir va être immédiatement drainée vers le compartiment inférieur alors qu'elle est en réalité retenue dans les horizons supérieurs.

4.4.2.Comparaison des teneurs en eau pondérales mesurées et simulées par horizon

La figure III. 9 présente l'évolution de l'humidité pondérale des 3 horizons de référence définis dans le paramétrage pour, respectivement, AVI-01 et un site des essais VIS-99, VIS-00 et VIS-01. Comme pour les stocks d'eau, les mesures montrent que l'humidité du sol par horizon varie peu au cours du cycle, et se situe à des valeurs proches de la capacité au champ de chaque horizon.

PASTIS restituent mieux les teneurs en eau pondérales par couche mesurées que STICS comme le montre les ajustements entre données observes et simulées (R^2=0.782 pour PASTIS et R^2=0.615 pour STICS). PASTIS reproduit également mieux la dynamique des teneurs en eau par horizon que STICS. On observe notamment, dans toutes les situations, que STICS sous estime les teneurs en eau des couches de surface entre 0 et 30 cm en fin de cycle, et a tendance à surestimer par contre celles de la couche profonde. A part pour l'essai AVI-01, ces écarts ont tendance à se compenser ce qui explique que le stock d'eau sur le profil soit bien restitué. Il y a donc un problème de redistribution de l'eau entre les horizons dans STICS.

L'enracinement des plantes étant limité à 35 cm (cf. 2.2), STICS sous estime donc les teneurs en eau dans la zone racinaire. Ce dessèchement au niveau des racines plus important que la réalité en fin de culture laisse penser que la réduction de Tréel (par rapport à Tpot) simulée à cette période (cf. 4.3.2) ne correspond pas au fonctionnement de la culture.

4.4.3.Simulations des potentiels hydriques du sol

La simulation des potentiels hydriques ne concerne que PASTIS. C'est sur la base des valeurs de potentiel hydrique que ce modèle simule les transferts d'eau dans le sol, et à partir desquelles il recalcule les teneurs en eau et les stocks. C'est donc la variable la plus pertinente pour évaluer PASTIS. Le potentiel hydrique du sol est par ailleurs une variable importante pour notre diagnostic.

Les figures III. 10 et III. 11 montrent l'évolution des potentiels hydriques mesurés et simulés respectivement pour les 3 sites des essais VIS-99 et VIS-00. Les profondeurs de mesures étaient 10, 20 et 30 cm pour VIS-99, et 5, 10, 20, 30 et 45 cm pour VIS-00. Dans les 2 cas, les mesures du site B ont été utilisées pour le calage du modèle. Les simulations des deux autres sites constituent donc une validation de ce calage.

Dans les 2 essais, l'évolution des potentiels hydriques mesurés est identique pour tous les sites et toutes les profondeurs. Au cours des 2 premiers tiers du cycle, les potentiels hydriques se situent à des valeurs élevées entre –50 et –200 mbars et varient peu, puis ils diminuent ensuite jusqu'à la récolte. Cette baisse des potentiels est d'autant plus marquée qu'on est proche de la surface. Ces observations sont cohérentes avec l'évolution des stocks sur 0-60cm et des teneurs en eau par couche décrite ci-dessus, et s'expliquent par la distribution des irrigations au cours du cycle.

PASTIS restitue bien l'évolution des potentiels mesurés pour l'ensemble des sites et des profondeurs. Ce résultat permet donc de valider pour chaque parcelle le calage des propriétés hydrodynamiques effectués sur un des sites de mesure. L'ajustement entre données mesurées et simulées est assez bon avec un R^2 de 0.744. Il montre que le modèle surestime légèrement les valeurs mesurées entre 0 et –40 kPa et les sous estime pour le reste de la gamme tensiométrique (-40 à –80 kPa). Dans son étude méthodologique sur le tensionic, Godard (1994) montre que dans cette gamme (-40 à –80 kPa) le tensionic a tendance à surestimer le potentiel hydrique mesuré avec des tensiomètres traditionnels. L'écart entre le modèle et les observations peut donc être dans ce cas en partie expliquée par une erreur sur la mesure.

Rapport-Gratuit.com

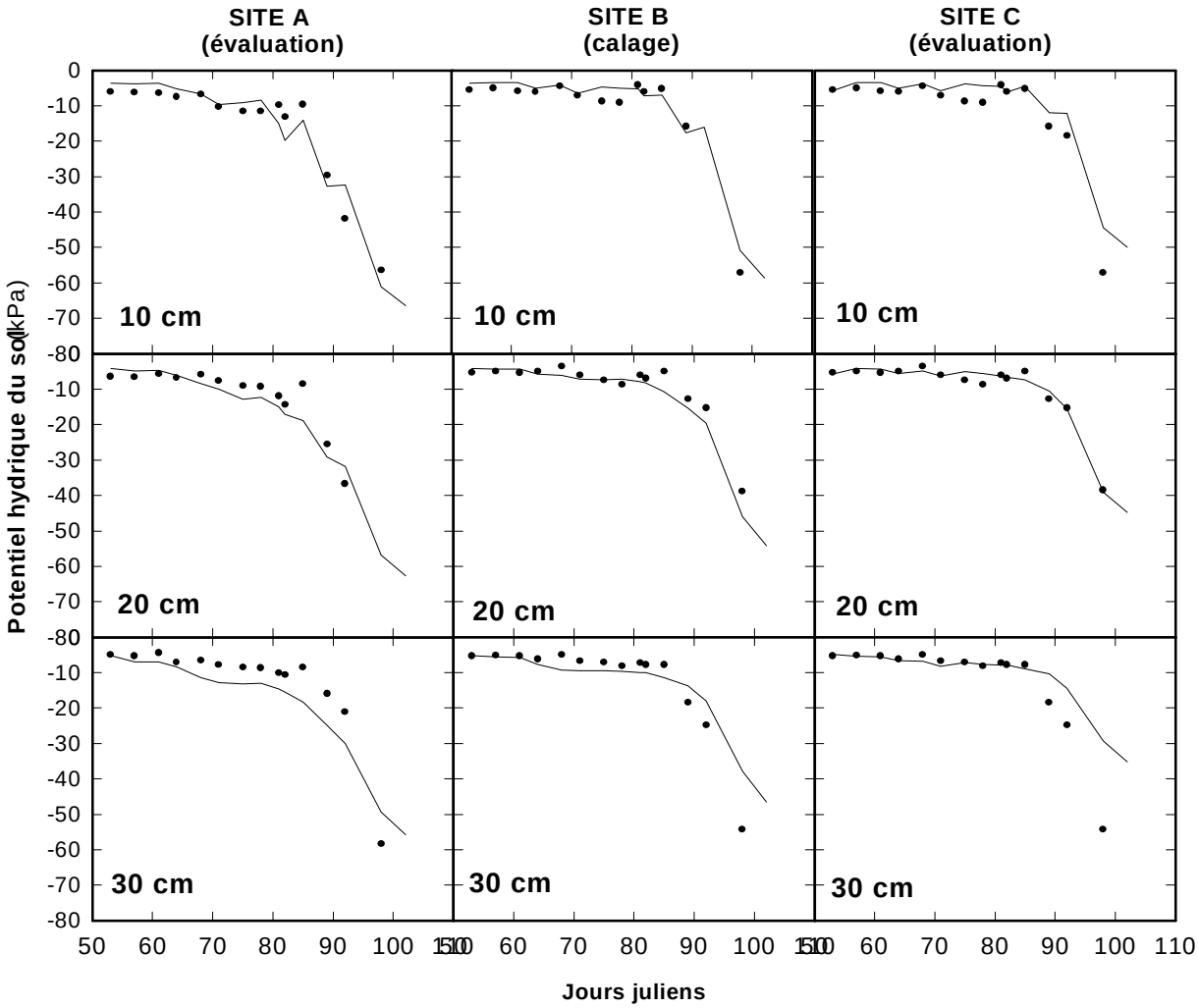


Figure III.10 : Evolution des potentiels hydriques du sol mesurés (symboles) et simulés (ligne) par PASTIS pour les 3 sites et les 3 profondeurs de mesure dans VIS-99.

4.4.4. Conclusion.

Nos résultats montrent que PASTIS et STICS, avec le paramétrage proposé dans la section 2, restituent globalement bien les principaux termes du bilan hydrique (variations de stocks et consommation en eau de la culture). Les simulations effectuées avec PASTIS donnent de meilleurs résultats que celles faites avec STICS. STICS reproduit notamment mal les teneurs en eau du sol par horizon et les stocks en fin de cycle. Ces écarts entre le modèle et la réalité sont directement dues aux limites conceptuelles d'un modèle de type réservoir comme STICS qui ne peut rendre compte des phénomènes de remontées capillaires et de redistribution de l'eau entre les couches qui se produisent en fin de cycle dans nos systèmes. Dans la suite, nous évaluons les conséquences de ces limites de STICS par rapport à PASTIS pour la simulation des flux d'eau sous les racines.

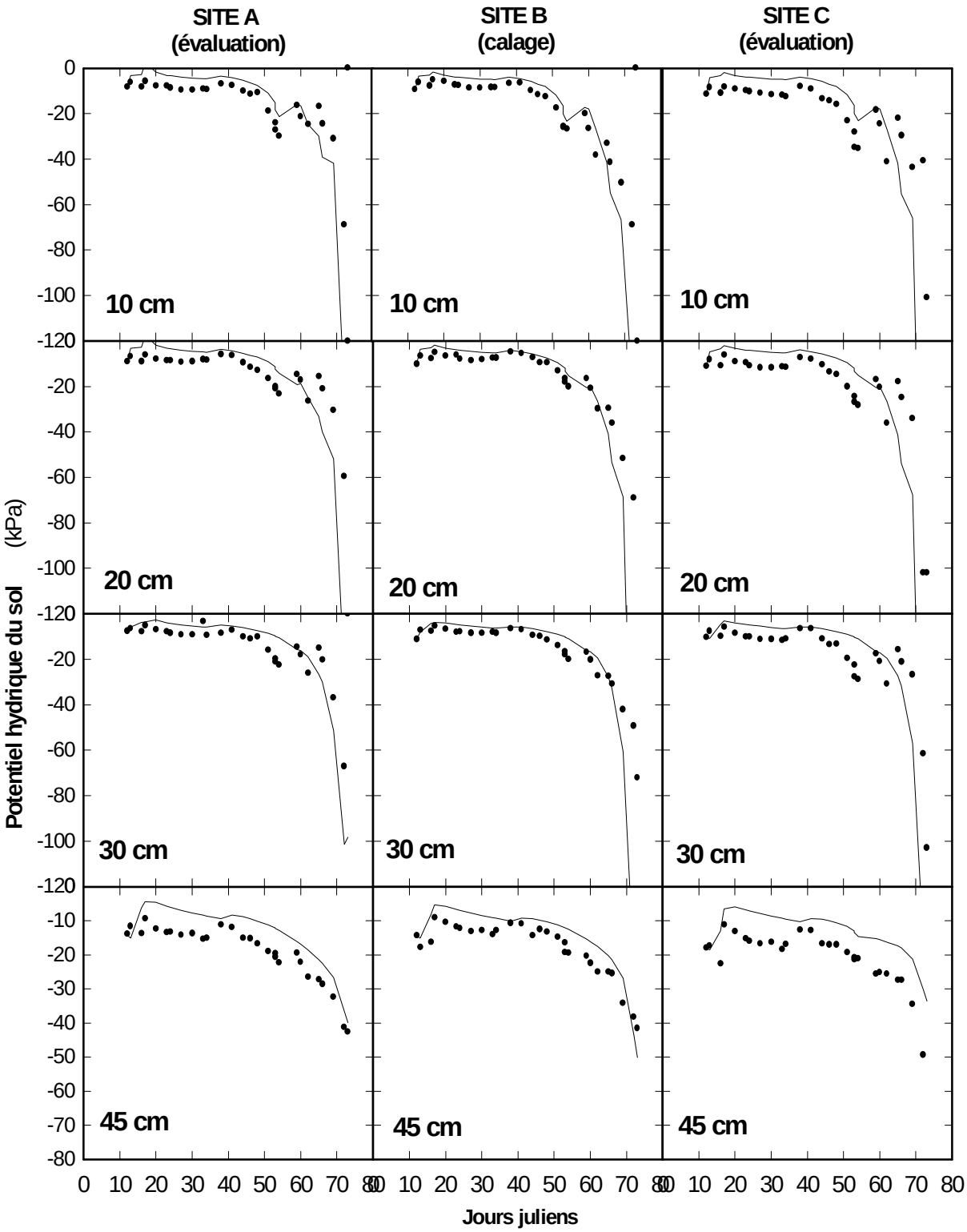


Figure III.11 : Evolution des potentiels hydriques du sol mesurés (symboles) et simulés (ligne) par PASTIS pour les 3 sites et les 4 profondeurs de mesure dans VIS-00

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4.5. Comparaison des flux sous les racines simulés par STICS et PASTIS

4.5.1. Flux d'eau journaliers

Les figures III. 12 et III. 13 représentent, respectivement pour les 3 sites de VIS-99 et VIS-00, l'évolution au cours du cycle du gradient hydraulique calculé à partir des mesures de potentiel hydrique sous les racines, et des flux d'eau journaliers à 60 cm de profondeur simulés par STICS et PASTIS. Par convention, un gradient ou un flux positif indiquent du drainage, et un gradient ou un flux négatif indiquent des remontées capillaires.

La distribution et l'intensité des flux journaliers simulés par STICS et PASTIS présentent des différences importantes. Dans toutes les situations, STICS ne simule que des flux drainants, localisés au cours de la première moitié du cycle. Ces épisodes de drainage sont ponctuels et ont toujours lieu le jour suivant une irrigation (non montré). Avec PASTIS, les flux sont répartis tout au long du cycle avec une période de drainage quasi continue de la plantation jusqu'à 10 à 20 jours avant la récolte, suivie d'une période de remontées capillaires. Cette évolution du sens des flux simulés par PASTIS est par ailleurs cohérente avec le sens des gradients hydrauliques calculés à partir des mesures tensiométriques. PASTIS représente donc mieux que STICS les flux d'eau observés sous les racines.

La dynamique des flux simulée par STICS s'explique en partie par les problèmes de limitation de la capacité de stockage du sol et de répartition de l'eau entre les couches évoqués ci-dessus (cf. 4.4.2). En début de cycle, le stock d'eau du sol est déjà à la capacité au champ. Le stock simulé par STICS ne pouvant dépasser cette limite, le moindre apport d'eau est immédiatement drainé en profondeur. Avec PASTIS, la teneur en eau va d'abord atteindre la saturation et le drainage va être étalé dans le temps en fonction des propriétés hydrodynamiques du sol. Dans la seconde moitié du cycle, quand les besoins en eau de la culture augmentent, le drainage simulé par STICS est limité par la trop forte sollicitation des couches de surface. Nous avons vu en effet que la teneur en eau de ces couches est sous estimée par STICS au cours de cette période. De ce fait, les irrigations ne vont alors plus permettre d'atteindre la capacité au champ des premières couches, il n'y a donc plus de drainage.

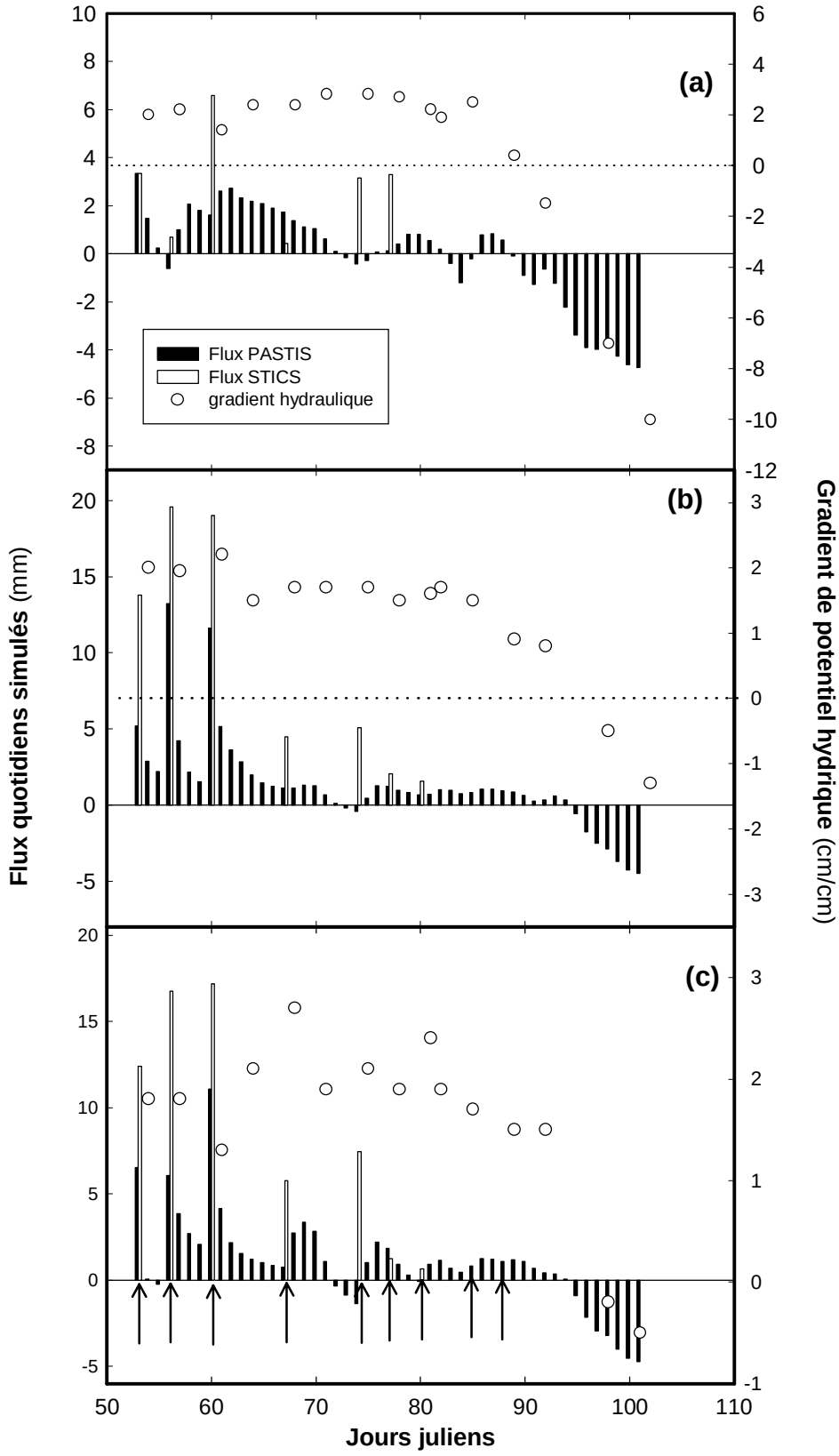


Figure III.12 : Evolution des flux d'eau journalier à 60 cm de profondeur simulés par STICS (barres vides) et PASTIS (barres pleines), et du gradient hydraulique calculé à partir des potentiels hydriques mesurés à 50 et 70 cm sur l'essai VIS-99. (a) site A, (b) site B, (c) site C. Les flêches indiquent les dates des irrigations.

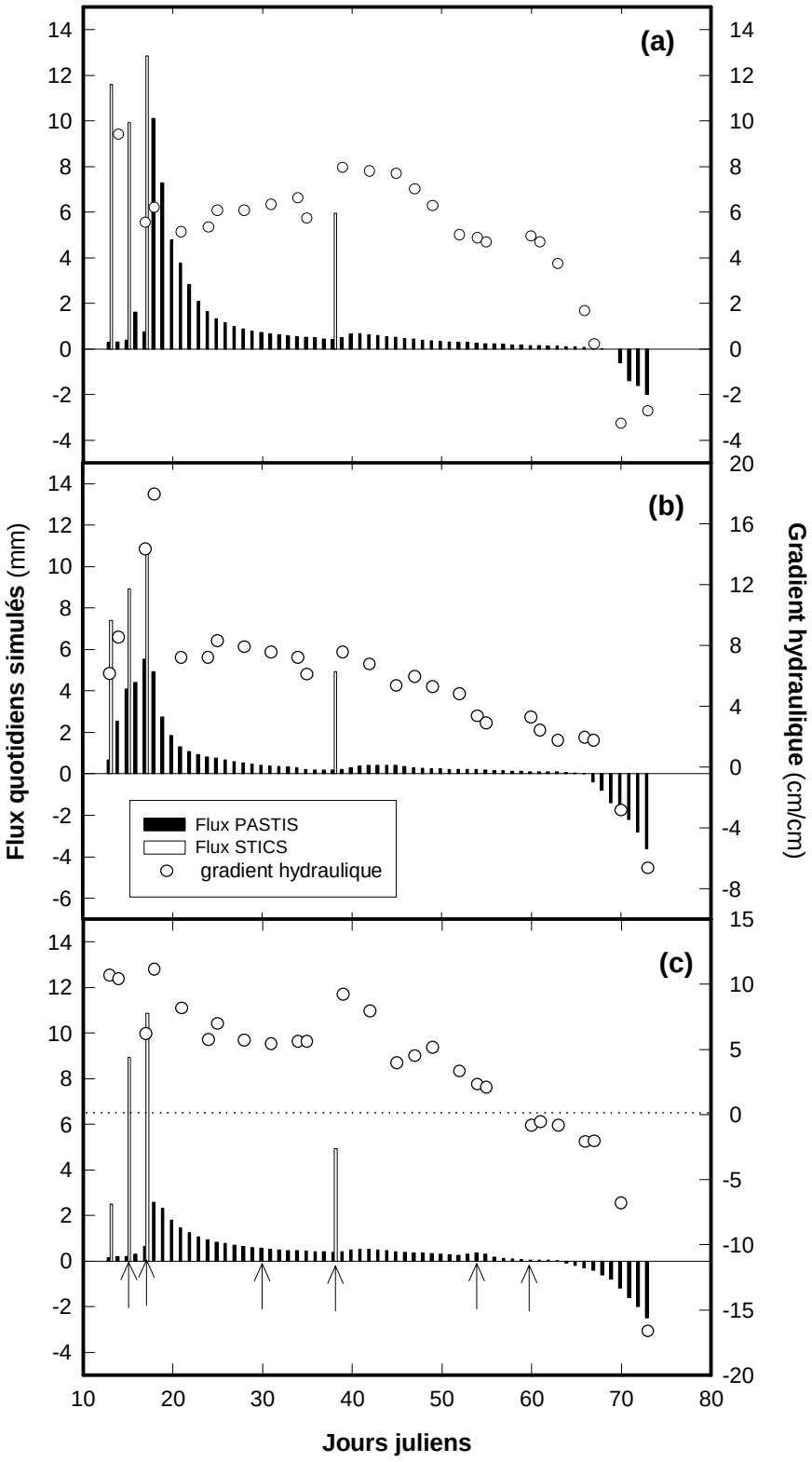


Figure III.28 : Evolution des flux d'eau journalier à 50 cm de profondeur simulés par STICS (barres vides) et PASTIS (barres pleines), et du gradient hydraulique alculé à patir de potentiels hydriques mesurés45 et 60 cm sur l'essai VIS-00. (a) site A, (b) site B, (c) site C.

4.5.2. Flux d'eau cumulés

Ces différences entre STICS et PASTIS s'observent également sur les évolutions des flux d'eau cumulés à 60 cm de profondeur représentés sur les figures III. 14 et III. 15, respectivement pour les 3 sites de mesure des essais VIS-99 et VIS-00. Avec STICS, le drainage a lieu, dans toutes les situations, au cours du premier mois de culture. L'intensité du drainage est particulièrement importante en début de cycle. Ainsi, pour les 3 sites de mesure de l'essai VIS-00 (figure III.15), plus de 80% des quantités d'eau drainées simulées par STICS sont perdues au cours des 4 jours suivant la plantation. Avec PASTIS, la période de drainage est plus longue (entre 34 et 51 jours selon les situations). Là aussi, le drainage est essentiellement concentré en début de cycle avec plus de 80% des volumes d'eau drainée perdus entre 16 et 29 jours après la plantation. En fin de cycle, les remontées capillaires simulées par PASTIS permettent de récupérer une partie, voire la totalité pour le site A de VIS-99 (figure III.14a), de l'eau drainée.

Tableau III. 7 : Valeurs des principaux flux d'eau mesurés et simulés par STICS et PASTIS pour les essais VIS-99 et VIS-00

Situations	STICS			PASTIS		
	Irrigation (mm)	Tpot/Tréel (mm)	D (mm)	Tpot (mm)	Dnet (mm)	D (mm)
VIS_99 site A	43	107/80	18	99	-2	33
VIS_99 site B	94	107/88	66	95	60	89
VIS_99 site C	91	107/88	62	99	47	69
VIS_00 site A	68	69/62	40	62	50	55
VIS_00 site B	61	69/60	32	62	29	43
VIS_00 site C	61	69/60	27	62	18	28

Le tableau III.7 donne les volumes cumulés à la récolte des flux d'eau calculés par STICS (D_{STICS}) et PASTIS. Pour PASTIS, nous avons distingué dans ce tableau, le cumul de l'ensemble des flux simulés (D_{PASTIS_net}) et le volume total d'eau drainée sans tenir compte des remontées capillaires (D_{PASTIS}). STICS ne simulant pas les remontées capillaires, D_{PASTIS} et D_{STICS} sont donc 2 grandeurs comparables. Les valeurs finales de Dstics sont toujours infèrieures à celles de Dpastis.

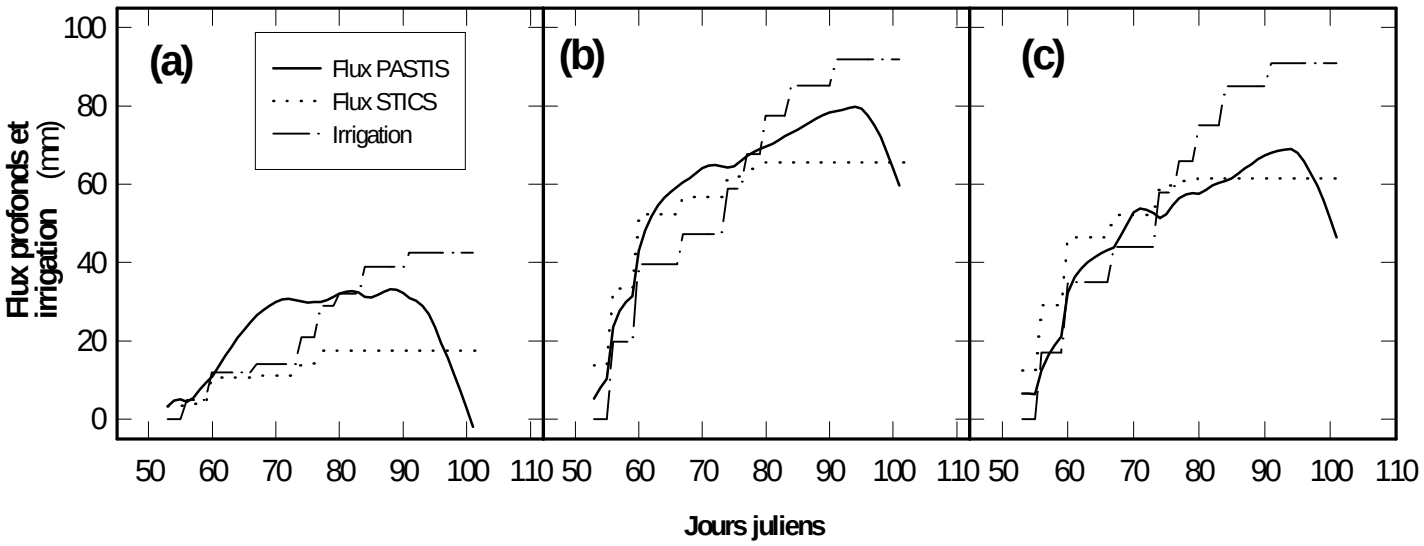


Figure III.14 : Evolution des flux hydriques profonds cumulés simulés par STICS et PASTIS pour les 3 sites de VIS-99. (a) site A, (b) site B, (c) site C.

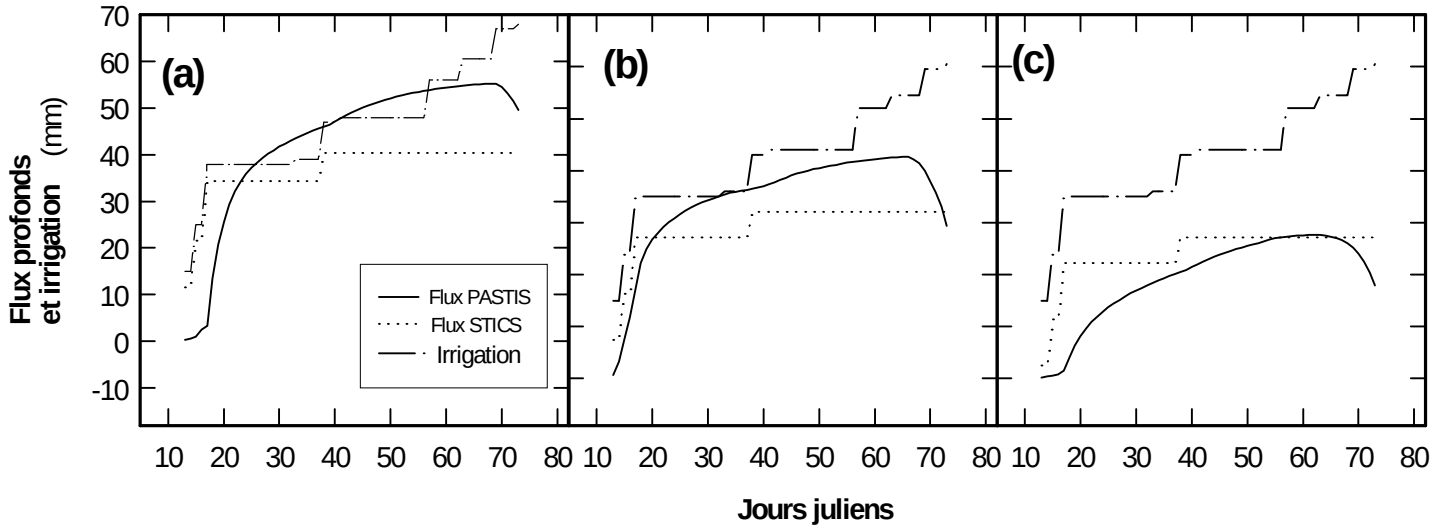


Figure III.15 : Evolution des flux hydriques profonds cumulés simulés par STICS et PASTIS pour les 3 sites de VIS-00. (a) site A, (b) site B, (c) site C.

4.5.3. Comparaison des flux d'azote nitrique et de Nlixi

Les flux d'azote nitrique entre deux périodes de mesures de la concentration en nitrate de la solution du sol (Nlixi_j) sont calculés comme le produit du flux d'eau journalier simulé par le modèle de bilan hydrique (Dj) et de la concentration en nitrate moyenne de la solution du sol (C_{NO3}) mesurée avec les tensionics à 2 profondeurs sous les racines. C_{NO3} étant mesuré tous

les 10 jours environ, Nlixi_j a été calculé entre 2 dates de mesure i et i_{+10} en multipliant Dj par la moyenne des C_{NO3} mesurés à ces dates (Eq. III. 18).

Soit i et i+10, 2 dates successives de mesure de C_{NO3}

$$\begin{aligned} &\text{Si } j = i && \text{Nlixi_j} = Dj \times C_{NO3}_i \\ &\text{Si } i<j<i_{+10} && \text{Nlixi_j} = Dj \times \text{moy}(C_{NO3}_i \; ; \; C_{NO3}_i_{+10}) \\ &\text{Si } j = i_{+10} && \text{Nlixi_j} = Dj \times C_{NO3}_i_{+10} \end{aligned} \qquad \text{Eq. III.19}$$

Les quantités d'azote lixiviées (Nlixi) sont égales à la somme des Nlixi_j.

Les différences entre les dynamiques des flux profonds d'eau et les valeurs finales de D simulées par STICS et PASTIS s'observent également sur les flux d'azote nitrique et les valeurs de Nlixi (figures III. 16 et III. 17, tableau III. 8). Comme nous avons calculés les flux d'eau cumulés avec et sans remontées capillaires pour PASTIS, nous avons calculés Nlixi en tenant compte ou pas des remontées capillaires, respectivement Nlixi_net_pastis et Nlixi_pastis. Les valeurs de Nlixi_net montrent, dans le cas du site A de l'essai VIS-99, que les remontées capillaires peuvent compenser complètement les pertes d'azote nitrique et même alimenter le profil en azote.

Comme pour le drainage, les valeurs de Nlixi_pastis sont toujours supérieures à celles de Nlixi_stics. Le risque de pollution nitrique est donc sous estimé en utilisant STICS pour modéliser le bilan hydrique. Toutefois, on remarque que les ordres de grandeur de Nlixi_pastis sont bien restitués avec Nlixi_stics. On constate également que le classement des situations selon le risque de pollution qu'elles présentent est le même si on utilise Nlixi_stics ou Nixi_pastis.

Tableau III.8 : Valeurs de Nlixi calculées à partir des flux hydriques simulés par STICS et PASTIS pour les 3 sites de VIS-99 et VIS-00

Situations	Nlixi STICS	Nlixi PASTIS	Nlixi_net PASTIS
	(kg N-NO3.ha^{-1})		
VIS_99 site A	3	5	-10
VIS_99 site B	17	24	13
VIS_99 site C	24	31	18
VIS_00 site A	16	21	20
VIS_00 site B	18	23	17
VIS_00 site C	7	8	5

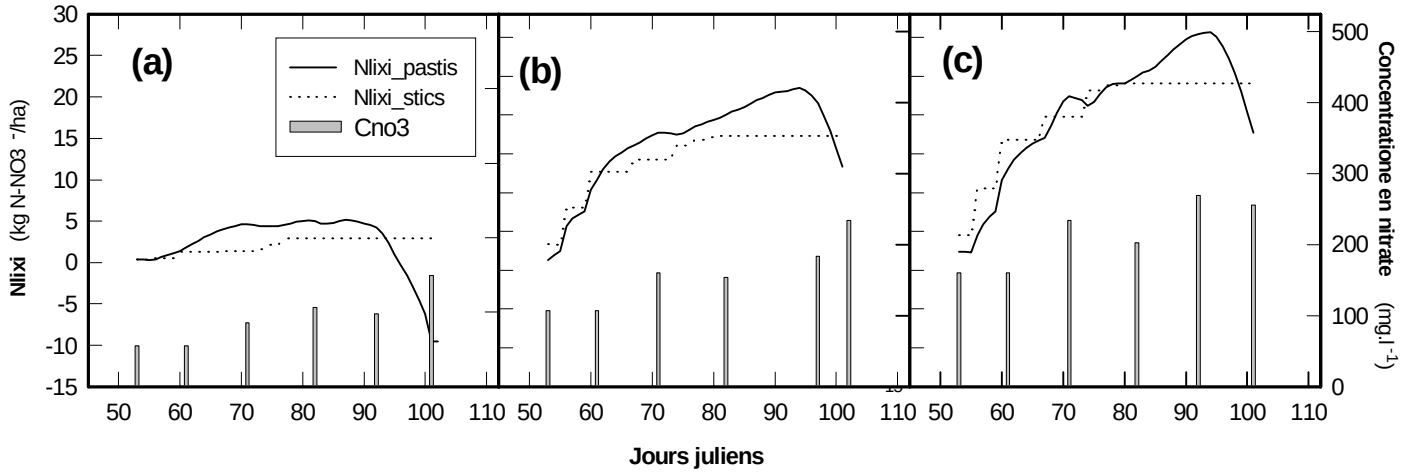


Figure III.16 : Evolution des quantités d'azote nitrique lixiviées calculées à partir des flux d'eau simulés par STICS (pointillés) et PASTIS (trait plein),et des concentrations en nitrate de la solution du sol mesurées (barres) sur l'essai VIS-99. (a) site A, (b) site B, (c) site C.

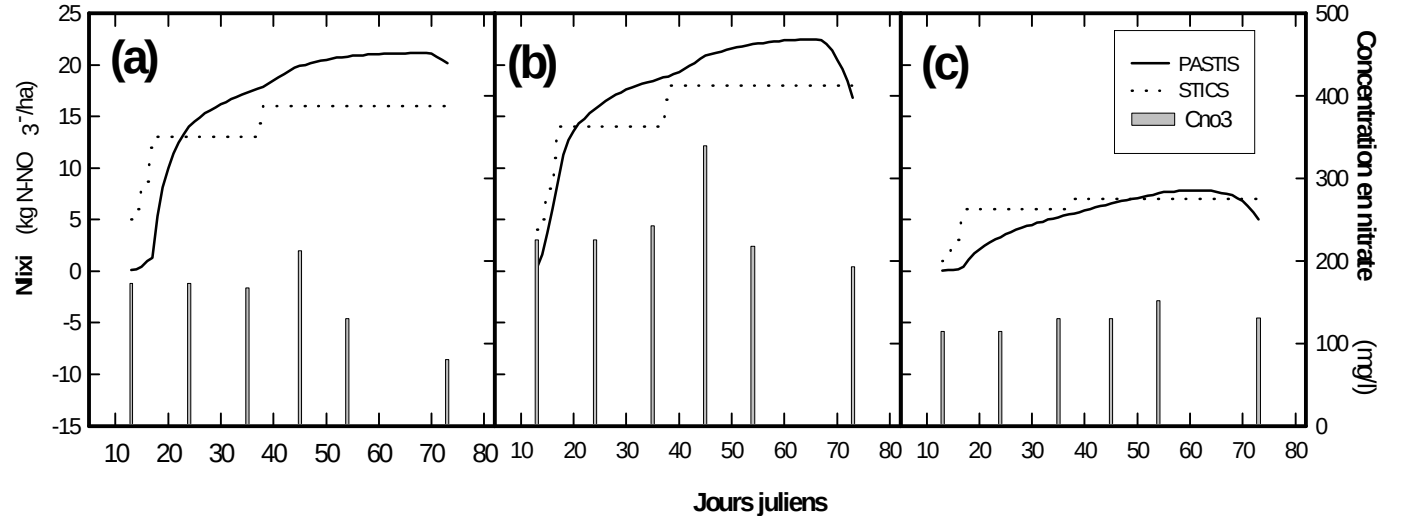


Figure III.17 : Evolution des quantités d'azote nitrique lixiviées calculées à partir des flux d'eau simulés par STICS (pointillés) et PASTIS (trait plein),et des concentrations en nitrate de la solution du sol mesurées (barres) sur l'essai VIS-00. (a) site A, (b) site B, (c) site C.

On peut donc considérer, pour les situations étudiées, que Nlixi_stics donne une bonne estimation des pertes réelles en azote nitrique représentées par Nlixi_pastis. Il faut cependant noter que dans ces situations les teneurs en nitrate sous les racines varient peu au cours de la phase de drainage (fig. III.16 et III.17). L'écart entre les valeurs de Nlixi_pastis et Nlixi_stics est ainsi essentiellement lié aux différences entre les quantités d'eau drainées simulées par PASTIS et par STICS. Par contre, pour des situations dans lesquelles les teneurs en nitrate sous les racines varient fortement au cours du cycle, Nlixi_stics risque d'être alors un moins bon estimateur de Nlixi_pastis. C'est le cas par exemple dans la situation dans laquelle les concentrations en nitrate sous les racines doublent au cours du cycle (chapitre I, fig. I.8c).

4.5.4. Conclusion

Le modèle PASTIS reproduit donc correctement la dynamique des flux d'eau, aussi bien en drainage qu'en remontées capillaires, sous les racines ainsi que les principaux termes du bilan hydrique (cf. § 4.4). On peut donc estimer que PASTIS prédit bien les quantités d'eau drainées sous les racines. STICS par contre simule très mal la dynamique des flux d'eau drainants et ne rend pas compte des remontées capillaires. Malgré cela, dans les situations où les remontées capillaires sont peu importantes, les quantités totale d'eau drainées simulées par STICS sont proches de celles simulées par PASTIS. Dans ces situations, on peut donc envisager d'utiliser STICS dont la mise en œuvre est plus simple en parcelles agricoles. Nous reviendrons dans la discussion générale de ce chapitre sur la question du paramétrage de PASTIS dans le cadre d'une démarche d'évaluation en parcelles agricoles. Dans la partie suivante, nous nous avons donc utilisé STICS pour compléter le diagnostic des risques de pollution nitrique pour des situations étudiées dans le chapitre I, pour lesquelles les propriétés hydrodynamiques du sol n'ont pas été mesurées. Nous reviendrons dans la discussion finale de ce chapitre sur la question du paramétrage d'un modèle mécaniste dans le cadre d'une démarche d'évaluation en parcelles agricoles.

5. Utilisation de STICS pour le diagnostic des risques de pollution nitrique sous des cultures de laitues sous abri froid

STICS a été appliqué aux situations S4, S5, S11 et S13 étudiées dans le chapitre I qui correspondent toutes à des cultures de laitues sous abri froid. Pour chaque situations, nous avons simulé le bilan hydrique des 3 sites de mesure tensionics, sauf pour S4 pour laquelle nous n'avons pas traité le site C du fait de la période de stress observée en cours de cycle dans ce cas (fig. I.6). Nous n'avons pas utilisé STICS dans ce cas car le modèle n' a pas été évalué

Rapport-Gratuit.com

en conditions hydriques limitantes. De même, nous n'avons pas traité la situation S3, qui correspond également à une culture de laitues sous abri froid, car dans ce cas le diagnostic initial a mis en évidence la présence de la nappe d'eau souterraine au niveau des racines. Dans cette situation particulière, STICS n'est pas valide car les remontées capillaires vont probablement être importantes.

Une des objectifs de chapitre est de comparer le diagnostic des risques de pollution nitrique avec l'indicateur R_{NO_3} (chap. I, §1.2.3). Pour cela, nous reprenons également dans cette partie des résultats des simulations effectuées pour les essais VIS-99, VIS-00, VIS-01 pour lesquelles nous disposons également des mesures pour calculer l'indicateur de lixiviation du nitrate utilisé dans le diagnostic.

5.1. Calcul du drainage (D)

5.1.1. Calage, initialisation et variables d'entrées du modèle

L'utilisation de STICS pour simuler le bilan hydrique d'une culture de laitues sous abri froid nécessite de déterminer les paramètres sols (Hcc, Hmin et Da), les variables d'entrées du modèle (température et ETP de l'abri, dates et doses d'irrigation) et les valeurs initiales des teneurs en eau pondérales (Hp) par horizon. Ces données ont déjà été présentées pour les situations VIS-99, VIS-00 et VIS-01. Nous présentons ci-dessous comment elles ont été déterminées pour les situations S4, S5, S11 et S13.

Paramètres sols (tableau III.9)

Pour les situations S4, S5, S11 et S13, nous avons découpé le compartiment sol (entre 0 et 60 cm) en 3 horizons de 20 cm d'épaisseur chacun. Pour chaque horizon Hcc a été mesuré par gravimétrie sur des échantillons de sol prélevés in situ, en début de cycle, 2 à 3 jours après une irrigation. Pour Hmin nous avons utilisé la teneur en eau au point de flétrissement permanent déterminée en laboratoire. La densité apparente n'a pas été mesurée sur ces parcelles et a été fixée en fonction des mesures effectuées sur le sol de l'essai VIS-00 qui présentait une texture proche des sols des situations.

Tableau III. 9 : Paramètres sols par horizons pour les situations S4, S5 , S11 et S13.

Essai	Horizon	Hcc %	Hmin %	Da (T/m3)
S4 et S5 (même parcelle)	0-20 cm	22.0	11.5	1.18
	20-40 cm	22.0	11.5	1.25
	40-60 cm	21.0	11.5	1.54
S11	0-20 cm	22.5	11.7	1.18
	20-40 cm	22	11.7	1.25
	40-60 cm	22	11.7	1.54
S13	0-20 cm	25	11.7	1.18
	20-40 cm	22.5	11.7	1.25
	40-60 cm	22	11.7	1.54

Variables d'entrées : calcul du climat sous l'abri

Dans chaque situation, le calendrier et les doses d'irrigation ont été déterminés à partir des pluviomètres installés au niveau des sites tensionics et relevés tous les 3 jours. Par contre, nous n'avions pas, comme dans nos essais, de mesures de température et de rayonnement sous l'abri (resp. Temp_abri et Rg_abri pour le calcul de l'ETP, cf 4.1.1 eq. III.21). Les seules données climatiques disponibles étaient celles fournies par la station Météo France de Vauvert située à moins de 15 km de notre zone d'étude. La dernière version de STICS propose un module de calcul de Tabri et Rg_abri à partir du climat extérieur basé sur les travaux de Wang et Boulard (2000).

Pour le rayonnement, Rg_abri est calculé simplement à partir du rayonnement extérieur (Rg_ext) et du coefficient de transmission du plastique (T). Pour déterminer ce paramètre, nous avons comparé les données journalières de Rg_ext fourni par Météo France et de Rg_abri mesuré dans les essais VIS-99, VIS-00 et VIS-01. La régression linéaire sur ces données montre une bonne corrélation entre ces 2 variables (R^2=0.93), avec une pente correspondant au paramètre T de 0.73. Cette valeur est proche du 0.70 communément admis (CTIFL, 1997).

La modification de la température par l'abri est estimée à partir d'un bilan d'énergie journalier nécessitant de connaître par jour la vitesse du vent à l'extérieur de l'abri et la surface des ouvrants ouverts par rapport à la surface du tunnel (Wang et Boulard, 2000). Ne disposant pas de ces données dans nos situations, nous avons calculé Temp_abri à partir de la

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

régression entre la température extérieure de l'air (Temp_ext), issue des données Météo France, et les valeurs correspondantes de Temp_abri mesurées dans nos essais (R^2=0.876, CVe=9.74). L'équation représentant la régression linéaire est :

$$Temp_abri = 0.867*Temp_ext + 1.280 \qquad \text{Eq. III. 19}$$

Nos données mesurées des conditions climatiques contrastées, de novembre à avril, correspondant à la période de culture des laitues sous abri dans notre zone d'étude. Nous pouvons donc estimer que la valeur ajustée de T et l'équation III.22 sont applicables aux situations de la partie I.

Calage des paramètres de la fonction de taux de couverture

Nous avons vu en 4.3.1 que la mise en place du taux de couverture de la culture dépend de la température et du rayonnement et qu'on ne peut pas par conséquent déterminer un paramétrage unique de la relation entre TR et la température. Sur nos essais, nous avons été amené a définir un jeu de paramètres pour les 3 cultures de fin d'hiver (VIS-99, VIS-00 et AVI-01), c'est à dire plantées à partir de janvier, et pour l'essai VIS-01 qui correspond à une culture implantée en automne pour laquelle la mise en place de TR est plus lente. Le tableau III. 10 donne les dates de plantation et de récolte, et la durée, en temps thermique (base 3.5°C) depuis la plantation, de chacune des culture correspondant à nos 4 essais et aux 4 situations étudiées dans ce chapitre. On constate que les cultures dont la plantation se situe entre fin octobre et fin novembre ont une durée de cycle comprise entre 550 et 660 °Cj, tandis que les cultures implantées en janvier et février accomplissent leur cycle en 380 à 450 °Cj. On retrouve la distinction entre cultures dites d'hiver (VIS-01, S4, S11, S13) et les cultures dites de printemps (VIS-99, VIS-00, AVI-01, S5). Nous avons donc utilisé les paramètres établis sur les données de l'essai VIS-01 pour les situations S4, S11 et S13, et ceux établis sur l'essai AVI-01 pour la situation S5.

Initialisation

Pour chaque site de suivi tensionic, la teneur en eau pondérale de chaque horizon a été déterminée à la plantation de la culture à partir de la moyenne des valeurs mesurées sur 3 échantillons de sol prélevés autour des appareils.

Tableau III.10 : Dates de plantation et de récolte, et durée en temps thermique des cultures des essais VIS-99, VIS-00, VIS-01, AVI-01 et des situations S4, S5, S11 et S13.

Situations	Date plantation	Date récolte	Durée cycle (°Cj)
VIS-99 (S10)	17/02/1999	12/04/1999	423
VIS-00	13/01/2000	14/03/2000	384
VIS-01	27/10/2000	24/01/2001	603
AVI-01	08/02/2001	02/04/2001	463
S4	20/11/1997	16/03/1998	574
S5	29/01/1999	07/04/1999	416
S11	20/11/1997	03/03/1998	546
S13	26/11/1997	09/03/1998	582

5.1.2. Bilan hydrique et drainage simulé

Le tableau III.11 donne pour toutes les situations étudiées les valeurs des principales composantes, mesurées ou simulées, du bilan hydrique et la figure III.18 montre pour les situations S4, S5, S11 et S13 l'évolution des stocks d'eau dans le profil.

Comme nous l'avons déjà vu en 4.1.2.3., on remarque que Tréel est inférieur à Tpot dans tous les cas. Le modèle simule donc un stress pour la transpiration au cours de ces cultures. Ce stress intervient en fin de cycle comme le montre la figure III.7 pour VIS-00. Cette période de stress coïncide avec une diminution importante du stock d'eau dans le profil (fig. III. 18). Pour les situations S11 et S13, ce dessèchement du sol en fin de cycle simulé par le modèle ne s'observe pas sur l'évolution des potentiels hydriques mesurés à 20 et 50 cm (fig. I.7 et I.8). On peut penser, comme dans la situation AVI-01 (fig. III.8) que STICS sous estime les stocks en fin de cycle dans ces situations.

Les quantités d'eau drainées (D) sont très variables, de 3 à 66mm, d'une situation à l'autre et, parfois même, entre sites d 'une même parcelle (tab. III.11). Ces variations s'expliquent en grande partie par les quantités d'eau apportées par irrigation. Ainsi pour les situations S4, S11 et S13, qui correspondent à des cultures menées en même temps chez 3 producteurs différents, alors que la demande climatique est quasi identique dans les 3 cas, le volume des irrigations est de 59mm pour S4, 76mm pour S13 et 110mm pour S11 et D est respectivement de 4, 34 et 48mm. De même, dans l'essai VIS-99, le drainage simulé pour le site A est de 18mm seulement contre environ 64mm pour les 2 autres sites. On constate que le site A a reçu 50% d'eau en moins (50mm environ) que les sites A et B. Par contre, dans la situation S13, D est différent entre les 3 sites alors qu'ils ont reçu le même volume d'irrigation. Dans ce cas, ce

sont les différences de conditions initiales qui permettent d'expliquer les variations de D. Ainsi, la diminution de D pour le site B par rapport aux sites A et C correspond à un profil initial plus sec en B (tab. III.11).

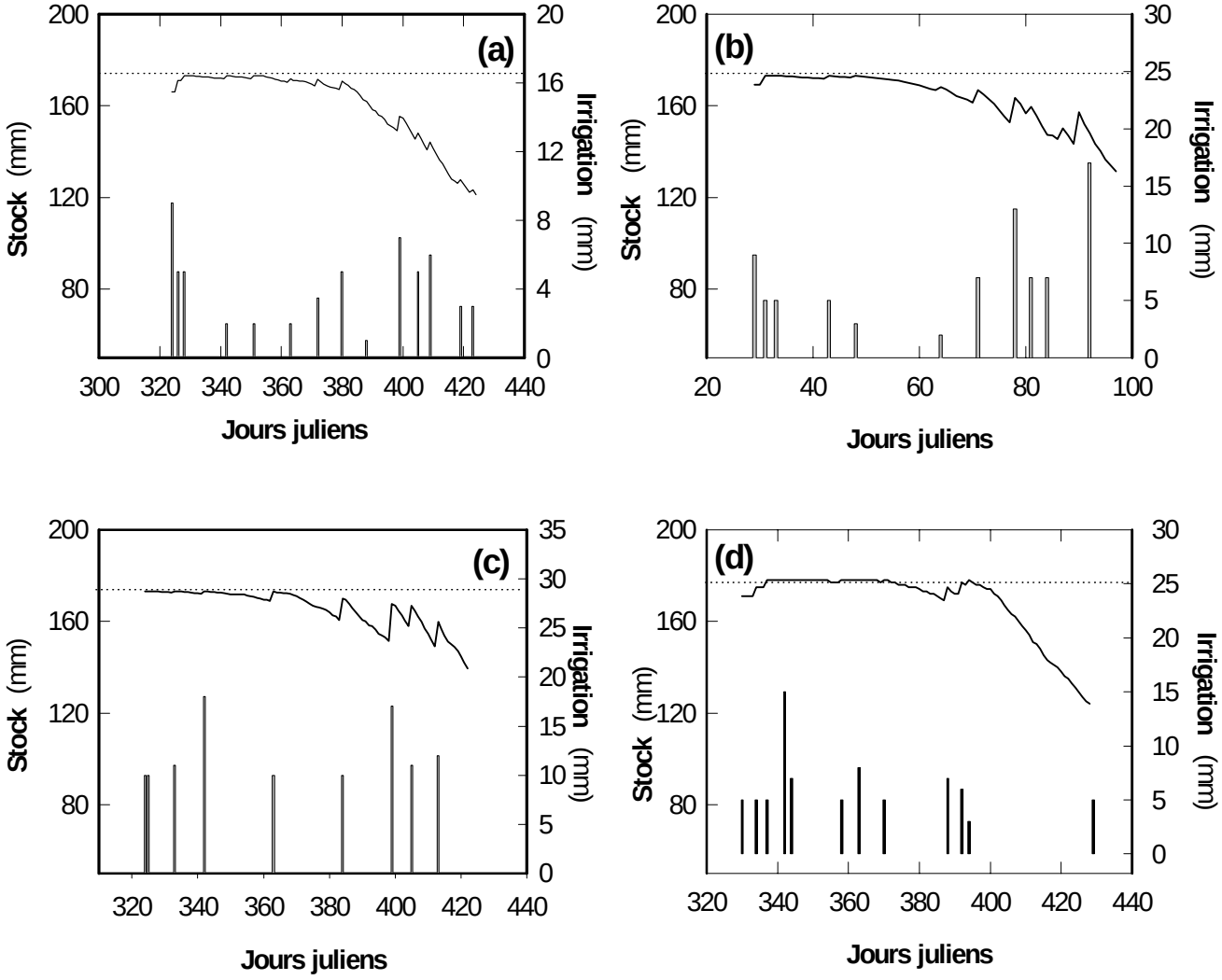


Figure III.18 : Evolution du stock d'eau dans l'horizon 0-60 cm simulé par STICS (trait) et irrigations mesurées (barres). (a) situation S4, (b) situation S5, (c) situation S11, (d) situation S13. S4, moyenne des sites A et B; S5, S11 et S13, moyennes des 3 sites. Les traitshorizontaux en pointillés représentent les stocks à ma capacité au champ dans chaque situation

Tableau III. 11 : Valeurs des principales composantes du bilan hydrique mesurées et simulées avec STICS pour les essais VIS-99, VIS-00, VIS-01 et les situations S4, S5, S11 et S3.

Situations	Stock initial (mm)	Tpot (mm)	Tréel (mm)	Irrigation (mm)	D (mm)
S4 sites A et B	166	100	91	59	4
S5 sites A,B,C	169	119	98	80	20
S11 site A	173	93	90	124	62
S11 site B				117	47
S11 site C				89	35
S13 site A	170	94	83	76	37
S13 site B	158				26
S13 site C	171				39
VIS_99 site A	181	107	80	43	18
VIS_99 site B	196		88	94	66
VIS_99 site C	194			91	62
VIS_00 site A	176	69	62	68	40
VIS_00 site B	173		60	61	32
VIS_00 site C	167				27
VIS-01 site P1	169	48	47	38	4

L'évolution au cours du temps des quantités cumulées d'eau drainées simulées par le modèle montre que la totalité du drainage a lieu dans la première moitié du cycle (fig. III. 19). Au cours de cette période, la fréquence et les doses d'irrigation sont élevées alors que les besoins en eau de la culture sont faibles, et que le sol est déjà plein en eau (fig. III.18).

5.2. Calcul des quantités d'azote nitrique lixiviées (Nlixi)

5.2.1. Diagnostic des risques de pollution nitrique : comparaison entre Nlixi et $R_{NO_3^-}$

Les quantités cumulées d'azote nitrique lixiviées (Nlixi), calculées selon la méthode décrite en 4.5.3, varient de 1 à 38 kg $N\text{-}NO_3^-.ha^{-1}$ selon les situations (tab. III.12). Le risque le plus important est représenté par la situation S13 avec 37 kg $N\text{-}NO_3^-.ha^{-1}$ en moyenne sur les 3 sites. Les situations S11, VIS-99 et VIS-00 présentent des niveaux de risque proches de 15 kg $N\text{-}NO_3^-.ha^{-1}$. Enfin, Nlixi est faible, de 1 à 4 kg $N\text{-}NO_3^-.ha^{-1}$, pour les situations S4 , S5 et VIS-01.

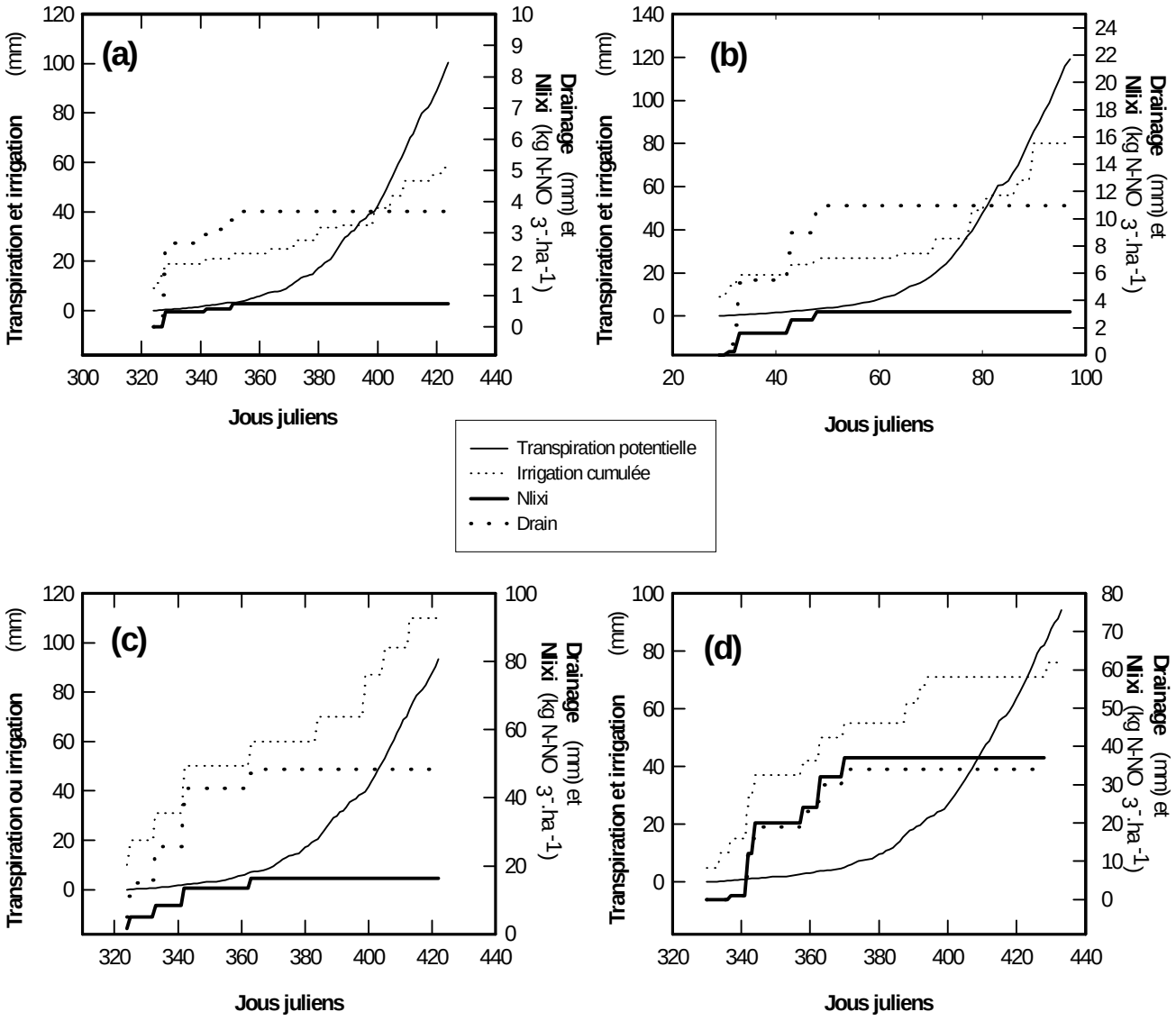


Figure III.17 : Evolution des principaux flux hydriques et des quantités d'azote nitrique lixiviées à la base du profil simulés par STICS. (a) situation S4 (b) situation S5, (c) situation S11, (d) situation S13. S4, moyenne des sites A et B; S5, S11 et S13, moyenne des 3 sites

Ce classement des situations selon la variable de risque de pollution nitrique Nlixi est différent de celui qu'on pourrait établir avec les valeurs de la variable RNO_3^- utilisée dans la partie I. Si les 2 variables de risque identifient bien la situation S13 comme la plus dangereuse, l'écart entre les autres situations est moins important en considérant les valeurs de RNO_3^- plutôt que celles de Nlixi. Ainsi, selon RNO_3^-, les situations S5 et VIS-99 présentent le même risque avec des teneurs en nitrate moyenne de l'eau drainée respectives de 162 et 149 mg $N\text{-}NO_3^-.l^{-1}$ et une durée de la période de drainage observée identique (tab. III.12), alors que Nlixi montre que le risque est beaucoup plus important pour VIS-99 avec 15 kg $N\text{-}NO_3^-.ha^{-1}$ en moyenne (jusqu'à 24 kg pour les site B) que pour S5 avec des pertes de seulement 4 kg $N\text{-}NO_3^-.ha^{-1}$.

Cette comparaison des variables Nlixi et $R_{NO_3^-}$ montre bien l'intérêt de connaître la quantité d'eau drainée pour classer des parcelles selon un risque de pollution nitrique de l'eau.

Tableau III. 12 : Comparaison des variables de risque de pollution nitrique $R_{NO_3^-}$ et Nlixi pour les différentes situations. Valeurs moyennes des 2 ou 3 sites par parcelle.

Situations	Nlixi (kg $N\text{-}NO_3^-.ha^{-1}$)	Diagnostic tensionic	
		R_{NO_3} (mg $NO_3^-.l^{-1}$)	Jours avec drainage (% nombre de mesures)
S4 (sites A et B)	1 (-)	72 (-)	100%
S5	3 (0.4)	162 (68)	88%
S11	16 (11)	99 (20)	100%
S13	34 (2)	641 (152)	100%
VIS-99	15 (11)	149 (59)	87%
VIS-00	14 (6)	170 (56)	83%
VIS-01	1 (-)	78 (-)	79%

5.2.2. Impact de la gestion de l'eau sur le risque de pollution nitrique.

La quantification des pertes montre contrairement à $R_{NO_3^-}$ que le risque de pollution nitrique est bien maîtrisé dans les situations S4, S5 et VIS-01. Dans ces situations, les teneurs en nitrate sous les racines ne sont pas très différentes des autres situations excepté S13. La réduction de la lixiviation du nitrate s'explique dans ces situations par des quantités d'eau drainées moins importantes (tableau III.9). D représente entre 7 et 25% des quantités d'eau apportées pour S4, S5 et VIS-01, et entre 34 et 70% pour les autres situations. Pour S13 par contre, alors que le drainage est 30% plus faibles a celui simulé pour S11 (34 mm contre 48mm), Nlixi est plus de 2 fois supérieur (37 contre 16 kg $N_NO_3^-.ha^{-1}$). Dans cette situation, le risque de pollution est amplifié par les fortes teneurs en nitrate sous les racines.

5.3. Conclusion

L'utilisation de STICS, paramétré et validé pour simuler le bilan hydrique d'une culture de laitues, nous a permis de calculer les quantités d'eau drainées (D) et les pertes en nitrate par lixiviation (Nlixi) sous la parcelle pour les situations étudiées dans la partie I. La comparaison du diagnostic des risques de pollution nitrique effectué avec la variable $R_{NO_3^-}$ et avec la variable Nlixi montre l'importance de quantifier les pertes d'azote nitrique, donc de connaître D en plus des teneurs en nitrate sous les racines. Par ailleurs, le diagnostic avec Nlixi sur les différentes situations étudiées ci dessus confirme la principale conclusion de la phase de diagnostic de la partie I, qui montre que dans des situations où la gestion de la fertilisation

respecte les bonnes pratiques agricoles, le risque de pollution nitrique demeure si on ne gère pas l'irrigation pour limiter le drainage en profondeur.

6. Discussion et conclusion

Les objectifs du travail présenté dans cette partie étaient (i) de paramétrer et tester un modèle de bilan hydrique pour des cultures de laitues sous abri froid, (ii) de l'utiliser, pour certaines des situations étudiées dans la partie I, pour calculer les volumes d'eau drainée sous ces cultures, variable indispensable au diagnostic des risques de pollution nitrique. Dans ce travail, nous avons été amenés à comparer les modèles STICS (Brisson et al., 1998) et PASTIS (Lafolie, 1991) après les avoir adaptés pour simuler le fonctionnement d'une culture de laitue. Ces deux modèles se distinguent essentiellement par la manière de représenter les transferts d'eau dans le sol. De ce point de vue, STICS est considéré comme un modèle fonctionnel basé sur une analogie de type réservoir, et PASTIS comme un modèle mécaniste basé sur l'équation de Darcy.
Le paramétrage des deux modèles a été effectué à partir des données issues de 4 essais sur des cultures de laitues sous abri froid, dont 3 ont été menés chez des producteurs situés sur la zone d'étude présentée dans la partie I. Nous nous sommes également reportés aux travaux de De Tourdonnet (1998) qui a réalisé l'adaptation de PASTIS pour une culture de laitue, et sur lesquels est basée l'adaptation de STICS pour cette culture. Nous avons ensuite testé et comparé les modèles sur leur capacité à restituer les besoins en eau de la culture, les stocks d'eau dans le profil, les teneurs en eau, les potentiels hydriques dans le sol, et la dynamique des flux profonds à la base du profil à partir des mesures effectuées dans nos essais.

La simulation de la consommation en eau de la culture n'a été testée que sur un jeu de données restreint issu de l'essai AVI-01 et nécessiterait d'être évalué sur des données véritablement indépendantes. Les résultats montrent que l'évolution de l'ETR au cours du cycle est assez bien restituée par les modèles. Il faut toutefois noter 2 points sur lesquels le paramétrage ou la structure des modèles pour une culture de laitue est à améliorer. Il s'agit tout d'abord de la prise en compte des effets du stress hydrique sur la transpiration des plantes. Des formalismes très différents existent dans les 2 modèles pour représenter ce phénomène mais ils n'ont pas été paramétrés pour une culture de laitue. Nous présenterons dans la partie V des éléments sur la régulation de la transpiration en réponse au stress hydrique chez la laitue qui pourraient être utilisés pour cela. Il s'agit d'autre part, de la

détermination de la valeur du coefficient de réduction de l'évaporation par le paillage plastique (r_f). Nous n'avons pas mesuré ce paramètre expérimentalement ni trouvé de référence précise sur ce sujet. La procédure d'optimisation que nous avons utilisée ne nous a pas permis de déterminer une valeur unique de r_f . Une étude expérimentale sur l'effet du paillage plastique sur les flux d'eau à la surface du sol apparaît donc nécessaire pour améliorer la prévision des besoins en eau des cultures conduites avec ce type de couverture du sol.

Dans toutes nos simulations, **PASTIS est plus performant que STICS pour modéliser les transferts d'eau dans le sol**. Il restitue bien les valeurs observés pour les stocks d'eau totaux, les humidités et les potentiels hydriques pour chaque tranche de sol. STICS reproduit assez bien les stocks mais simule très mal les teneurs en eau par couche au sein du profil. Nous avons notamment vu que STICS simule des dessèchements du sol dans la zone racinaire plus importants que ce qui a été observé. Cela a pour conséquence de déclencher des fonctions de stress hydrique qui ne correspondent probablement pas à la réalité. Ces différences de comportement entre STICS et PASTIS montrent les limites des modèles de type réservoirs comme STICS dans la simulation du bilan hydrique et du drainage. La principale limite est liée à la non prise en compte des propriétés hydodynamiques du sol qui ne permet pas de représenter les phénomènes de remontées capillaires et de répartition de l'eau entre les couches de sol. Ces phénomènes sont notamment importants dans l'essai AVI-01 dans lequel l'écart entre les stocks simulés par STICS et ceux observés atteint 20mm, et celui entre les teneurs en eau dans la zone racinaire prés de 8%. Dans les autres essais, ces écarts sont moins importants car les apports d'eau sont plus élevés par rapport aux besoins de la culture, et les remontées capillaires sont en conséquence plus faibles.

Les dynamiques des flux d'eau sous les racines à la base du profil de sol simulées par les deux modèles sont également très différentes. PASTIS reproduit bien l'évolution du sens des flux observés sous les racines à partir des mesures tensiométriques, qui montrent un drainage quasi permanent au cours du cycle, et une inversion du sens des flux quelques jours seulement avant la récolte. STICS ne simule que des flux drainant ponctuels, localisés juste après une irrigation, sur la première moitié du cycle uniquement. Là encore cette comparaison souligne les limites de l'utilisation de modèles réservoirs dans lesquels le drainage correspond à un excès d'eau par rapport à la capacité maximum de stockage du sol définie par l'humidité à la capacité au champ (Hcc) (Asare et al., 2001). Les observations faites sur le terrain et les

Rapport-Gratuit.com

simulations réalisées avec PASTIS montrent que le sol va pouvoir stocker de l'eau au delà de Hcc, ce qui va limiter les flux instantanés. La prise en compte des propriétés hydrodynamiques du sol dans PASTIS permet d'étaler les flux dans le temps et de mieux répartir l'eau entre les différentes couches du sol.

Au vu de cette comparaison entre STICS et PASTIS sur les principaux postes du bilan hydrique, **PASTIS apparaît plus approprié pour simuler les volumes d'eau drainés donc pour évaluer les quantités d'azote nitrique lixiviées (Nlixi) sous une culture de laitue**. L'utilisation de ce type de modèle mécaniste en parcelles agricoles pose cependant le problème de la détermination des propriétés hydrodynamiques du sol nécessaires à la résolution de l'équation de Richards. De nombreux travaux ont été menés pour mettre au point des techniques opérationnelles permettant d'estimer, à partir d'informations facilement disponibles sur le sol, les paramètres des relations entre le potentiel hydrique et la teneurs en eau (courbe de rétention, $\psi(\theta)$) et entre la teneur en eau et la conductivité hydraulique ($K(\theta)$) (Bouma et al., 1993). Une des voies étudiées est celle de la mise au point de fonctions, dites « de pédotransfert », permettant de calculer les paramètres de ces relations à partir de caractéristiques du sol facilement mesurables (Saxton et al., 1986 ; Wosten and Van Genuchten, 1988 ; Verecken et al., 1989 ; Wosten et al., 1990 ; Smetten et al., 1999 ; Wosten et al., 2001). Wosten et al. (1990) montrent en comparant 4 méthodes différentes pour estimer les propriétés hydrodynamiques d'un sol que l'utilisation de telles fonctions donne d'aussi bons résultats que des mesures in situ ou au laboratoire, pour un coût largement inférieur. Le développement de cette approche nécessite toutefois de mettre au point des bases de données répertoriant de nombreux types de sol. La modélisation inverse fournit également le moyen de déterminer les paramètres de $\psi(\theta)$ et $K(\theta)$. Cette méthode consiste à chercher à l'aide d'un modèle les paramètres de ces fonctions de façon à reproduire le mieux possible l'évolution observée de l'état hydrique du sol (Bouma et al ; 1993 ; Lafolie, 1995). C'est le principe de la procédure que nous avons utilisée pour caler les paramètres de la relation $K(\theta)$. Cette méthode est plus efficace quand on dispose de quelques données mesurées permettant de fixer à priori les valeurs des paramètres comme nous l'avons fait en se basant sur les mesures de Wind pour fixer les valeurs initiales des paramètres de $K(\theta)$. Elle requiert par ailleurs de disposer d'un suivi assez fréquent de l'état hydrique du sol (potentiel ou teneur en eau). Dans nos situations, on peut imaginer que la combinaison d'une approche de type « fonctions de pédotransfert » et de la modélisation inverse permette de paramétrer un modèle de type mécaniste pour simuler

le drainage comme l'illustre le cas de l'essai VIS-99. Dans cette situation, aucune de mesure de conductivité n'avait été faite sur la parcelle et les paramètres initiaux de K(θ) ont été déterminés à partir des mesures réalisées sur une parcelle voisine de celle de l'essai, dont le sol présentait des caractéristiques physiques proches de celui de VIS-99. Ces paramètres ont ensuite été calés par optimisation sur les mesures de potentiels hydriques réalisées au cours de la culture sur un des 3 sites de mesure de la parcelle. Les simulations faites avec ces paramètres ont montré par la suite un très bon accord avec les données mesurées.

L'utilisation de STICS demeure toutefois plus simple en l'absence de données suffisantes pour appliquer l'approche décrite ci-dessus. Malgré les problèmes pour rendre compte de la dynamique des flux d'eau, on peut estimer que STICS fournit une bonne estimation des pertes en azote nitrique comme le montre la comparaison des valeurs de Nlixi calculées avec les 2 modèles dans le essais VIS-99 et VIS-00. Dans ces situations, STICS restitue assez bien l'ordre de grandeur des Nlixi obtenus avec PASTIS et permet de classer les différentes sites selon leur degré de risque de pollution nitrique. Ce résultat est en partie lié au fait que la teneur en nitrate de l'eau drainée est quasi constante dans ces situations, ce qui n'est pas le cas dans toutes les situations étudiées. Malgré cela, on peut donc envisager dans le cadre de notre démarche d'évaluation en parcelles agricoles que STICS soit utilisé dans un premier temps pour estimer les pertes d'azote, classer et identifier les situations présentant les plus forts risques. Dans un deuxième temps, on pourra avoir recours à PASTIS pour ces situations afin d'affiner le diagnostic notamment pour simuler la dynamique des pertes et de tester ensuite des stratégies de gestion de l'eau et/ou de l'azote.

Le calcul de Nlixi pour les situations S4, S5, S10, S11 et S13 étudiées dans la partie I confirme la possibilité d'erreur dans l'évaluation des risques de pollution nitrique à partir de la variable $R_{NO_3^-}$ et la nécessité de connaître la quantité d'eau drainée pour évaluer les pertes sous la culture. Le diagnostic avec Nlixi montre l'importance de la gestion de l'irrigation pour la maîtrise des risques dans des situations où la gestion de la fertilisation est conforme aux codes des bonnes pratiques en vigueur sur la zone. Le cas de la situation S4 illustre toutefois la difficulté et les risques pour la production qu'engendrent une diminution des apports d'eau. Dans cette situation, la réduction des pertes d'azote par rapport à la situation S11, qui correspond à la même culture menée à la même saison, est essentiellement liée à des apports d'eau moins important (59mm pour S4 contre 110mm pour S11 en moyenne pour des besoins en eau autour de 100mm). Cette stratégie d'irrigation permet d'assurer la réussite de la

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

culture, mais elle demande une attention particulière de la part de l'agriculteur pour éviter tout déficit hydrique comme le montre les observations effectuées sur le site C de cette parcelle (fig. I.6). Au niveau de ce site, un dysfonctionnement du système d'irrigation a provoqué une diminution des doses d'irrigation entraînant rapidement une baisse des potentiels hydriques dans la zone racinaire et un stress pour la culture qui s'est traduit par un retard dans la récolte des plantes dans cette partie du tunnel. Dans l'essai VIS-99, le site A présente également des quantités d'eau reçues inférieures de moitié à celles reçues sur les 2 autres sites (tab. III.9) sans que les rendements mesurés sur les 3 sites ne présentent de différences significatives. Dans cette situation, la stratégie d'irrigation assure un tel confort hydrique à la culture qu'elle permet d'éviter tout risque lié à un dysfonctionnement du système d'arrosage. La conception de nouvelles stratégies d'irrigation pour limiter le drainage et les risques de pollution nitrique impose donc de pouvoir prédire également les conséquences sur la production.

Pour cela, il faut disposer d'un modèle de bilan hydrique capable de prédire avec précision l'état hydrique du sol dans la zone racinaire et d'un modèle permettant de rendre compte de l'impact de l'état hydrique du sol sur le rendement de la culture. Dans la partie suivante, nous présentons un modèle de prévision du rendement pour des cultures de laitue basé sur la modélisation de la croissance individuelles des feuilles d'une plante de laitue en fonction de la température, du rayonnement et de l'état hydrique du sol au niveau des racines.

CHAPITRE IV

Modélisation de la croissance foliaire de la laitue en fonction de la température, du rayonnement et de l'état hydrique du sol : application à la prévision du rendement d'une culture de laitues.

CHAPITRE IV

MODELISATION DE LA CROISSANCE FOLIAIRE DE LA LAITUE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE, DU RAYONNEMENT ET DE L'ETAT HYDRIQUE DU SOL : APPLICATION A LA PREVISION DU RENDEMENT D'UNE CULTURE DE LAITUES .

1. Introduction : objectif et démarche

1.1. Objectif

La conception de stratégies d'irrigation alternatives visant à réduire les risques de pollution nitrique doit également inclure la prévision des pertes de rendement liées à la réduction des apports d'eau afin de déterminer les stratégies acceptables pour les agriculteurs. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un modèle capable de prédire l'impact des stratégies d'irrigation sur le rendement, c'est à dire le poids frais dans le cas de la laitue. L'objectif du travail présenter dans ce chapitre est d'élaborer un modèle permettant de simuler le poids frais d'une laitue en fonction de l'état hydrique du sol, applicable pour l'évaluation des pratiques agricoles.

1.2. Relations entre rendement et croissance foliaire de la laitue

1.2.1. Le nombre de feuilles est un bon indicateur du stade de récolte d'une culture de laitue

Pour les producteurs, les critères de déclenchement de la récolte d'une parcelle de laitues sont liés au poids des plantes, à leur forme (pommaison) et aux conditions de commercialisation (prix) (CTIFL, 1997). Ce dernier critère est parfois déterminant par rapport aux deux premiers car les prix de vente peuvent connaître des variations importantes d'une semaine sur l'autre en pleine saison de production ; l'agriculteur peut retarder la date de récolte de quelques jours si les cours sont trop bas. La prévision de la durée de cycle d'une culture peut être un bon outil pour aider les producteurs à mieux planifier leur production par rapport aux contraintes du marché et à l'organisation du travail sur leur exploitation (Bierhuzen et al., 1973 ; Wurr et al.,

1992 ; Bruno et Papy, 1992). A partir d'observations au champ sur des cultures de laitues beurres de la variété Dolly, Bruno et Papy (1992) montrent que le nombre de feuilles de longueur supérieures à 1 cm (ou nombre de feuilles apparues, NFapp) est un bon indicateur du stade optimal de récolte contrairement au diamètre des plantes ou à leur poids sec.

Dans le tableau IV.1, nous avons indiqué la valeur moyenne et l'écartype de NFapp mesuré à la récolte sur un échantillon de 12 plantes minimum dans nos essais sur des cultures sous abri (AVI-01, VIS-99, VIS-00 et VIS-01), 2 des 3 essais en pots (SER-1 et SER-2), et 2 cultures sous abri suivies dans le cadre d'un réseau expérimental sur la laitue (BAL-01, ALE-01)[6]. Dans chaque situation, la variété cultivée était Sensaï.

Pour les cultures sous abri en conditions de production, la moyenne des NF_{app} est de 65.8 feuilles avec un intervalle de confiance au risque α de 5% de 1.5 feuilles. Cet intervalle de confiance correspond à celui calculé par Bruno et Papy à partir de mesures réalisées sur 9 sites différents et qu'ils attribuent à la latitude de choix de la date de récolte. Dans les essais en pots, le nombre de feuilles est plus faible. Ceci peut s'expliquer par une moins bonne détermination du stade optimal de récolte mais surtout par des conditions de culture (climat, culture en pots) limitantes pour le développement et la croissance des plantes.

Tableau IV. 1 : Nombres de feuilles de longueur supérieure à 1cm (NF_{app}) à la récolte dans 6 de nos essais et dans 2 essais réalisés dans le cadre du réseau expérimental CTIFL-INRA. Les valeurs entre parenthèses représentent l'écart type des moyennes calculées sur 12 plantes

ESSAI	NF_{app} à la récolte
VIS-99	66.9 (6.2)
VIS-00	66.9 (5.7)
VIS-01	61.6 (3.4)
AVI-01	67.8 (7.5)
BAL-01	65.1 (0.9)
ALE-01	66.4 (-)
SER-1	55.8 (5.7)
SER-2	59.3 (-)

[6] Ce réseau a été conduit en collaboration par le CTIFL et l'INRA dans le cadre d'un projet portant sur la prévision de récolte, la protection des eaux et la modélisation en cultures légumières. Pour les cultures de laitues sous abri froid, un protocole expérimental de mesures et de modélisation des risques de pollution nitrique à la parcelle a été élaboré sur la base des dispositifs que nous avons utilisé et des résultats présentés dans le chapitre III.

Nos observations confirment donc que le nombre de feuilles supérieures à 1 cm est un bon indicateur de la durée optimale du cycle d'une culture de laitues.

1.2.2. Le rendement d'une laitue peut être calculé simplement à partir de la surface foliaire de la plante.

Le premier critère d'appréciation du rendement et de la qualité d'une culture de laitues est le poids frais des plantes à la récolte (Pf). Il est très variable selon la saison de culture, ainsi le poids minimum commercialisable recherché varie de 280 g en hiver à 400 g en été (CTIFL, 1997). Les feuilles représentent la quasi-totalité de la biomasse produite. La figure IV.1a montre la relation entre la surface foliaire et le poids frais de plantes récoltées à différents stades au cours des essais SER-1, SER-2, AVI-01, VIS-00 et VIS-01. Dans le cas de SER-2, les points reportés sur ce graphique comprennent aussi bien des plantes en conditions hydriques non limitantes que des plantes soumises à des stress hydriques variables selon les plantes mais d'intensité constante au cours de leur cycle. Pour les valeurs de SFp inférieures à 2000 cm², on constate que Pf augmente de façon exponentielle entre 0 et 100g comme le montre l'évolution de la masse surfacique fraîche (MSf , en g $Pf.cm^{-2}$) en fonction de SFp dans la figure IV.1b. Au delà de 2000 cm², la relation entre SFp et Pf peut être considérée comme linéaire (fig.IV.1a), avec une valeur de MSf constante de 0.0546 $g.cm^{-2}$ de matière fraîche (R^2=0.95 et CVe=9.09%). Cette valeur de MSf est valable pour une gamme de Pf entre 100 et 600g couvrant la gamme des poids commercialisables.

1.2.3.Intérêt de la modélisation de la croissance individuelle des feuilles

Le rendement d'une laitue peut donc être calculé à partir de la surface foliaire de la plante et de la matière fraîche surfacique. La modélisation du développement et de la croissance foliaire d'une laitue constitue donc un outil intéressant pour prévoir la durée de cycle et le rendement d'une culture de laitue. De nombreux modèles sont capables de simuler l'évolution de la surface foliaire de la plante au cours du temps en fonction de la température. Nous faisons toutefois l'hypothèse que, pour la laitue, une modélisation de la croissance individuelle des feuilles en fonction des variables du milieu selon l'approche proposée par Tardieu et al. (1999) est plus intéressante pour rendre compte des variations de rendement en fonction des pratiques d'irrigation. Comme nous l'avons déjà évoqué dans le chapitre I, nous pouvons faire cette hypothèse compte tenu de la nature des contraintes hydriques (temporaires, modérées et précoces) compatibles avec les conditions de production d'une

culture de laitues. Les modèles classiques ne sont généralement pas paramétrés pour rendre compte de ce type de contrainte.

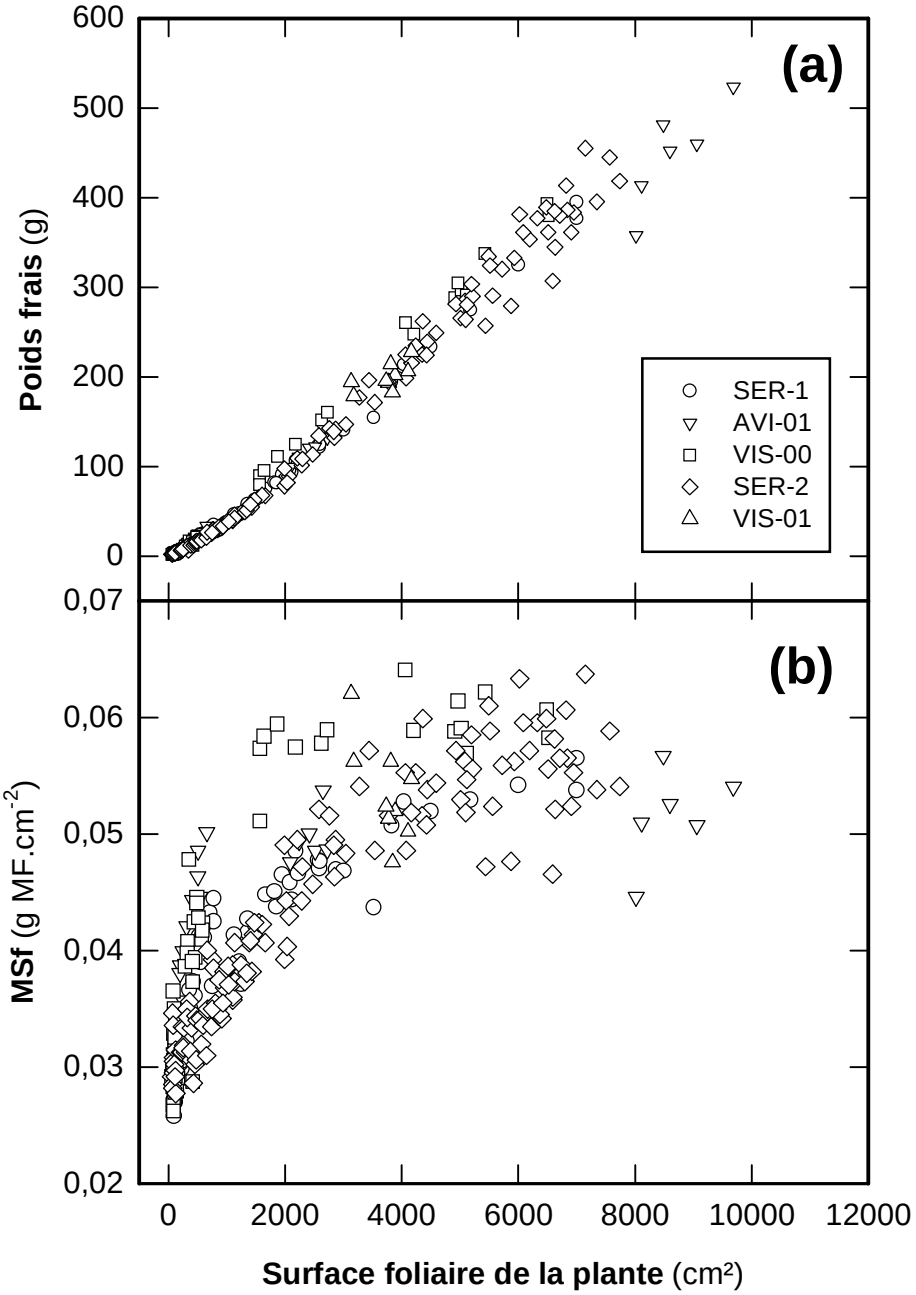


Figure IV.1 : Relation entre la surface foliaire et (a) le poids frais, (b) la masse surfacique fraîche (MSf) de la plante à partir des données mesurées dans les essais SER-1, SER-2, AVI-01, VIS-00 et VIS-01.

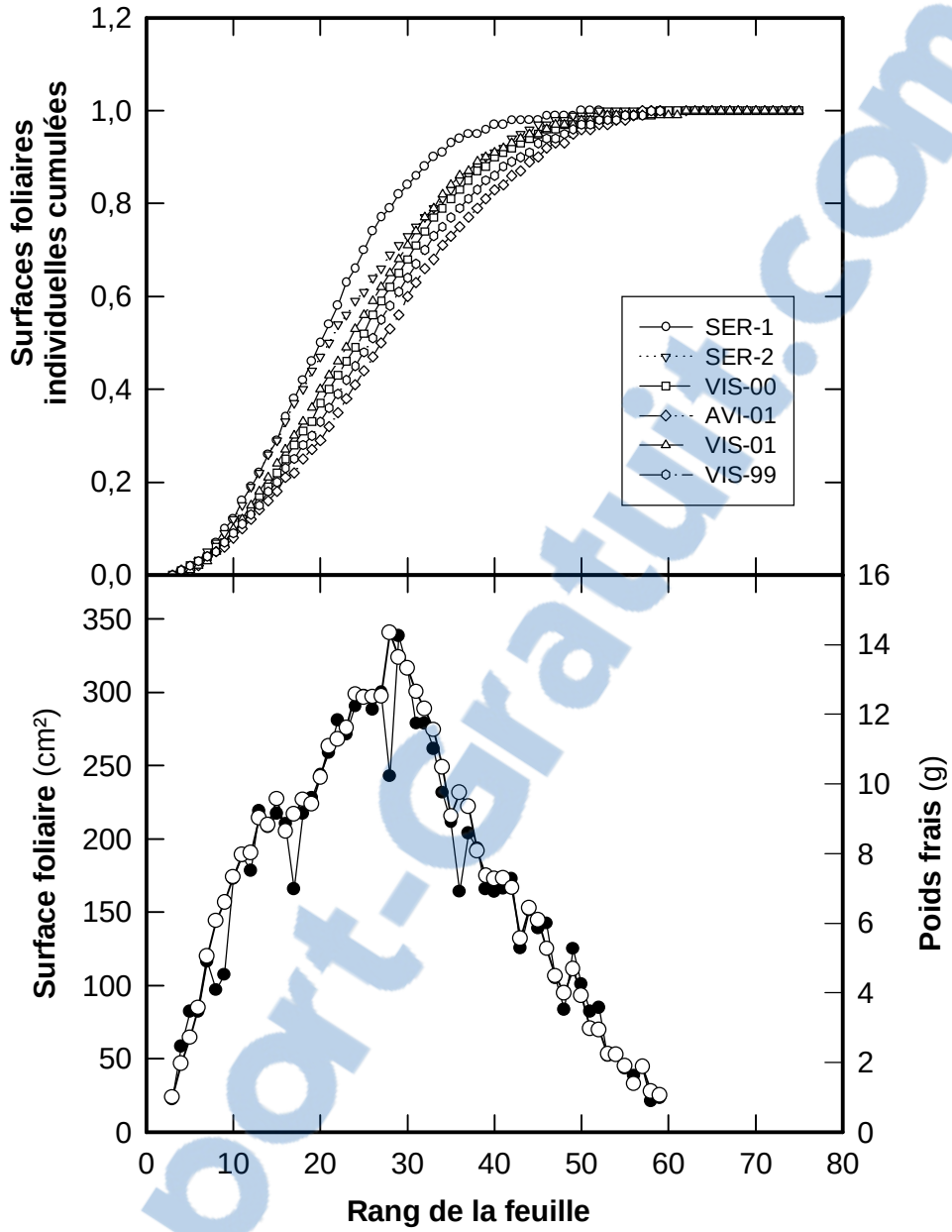


Figure IV.2 : (a) Profils de surface foliaire cumulée exprimés en pourcentage de la surface foliaire de la plante (SFp)à la récolte dans les essais SER-1, SER-2, VIS-99, VIS-00, VIS-01 et AVI-01. (b) Profils de surface foliaire (symboles fermés) et de poids frais (symboles ouverts) selon le rang de la feuille mesurés à la récolte dans AVI-01.

Par ailleurs, les distributions des surfaces des feuilles au sein de la plante montrent que les 30 à 40 premières feuilles – sur 70 apparues et plus de 100 initiées - représentent 90% de la surface de la plante entière (figure IV. 2a). On observe une distribution identique des poids frais des feuilles en fonction de leur position sur la tige (figure IV.2b). Ces observations montrent donc qu'un stress hydrique ne va pas avoir les mêmes conséquences sur le rendement de la plante selon les feuilles qu'il va affecter. Une approche de simulation de la croissance foliaire de la plante basée sur la modélisation de la croissance individuelle des

Rapport-Gratuit.com

feuilles paraît intéressante pour pouvoir rendre compte de ces différences de sensibilité du rendement au stress hydrique en fonction de la position de la contrainte au cours du cycle.

1.3. Cadre d'analyse et de modélisation de la croissance individuelles des feuilles de la laitue.

1.3.1. Description

Le cadre d'analyse sur lequel nous avons développé notre modèle de croissance foliaire de la laitue est issu de travaux portant sur l'analyse des variations de surface foliaire des plantes en réponse aux facteurs de l'environnement chez des dicotylédones (Dale, 1964 sur le haricot ; Mutsaers, 1983a et b sur le coton ; Lecoeur et al., 1995 sur le pois ; Granier et Tardieu, 1998a sur le tournesol).

Ces travaux montrent notamment que la période d'expansion d'une feuille après son initiation par l'extrémité apicale peut être divisée en 2 phases (chapitre II, figure II.7). Au cours de la première phase, la croissance de la feuille est exponentielle. La vitesse relative d'expansion (RER) est quasi constante. Pendant la deuxième phase, le RER décroît progressivement jusqu'à l'arrêt de l'expansion de la feuille. Granier et Tardieu (1998a et b) ont montré sur tournesol que ces 2 phases correspondent à des périodes de sensibilité différente aux variables environnementales, notamment la lumière.

Cette représentation de la cinétique du RER peut être appliquée aux feuilles d'une plante de laitue. La figure IV.3 montre l'évolution de la surface foliaire et du RER pour 10 feuilles de rang différent (de 4 à 51) en fonction du temps thermique dans l'essai SER-1. En dehors de la feuille 4, dont la croissance est presque terminée à l'installation des plantes, on distingue nettement les 2 phases décrites ci dessus dans l'évolution du RER pour toutes les feuilles présentées. Pour les feuilles de rang supérieur à 20, les cinétiques ne sont pas complètes car ces feuilles n'ont pas terminé leur croissance à la fin du cycle de la culture.

Le cadre d'analyse et de modélisation de la croissance foliaire de la plante basé sur la décomposition de l'expansion des feuilles en deux phases comporte deux parties. La première consiste à bâtir un schéma de développement de la plante qui permet de prévoir pour chaque feuille les dates de 3 événements caractéristiques de sa croissance : l'initiation à l'extrémité apicale, la fin de la phase de croissance exponentielle, et la fin de l'expansion foliaire. Ce modèle donne la vitesse de production des feuilles et leur durée de développement. Pour prédire la surface des feuilles, il faut également modéliser leur vitesse d'expansion. La deuxième partie du cadre d'analyse consiste à modéliser la cinétique du RER pour chaque feuille initiée à l'extrémité apicale de la plante.

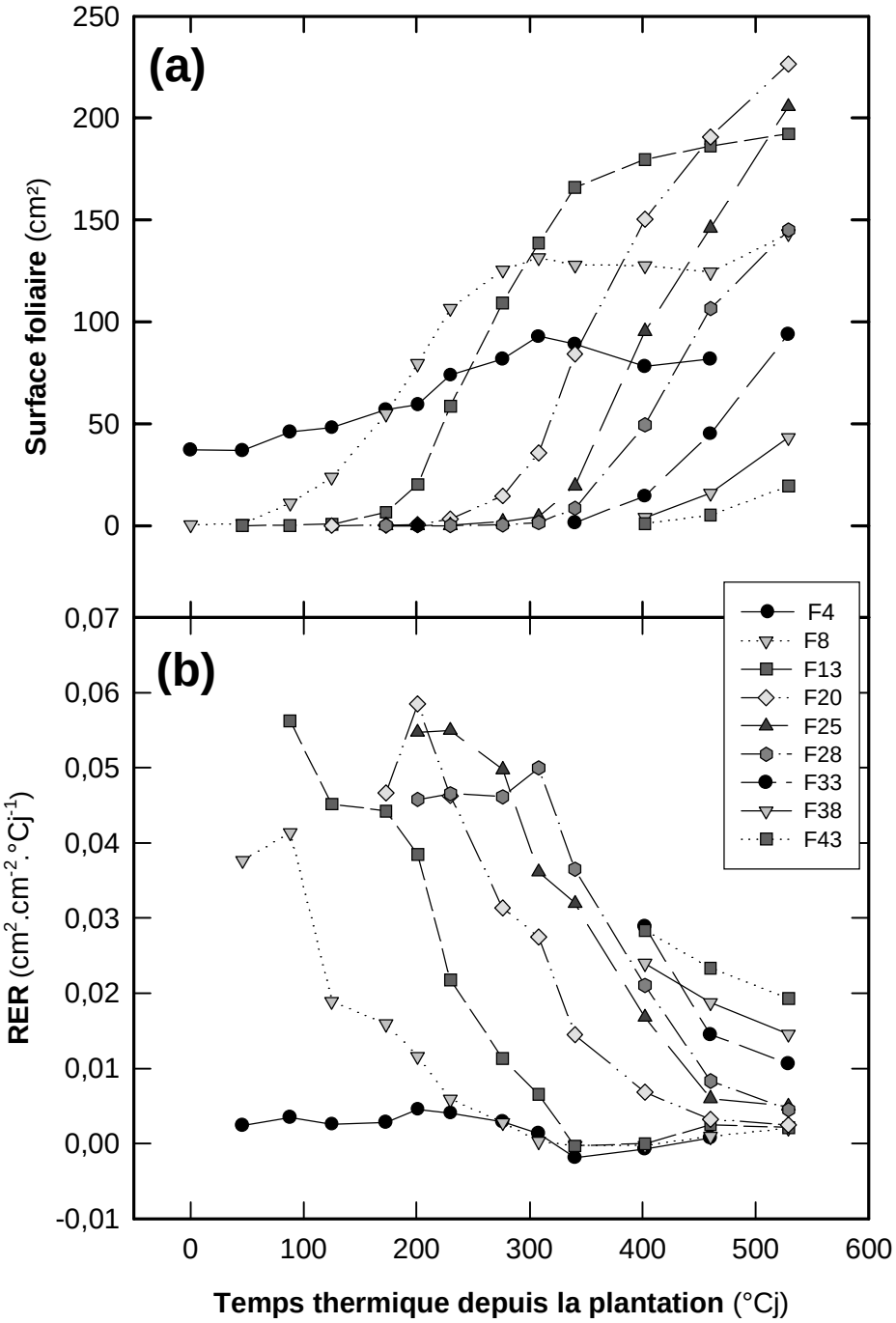


Figure IV.3 : Evolution en fonction du temps thermique de (a) la surface foliaire, (b) la vitesse relative d'expansion (RER) des feuilles 4, 8, 13, 20, 25, 28, 33, 38, et 43 dans l'essai SER-1.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.3.2. Quelles variables environnementales considérer en conditions hydriques non limitantes ?

Le cadre d'analyse de la croissance foliaire présenté ci-dessus a été développé en utilisant le temps thermique comme variable de référence pour modéliser les processus considérés (Turc et Lecoeur, 1997 ; Granier et Tardieu, 1998a et b). En l'absence de déficits hydrique ou azoté du sol et de stress biotiques, ces processus vont également être sensibles à la quantité de rayonnement intercepté par la plante (Granier et Tardieu, 1999), et à la demande évaporative (Ben Haj Salah et Tardieu., 1996). La prise en compte de ces variables permet généralement d'expliquer la variabilité des surfaces foliaires finales observées pour des plantes bien alimentées en eau et en azote. Dans nos essais, les surfaces foliaires finales des plantes varient de 3992 cm² pour VIS-01 à 11864 cm² pour VIS-99 (tableau IV.2) et présentent des profils très différents (figure IV. 4) en conditions hydriques et azotés non limitantes. Dans ces situations, les niveaux de PAR reçus par la culture varient de 5.4 à 18.1 $mol.m^{-2}.j^{-1}$, les conditions rencontrées en serre étant représentatives de celles relevées en cultures sous abri chez les agriculteurs. Par contre le déficit de saturation de l'air (VPD), qui rend compte de la demande évaporative, est quasi identique dans nos essais et se situe à des valeurs inférieures à 2 kPa non limitantes pour la croissance foliaire (Papadopoulos et al., 1997).

Avec la température, le rayonnement semble donc être une variable déterminante à prendre en compte pour simuler et prévoir la croissance foliaire de la laitue.

Tableau IV. 2 : Moyennes et écart types sur le cycle des températures, du PAR incident et du VPD quotidiens et surfaces foliaires finales des plantes mesurées dans nos essais

ESSAI	Température (°C)	PAR incident ($mol.m^{-2}.j^{-1}$)	VPD (kPa)	Surface foliaire finale (cm^2)
SER-1	17.8 (2.89)	18.1 (8.41)	0.9 (0.49)	5521
SER-2	19.2 (1.58)	7.5 (2.93)	0.7 (0.21)	6787
VIS-99	11.3 (2.00)	17.2 (6.74)	0.8 (0.29)	11864
VIS-00	9.9 (3.07)	12.8 (5.27)	0.9 (0.37)	8707
VIS-01	10.0 (2.90)	5.4 (2.95)	1.3 (0.31)	3992
AVI-01	12.2 (2.43)	14.6 (5.62)	- (-)	9347

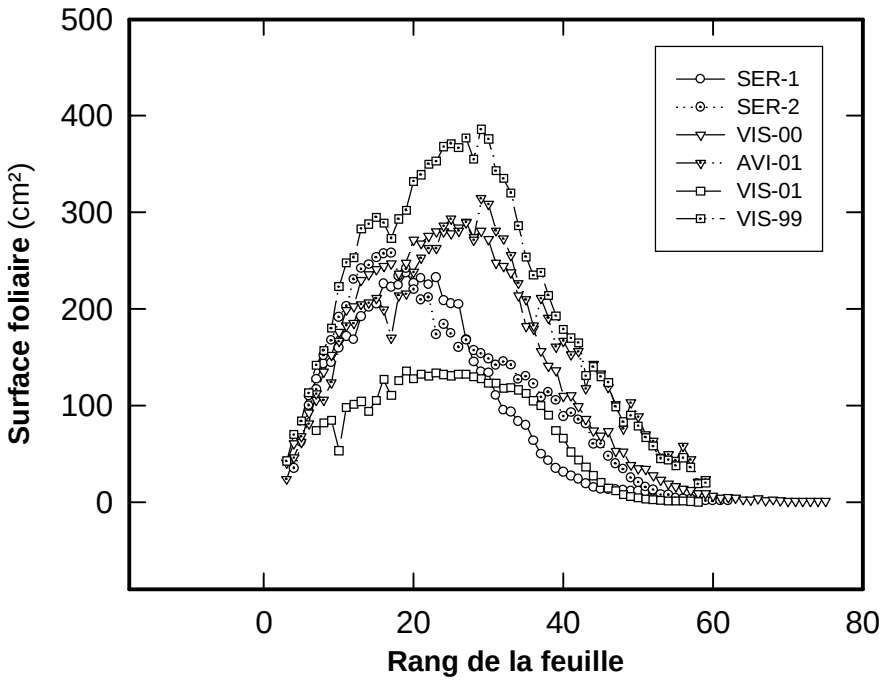


Figure IV.4 : Profils de surface foliaire à la récolte mesurés dans les essais SER-1, SER-2, VIS-99, VIS-00, VIS-01 et AVI-01.

1.3.3. Quelle variable pour caractériser le stress hydrique ?

Le stress hydrique subit par une plante peut être caractérisé par des variables d'état hydrique du sol (Lacape et al., 1998) ou des variables d'état hydrique de la plante (Katerji et al., 1988). Les variables d'état hydrique du sol sont essentiellement le potentiel hydrique et la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW, chapitre II, section 2.2.2). FTSW est définie comme le rapport entre le stock d'eau disponible du sol à un jour donné et la quantité totale d'eau transpirable du sol dans la zone racinaire. Par rapport à notre démarche, ces variables présentent l'avantage d'être facilement mesurables dans le cas du potentiel hydrique, ou calculable à partir des données issues d'un modèle de bilan hydrique dans le cas de FTSW. Des relations robustes ont pu être établies entre FTSW et la transpiration de la plante (Lecoeur et Sinclair, 1996), l'état hydrique de la plante (Lacape et al., 1998) et la croissance foliaire (Leceour et al., 1996). Ces relations ont dans certains cas été intégrées dans des modèles de fonctionnement des cultures (Amir et Sinclair, 1991).

Dans les essais SER-2 et SER-3, nous avons mesuré le potentiel hydrique foliaire en fin de nuit (ou potentiel de base, ψ_b) des plantes au cours des phases de stress. Le potentiel de base est une variable d'état hydrique de la plante très sensible au stress hydrique pour des plantes à comportement anisohydrique comme la laitue (Izzeldin et al., 1980 ; Katerji et al., 1988 ; Tardieu et Simonneau, 1998). L'ajustement réalisé entre FTSW et ψ_b à partir de nos données

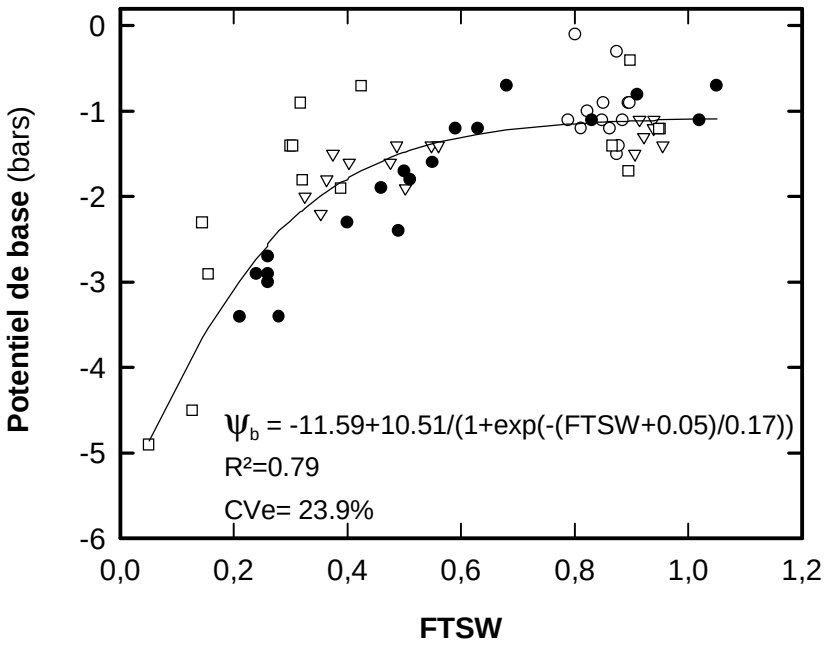


Figure IV.5 : Relation entre la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW) et le potentiel de base établie à partir des mesures effectuées au cours des essais SER-2 (symboles fermés) et SER-3 (symboles ouverts). La courbe représente l'ajustement réalisé sur l'ensemble des données

montre une bonne corrélation entre ces deux variables (figure IV.5). La relation obtenue est comparable à celles établies pour de nombreuses espèces (voir la synthèse de Sadras et Milroy, 1996; Lacape et al., 1998 sur coton ; Pellegrino et al., 2001 sur vigne), et aux données de Izzeldin et al. (1980) sur laitue.

Nous avons donc choisi la FTSW pour caractériser le stress hydrique subi par la plante dans nos essais et modéliser la réponse de la croissance foliaire de plantes au déficit hydrique.

1.4. Démarche du chapitre

Les deux premières parties de ce chapitre sont consacrées à l'analyse du développement et de la croissance individuelle des feuilles de la laitue en fonction de la température et du rayonnement en l'absence de contraintes hydriques (section 2), puis en fonction du stress hydrique (section 3), à partir du cadre d'analyse présenté en 1.3. et des résultats des essais en pots mais également des données issues des essais sous abri froid. Dans ce travail, nous nous sommes efforcés de bâtir des relations stables et quantitatives entre les processus étudiés et les variables de l'environnement que nous avons ensuite utilisées pour élaborer un modèle de croissance des feuilles de la laitue que nous présentons et testons dans la section 4.

2. Analyse du développement et de la croissance individuelle des feuilles de la laitue en fonction de la température et du rayonnement.

2.1. Analyse et modélisation du développement foliaire

2.1.1. Description du schéma de développement foliaire de la laitue

Nous avons caractérisé le développement d'une feuille de laitue en 4 stades : l'initiation, la fin de la croissance exponentielle, la fin de l'expansion, et l'apparition. Les trois premiers stades permettent de décrire la cinétique du RER de la feuille au cours du temps (figure II.7 et IV.3). La phase de croissance exponentielle correspond à la période au cours de laquelle le RER est considéré comme constant. Le quatrième stade, l'apparition, n'a pas de signification par rapport à cette cinétique. Pour la laitue, on considère qu'une feuille est apparue quand elle atteint 1 cm de longueur. Comme nous l'avons vu ci dessus (section 1.2.1), le nombre de feuilles apparues constitue un stade de référence de la durée du cycle d'une culture de laitues facilement repérable contrairement aux 3 autres stades.

La figure IV.6 montre l'évolution au cours du temps, exprimé en temps thermique cumulé depuis la plantation, du nombre de feuilles initiées (NFini), apparues (NFapp), ayant atteint la fin de la phase de croissance exponentielle (NFfp) et ayant fini leur expansion (NFfin) pour l'essai SER-1. NFfp n'a pu être calculé au delà de la 38ème feuille car les feuilles de rang supérieur étaient trop jeunes à la récolte pour pouvoir déterminer ce stade selon la méthode utilisée (cf chapitre II section 3.2).

Compte tenu du mode d'installation de la culture à partir de jeunes plantes élevées en mottes, un certain nombre de feuilles sont déjà présentes aux différents stades à la plantation. A la récolte, 110 feuilles ont été initiées, 55 sont apparues et seulement 25 ont fini leur croissance. Il y a donc 85 feuilles encore en expansion dont 55 ont une longueur inférieure à 1 cm. Il en résulte une accumulation de jeunes feuilles de petite taille par rapport aux grandes feuilles ayant atteint leur taille définitive. Ce processus d'accumulation de feuilles a été identifié comme indispensable à la formation de la pomme caractéristique des laitues qui constitue un critère de qualité primordial pour leur commercialisation (Bensink, 1971 ; Nothmann, 1976).

Quel que soit le stade considéré, on distingue 2 phases dans les cinétiques de mise en place du nombre de feuilles (figure IV.6). Au cours de la première phase, après la plantation, le nombre de feuilles initiées ou produites[7] augmente faiblement. Dans la seconde phase, les vitesses

[7] On parlera de feuilles produites pour désigner l'ensemble des feuilles ayant atteint les stades apparition, fin de la croissance exponentielle et fin d'expansion.

d'initiation et de production sont plus élevées et sont presque constantes. L'évolution du nombre de feuilles aux différents stades est alors quasiment linéaire. Le temps thermique auquel a lieu la transition entre ces deux phases est variable selon le stade considéré. Pour le déterminer, nous avons réalisé un ajustement par morceaux avec deux relations linéaires sur les points observés pour chaque stade (Tableau IV. 3, fig. IV.6). Pour le stade « fin de phase exponentielle », les schémas de développement établis pour d'autres espèces (Granier et Tardieu, 1998 ; Lafarge et Tardieu, 2002 ; Franck, 2001) permettent d'estimer que NFfp évolue également linéairement au delà de la dernière feuille pour laquelle nous avons pu déterminer ce stade. Pour la cinétique de NFfin, nous avons été amené à distinguer 3 phases pour améliorer la qualité de l'ajustement : une première phase après la plantation au cours de laquelle NFfin n'évolue quasiment pas, suivie de 2 phases au cours desquelles la vitesse de NFfin augmente progressivement.

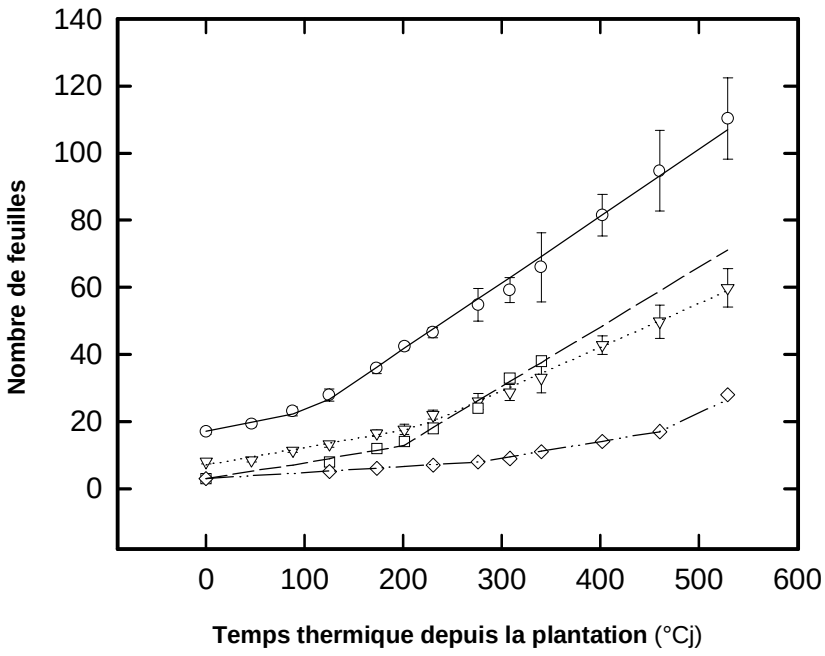


Figure IV.6 : Evolution, en temps thermique cumulé depuis la plantation, du nombre de feuilles initiées (cercles), apparues (triangles), ayant fini la phase de croissance exponentielle (carrés) et ayant terminé leur expansion (losanges) au cours de l'essai SER-1. Les lignes représentent les ajustements réalisés pour chaque stade. Les barres verticales représentent les écartypes des valeurs moyennes observées.

Les pentes des différents ajustements permettent de déterminer les vitesses moyennes des processus d'initiation et de production de feuilles au cours de chaque phase. On constate que l'initiation est le processus le plus rapide des 4 étudiés avec les vitesses les plus élevées et la transition entre les 2 phases la plus précoce. Le processus le plus lent est la fin d'expansion.

Ces observations permettent d'expliquer le phénomène d'accumulation de feuilles de petites tailles constaté ci dessus. On remarque par ailleurs que les évolutions de NFapp et NFfp sont quasiment identiques en début de cycle avec des vitesses peu différentes (resp. 0.052 contre 0.050 feuil.°Cj^{-1}) et un point de transition entre les deux phases de production autour de 200°Cj. Au-delà de cette date, la vitesse de production de feuilles apparues est plus faible que celle de feuilles ayant atteint la fin de la croissance exponentielle.

Tableau IV.3 : Paramètres des ajustements réalisés sur les cinétiques de NFini, NFapp, NFfp et NFfin pour l'essai SER-1. V_1, V_2, V_3 sont les pentes des droites ajustées et représentent les vitesses moyennes de production des feuilles au cours des phases considérées (en nombre de feuilles. °Cj^{-1}). A, B et C représentent les ordonnées à l'origine de chaque ajustement

	Paramètres	NFini	NFapp	NFfp	NFfin
Phase 1	**A**	17.1	7.1	2.7	2.9
	V_1	0.058	0.052	0.050	0.019
	transition (°Cj^{-1})	118	209	200	270
Phase 2	**B**	1.9	-9.9	-22.6	-5.8
	V_2	0.198	0.130	0.177	0.050
	transition (°Cj^{-1})	-	-	-	460
Phase 3	**C**	-	-	-	-46
	V_3	-	-	-	0.137
Ajustement global	**R^2**	0.996	0.996	0.992	0.996
	CVe	3.52%	3.86%	3.08%	3.17%

2.1.2. Le schéma de développement foliaire de la laitue n'est pas stable en temps thermique

Les observations faites ci dessus pour le développement foliaire des plantes de laitue au cours de l'essai SER-1 sont également valables pour les schémas de développement des plantes observés au cours des essais SER-2, AVI-01 et VIS-00 (figure IV. 7).

Les ajustements réalisés pour les différents processus montrent que les vitesses d'initiation et de production des feuilles calculées en fonction du temps thermique et les dates des transitions entre les 2 phases du développement ne sont pas identiques entre les essais (Tableau IV. 4). Quel que soit le processus considéré, on constate que le développement le plus rapide est observé pour l'essai VIS-00, suivi de VIS-99 et AVI-01 qui ont des vitesses de développement proches, puis de SER-2, AVI-01 et enfin de SER-2 qui présente le développement le plus lent. Cela se traduit par des durées de cycle en temps thermique variant de 384 °Cj pour VIS-00 à 650°Cj pour SER-2.

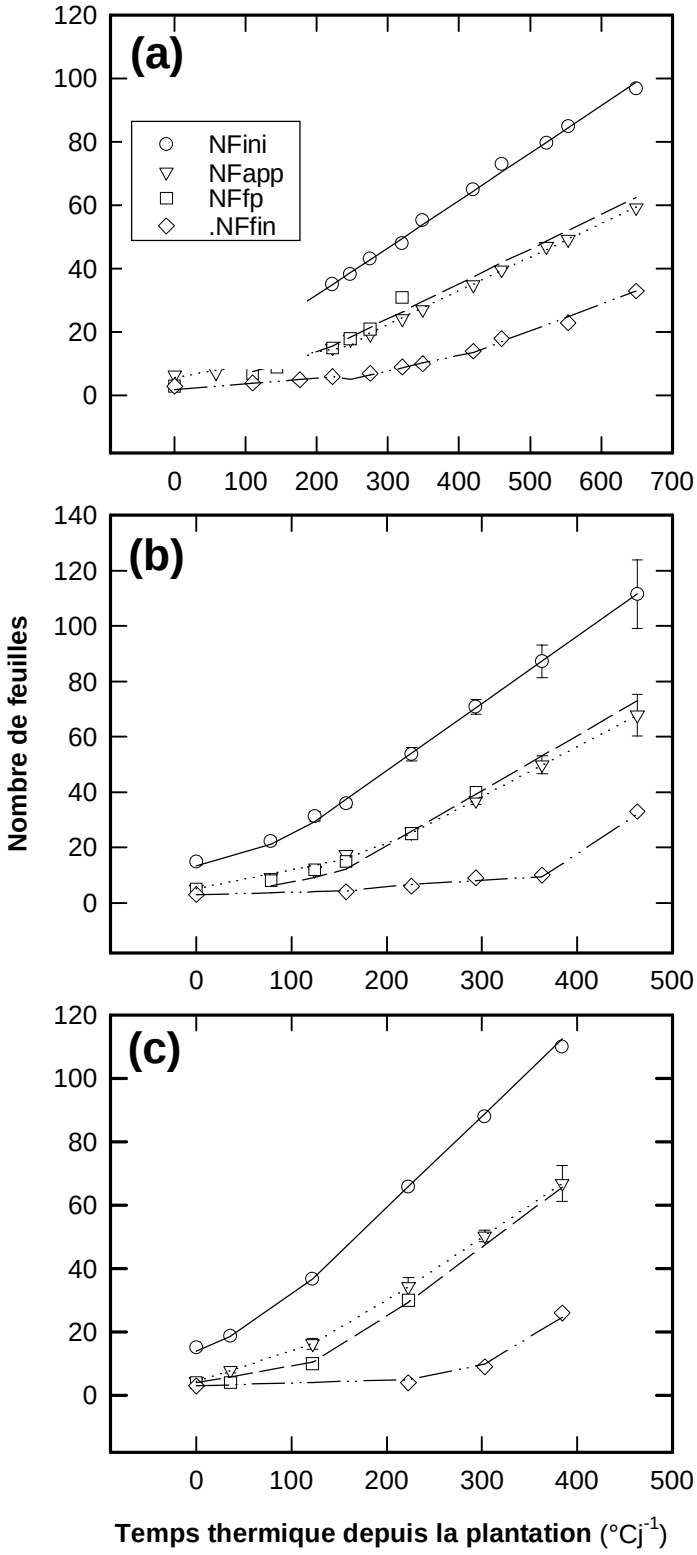


Figure IV.7 : Schéma de développement foliaire des plantes dans les essais (a) SER-2, (b) AVI-01 et (c) VIS-00. Les symboles représentent les données observées, et les lignes les ajustements réalisés.

Tableau IV.4 : Vitesses moyennes d'initiation et de production de feuilles aux différents stades, et dates des transitions entre les phases de développement calculées pour les essais SER-2, AVI-01, VIS-99, VIS-00 ET VIS-01.

Processus	Paramètres	SER-2	AVI-01	VIS-99	VIS-00	VIS-01
NFini	V1 (feuil.°Cj^{-1})	0.070	0.100	0.110	0.130	-
	V2 (feuil.°Cj^{-1})	0.149	0.243	0.243	0.289	-
	Transition (°Cj)	136	99	104	79	-
NFapp	V1 (feuil.°Cj^{-1})	0.042	0.069	0.090	0.098	0.041
	V2 (feuil.°Cj^{-1})	0.106	0.180	0.201	0.202	0.134
	Transition (°Cj)	254	185	202	146	254
NFfp	V1 (feuil.°Cj^{-1})	0.060	0.067	-	0.119	-
	V2 (feuil.°Cj^{-1})	0.147	0.199	-	0.224	-
	Transition (°Cj)	222	152	-	157	-
NFfin	V1 (feuil.°Cj^{-1})	0.018	0.008	-	0.009	-
	V2 (feuil.°Cj^{-1})	0.047	0.020	-	0.065	-
	V3 (feuil.°Cj^{-1})	0.135	0.208	-	0.182	-
	Transition (°Cj)	298	226	-	**232**	-
	Transition (°Cj)	509	373	-	302	-

2.1.3. Les vitesses de développement des feuilles dépendent du rapport entre le rayonnement et le temps thermique.

Comme nous l'avons vu plus haut (section 1.3.2), les quantités de rayonnement reçues par les plantes sont très variables dans nos essais. On observe une liaison négative entre le PAR incident cumulé de la plantation à la récolte et la durée de cycle exprimée en temps thermique cumulé pour nos essais (figure IV. 8).

Pour analyser cet effet du rayonnement sur le développement foliaire de la laitue, nous avons calculé à partir de nos données expérimentales les vitesses d'initiation et de production des feuilles aux différents stades sur des périodes d'une semaine sur lesquelles nous avons également calculés le PAR absorbé par les plantes (PARa) et le coefficient photothermique (Cphth) en moyenne par jour. Nous avons défini le coefficient photothermique journalier comme le rapport entre le PAR incident et le temps thermique du jour. Dans ce calcul, nous avons différencié pour un même stade de développement les vitesses avant et après le point de transition identifié dans les ajustements (tableau IV.4)

Les vitesses d'initiation et d'apparition après le point de transition (resp. Vini2 et Vapp2) montrent une évolution similaire en fonction du coefficient photothermique (figure IV. 9a). Pour des valeurs de Cphth supérieures à 2 mol.m-².°Cj-1, Vini2 et Vapp2 sont constantes

Rapport-Gratuit.com

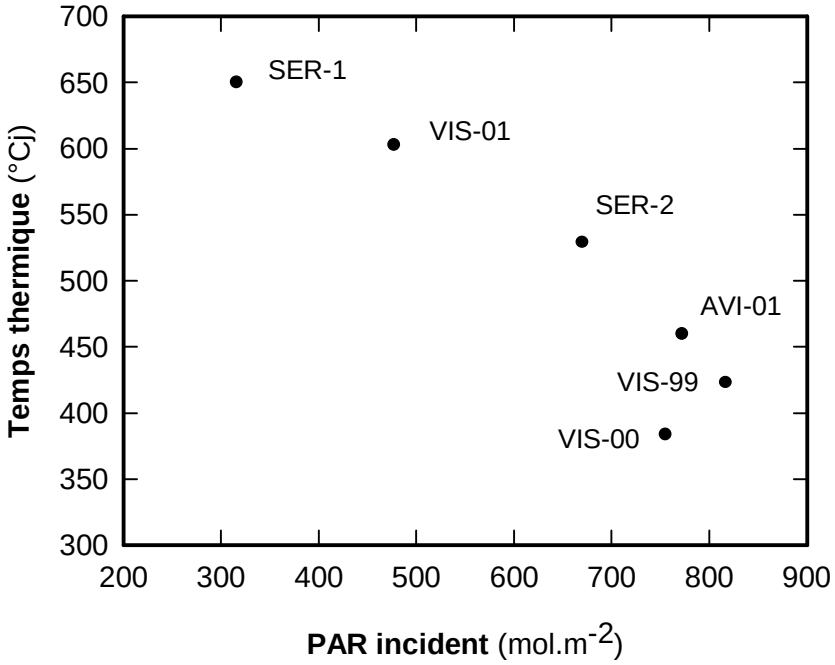


Figure IV.8 : Relation entre le PAR incident et le temps thermique cumulés de la plantation à la récolte dans nos essais.

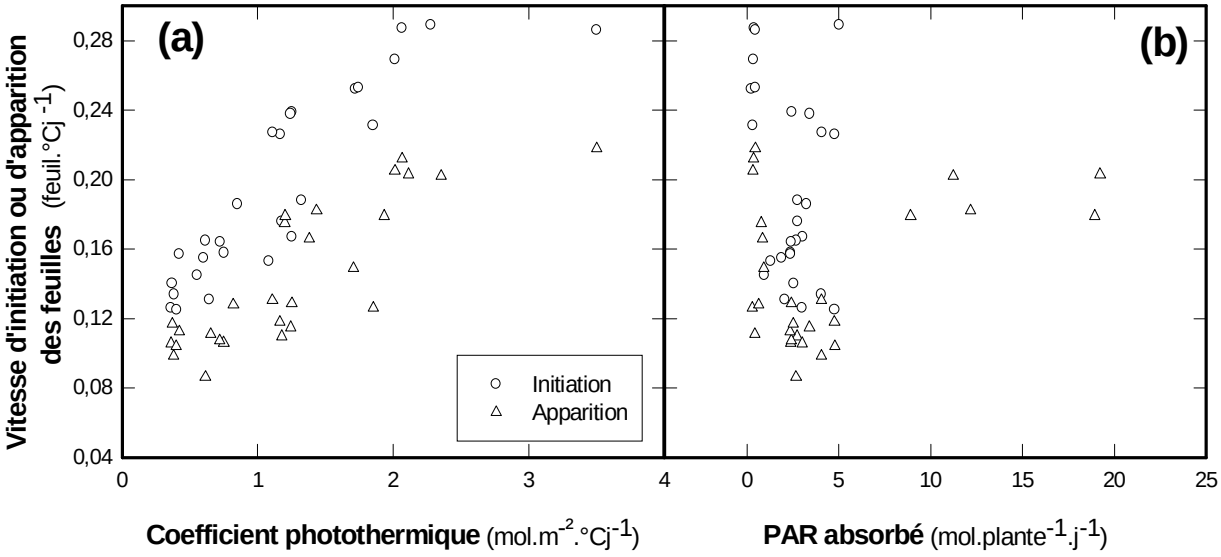


Figure IV.9 : Relation entre la vitesse d'initiation (cercles) et d'apparition (triangles) aprés le point de transition et (a) le coefficient photothermique, (b) le PAR absorbé journalier.

autour de 0.28 feuil.°Cj-1 pour l'initiation et de 0.21 feuil.°Cj-1 pour l'apparition. Elles chutent ensuite quasi linéairement jusqu'à des valeurs de l'ordre de 0.12 feuil.°Cj-1 pour Vini2 et 0.10 feuil.°Cj-1 pour Vapp2. Par contre, aucune tendance claire n'apparaît entre ces vitesses et le PAR absorbé (fig. IV.9b).

La relation mise en évidence dans la figure IV.9a entre Cphth, Vini2 et Vapp2 est généralisable aux autres stades phénologiques et aux phases avant et après les points de transition comme le montre la figure IV.10. Dans cette figure, les vitesses ont été normalisées par rapport aux vitesses maximum observées pour chaque stade et chaque phase de développement (Tableau IV. 5). Cette transformation permet de regrouper l'ensemble des données dans une même relation. On peut distinguer 3 phases dans cette relation : entre 0 et environ 0.7 mol.l-2.°Cj-1, V/Vmax est relativement constant pour un stade donné entre 0.04 et 0.06 ; entre 0.7 et 2 mol.l-2.°Cj-1, V/Vmax augmente linéairement jusqu'à 1 ; au delà de 2 mol.l-2.°Cj-1, V/Vmax est égal à 1. Pour représenter cette évolution, nous avons réalisél'ajustement suivant en 2 parties ($R^2 = 0.79$, CVe = 12.09%) :

$$\text{Si } Cphth \le 0.75 \qquad \frac{V}{V\max} = 0.5$$

$$\text{Si } Cphth > 0.75 \qquad \frac{V}{V\max} = -1 + \frac{2}{1 + \exp(-1.61 \times Cphth)} \qquad \textbf{Eq. IV. 1}$$

Tableau IV.5 : Vitesses maximum observées pour les différents stades de développement

Stades/phases	Vmax (feuil.Cj^{-1})
NFini 1	0.130
NFini 2	0.289
NFapp 1	0.098
NFapp 2	0.205
NFfp 1	0.098
NFfp 2	0.244
NFfin 1	0.017
NFfin 2	0.080
NFfin 3	0.334

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

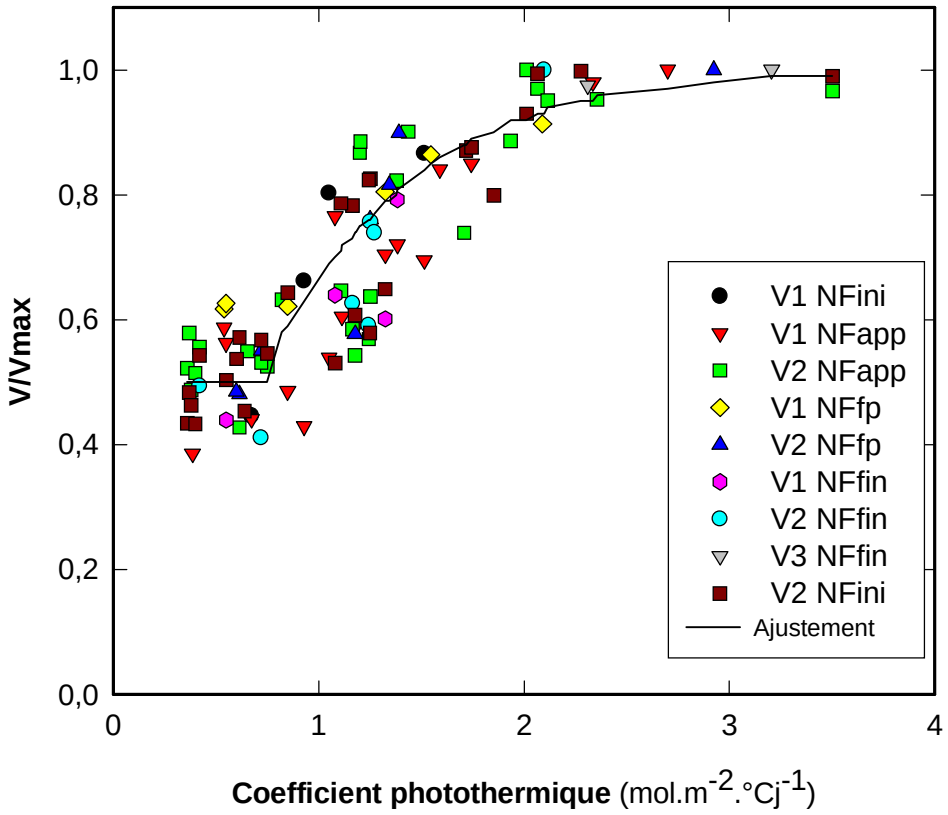


Figure IV.10 : Relation entre le coefficient photothermique
et les vitesses normalisées d'initiation et de production des feuilles.

2.1.4. Conclusion

Le schéma de développement foliaire de la laitue en fonction de la température est semblable à celui établi pour de nombreuses espèces (Rickman et Klepper, 1995 pour les céréales ; Ben Haj Salah et al , 1996 sur le maïs; Turc et Lecoeur, 1997 sur le pois; Granier et Tardieu, 1998 sur le tournesol ; Lafarge et Tardieu, 2002 sur le sorgho; Lebon et al., 2001 sur la vigne; Franck, 2001, sur Arabidopsis Thaliana). Il montre une mise en place séquentielle des organes aux différents stades caractéristiques du développement d'une feuille. Nous avons montré que la modélisation de ce processus doit tenir compte du rayonnement pour rendre compte des différences de vitesses d'initiation et de production des feuilles selon les situations. Pour les 4 stades de développement étudiés, nous avons par ailleurs mis en évidence une évolution en deux phases dans tous nos essais, marquée par des vitesses plus faibles en début de cycle. Nous reviendrons sur ce point dans la discussion du chapitre.

Le schéma de développement ne constitue que la première étape de la modélisation de la croissance individuelle des feuilles. Dans la suite, nous analysons la réponse de la vitesse de croissance des feuilles à la température et au rayonnement.

2.2. Analyse et modélisation de l'expansion des feuilles de laitue

L'analyse de l'expansion des feuilles a été centrée sur l'analyse des cinétiques de la vitesse relative d'expansion des feuilles (RER).

2.2.1. Analyse de la distribution du RER selon le rang de la feuille

Selon le cadre d'analyse présenté en 1.3.1, nous proposons de modéliser l'expansion des feuilles en simulant l'évolution de la vitesse relative d'expansion (RER) de chaque feuille. A la suite de Mutsaers (1983a et b), nous avons basé notre approche de modélisation sur l'analyse des distributions au sein de la plante des valeurs de RER selon le rang de la feuille à différentes dates au cours du cycle.

Comme le montre la figure IV.11 pour 3 dates de mesure dans l'essai SER-1, ces profils présentent une allure commune de type sigmoïde. Le RER augmente d'abord lentement entre 0 et 0.01 $cm^2.cm^{-2}.°Cj^{-1}$ pour les feuilles les plus âgées (celles de rang le plus faible) dont la croissance est presque terminée, puis il augmente quasi linéairement, pour les feuilles dans la phase d'expansion linéaire, de 0.01 $cm^2.cm^{-2}.°Cj^{-1}$ jusqu'à une valeur maximum (notée RERp) relativement constante pour les feuilles les plus jeunes (celles de rang le plus élevé) qui se trouvent dans la phase de croissance exponentielle. Ces distributions de RER peuvent être représentées simplement par l'équation logistique à trois paramètres suivante :

$$RER = \frac{a}{1 + \exp\left(\frac{-(NF - b)}{c}\right)} \qquad \textbf{Eq. IV. 2}$$

avec NF = rang de la feuille.

Le paramètre a de cette équation correspond à la valeur du plateau final de la courbe et permet donc de déterminer RERp pour un profil donné. L'équation IV.2 devient alors

$$RER = \frac{RERp}{1 + \exp\left(\frac{-(NF - b)}{c}\right)} \qquad \textbf{Eq. IV. 3}$$

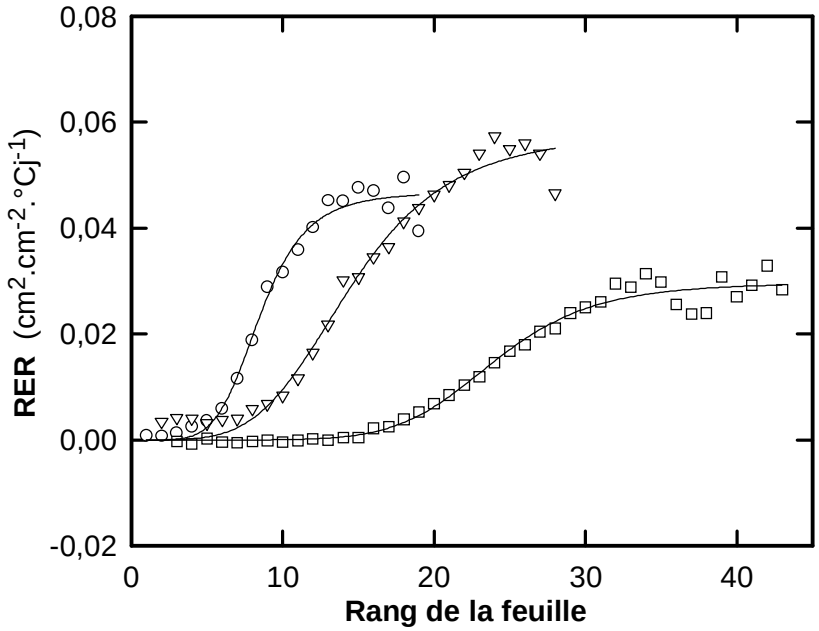


Figure IV.11 : Distribution des valeurs de RER selon le rang de la feuille le le 11éme jour (cercles), le 19ème jour (triangles) et le 30ème jour (carrés) dans l'essai SER-1. Les lignes représentent les ajustements réalisés sur chaque série de point avec une logistique à 3 paramètres.

2.2.2. Evolution de RERp en fonction de l'âge de la plante.

Les ajustements avec l'équation IV.3 ont été réalisés sur l'ensemble de profils de RER par date de mesure obtenus dans les essais SER-1, SER-2 et AVI-01. L'évolution de RERp au cours du cycle présente une allure identique en 2 phases dans les 3 cas (figure IV. 12). Dans la première phase, RERp varie autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 0.050 $cm^2.cm^{-2}.j^{-1}$ pour SER-1 et SER-2, et 0.065 $cm^2.cm^{-2}.j^{-1}$ pour AVI-01. Pendant la deuxième phase, RERp diminue progressivement jusqu'à 0.03 $cm^2.cm^{-2}.j^{-1}$ pour SER-1 et SER-2, 0.04 $cm^2.cm^{-2}.j^{-1}$ pour AVI-01.

Cette évolution de RERp en fonction du temps peut être représentée par un ajustement en deux morceaux comme suit :

Si $TT < TT_{trans_RER}$ $RERp = RERp_max$ **Eq. IV. 4**

Si $TT \geq TT_{trans_RER}$ $RERp = RERp_max \times \exp(-\alpha(TT - TT_{trans_RER}))$

Avec TT = temps thermique cumulé depuis la plantation (°Cj)

TT_{trans_RER} = temps thermique entre les deux phases de l'ajustement de RERp (°Cj)

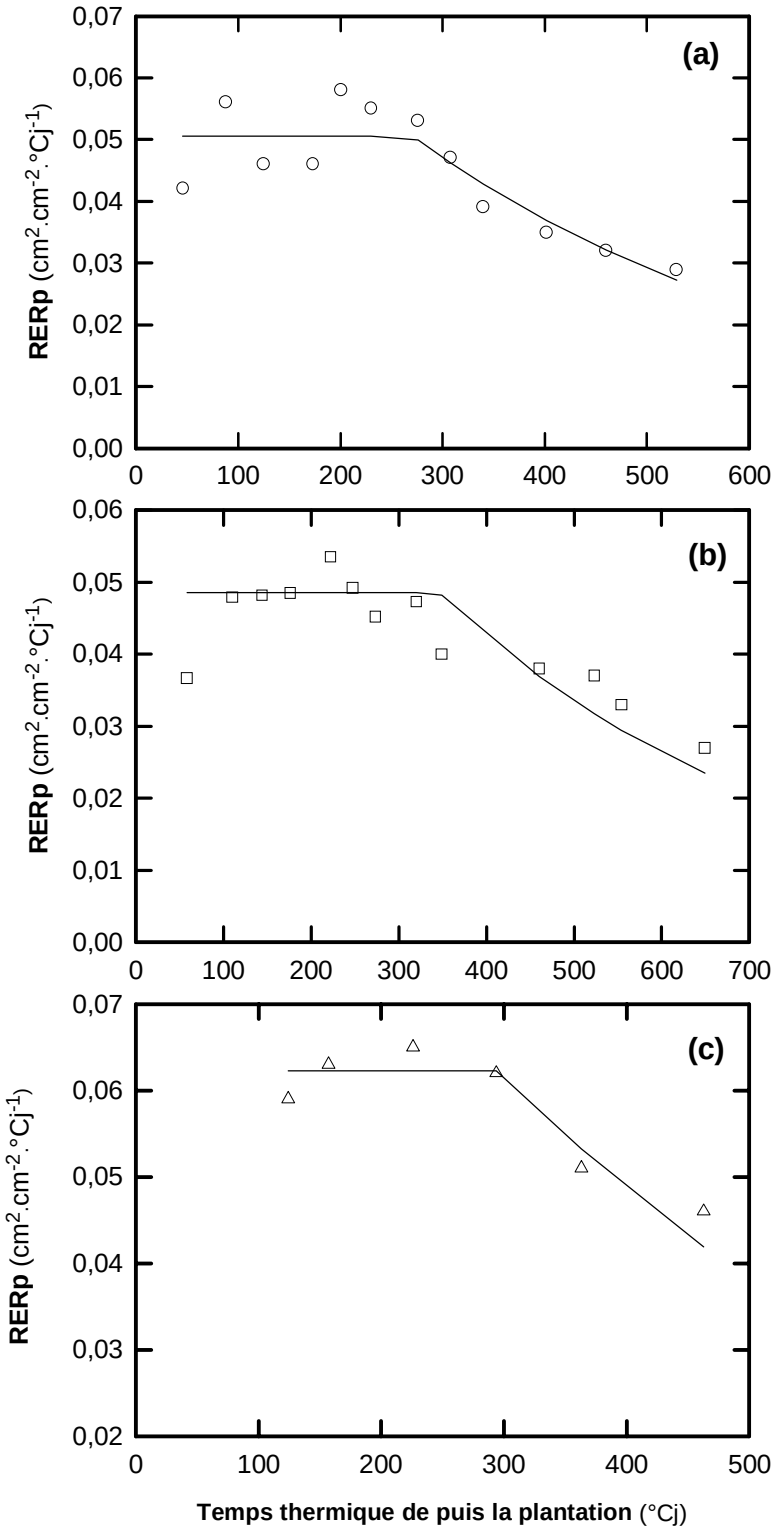


Figure IV.12: Evolution de la vitesse relative d'expansion foliaire pendant la phase de croissance exponentielle (RERp) au cours du temps dans les essais (a) SER-1, (b) SER-2, (c) AVI-01. Les courbes représentent les ajustements réalisés sur les points expérimentaux.

Le tableau IV. 6 donne les paramètres de cet ajustement sur les données des essais SER-1, SER-2 et AVI-01. On observe que les valeurs de TT_{trans_RER} sont très différentes dans les 3 essais. Pour SER-2 et AVI-01, TT_{trans_RER} se situe environ aux 2/3 du cycle, alors qu'il se situe un peu avant la moitié du cycle dans SER-1. Selon les observations qualitatives faites sur la formation de la pomme de la laitue (non montré), ces stades correspondent à peu près au début de la fermeture de la pomme quand certaines des feuilles au cœur de la plante commencent à recouvrir les feuilles plus jeunes. On constate par ailleurs que les valeurs du paramètre α, qui détermine la courbure de la décroissance de RERp après la phase de plateau, sont par contre assez proches. Le rythme de diminution de RERp est donc quasi identique dans les 3 essais.

Tableau IV.6 : Paramètres de l'équation décrivant l'évolution de RERp au cours du cycle dans les essais SER-1, SER-2, AVI-01

Paramètres	SER-1	SER-2	AVI-01
RERp_max ($cm^2.cm^{-2}.°Cj^{-1}$)	0.0509	0.0475	0.0617
TTtrans_RER (°Cj)	244	358	297
α	0.0022	0.0018	0.0020
R^2	0.77	0.84	0.89
CVe	10.01	6.73	4.03

2.2.3. Sensibilité de RERp au PAR absorbé par la plante

On observe également dans le tableau IV.6 que les valeurs de RERp_max sont différentes d'un essai à l'autre. La vitesse relative de croissance pendant la phase exponentielle n'est donc pas la même selon les situations. Plusieurs auteurs ont montré que les variations de RER au cours de cette phase peuvent être reliées à la quantité de PAR absorbé par la plante (Granier et Tardieu, 1999a, sur tournesol; Massonet, 2000, sur A. thaliana; Muller et al., 2001, sur maïs).

Dans les essais SER-1, SER-2 et AVI-01, nous avons calculé le PARa journalier moyen au cours de la phase de croissance exponentielle des feuilles qui ont passé ce stade avant la décroissance de RERp mise en évidence ci dessus. Les valeurs de RERp varient entre 0.0358 et 0.0623 $cm^2.cm^{-2}.°Cj^{-1}$ dans une gamme de 0.10 à 0.45 mol $PARa.plte^{-1}.j^{-1}$. Elles augmentent rapidement jusqu'à 0.055 $cm^2.cm^{-2}.°Cj^{-1}$ pour les faibles valeurs de PARa entre

0.10 et 0.30 mol.plte^{-1}.j^{-1}, et augmentent plus faiblement pour des PARa supérieures à 0.30 mol.plte^{-1}.j^{-1}(figure IV. 13a). Cette relation entre RERp et PARa est linéaire si on utilise le logarithme de PARa en abscisse (figure IV.13b) et peut être représentée par l'ajustement suivant :

$$RERp = 0.0352 \log(PARa) + 0.0733$$
$$R^2 = 0.635 \qquad \textbf{Eq. IV. 5}$$
$$CVe = 8.27\%$$

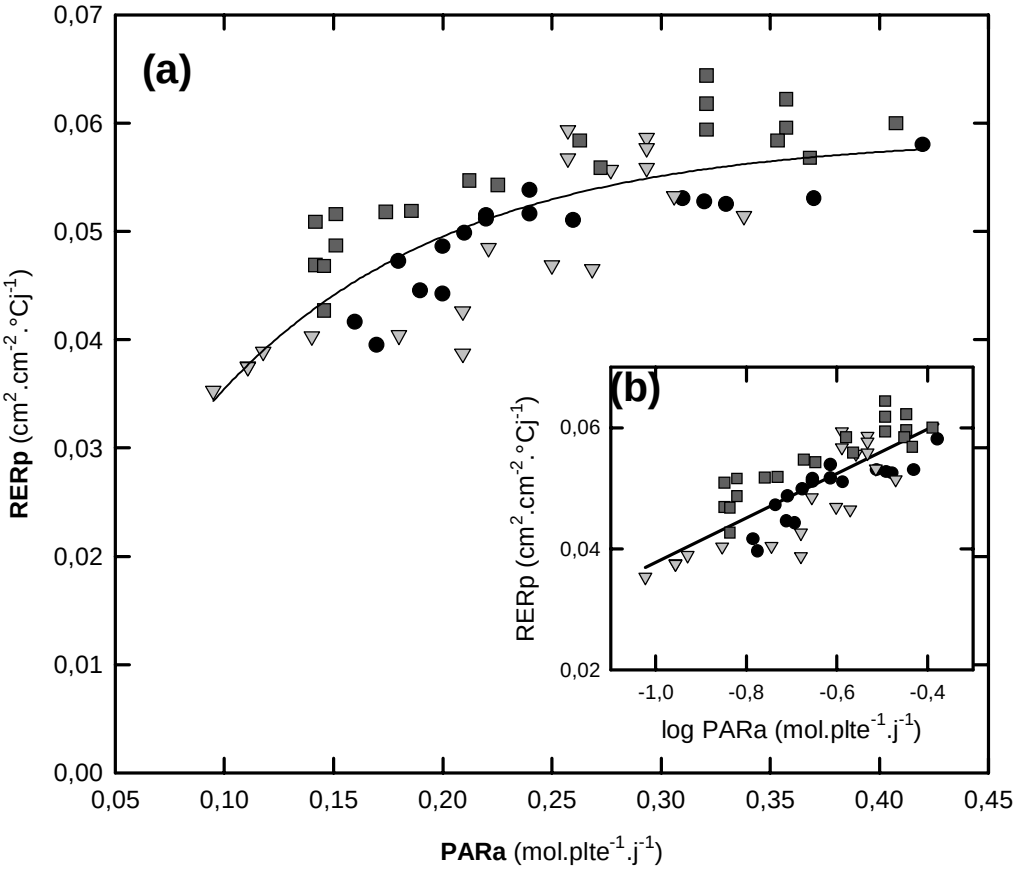


Figure IV.13 : Relation entre RER pendant la phase de croissance exponentielle (RERp) et (a) le PAR absorbé par la plante (PARa), (b) le logarithme du PARa dans les (b) essais SER-1 (cercles), SER-2 (triangles) et AVI-01 (carrés).

2.2.4. Modélisation de l'évolution du RER après la phase de croissance exponentielle.

Les équations IV.4 et IV.5 permettent de décrire l'évolution de la valeur du RER pendant la phase de croissance exponentielle (RERp). Pour décrire la diminution du RER après cette phase (noté RER_{dec}) et comparer les distributions observées de RER selon le rang de la feuille, nous avons effectué une double normalisation de ces distributions. Dans un premier temps, nous avons exprimé les valeurs de RER_{dec} un jour donné par rapport au RERp de ce

jour. Le résultat de cette transformation est présenté dans la figure IV. 14 pour les 3 profils de RER de la figure IV.11. Avec ce mode de représentation, l'évolution du rapport RERdec/RERp apparaît relativement identique entre les 3 profils, ce qui n'était pas le cas dans la figure IV.11.

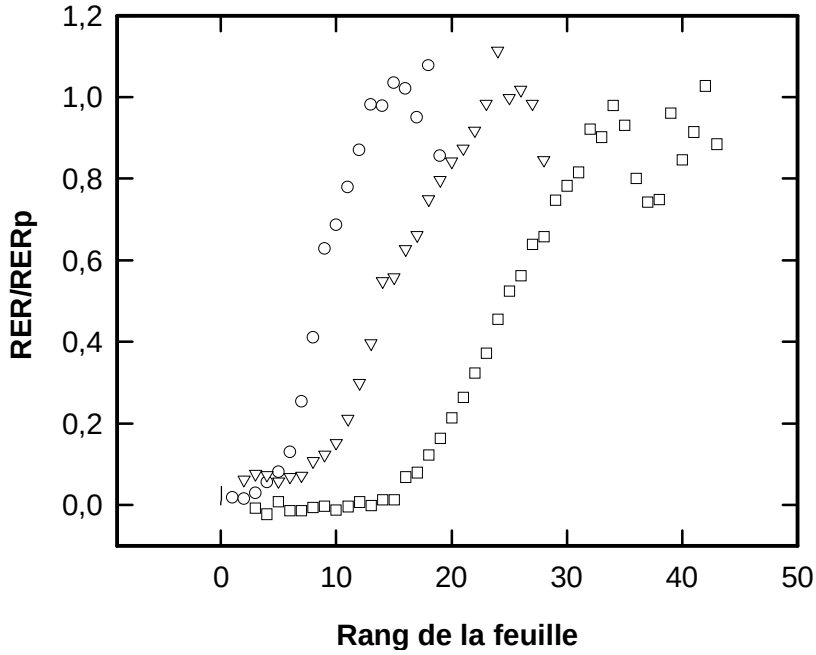


Figure IV.14 : Distribution du RER normalisé par rapport à la valeur de RERp du jour selon le rang de la feuille pour 3 jours de mesure dans SER1. Même légende que la figure IV.16.

Dans un second temps, nous avons normalisé le rang des feuilles utilisé en abscisse dans les figures IV.11 et IV.14 en calculant pour chaque feuille un indice plastochronique (IP). Cet indice calcule la position de la feuille en fonction de son rang (NF) par rapport au nombre de feuilles qui ont atteint les stades « fin de la croissance exponentielle « (NFfp) et « fin d'expansion » (NFfin) (Eq. IV. 6).

$$\begin{aligned} &\text{Si} \quad NF < NFfp && IP = 0 \\ &\text{Si} \quad NFfp \le NF < NFfin && IP = 1 - \frac{NF - NFfin}{NFfp - NFfin} \\ &\text{Si} \quad NF \ge NFfin && IP = 1 \end{aligned} \qquad \textbf{Eq. IV.6}$$

Nous avons calculé IP pour toutes les feuilles pour lesquelles nous avions des mesures de RER dans les essais SER-1 , SER-2 et AVI-01. Pour cela, nous avons utilisé les ajustements présentés dans le tableau IV.4 pour calculer aux dates de mesures les valeurs de NFfp et

NFfin. La figure IV. 15 montre l'évolution du rapport $RER_{dec}/RERp$ en fonction de IP dans ces 3 essais. On observe une tendance générale commune pour l'ensemble des profils présentés. Le RER décroît d'abord lentement jusqu'à 80% de RERp pendant le premier tiers de la période entre la fin de la croissance exponentielle et la fin d'expansion (resp. IP=0 et IP=0.3), puis la décroissance s'accélère entre IP=0.3 et IP=0.9 pour atteindre 10% de RERp et ralentit jusqu'à IP=1. Nous avons représenté cette évolution de RERdec/RERp en fonction de IP par l'équation suivante :

$$\frac{RER_{dec}}{RERp} = a + \frac{b}{1 + \exp\left(\frac{-(IP - c)}{d}\right)} \qquad \textbf{Eq. IV. 7}$$

avec, selon l'ajustement sur les données de la figure IV.15,

a= -0.297 b= 1.247

c= 0.721 d= -0.232

R^2 = 0.93 CVe = 28.51%

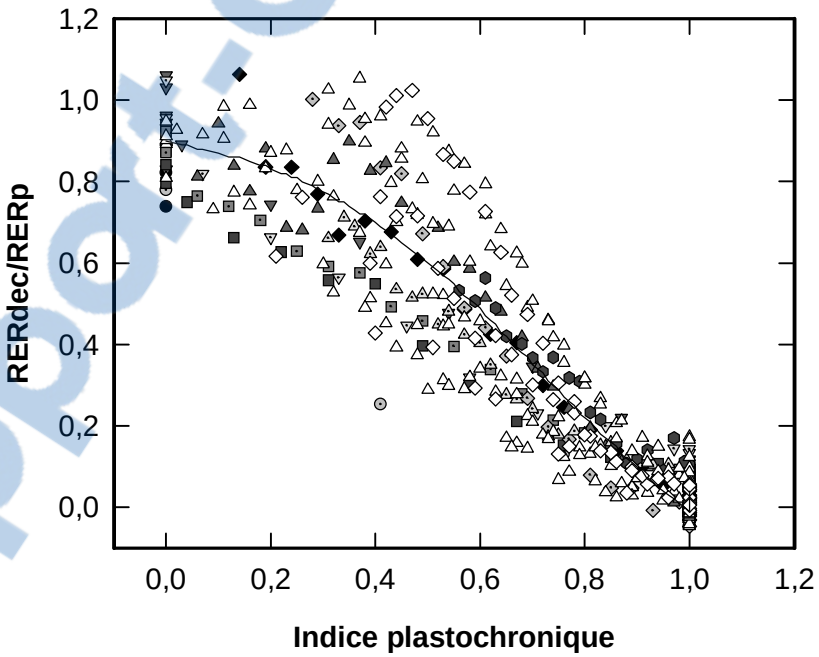


Figure IV.15 : Evolution du rapport entre le RER de la phase décroissante et le RER de la phase exponentielle en fonction de l'indice plastochronique dans les essais SER-1 (symboles grisés), SER-2 (triangle blanc), et AVI-01 (losanges blancs).

2.2.5. Conclusion

Comme pour le développement des feuilles, l'expansion des feuilles de laitues peut être modélisée en fonction de la température et du rayonnement, en l'absence de contraintes

Rapport-Gratuit.com

hydriques. L'approche développée a consisté à découper la cinétique de RER en deux phases : une phase au cours de laquelle le RER peut être considéré constant autour d'une valeur maximum (RERp) à partir de laquelle le RER décroît jusqu'à s'annuler au cours de la seconde phase. Nous avons montré que cette cinétique de RER peut être décrite par le même jeu de relations pour l 'ensemble des feuilles d'une plante de laitues.

Les résultats des parties 2.1 et 2.2 montrent donc qu'il est possible de modéliser le développement et la croissance de toutes les feuilles d'une laitue à partir d'un petit nombre de relations entre les vitesses caractéristiques de ces processus et les facteurs du climat les plus variables en conditions de production. Une telle modélisation peut être utile pour la prévision des dates de récolte et des rendements pour des situations climatiques très contrastées.

Pour l'évaluation des stratégies d'irrigation, il est également nécessaire d'analyser l'effet du stress hydrique sur le développement et l'expansion des feuilles.

3. Analyse et modélisation de l'effet de l'état hydrique du sol sur le développement et la croissance foliaire de la laitue.

3.1. Caractérisation des stress hydriques dans les essais SER-2 et SER-3.

Essai SER-2 (stress hydriques courts et d'intensité constante)

Dans cet essai, les 3 régimes hydriques appliqués ont entraîné la différenciation de l'état hydrique du sol entre les 3 traitements (figure IV. 16). Pour le lot témoin, FTSW a été maintenu par des irrigations régulières au dessus de 0.75, à des valeurs non limitantes pour le développement et la croissance foliaire (Sadras et Milroy, 1996 ; Lecoeur et Sinclair, 1996 ; Lecoeur et Guilioni, 1998). Pour les 2 lots stressés (S1 et S2), les irrigations ont été stoppées à 176°Cj entraînant un dessèchement progressif du sol, puis ont été reprises vers 250°Cj de façon à maintenir FTSW à 2 niveaux de déficit hydrique constants autour de 0.60 pour le lot S1 et de 0.40 pour le lot S2 jusqu'à 349°Cj, date à laquelle l'ensemble des pots a été ramené - et maintenu jusqu'à la fin - de l'essai au dessus de 0.80. Selon la relation établie entre FTSW et le potentiel matriciel (ψ_m) du sol sur le même sol au cours de l'essai SER-3 (chapitre II, fig. II.4), ces FTSW correspondent à des valeurs de ψ_m de l'ordre de 15 kPa pour S1, et 35 kPa

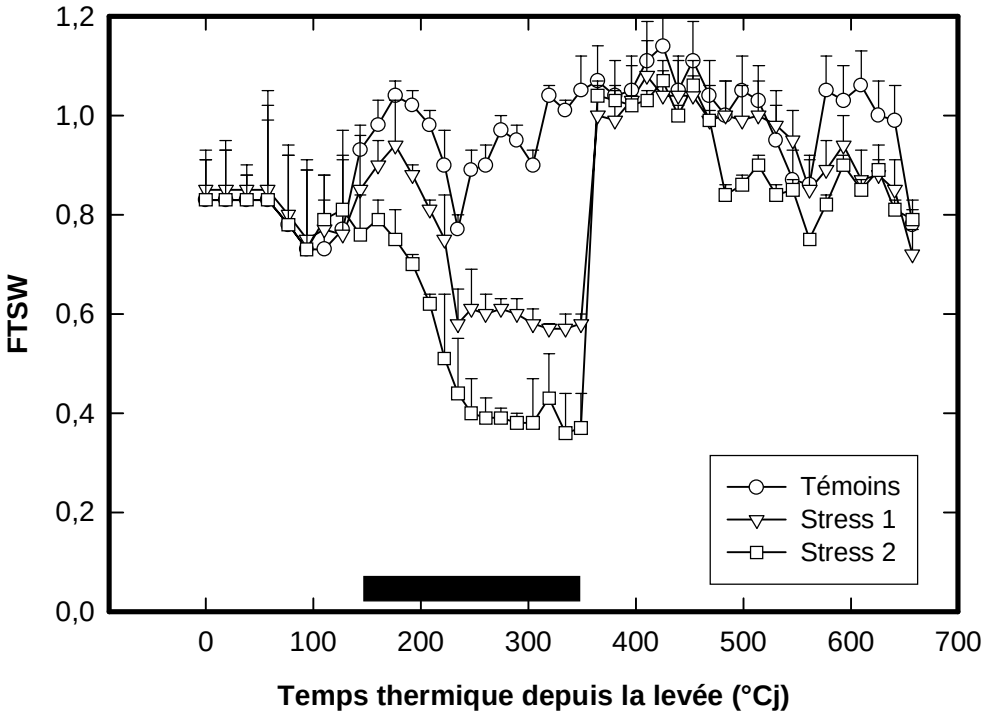


Figure IV. 16 : Evolution de la FTSW au cours de l'essai SER-2 pour les plantes des lots Témoins (cercles), Stress1 (triangles) et Stress2 (carrés). Les barres verticales représentent l'écartype des valeurs moyennes.

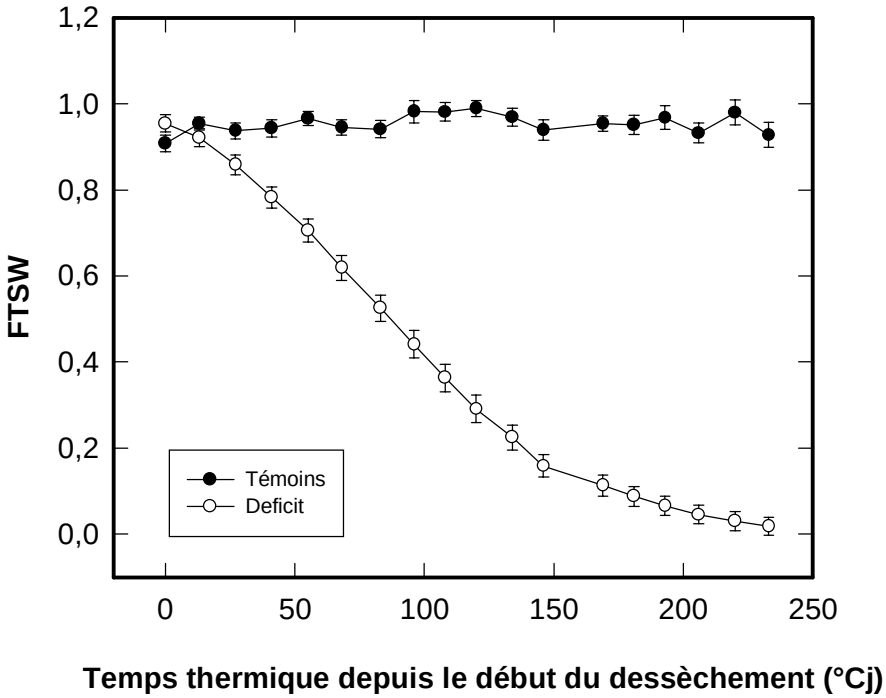


Figure IV.17 : Evolution de la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW) dans l'essai SER-3 des pots des lots irrigués (Témoins) et non irrigués (Deficit).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

pour S2. Les stress créés sont donc d'intensité modérée par rapport à la gamme de FTSW mais correspondent, au moins pour S2, à des niveaux d'état hydrique du sol à partir desquels on observe des effets sur le rendement en conditions de production.

Essai SER-3 (stress hydrique décroissant).

Dans l'essai SER-3 , l'arrêt des irrigations pour une partie des pots (lot D) à partir du 13ème jour après le semis a entraîné un dessèchement progressif de l'état hydrique du sol (figure IV. 17), jusqu'à épuisement de la fraction d'eau transpirable du sol au bout de 20 jours. Pour les plantes bien irriguées (lot I), la FTSW a été maintenue au dessus de 0.8.

3.2. Effet de l'état hydrique du sol sur le développement

Nous avons suivi les effets de l'état hydrique du sol sur les rythmes d'initiation et de production de feuilles au cours de l'essai SER-2.

A la fin de la période de stress, il n'y a pas de différences significatives entre lots pour les nombres de feuilles initiées moyens (non montré). Par contre, les contraintes hydriques ont affecté le développement des feuilles en croissance avant la remise en eau (figure IV.18a). Pour ces feuilles, les stress ont entraîné un allongement de la durée d'expansion. Pendant la période de déficit hydrique, on observe surtout un allongement de la phase de croissance exponentielle pour les feuilles 16 à 25 des lots S1 et S2. Il est difficile d'analyser l'effet des régimes hydriques sur le nombre de feuilles ayant terminées leur expansion pendant le stress car NFfin est faible et évolue peu au cours de cette période. Après la remise en eau, on constate que la fin d'expansion est retardée à partir du rang 13 pour les feuilles des lots stressés par rapport aux témoins.

Pour quantifier l'effet du stress hydrique sur les vitesses de production de feuilles en croissance, nous avons cherché à optimiser une fonction de stress type sur nos données expérimentales. Pour cela, on a bâti un modèle simple en fonction du temps thermique pour simuler les cinétiques de NFfp et NFfin des plantes témoins en utilisant les ajustements présentés dans le tableau IV.4 (eq. IV.8). On a ensuite appliqué à ce modèle une fonction de réduction de la vitesse de production des feuilles (Vpf) par l'état hydrique du sol, basée sur les relations établies par Lecoeur et Guilioni (1998) sur le pois entre FTSW et Vpf (eq. IV.9). Ces équations ont été programmées avec le logiciel Model Maker (ref). Ce logiciel inclut une procédure d'optimisation, basée sur la minimisation de la somme des carrés des écarts entre les données observées et simulées, que nous avons utilisée pour déterminer les valeurs des paramètres de l'équation IV.9.

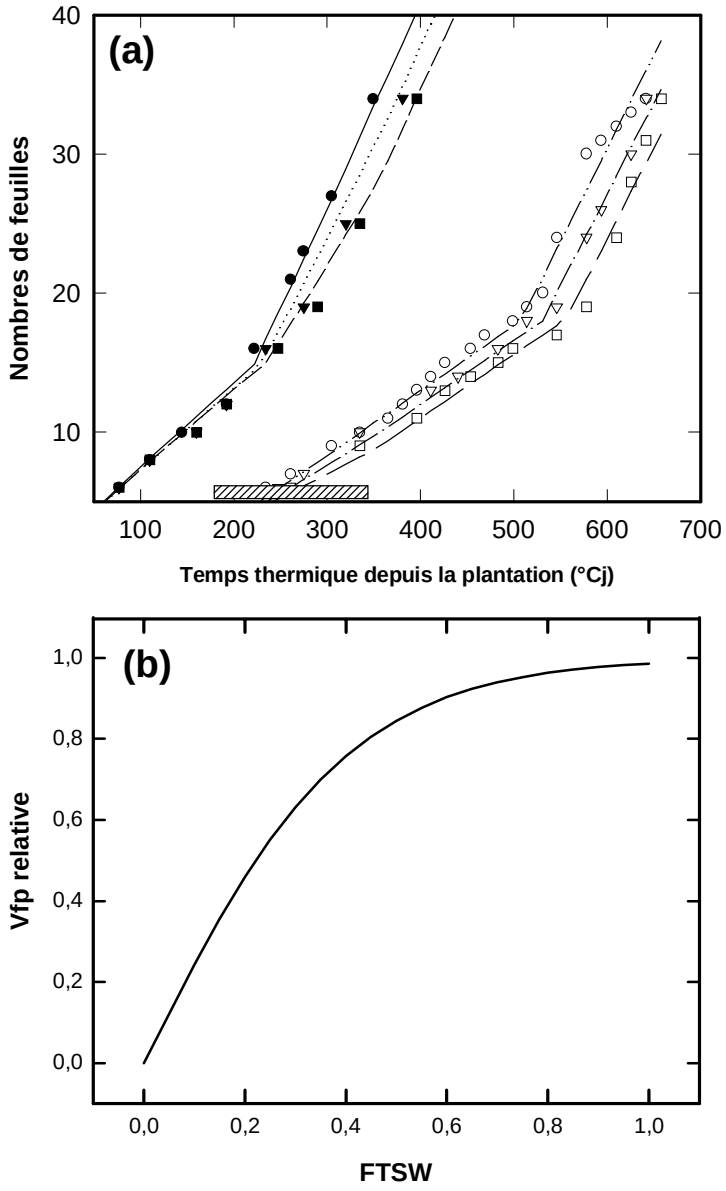


Figure IV.18 : Evolution du nombre de feuilles à la fin de la croissance exponentielle (symboles fermés) et à la fin de leur expansion (symboles ouverts) dans l'essai SER-2 pour les plantes témoins (cercles) et les plantes des lots Stress1 (triangles) et Stress 2 (carrés). La période de stress est indiquée par la barre horizontale. Les courbes représentent *les nombres de feuilles simulées pour chaque traitement dans la procédure d'optimisation de la relation entre FTSW et les vitesses de développement (b).*

Modèle en conditions hydriques non limitantes

$$\frac{dNF}{dt} = Vpf \times TT \qquad \textbf{Eq. IV.8}$$

avec si $NFfp \leq 15$ $Vpf_fp = 0.060$

si $NFfp > 15$ $Vpf_fp = 0.147$

si $NFfin \leq 18$ $Vpf_fin = 0.047$

si $NFfin > 18$ $Vpf_fin = 0.135$

TT = temps thermique depuis la plantation (°Cj).

Modèle en conditions hydriques limitantes

$$\frac{dNF}{dt} = Vpf \times TT \times FSH_dev$$

la fonction de stress hydrique, FSH_dev, calcule la réduction relative de Vpf pour des plantes stressées par rapport à celle de plantes témoins bien alimentées en eau :

$$Vpf_relative = \frac{Vpf_stress}{Vpf_max} = -1 + \frac{2}{(1+\exp(\alpha \times FTSW))} \qquad \textbf{Eq. IV.9}$$

Les résultats de l'optimisation donnent une valeur unique du paramètre α, égale à - 4.9565, qui permet de restituer avec un R^2 de 0.989 à la fois l'évolution de NFfp et NFfin pour les 2 niveaux de stress. La relation entre FTSW et Vpf_relative avec ce paramètre est représentée dans la figure IV. 18b.

3.3. Effet de la contrainte hydrique sur l'expansion des feuilles

A la fin de la période de stress dans l'essai SER-2, la surface foliaire des plantes des lots S1 et S2 était significativement différente des plantes du lot témoin, et présentait une réduction de 15% pour S1 et 35% pour S2. Les profils de surface foliaire individuelle montrent des réductions significatives par rapport au témoin de la surface de toutes les feuilles à partir de la 10ème feuille pour le lot S2, de la 13ème pour S1 (figure IV. 19a). Le pourcentage de réduction de la surface des feuilles des plantes stressées par rapport aux témoins augmente avec le rang de la feuille pour atteindre au maximum 60% pour S1 et 80% pour S2 (figure IV.19b).

Pour analyser l'effet de l'état hydrique du sol sur la vitesse d'expansion des feuilles, nous avons suivi en continu dans l'essai SER-3 la croissance des feuilles de rang 16 à 25 au cours de la phase de dessèchement sur 6 plantes du lot I et 12 plantes du lot D. La figure IV.20 présente l'évolution de la surface moyenne des feuilles 16, 19, 22 et 25 des plantes des 2 lots. Pour la feuille 16, apparue dés la différenciation des 2 lots, la surface foliaire devient significativement différente entre les deux lots à partir de 100°Cj après l'arrêt des apports d'eau pour le lot D (figure IV.20a). A ce stade, la FTSW est environ de 0.5 (figure IV.17). On constate ensuite une réduction importante de la vitesse d'expansion foliaire au fur et à mesure que la FTSW diminue. La même tendance s'observe pour les feuilles 19, 22 et 25 avec une diminution progressive de la vitesse de croissance pour les plantes du lot D par rapport au lot I à partir de 100 °Cj après le début du dessèchement.

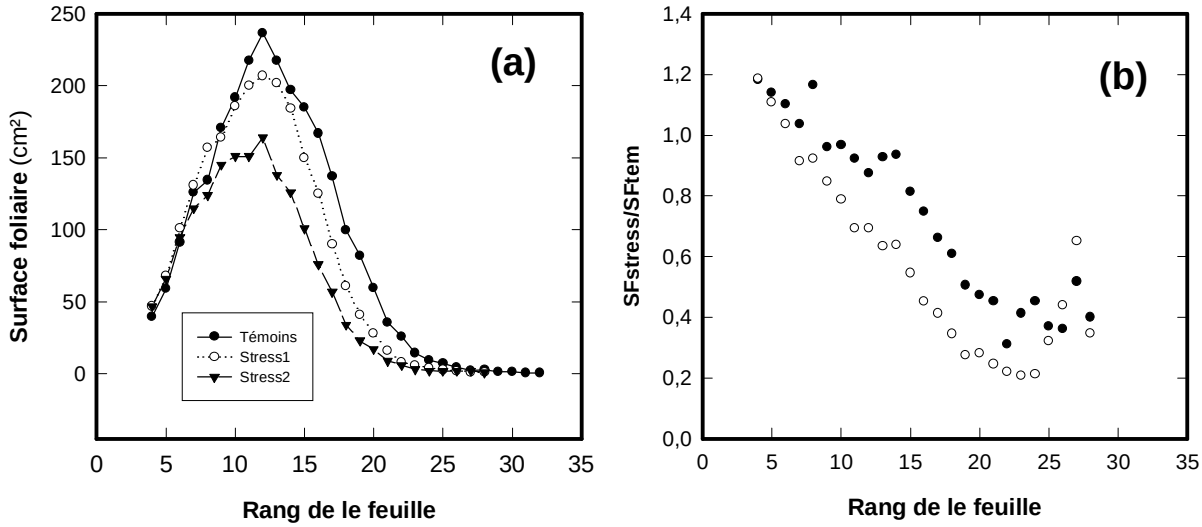


Figure IV.19 : (a) Profils de surface foliaire à la finde la période de stress dans l'essai SER-2 pour les plantes des lots Témoins, Stress1 et Stress2. (b) Evolutionn selon le rang de la feuille du rapport entre la surface individuelle des feuilles des plantes stréssées (Stress1, symboles fermés; Stress2, symboles ouverts) et des plantes témoins.

A partir de ces cinétiques de surface foliaire individuelle, nous avons calculé la réduction relative du RER des feuilles des plantes du lot D par rapport à celles du lot I sur des périodes de 3 jours, sur lesquelles nous avons également calculé la valeur moyenne de FTSW de chaque pot. La figure IV. 21 présente la relation ainsi obtenue entre FTSW et le rapport RERstress/RERtémoin. Cette relation montre que le RER est peu affecté pour des valeurs de FTSW entre 0.6 et 1. Le rapport RERstress/RERtémoin décroît ensuite lentement jusqu'à 0.80 pour des FTSW entre 0.4 et 0.6, puis plus rapidement et quasi linéairement jusqu'à 0 pour des FTSW de 0.4 à 0.1. Pour représenter cette relation entre FTSW et le rapport RERstress/RERtémoin nous avons ajusté l'équation suivante sur les données de la figure IV.21 :

$$\frac{\text{RERstress}}{\text{RERtémoin}} = -1 + \frac{2}{1 + \exp(-5.39 \times (\text{FTSW} - 0.0341))} \qquad \textbf{Eq. IV. 10}$$

$R^2 = 0.785$

CVe = 14.78%

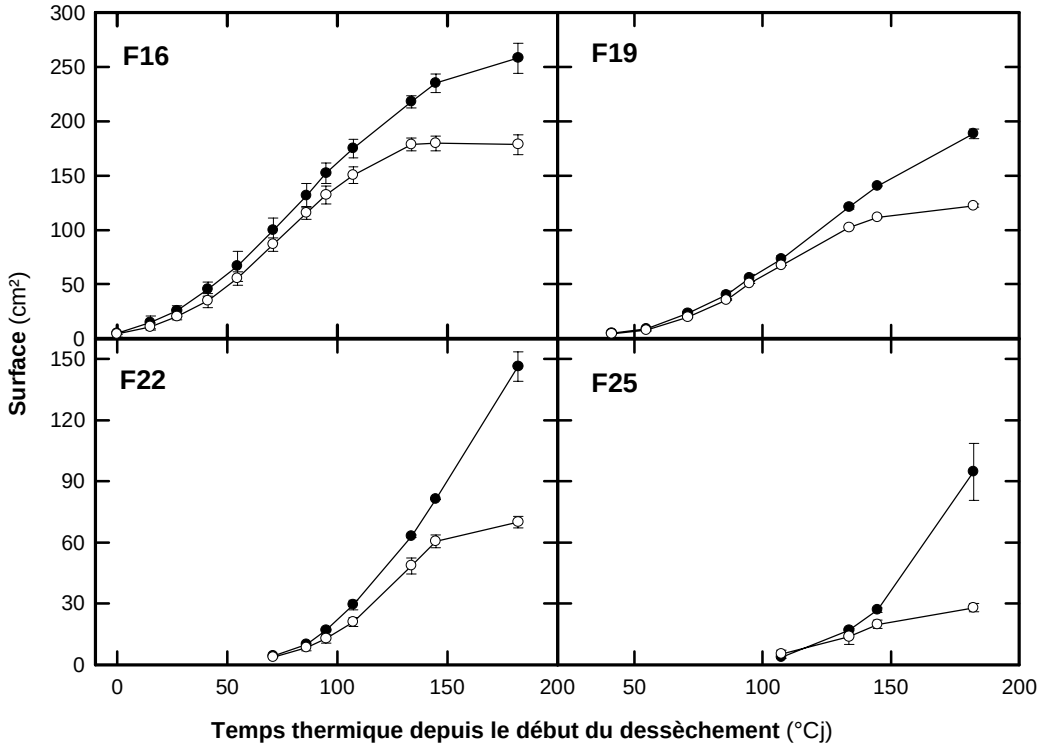


Figure IV.20 : Evolution de la surface des feuilles 16, 19, 22 et 25 des plantes du lot irrigué (symboles fermés) et du lot stressé (symboles ouverts) dans l'essai SER-3. Les barres verticales représentent les écarts types des valeurs moyennes

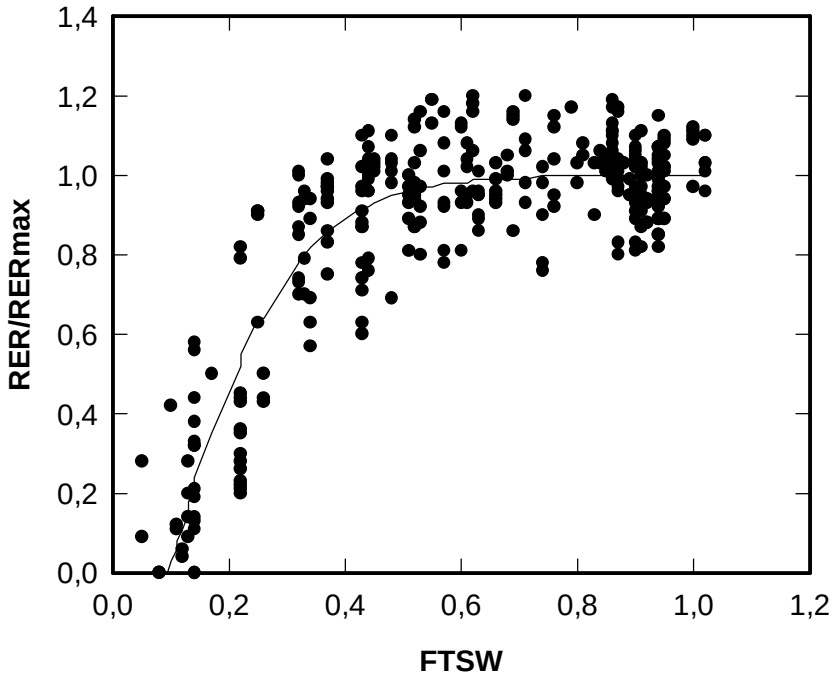


Figure IV.21 : Relation entre la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW) et le rapport entre la vitesse relative de croissance (RER) des feuilles des plantes stréssées et le RER des feuilles des plantes témoins établie à partir des données de l'essai SER-3. La courbe représente l'ajustement réalisé sur ces données.

3.4. Conclusion

L'effet de l'état hydrique du sol sur les vitesses de développement et d'expansion des feuilles peut donc être par deux relations simples entre la FTSW et ces vitesses. Ces relations confirment la sensibilité de la laitue à des déficits hydriques modérés.

L'intégration de ces relations dans un modèle de prévision du rendement basé sur les relations établies dans la partie 2 pour décrire le schéma de développement foliaire et l'expansion des feuilles en conditions de la température et du rayonnement, est donc importante pour évaluer l'impact des stratégies d'irrigation sur la production.

4. Elaboration et évaluation du modèle de croissance foliaire de la laitue en fonction de la température, du rayonnement et de l'état hydrique du sol.

4.1. Description du modèle

A partir de l'analyse faite ci dessus sur l'effet de la température, du rayonnement et de l'état hydrique du sol sur les vitesses d'initiation, de production et d'expansion des feuilles, nous avons écrit un modèle permettant de simuler l'évolution au cours du temps du développement et de la croissance individuelle des feuilles d'une plante de laitue en fonction de ces variables. Ce modèle a ensuite été programmé et testé avec le logiciel Model Maker.

4.1.1. Principes généraux

Le principe général du modèle est schématisé dans la figure IV.22. Le modèle peut être divisé en 3 modules : un module « Développement foliaire », un module « Expansion des feuilles » et un module « Rendement ». Le module « Développement foliaire » simule l'évolution du nombre de feuilles aux quatre stades phénologiques définis en 2.1.1. Le module « Expansion des feuilles » simule la croissance de la surface individuelle de toutes les feuilles initiées en fonction de leur stade de développement calculé dans le module précédent. Le module « Calcul du rendement » simule l'évolution du poids frais de la plante en fonction de la surface foliaire de la plante, calculée comme la somme des surfaces individuelles des feuilles initiées.

Variables d'entrée

Le modèle fonctionne au pas de temps journalier. Les variables d'entrée sont la température (Temp, °C), le PAR incident (PARinc, $mol.m^{-2}.j^{-1}$) et la FTSW par jour. La température et le PARinc n'agissent pas directement au niveau des différents modules, ces variables sont utilisées pour calculer des variables intermédiaires qui interviennent dans les processus mis en

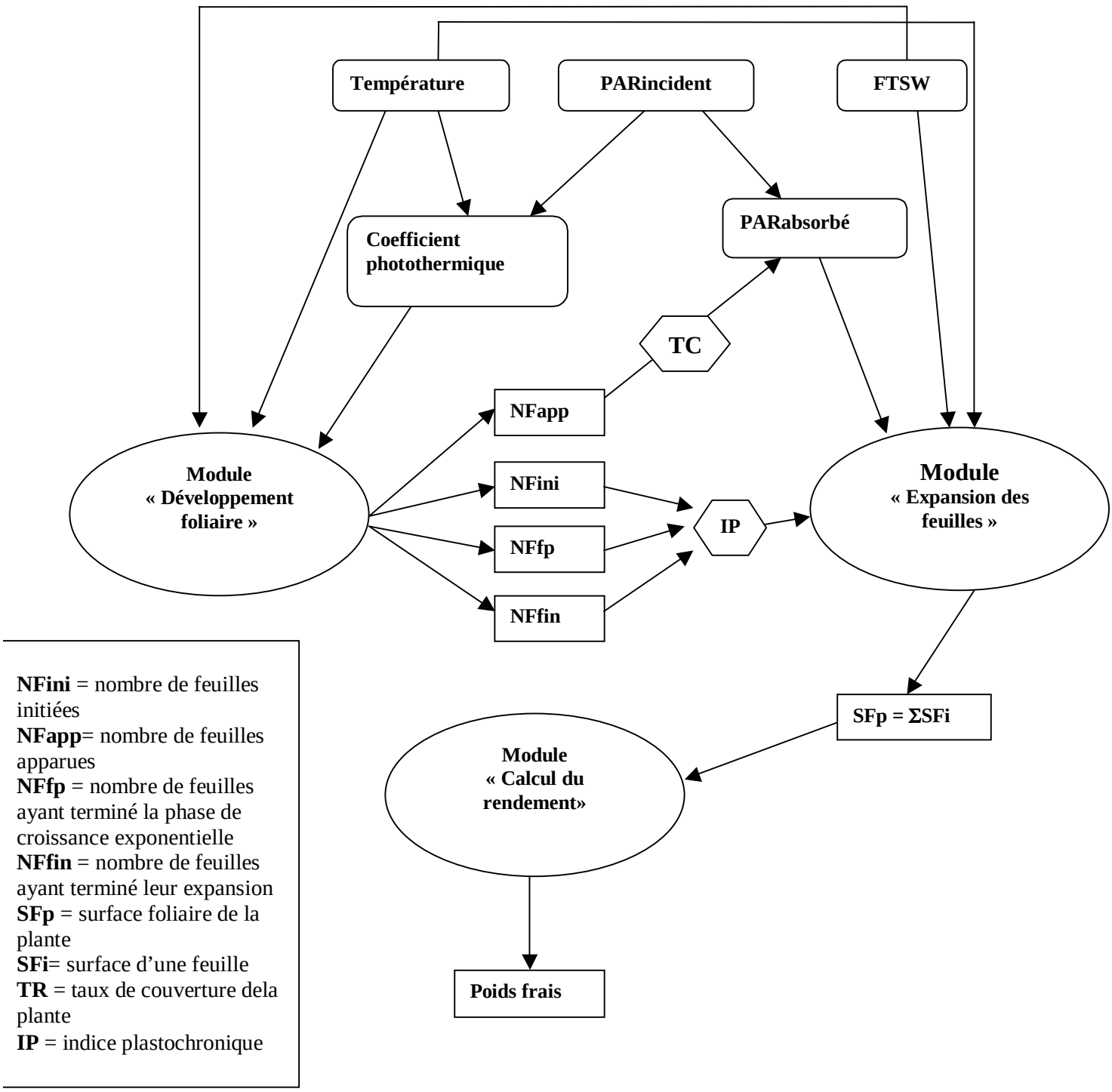


Figure IV.22 : Schéma de principe du modèle de croissance foliaire et de calcul du rendement d'une laitue.

jeu. Il s'agit du temps thermique (TT, °Cj), du coefficient photothermique (Cphth, $mol.m^{-2}.°Cj^{-1}$) et du PAR absorbé par la plante (PARa, $mol.plante^{-1}.j^{-1}$). Ces variables sont calculées quotidiennement comme suit :

$TT_j = Temp - Tbase$ avec Tbase = 3.5 °C

$$Cphth_j = \frac{PARinc_j}{TT_j} \qquad \textbf{Eq. IV. 11}$$

$PARa_j = PARinc_j \times TC_j \times 0.08/D$

avec TC_j = taux de couverture de la plante le jour j.

D = densité de plantation

Modélisation du taux de couverture

TCj est simulé par le modèle. Nous avons vu dans le chapitre III que TC ne peut être modélisé uniquement à partir de la température. A partir de nos données, nous avons élaboré un modèle de calcul de TC en fonction du nombre de feuilles apparues (NFapp). La figure IV. 23 montre en effet que l'évolution de TC en fonction de NFapp peut être décrite par une relation unique pour les essais SER-2, AVI-01, VIS-99, VIS-00 et VIS-01. Cette relation a une allure sigmoïde qui peut être modélisée par l'équation suivante :

$$TC = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{NFapp - 24.11}{0.114}\right)} \qquad \textbf{Eq. IV. 12}$$

$R^2 = 0.98$ CVe = 8.27%

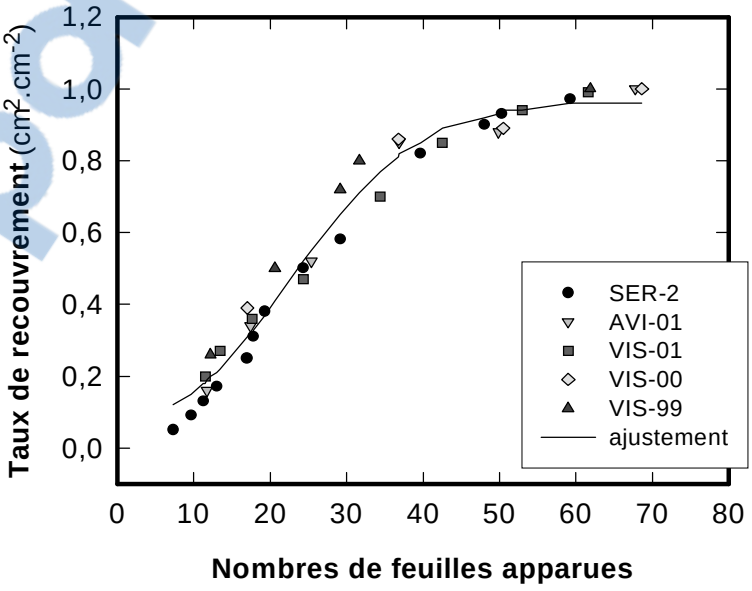


Figure IV.23 : Evolution observée et ajustée du taux de couverture en fonction du nombre de feuilles apparues dans les essais SER-2, AVI-01, VIS-99, VIS-00 et VIS-01.

Rapport-Gratuit.com

4.1.2. Module « Développement foliaire »

Le module « Développement foliaire » simule l'évolution au cours du temps du nombre de feuilles initiées (NFini), apparues (NFapp), au stade « fin de croissance exponentielle » (NFfp) et « fin d'expansion » (NFfin).

Pour chaque stade, la vitesse de production des feuilles (Vpf, feuil.°Cj^{-1}) est calculée au pas de temps de la journée en multipliant la vitesse maximum du stade considéré (Vpf_max) par les fonctions de réduction de Vpf_max par le coefficient photothermique (FS_Cphth, eq. IV.1) et par l 'état hydrique du sol (FSH_dev, eq. IV.9).

$$Vpf_j = Vpf_max \times FS_Cphth_j \times FSH_dev_j \qquad \textbf{Eq. IV. 13}$$

La variation journalière du nombre de feuilles est ensuite calculée en multipliant Vpf_j par le temps thermique du jour (TT_j).

$$\left(\frac{dNF}{dt}\right)j = Vpf_j \times TT_j \qquad \textbf{Eq. IV. 14}$$

et, le nombre de feuilles au jour j est

$$NF_j = NF_{j-1} + \left(\frac{dNF}{dt}\right)j \qquad \textbf{Eq. IV. 15}$$

où NF_{j-1} est le nombre de feuilles au jour j-1.

Les vitesses maximum correspondent aux valeurs données dans le tableau IV.5 et constituent des paramètres du modèle. Pour chaque stade, nous avons distingué 2 ou 3 phases chacune avec des Vpf_max différents (cf. section 2.1). La transition entre ces phases est calculée par le modèle à partir des ajustements que nous avons faits sur les relations entre le temps thermique à la récolte (TT_rec.) et le temps thermique à la transition entre les phases pour chaque stade (TT_transition) calculés dans chacun de nos essais (Eq. IV. 16). Nous avons ainsi déterminé 5 relations linéaires :

TT_transition_NFini = 0.194 x TT_rec. + 12.59	R^2=0.904	
TT_transition_NFfp = 0.249 x TT_rec. + 69.79	R^2=0.844	
TT_transition_NFapp = 0.370 x TT_rec. + 19.90	R^2=0.866	**Eq.IV.16**
TT_transition1_NFfin =0.282 x TT_rec. + 113.5	R^2=0.949	
TT_transition2_NFfin = 0.805 x TT_rec. + 3.69	R^2=0.875	

Une condition sur le temps thermique (TT < TT_transition) dans le calcul de Vpf_j permet de tenir compte de Vpf_max de la phase en cours.

TT_rec est un paramètre facilement calculable pour une culture à partir des données de température nécessaires au modèle et connaissant les dates de plantation et de récolte de la culture. Pour fonctionner ce modèle a par ailleurs besoin de connaître le nombre de feuilles aux différents stades de développement (initiation, apparition, fin de croissance exponentielle, fin d'expansion) à la plantation de la culture.

4.1.3. Module « Expansion foliaire »

Le module « Expansion foliaire » simule la croissance de chacune des feuilles initiées ainsi que celle de la surface foliaire de la plante. Chaque feuille est modélisée indépendamment des autres.

Pour chaque feuille, le modèle calcule la vitesse relative d'expansion (RER) en fonction de son stade de développement et de son indice plastochronique (cf 2.2.3), soit pour la feuille de rang i (notée NFi):

Si NFi < NFini	RERi = 0	
Si NFini < Nfi < NFfp	RERi = RERp x FSH_RER	**Eq. IV. 17**
Si NFfp < Nfi < NFfin	RERi = RERp x F_RER_IP x FSH_RER	
Si Nfi > NFfin	RERi = 0	

avec FSH_RER = fonction de réduction du RER par l'état hydrique du sol donnée par l'équation IV.10.

F_RER_IP = fonction de décroissance du RER après la phase de croissance exponentielle en fonction de IP donnée par l'équation IV. 6

RERp = RER de la phase exponentielle de croissance de la feuille.

Selon l'analyse faite en 2.2.2 et 2.2.3, RERp est calculé à l'échelle de la plante en fonction de l'âge de la plante et du PARa (Eq. IV. 18).

Si $TT_j \leq TT_{trans_RERp}$	RERp = RERmax x FS_RERp_PARa	**Eq. IV.18**
Si $TTj > TT_{trans_RERp}$	RERp = RERmax x FS_RERp_PARa x $\exp(-\alpha(TTj - TT_{trans_RERp}))$	

avec FS_RERp_PARa = fonction de réduction de RERp par PARa donnée par l'équation IV.5,

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

TT_{trans_RERp} est le temps thermique déterminant le début de la phase de diminution de RERp.

Par rapport aux ajustements présentés en 2.2.2 et dans le tableau IV.6 pour rendre compte de l'évolution de RERp au cours du cycle, nous avons défini des valeurs uniques de RERmax et α dans le modèle. Pour RERmax, nous avons pris la valeur ajustée de RERp la plus élevée soit 0.0617 $cm^2.cm^{-2}.°Cj^{-1}$. Pour α, la valeur retenue est 0.0020. La qualité des ajustements sur les données de SER-1 et SER-2, pour lesquels α avait été initialement fixé respectivement à 0.0022 et 0.0018, demeure bonne avec cette valeur (non montré).

L'augmentation quotidienne de surface de la feuille i est calculée de la manière suivante :

$$\left(\frac{dSFi}{dt}\right)_j = RERi_j \times SFi_{j-1} \times TT_j \qquad \text{Eq. IV. 19}$$

et la surface de la feuille au jour j devient ,

$$SFi_j = SFi_{j-1} + \left(\frac{dSFi}{dt}\right)_j \qquad \text{Eq. IV. 20}$$

La surface foliaire de la plante (SFp) est calculée simplement en additionnant les surfaces individuelles de toutes les feuilles initiées.

$$SFp_j = \sum_{i=1}^{NFini} SFi_j \qquad \text{Eq. IV. 21}$$

4.1.4. Module « Rendement »

Le rendement, estimé par le poids frais, est calculé en multipliant la surface foliaire de la plante par la masse fraîche surfacique (MSf). Nous avons vu en 1.2.2 que MSf peut être estimée constante dans la gamme de poids commercialisable de la laitue. On a donc,

$$Pf = SFp \times MSf$$

Avec MSf = 0.0546 $g.cm^{-2}$.

4.2. Evaluation du modèle

Le modèle a été testé sur les essais SER-1, SER-2, AVI-01, VIS-00 et VIS-99. Les 3 premiers ont été utilisés pour la mise au point et le paramétrage de l'ensemble des fonctions du modèle, excepté les fonctions de stress hydriques pour SER-1 et AVI-01. Les simulations sur ces 3 situations permettent donc de contrôler le fonctionnement global du modèle. Les résultats des

essais VIS-00 et VIS-99 ont servi seulement à l'analyse et à la modélisation du schéma de développement. Ces essais permettent donc de valider partiellement le module « expansion foliaire ». Une validation du modèle sur des données indépendantes dans une large gamme de conditions de culture reste donc à faire ainsi qu'une étude de sensibilité de l'effet des paramètres.

4.2.1. Paramétrage et initialisation

Paramétrage

Le tableau IV.7 donne la liste des paramètres du modèle avec leur valeur. Certains de ces paramètres (D, TTrec, TT_{trans_RERp}) doivent être définis pour chaque nouvelle situation étudiée mais ils sont facilement accessibles dans les conditions d'utilisation du modèle pour le diagnostic a posteriori.

Tableau IV.7 : Paramètres du modèle de développement et de croissance des feuilles, et de calcul du rendement d'une laitue.

Paramètre	Signification	Unité	Valeurs
Tbase	Température de base	°C	3.5
D	Densité de plantation	plante.m^{-2}	à déterminer selon la culture
TTrec	Temps thermique cumulé à la récolte	°Cj	à déterminer selon la culture
Vini_max1	Vitesse maximum de NFini durant la 1ère phase de développement	Nombre de feuilles. °Cj^{-1}	0.130
Vini_max2	Vitesse maximum de NFini durant la 2ème phase de développement	Nombre de feuilles. °Cj^{-1}	0.289
Vapp_max1	Vitesse maximum de NFapp durant la 1ère phase de développement	Nombre de feuilles. °Cj^{-1}	0.098
Vapp_max2	Vitesse maximum de NFapp durant la 2ème phase de développement	Nombre de feuilles. °Cj^{-1}	0.205
Vfp_max1	Vitesse maximum de NFfp durant la 1ère phase de développement	Nombre de feuilles. °Cj^{-1}	0.098
Vfp_max2	Vitesse maximum de NFfp durant la 2ème phase de développement	Nombre de feuilles. °Cj^{-1}	0.244
Vfin_max1	Vitesse maximum de NFfin durant la 1ère phase de développement	Nombre de feuilles. °Cj^{-1}	0.017
Vfin_max2	Vitesse maximum de production de NFfin durant la 2ème phase de développement	Nombre de feuilles. °Cj^{-1}	0.080
Vfin_max3	Vitesse maximum de NFfin durant la 3ème phase de développement	Nombre de feuilles. °Cj^{-1}	0.334
TT_{trans_RERp}	Temps thermique entre le plateau et la phase de décroissance de RERp	°Cj	à déterminer selon la culture
RERmax	Vitesse relative d'expansion des feuilles maximum	cm^2.cm^{-2}.°Cj^{-1}	0.062
MSf	Masse surfacique fraîche	g.cm^{-2}	0.0546
Temax	Teneur en eau maximum de la plante	g.g^{-1}	0.97

Le temps thermique cumulé de la plantation à la récolte (TTrec) est calculé simplement pour chaque situation à partir des mesures de température journalière nécessaires au modèle. TT_{trans_RERp} est par contre plus difficile à évaluer. Selon notre analyse sur les essais SER-1 SER-2 et AVI-01(cf. 2.2.2), semble correspondre au début de formation de la pomme. Selon les observations sur le terrain, TT_{trans_RERp} se situerait vers 300°Cj dans VIS-00 et 350°Cj pour VIS-99. Dans nos essais en pots, nous avons respecté une densité (D) de 14 plantes.m^{-2} correspondant à la densité pratiquée dans nos essais au champ.

Initialisation

Pour faire fonctionner le modèle, il est nécessaire de déterminer le nombre de feuilles aux 4 stades de développement foliaire de la laitue au démarrage de la culture ainsi que la surface initiale de toutes les feuilles produites au cours du cycle.

Le nombre des feuilles apparues est facilement mesurable sur les jeunes plants, contrairement au nombre des feuilles initiées qui nécessite des mesures sous loupe binoculaire, et aux nombres de feuilles aux stades fin de croissance exponentielle et fin d'expansion qui nécessitent de suivre la croissance des feuilles pour être calculés. De même, la surface des feuilles apparues à la plantation peut être facilement mesurée, tandis que la taille initiale des feuilles de longueur inférieure à 1cm à la plantation et initiées par la suite est difficilement accessible.

Dans nos essais, on observe que NFini et NFapp sont peu variables sauf pour SER-1, ainsi que NFfp et NFfin pour les situations dans lesquelles ils ont pu être déterminés (tableau IV.8). Dans SER-1, les valeurs plus élevés de ces paramètres que dans les autres essais s'expliquent par un retard dans la plantation par rapport au stade conseillé. Cela s'explique par le fait que le stade de plantation des plants en motte est assez bien standardisé, et correspond à une plante dont les 4 premières feuilles sont visibles et entièrement déployées.

On peut donc estimer que les nombres de feuilles initiées et produites sont relativement stables d'une situation à l'autre si ce stade de plantation est bien respecté. Pour s'en assurer, un comptage de NFapp peut être réalisé pour vérifier qu'il se situe dans la gamme observée dans le tableau IV.8.

Tableau IV.8 : Nombre de feuilles moyen aux différents stades de développement à la plantation dans nos essais.

	NFini	NFapp	NFfp	NFfin
SER-1	17.8 (0.8)	8.0 (0.6)	8.0	3.0
SER-2	13.5 (0.4)	6.4 (0.4)	6.0	3.0
AVI-01	13.2 (0.5)	5.2 (0.3)	5.0	3.0
VIS-99	15.2 (0.7)	5.1 (0.9)		--
VIS-00	15.4 (0.9)	4.5 (1.2)	5.0	3.0
VIS-01	-	4.6 (0.7)	-	-

Dans les essais SER-2, AVI-01, VIS-00 et VIS-99 nous n'avons mesuré que la surface des feuilles apparues à la plantation, tandis que les surfaces de toutes les feuilles initiées sauf les 2 dernières ont été mesurées dans SER-1. Les profils de surface foliaire initiaux obtenus présentent une allure identique même si les tailles sont très variables d'une situation à l'autre (figure IV.24a). On constate par ailleurs dans l'essai SER-1 que le logarithme de la surface des feuilles diminue quasi linéairement au delà de la feuille 4 (figure IV.24b). La même tendance s'observe pour les profils des surfaces des feuilles apparues dans SER-2, AVI-01, VIS-99 et VIS-00. Il est donc possible d'évaluer la surface de toutes les feuilles initiées à la plantation en calculant la régression linéaire entre le logarithme de la surface et le rang de la feuille au delà de la feuille 4. Ce calcul donne une surface initiale de la dernière feuille initiée similaire pour les 4 profils présentés dans la figure IV.24b, entre 0.00011 et 0.00018 cm². A partir de ces observations, nous avons fixé la surface des feuilles au moment de leur initiation à 0.00015 cm² tout au long du cycle de la plante

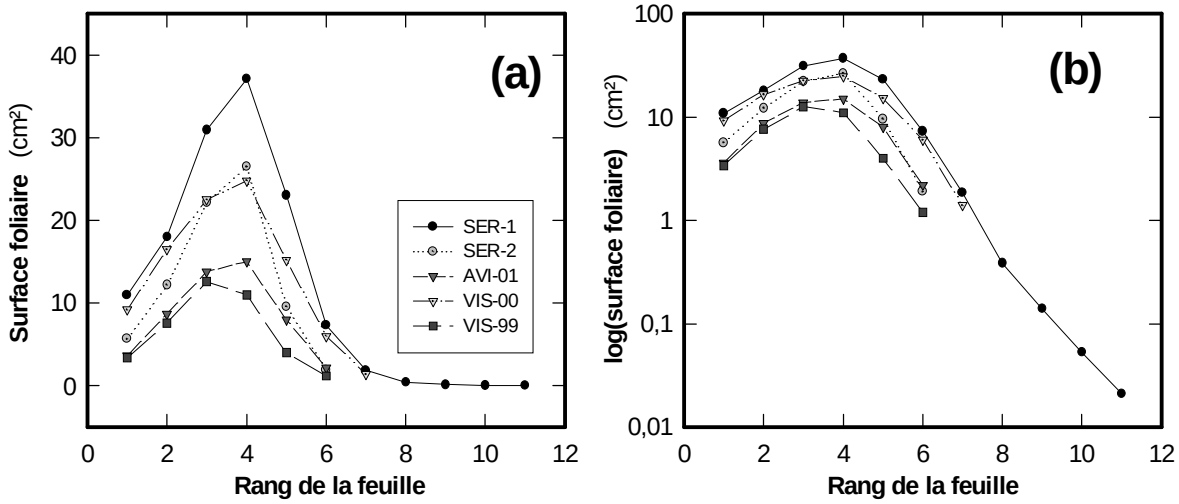


Figure IV.24 : (a) Profils de surface foliaire à la plantation dans les essais SER-1, SER-2, AVI-01, VIS-00 et VIS-0. (b) idem que (a) exprimé en log(surface).

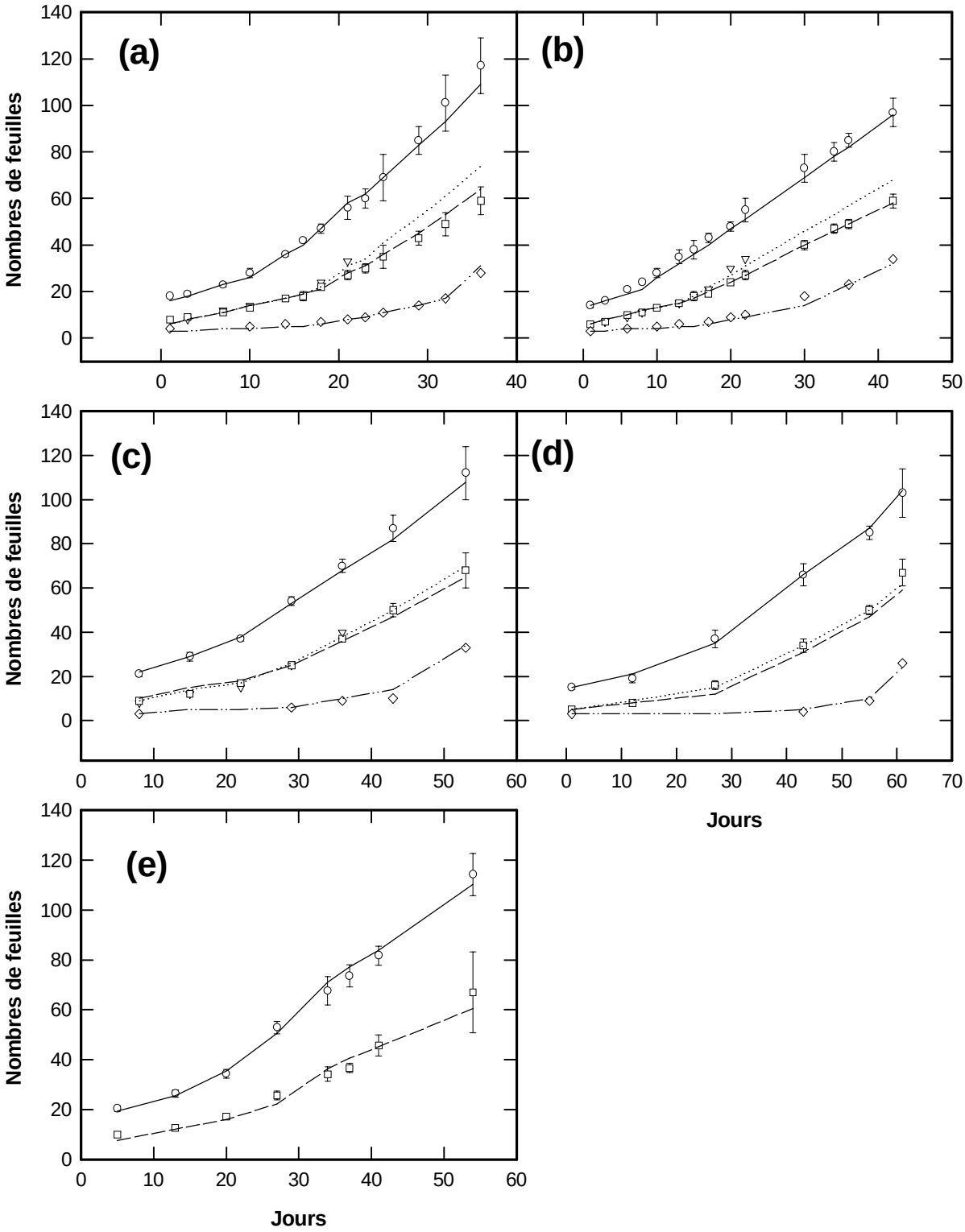


Figure IV.25 : Evolution observée (symboles) et simulée (courbes) du nombre de feuilles initiées (cercles), apparues (triangles), ayant fini leur croissance exponentielle (carrés) ou ayant terminé leur expansion (losanges) observées et simulés les essais (a) SER-1, (b) SER-2, (c) AVI-01, (d) VIS-00 et (e) VIS-99.

4.2.2. Simulation du développement foliaire

Le modèle restitue correctement les nombres de feuilles observées aux différents stades dans les essais SER-1, SER-2, AVI-01, VIS-99 et VIS-00 (figure IV. 25). Le meilleur ajustement entre données simulées et observées est obtenu pour NFini avec un R^2 de 0.994 et un CVe de 4.39%. Pour cette variable, les écarts entre le modèle et les mesures sont de l'ordre de grandeur des coefficients de variations des valeurs moyennes observées. Il en est de même pour NFapp, sauf dans l'essai VIS-00 dans lequel le modèle sous estime le nombre de feuilles de plus de 10 organes sur la fin de cycle (figure IV.25d). Les écarts les plus importants entre données mesurées et simulées sont observés pour NFfp et NFfin. En relatif, ces écarts peuvent atteindre 30% des données mesurées et correspondent toujours à une sous estimation du nombre de feuilles par le modèle.

4.2.3. Simulation de la croissance foliaire et du rendement

Calage des surfaces initiales

Dans tous les essais, les profils de surface foliaire à la récolte présentaient des écarts importants avec la réalité lors des premières simulations. Comme le montre la figure IV. 26 pour l'essai SER-1, les différences les plus fortes entre valeurs mesurées et simulées s'observaient notamment pour les feuilles 4 à 15, dont les surfaces étaient largement surestimées.

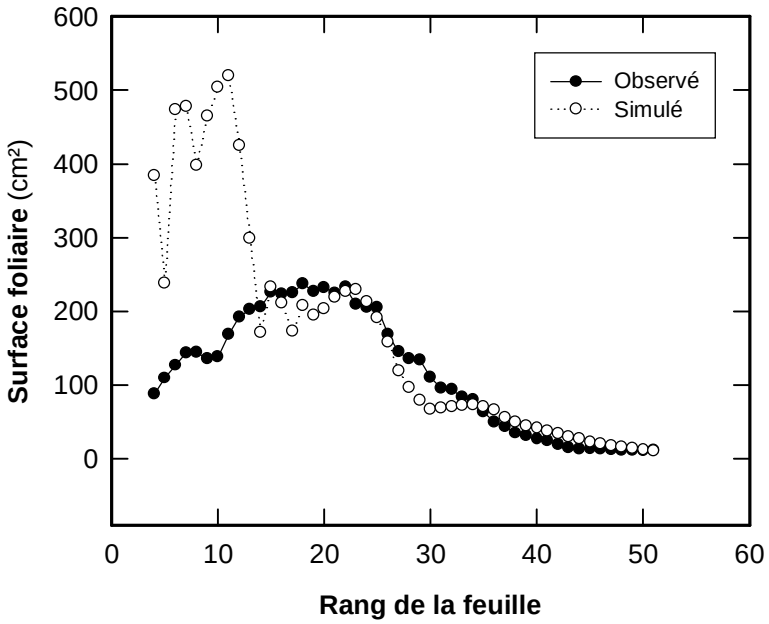


Figure IV.26 : Profils de surfaces foliaires à la récolte observé (symboles fermés) et simulé (symboles ouverts) avant calage des surfaces initiales dans l'essai SER-1.

Pour ces feuilles, les stades de développement sont bien simulés et les surfaces initiales ont été mesurées. L'erreur provient d'une surestimation de la vitesse de croissance après l'installation de la culture. Ainsi, on observe sur la figure IV.3 (cf. 1.3.1) une croissance presque nulle sur les premières mesures pour la feuille 4. Nous avons déjà vu que les vitesses d'initiation et de production des feuilles étaient plus faibles sur une période plus au moins longue selon les stades en début de cycle (cf. 2.1.1.). A partir de ces observations, nous avons fait l'hypothèse que le début de culture était marqué par une phase de ralentissement du développement et de la croissance foliaire par rapport à la suite du cycle. Cette hypothèse rejoint les observations des agriculteurs et conseillers techniques en maraîchage qui parlent de phase de reprise de la culture pour la période suivant l'installation de la culture. Pour rendre compte de ce phénomène, nous avons calé un facteur de réduction de la surface pour toutes les feuilles présentes à la plantation. Ce facteur (noté FS_plantation), compris entre 0 (arrêt de la croissance) et 1 (pas d'effet sur la croissance), intervient au niveau de l'équation IV.22 comme suit :

$$\left(\frac{dSFi}{dt}\right)_j = RERi_j \times SFi_{j-1} \times TT_j \times FS_plantation \qquad \textbf{Eq. IV. 22}$$

Le tableau IV. 9 donne les valeurs de FS_plantation par feuilles dans les 4 essais sur lesquels le modèle a été testé. Ces valeurs ont été obtenues par ajustement des cinétiques de croissance foliaire simulées sur les données observées. Dans toutes les situations, les valeurs de FS_plantation augmentent avec le rang de la feuille, c'est à dire que la réduction de croissance est de moins en moins importante quand on va de la feuille 4 à la feuille 14. Les essais SER-1, AVI-01, VIS-00 et VIS-99 présentent une évolution similaire de FS_plantation dont l'effet disparaît à partir de la feuille 13 ou 14. Dans SER-2, la réduction de croissance est moins marquée et ne s'observe plus à partir de la feuille 10. Les valeurs de FS_plantation par rang de feuille sont donc plus fortes.

Nous avons également été amenés à caler pour chaque situation la surface initiale (SFini), fixée en première approximation à 0.00015 cm² (cf section 4.2.1), de l'ensemble des feuilles initiées pour ajuster les profils finaux de surface foliaire individuelle aux profils observés. En pratique, les SFini des feuilles à partir du rang 36 n'ont pas été calées à cause du faible nombre de mesures de surface disponible. Pour ces feuilles, SFini a été prise égale à la surface initiale de la feuille 35.

Tableau IV.9 : Valeurs du facteur de réduction « plantation » de la surface des feuille 4 à 14 dans les essais SER-1, SER-2, AVI-01 et VIS-00

N° Feuille	SER-1	SER-2	AVI-01	VIS-00	VIS-99
4	0.40	0.15	0.35	0.45	0.45
5	0.60	0.75	0.65	0.67	0.65
6	0.65	0.92	0.75	0.77	0.77
7	0.75	0.88	0.82	0.82	0.86
8	0.85	0.90	0.85	0.87	0.90
9	0.85	0.94	0.87	0.89	0.92
10	0.87	0.98	0.90	0.92	0.95
11	0.88	1.00	0.93	0.94	0.97
12	0.92	1.00	0.97	0.96	0.98
13	0.95	1.00	0.99	0.98	1.00
14	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

La figure IV. 27 présente l'évolution de SFini par feuille pour les 5 situations étudiées. Dans les essais SER-1, AVI-01 et VIS-00, SFini varie peu au delà du rang 15. La valeur moyenne de SFini pour ces feuilles est proche de la valeur initialement fixée (0.00015 cm²) dans SER-1 et AVI-01 (resp. 0.00025 et 0.00023 cm²). Dans VIS-00, elle est par contre près de 6 fois supérieures (0.0009 cm²). Les moyennes des valeurs de SFini dans SER-2 et VIS-99 se situent entre ces deux extrêmes à 0.00035 cm² pour SER-2 et 0.00053 cm² pour VIS-99, mais présentent une plus forte variabilité.

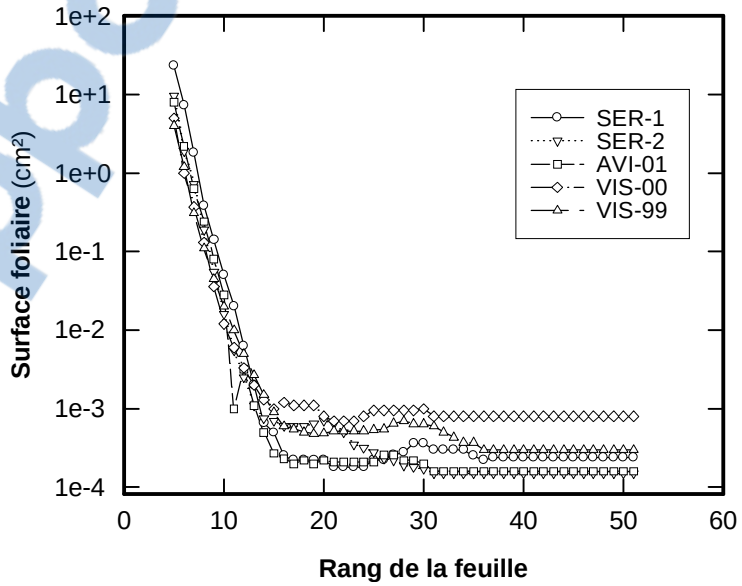


Figure IV.27 : Evolution de la surface foliaire intiale selon le rang de la feuille dans les essais SER-1, SER-2, AVI-01, VIS-00 et VIS-99.

Rapport-Gratuit.com

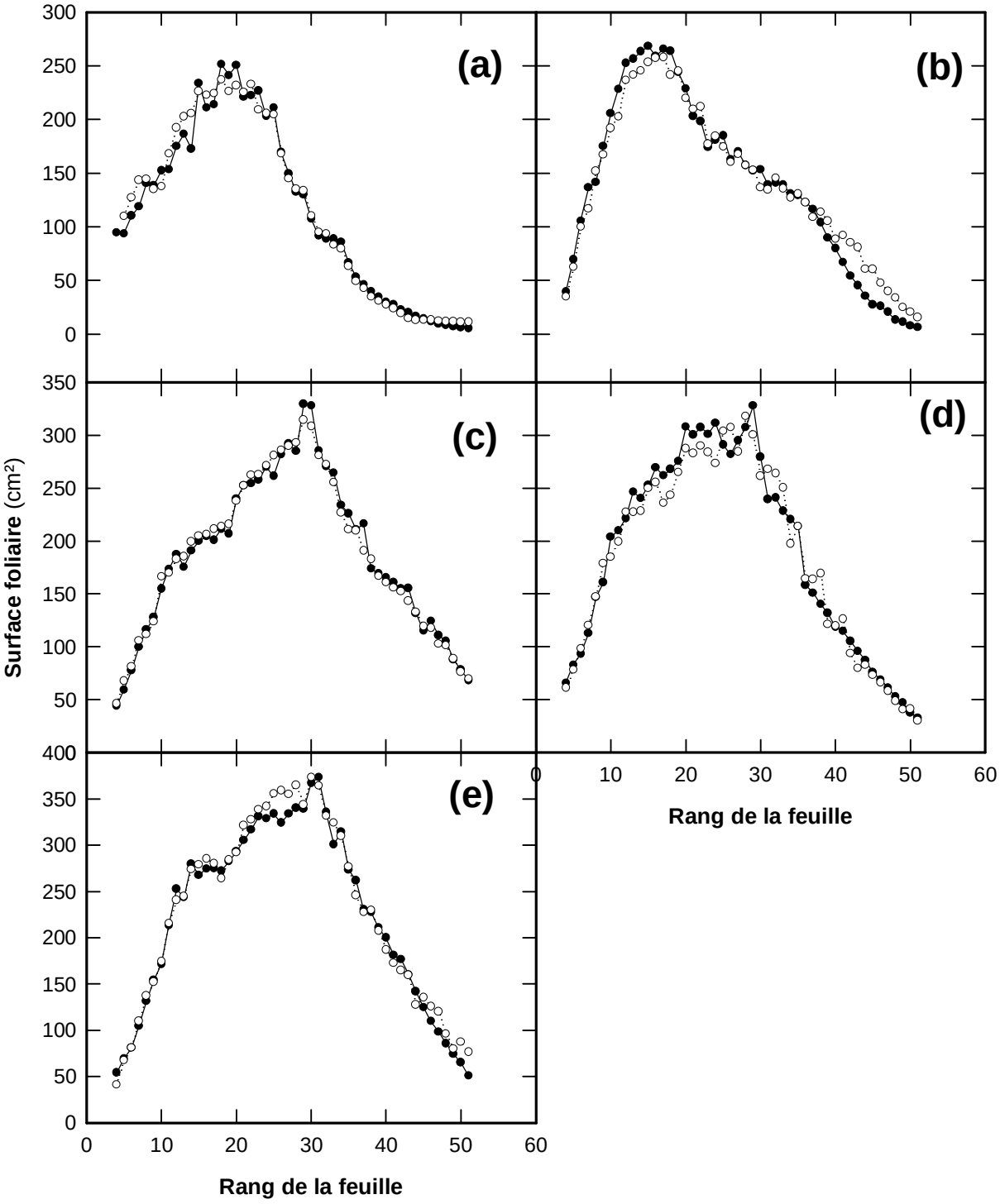


Figure IV.28 : Comparaison des profils de surface foliaire à la récolte observés (symboles ouverts) et simulés (symboles fermés) dans les essais (a) SER-1, (b) SER-2, (c) AVI-01, (d) VIS-00 et (e) VIS-99.

Comparaison des profils de surface foliaire observés et simulés

Le calage des surfaces initiales permet de restituer les profils finaux de surface foliaire avec un R^2 de 0.97 et un CV de 9.20 pour la régression entre surfaces mesurées et observées. Dans SER-2, le modèle sous estime les surfaces des feuilles de rang supérieur à 40 (figure IV. 28b). L'erreur sur la surface foliaire de la plante est toutefois faible puisque la surface de ces feuilles représente moins de 10% de la surface totale.

Comparaison des cinétiques de croissance individuelles des feuilles

La figure IV. 29 montre l'évolution observée et simulée de la surface de 9 feuilles de rang différents (de 10 à 45) dans les essais SER-1, SER-2, AVI-01 et VIS-00. L'essai VIS-99 n'est pas représenté puisque aucune mesure de surface foliaire n'a été faite entre la plantation et la récolte. D'une façon générale, le modèle restitue bien l'ordre de mise en place des différentes feuilles mais il sous estime quasi systématiquement les surfaces observées en cours de croissance. On observe en fait un décalage de 2 à 4 jours des cinétiques simulées par rapport à celles observées. Ce décalage est essentiellement lié à un retard dans la prévision des stades de développement plutôt qu'à une sous estimation des vitesses. On constate en effet que les cinétiques de surface foliaire simulées et mesurées présentent des allures parallèles indiquant des vitesses de croissance identiques. Par contre, on a remarqué ci dessus (cf. 4.2.2) que le modèle sous estimé légèrement, de quelques feuilles seulement, les nombres de feuilles initiées et produites notamment pour les stades « fin de croissance exponentielle » et « fin d'expansion ». Ce léger retard dans la prévision des stades phénologiques suffit pour expliquer le décalage des cinétiques d'expansion simulées .

Comparaison des surfaces foliaires et du poids des plantes simulés et observés

Le modèle restitue correctement les surfaces foliaires par plante (SFp) comme le montre l'ajustement entre surfaces mesurées et simulées (R^2=0.98, CVe=14.2). L'évolution de SFp est notamment bien représentée par le modèle dans SER-1 (figure IV.30a). Dans les 3 autres essais (figure IV.30 b,c et d), le modèle a tendance à sous estimer SFp en cours de cycle même si la valeur finale est correcte. Ces écarts découlent du décalage observé ci dessus entre les cinétiques de surface foliaire mesurées et simulées qui s'explique les erreurs faites sur la simulation des stades de développement.

On retrouve les mêmes écarts entre l'évolution au cours du temps des poids frais (Pf) mesurés et simulés à partir de la surface foliaire de la plante et de la masse surfacique fraîche (MSf) (figure IV.30). Les poids frais à la récolte sont sous estimés par le modèle sauf dans le cas de

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

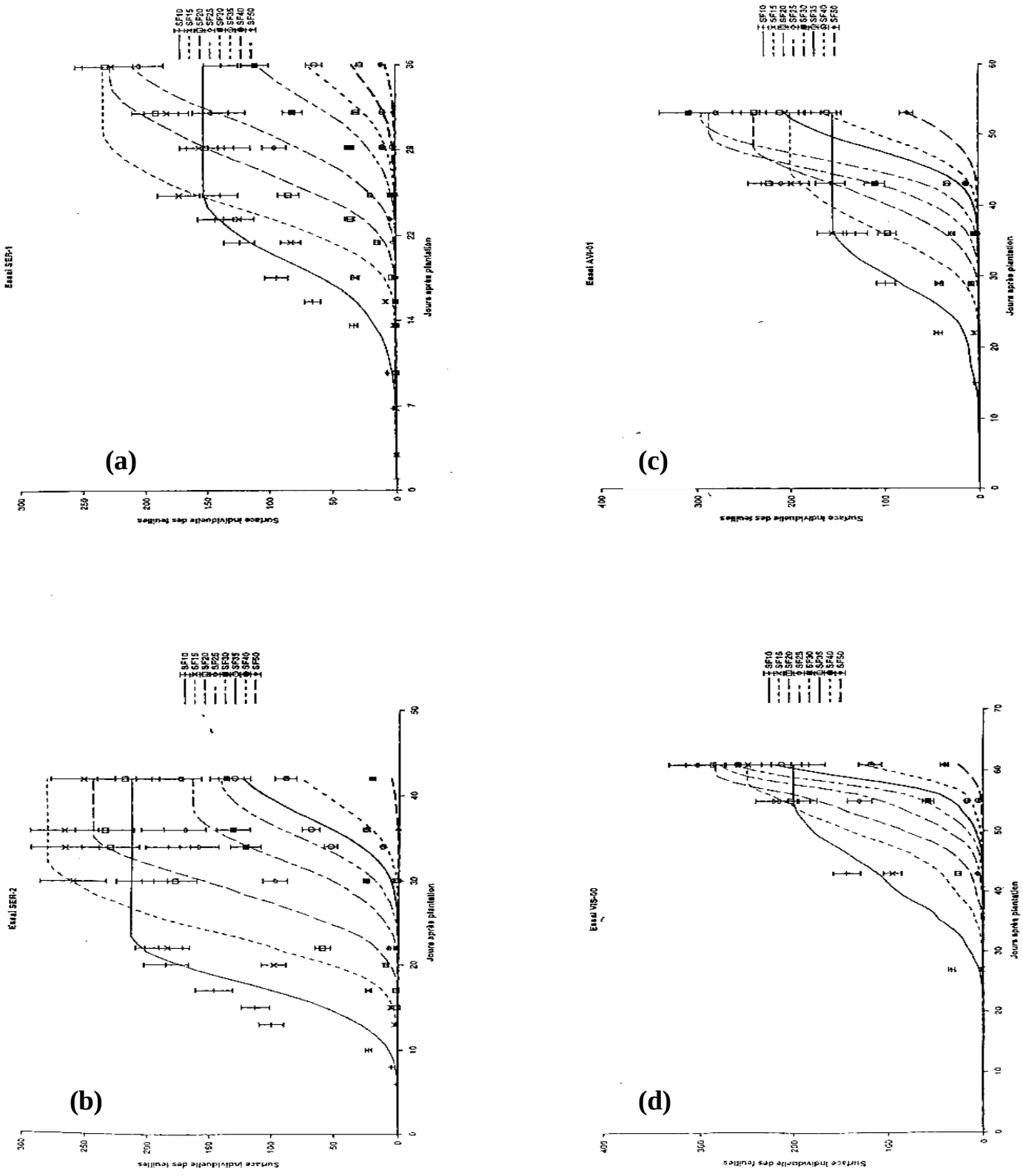


Figure IV.29 : Comparaison de l'évolution mesuée et simulée de la surface individuelle des feuilles de rang 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 et 50 pour les essais SER-1 (a), SER-2 (b), AVI-01 (c) et VIS-00 (d)

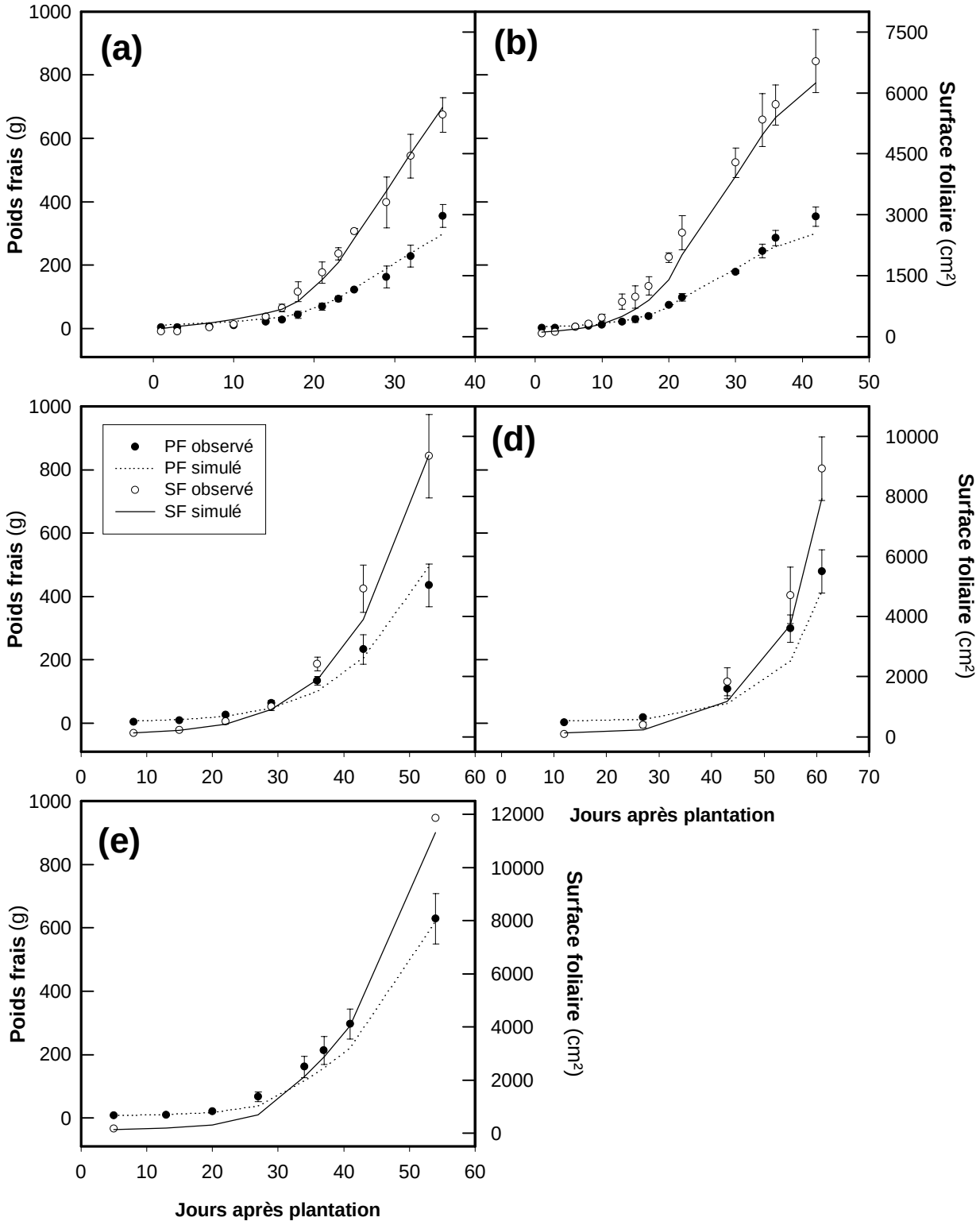


Figure IV.30: Evolution du poids frais (symboles fermés, pointillés) et de la surface foliaire (symboles ouverts, traits pleins) de la plante observés (symboles) et simulés (traits) dans les essais (a) SER-1, (b) SER-2, (c) AVI-01,(d) VIS-00 et (e) VIS-01.

AVI-01. Les écarts sur les valeurs faibles demeurent toutefois faibles, de l'ordre de 40 g pour des plantes pesant entre 350 et 620g. La prévision de Pf par le produit SFpxMSf est moins bonne que celle de SFp mais reste cependant correcte (R^2 = 0.965, CVe = 22.96%).

5. Discussion et conclusion

Le cadre d'analyse du développement et de la croissance foliaire utilisé nous a permis de mettre en évidence et de modéliser les effets sur la mise en place de la surface foliaire de la laitue des principales variables du milieu (température, rayonnement, état hydrique du sol). Nous avons également observé et pris en compte l'effet de certains stades clés du développement de la culture (plantation, pommaison).

Le développement et la croissance des feuilles de laitues en conditions hydriques non limitantes peuvent être modélisés en fonction de la température et du rayonnement.

Le développement d'une feuille de laitue a été décomposé en 4 stades permettant pour 3 d'entre eux (initiation, fin de croissance exponentielle, et fin d'expansion) de décrire les étapes caractéristiques de l'évolution de la vitesse relative d'expansion (RER), et pour la quatrième (apparition) de prédire le stade de récolte de la plante. Le positionnement pour chaque feuille des événements caractéristiques de son développement sur une échelle de temps thermique permet de bâtir un schéma de développement foliaire de la laitue pour une situation donnée (fig. IV.6, IV.7). Le schéma obtenu pour la laitue est similaire à ceux établis pour de nombreuses espèces (Rickman et Klepper, 1995 pour les céréales ; Ben Haj Salah et al , 1996 sur le maïs; Turc et Lecoeur, 1997 sur le pois; Granier et Tardieu, 1998 sur le tournesol ; Lafarge et Tardieu, 1998 sur le sorgho; Lebon et al., 2001 sur la vigne; Franck, 2001, sur Arabidopsis Thaliana). Pour chaque situation étudiée, il montre une évolution linéaire en 2 phases du nombre de feuilles initiées et produites. Ce schéma permet de dater pour chaque feuille les étapes clés de son développement (lecture horizontale), et de déterminer à une date donnée le nombre de feuilles présentes à chaque stade (lecture verticale).

Le schéma de développement foliaire de la laitue exprimé en temps thermique n'est pas stable pour des conditions de culture différents par les niveaux de rayonnement. Dans nos essais, la récolte qui correspond à un nombre de feuilles apparues relativement constant intervient entre 380 et 600°Cj après la plantation. La prise en compte de la quantité de rayonnement photosynthétiquement actif reçue par la plante (PARinc) nous a permis de bâtir une relation unique entre les vitesses relatives d'initiation et de production des feuilles et le

coefficient photothermique, définit comme le rapport entre PARinc et le temps thermique (fig. IV.10). Cette relation montre une diminution des vitesses de développement avec le coefficient photothermique entre deux seuils minimum et maximum au delà desquels la vitesse est constante. Ces résultats confirment les observations de Bensink (1971) qui a étudié l'effet de plusieurs combinaisons de niveaux de température et de rayonnement sur l'initiation et l'apparition des feuilles chez la laitue. Dans le cadre de travaux sur la prévision des dates de récolte ou sur la modélisation de la croissance en biomasse de la laitue, de nombreux auteurs mettent également en évidence la stabilité des cycles de développement de la laitue lorsqu'ils sont représentés en fonction d'une combinaison linéaire du temps thermique et de la quantité de rayonnement reçu par les plantes appelée degrés jours efficaces (Bierhuzen et al., 1973; Scaife et al., 1987 ; Wurr et al., 1987 ; Tei et al., 1996a).

Le rayonnement affecte également la vitesse relative d'expansion des feuilles au cours de la phase de croissance exponentielle (RERp). La relation obtenue entre le RERp et le PARa (fig.IV.13, eq. IV.5) montre une augmentation rapide de RERp avec le PARa jusqu'à une valeur seuil, vers 0.30 $mol.plte^{-1}.j^{-1}$, au delà de laquelle le RERp augmente peu. Ces résultats rejoignent les observations faites sur le tournesol (Granier et Tardieu, 1999), Arabidopsis thaliana (Massonet, 2000 ; Franck, 2001) et le maïs (Muller et al., 2001). Cette relation entre RERp et PARa s'expliquerait par le fait qu'au cours de la phase de croissance exponentielle, la feuille est hétérotrophe et le RER dépend alors de la disponibilité en sucres au niveau de la plante. Ainsi, Kemp (1981) montre qu'une réduction de la teneur en sucres suite à un ombrage ralentit la vitesse de croissance des feuilles. Plus récemment, Massonet (2000) a mis en évidence qu'un apport de sucres exogènes à des feuilles de A. thaliana permet de compenser les effets d'une baisse de rayonnement sur RERp.

Selon ces travaux, nous avons fait l'hypothèse que le niveau de rayonnement n'a plus d'effet sur le RER après la phase de croissance exponentielle. A partir de ce stade, la feuille devient autotrophe et sa vitesse d'expansion n'est plus sensible au PAR absorbé par la plante. Nous avons par ailleurs montré que cette phase de décroissance du RER, exprimée en fonction d'un indice du développement de la feuille entre la fin de la phase exponentielle et la fin d'expansion (indice plastochronique), peut être représentée par une relation unique pour toutes les feuilles d'une plante. Cette approche a été déjà développée par Mustaers (1983a et b) pour modéliser la croissance des feuilles de coton.

Le développement et la croissance des feuilles de laitues sont affectés à certains stades clés du cycle de la plante.

En plus des effets de la température et du rayonnement, nos résultats ont permis de mettre en évidence des réductions des vitesses de développement et/ou de croissance des feuilles en début de cycle et au cours de la deuxième moitié du cycle

Comme nous l'avons déjà signalé, **la période suivant la plantation est considérée comme une période critique**, qualifiée de phase de reprise des plants, par les producteurs et les conseillers techniques. Bruno et Papy (1992) montrent que la vitesse d'apparition des feuilles est réduite en début de culture pour des cultures de laitues plantées par rapport à des cultures de laitues semées. Cette réduction de la vitesse d'apparition des feuilles est transitoire et, au delà d'un certain stade, les rythmes d'apparition des feuilles sont identiques pour les 2 types de culture. Ces auteurs attribuent cette réduction de vitesse à un stress lié au mode d'installation des cultures plantées. Dans nos essais, les évolutions au cours du temps du nombre de feuilles aux 4 stades de développement considérés montrent des allures similaires à celle observée pour NFapp par Bruno et Papy (1992). On distingue après la plantation de la culture une période, de durée variable selon les stades de développement, au cours de laquelle les vitesses d'initiation et de production des feuilles sont entre 2 et 3 fois plus faibles que dans le reste du cycle (figure IV.6 et IV.7). Les cinétiques d'expansion des feuilles présentes à la plantation montrent également un ralentissement de leur vitesse de croissance en début de cycle que nous avons traduit dans le modèle par un facteur de réduction de la surface de chacune de ces feuilles (tableau IV.9).

Selon McKee (1981), **ce stress de la plantation s'apparente pour la plante à un stress hydrique** du à plusieurs facteurs. Lors de la plantation, la séparation des plants, jusque là cultivés sur des lits de terreau, en mottes de quelques cm de côté, va endommager et mettre à nu une partie du système racinaire, et réduire le volume de sol exploré par les racines. Les plants vont se retrouver par ailleurs dans des conditions climatiques moins favorables qu'en pépinière avec notamment une demande évaporative plus forte. Les besoins en eau de la plante vont alors augmenter tandis que la disponibilité en eau est réduite. On peut également penser que les racines subissent une contrainte mécanique à la pénétration dans le sol due aux différences de structure entre le terreau et le sol. Bruno et Papy (1992) observent ainsi que le stress de la plantation est plus marqué en sol argileux qu'en sables ou en limons. Cette contrainte aurait des conséquences similaires aux effets d'un compactage, qui notamment va inhiber la croissance aérienne (Tardieu et al., 1994 ; Stirzaker et al., 1993). Aloni et al. (1991)

montrent par ailleurs que l'allocation des assimilats vers les racines est favorisée par rapport aux jeunes feuilles comme cela a également été mis en évidence pour les plantes soumises à un stress hydrique (Begg et Turner, 1976). La croissance racinaire est donc stimulée au profit de la croissance foliaire afin de permettre aux plantes de s'implanter dans le sol et accéder ainsi à des ressources suffisantes en eau et en éléments minéraux pour leur croissance. McKee (1981) souligne que cette adaptation du fonctionnement de la plante est plus ou moins marquée parmi les espèces de légumes cultivées, et permet d'identifier celles qui sont le mieux adaptées à ce mode de culture. Il distingue ainsi 3 groupes, dont le premier dans lequel figure la laitue, correspond aux espèces particulièrement bien adaptées à la plantation présentant au cours de la phase de reprise une croissance racinaire rapide associée à une croissance lente des parties aériennes.

Plus tard dans le cycle, on observe une diminution progressive de RERp jusqu'à la récolte à partir d'un stade se situant entre la moitié et les deux tiers du cycle (fig. IV.12). Cette baisse de RERp ne peut être attribuée à une réduction du PARa au niveau de la plante selon la relation mise en évidence plus haut puisque le taux de couverture, donc l'absorption du rayonnement, augmentent dans le même temps. Une évolution similaire de RERp a été observée chez le tournesol (Lecoeur, comm. pers.). Dans ce dernier cas, la chute de RERp semble liée à l'induction florale et au début du développement reproducteur. Chez la laitue, ces événements se produiraient après le stade auquel la plante est récoltée en conditions agricoles. Selon nos observations, **la baisse de RERp coïnciderait chez la laitue au début du processus de pommaison des plantes**. Au cours de ce processus, certaines feuilles en cours de croissance, entre les rangs 25 à 35 dans nos essais, vont se replier vers le centre de la plante et couvrir les feuilles plus jeunes. La pomme ainsi formée va ensuite augmenter en volume au cours du cycle par l'accumulation de feuilles de petites tailles (Bensink, 1971 ; Nothmann, 1976). Comme on l'observe sur les schémas de développement foliaire (fig. IV.6 et IV.7), cette accumulation de petites feuilles est liée à une vitesse d'initiation des feuilles supérieure à leur vitesse de production aux autres stades de développement. Les feuilles initiées après le début de la fermeture de la pomme vont avoir un accès limité à la lumière. Leur alimentation carbonée va donc dépendre de la quantité d'assimilats fournis par les feuilles exposées à la lumière. Dapoigny (1997) montre que l'assimilation du nitrate est également réduite pour ces feuilles car l'expression du gène de la nitrate réductase dépend de la lumière. La pomme va donc se comporter comme un organe puits dont la demande va augmenter plus rapidement, avec l'accumulation des feuilles initiées au cours du temps, que la quantité de PARa. On peut donc faire l'hypothèse qu'à partir de la pommaison la quantité

d'assimilats disponibles pour les feuilles néo formées est réduite ce qui se traduit par une diminution du RERp de ces feuilles.

L'impact de stress hydriques modérés sur le développement et la croissance des feuilles de laitues peut être modélisé à partir de relations simples entre les vitesses de production et de croissance des feuilles et l'état hydrique du sol.

La relation que nous avons établie dans l'essai SER-3 entre la vitesse relative de croissance des feuilles et la FTSW a une allure similaire à celle établie pour le soja (Sinclair, 1986), le coton (Rosenthal et al., 1987), le maïs (Muchow et Sinclair, 1991) et le pois (Lecoeur et Sinclair, 1996). Le rapport RERstress/RERtémoin diminue peu entre des FTSW de 1 à 0.5, puis décroît rapidement et s'annule avant que l'eau transpirable ne soit totalement utilisée par la plante (fig. IV.21). La relation entre FTSW et la vitesse de production des feuilles (Vpf, fig. IV.18) montre que Vpf est affectée plus tôt que le RER mais diminue moins rapidement ensuite. Les mesures simultanées de FTSW et de potentiel hydrique du sol effectuées au cours du même essai indiquent que la gamme de potentiel dans laquelle RER et Vpf décroissent rapidement commence à partir de potentiel matriciel de l'ordre de 30 kPa (fig. II.4). Ces observations confirment la sensibilité de le croissance foliaire de la laitue pour des dessèchements modérés du sol dans la zone racinaire.

L'effet du stress hydrique sur le développement foliaire se traduit par un allongement de la durée de développement des feuilles produites ou en expansion au cours du stress sans que la vitesse d'initiation n'ait été affectée. L'allongement de la période d'expansion des feuilles soumises à une contrainte environnementale a été observée chez plusieurs espèces en réponse à des stress hydrique (Lecoeur et Guilioni, 1998 sur pois ; Lebon et al., 2001 sur la vigne; Dosio, 2002 sur le tournesol), thermique (Lecoeur et Guilioni, 1998 sur pois) ou lumineux (Franck, 2001 sur A. thaliana). Dans ce dernier cas, l'auteur montre que l'augmentation de la durée de développement permet de compenser en partie la réduction de la vitesse d'expansion foliaire au cours du stress. Dans le cas de la laitue, on peut penser que ce phénomène de compensation peut permettre, dans le cas de contraintes hydriques modérées, de limiter les pertes de surface foliaire donc de rendement dans une gamme acceptable pour les producteurs mais va retarder la date de récolte. Ce retard peut être préjudiciable pour le producteur si leprix de vente des laitues baisse entre la période programmée pour la récolte et la date effective de la récolte.

Les relations mises en évidence entre les variables du milieu et les processus de développement et d'expansion des feuilles nous ont permis d'élaborer un modèle de

croissance foliaire et de prévision du rendement de la laitue utilisable en parcelles agricoles.

Ce modèle permet de rendre compte de la variabilité des profils de surface foliaire et des rendements en conditions hydriques non limitantes. Nos données expérimentales ne nous ont pas permis de tester le modèle en conditions hydriques limitantes pour des cultures sous abri froid. Si ce travail reste à faire, plusieurs travaux ont montré la validité des relations du type de celles que nous avons établi entre FTSW et les vitesses de production et d'expansion de feuilles, pour des plantes cultivées sous serre en colonnes de sol aussi bien que pour des plantes cultivées au champ en conditions environnementales fluctuantes (Amir et Sinclair, 1991 ; Lecoeur et Sinclair, 1996 ; Ray et Sinclair, 1998).

Le modèle restitue notamment bien l'évolution du nombre de feuilles aux différents stades de développement pour des conditions de lumière et de rayonnement variées. Le module de développement ne requiert qu'un seul paramètre, le temps thermique cumulé de la plantation à la récolte, et le nombre initial de feuilles aux différents stades à la plantation. Comme nous l'avons vu, le stade de plantation étant standardisé ces nombres de feuilles sont peu variables entre les situations. Le modèle de développement peut donc être mis en œuvre en parcelles agricoles pour simuler a posteriori la croissance en disposant de relevés au pas de temps journalier de la température et du rayonnement, et en connaissant les dates de plantation et de récolte de la culture. La modélisation du développement foliaire est une étape essentielle pour le diagnostic à posteriori des effets d'une contrainte hydrique sur la croissance foliaire de la plante, dons sur le rendement dans le cas de laitue. La superposition du modèle de développement et de l'évolution des variables du milieu (lumière, état hydrique du sol et de l'air..) permet en effet d'identifier les organes qui vont être affectés par un stress, donc d'évaluer l'impact de ce stress sur le rendement de la plante en fonction du poids des organes touchés dans l'élaboration du rendement. Ainsi dans le cas de la laitue, dont le rendement est étroitement lié à la surface foliaire de la plante (cf. 1.2), les profils cumulés des surfaces individuelles des feuilles mesurés dans nos essais montrent que 90% de la surface foliaire de la plante est représentée par les 30 à 45 premières feuilles selon les situations (figure IV. 2). Le schéma de développement montre par ailleurs que ces feuilles sont initiées au cours du premier tiers du cycle et terminent leur phase de croissance exponentielle avant la moitié du cycle (figure IV.6 et IV.7) Une contrainte hydrique précoce, localisée entre la plantation et le milieu du cycle, alors que le poids frais de la plante représente moins de 20% du poids final, va donc avoir des effets importants sur le rendement car elle va affecter la croissance des

Rapport-Gratuit.com

organes qui pèsent le plus dans le rendement final pendant la période où leur vitesse relative d'expansion est maximum. La prévision du nombre de feuilles apparues permet par ailleurs de simuler le taux de couverture avec une relation unique valable dans tous nos essais (fig. IV.23). Cette approche est intéressante pour améliorer la valeur prédictive des modèles de bilan hydrique étudiés dans le chapitre III.

L'utilisation du modèle d'expansion foliaire est plus délicate car elle impose une étape de calage des surfaces initiales des feuilles et des valeurs du paramètre déterminant l'impact du stress de la plantation sur la croissance des premières feuilles (FS_plantation). La taille moyenne des feuilles à l'initiation après calage sur les surfaces finales varie de 0.0002 à 0.0009 cm^2 dans nos situations. Nous ne pouvons pas dire si ces différences sont liées à un mécanisme de régulation de la taille des primordium foliaire en fonction de l'environnement, ou si elles sont dues au fonctionnement du modèle. La taille finale des feuilles est très sensible aux paramètres qui vont déterminer la durée et la vitesse des différents phases de la croissance foliaire. Les fonctions utilisées dans le modèle pour représenter la réponse de ces processus aux variables de l'environnement sont des tendances moyennes ajustées sur des nuages de points présentant parfois une forte dispersion. Dans ces conditions, la variabilité des surfaces initiales peut provenir d'un effet de compensation des erreurs du modèle comme dans toute approche d'optimisation de paramètres par modélisation inverse (Bouma et al., 1993). Pour limiter ce phénomène, il est important de vérifier le domaine de validité des relations et des paramètres utilisés. Le paramètre TT_{trans_RERp} par exemple est déterminant pour le calage des surfaces initiales. Nous l'avons associé au début de la pommaison sans que ce stade soit très clairement quantifié par ailleurs. Dans l'essai VIS-00, nous ne disposions pas de mesure de RERp pour le déterminer précisément comme dans les essais SER-2, SER-1 et AVI-01. Nous l'avons donc calé sur les données de RER après la phase exponentielle de feuilles individuelles. La valeur obtenue (280°Cj) est proche de celle estimée par les observations visuelles du début de la pommaison (300°Cj). Cela semble confirmer notre hypothèse. Il n'est toutefois pas envisageable de disposer de mesures de RER dans chaque situation qu'on souhaite modéliser. Une étude détaillée du processus du pommaison et de son impact sur la croissance foliaire est donc nécessaire pour vérifier cette hypothèse.

Dans le cas de FS_plantation par contre, le calage pour les 4 situations sur lesquelles nous avons testé le modèle montre une évolution similaire des valeurs prises par ce paramètre en fonction de la position de la feuille (tableau IV.9). La moyenne de ces valeurs par rang de feuille permet de définir une relation empirique pouvant servir de référence pour d'autres

situations (figure IV. 31), bien qu'elle ne fournisse aucune explication sur les mécanismes en jeu.

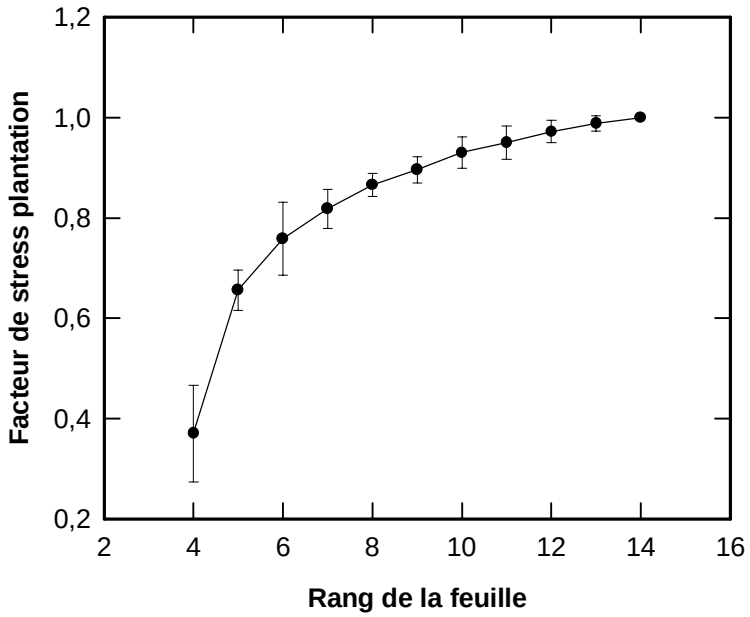


Figure IV.31 : Evolution du facteur de stress "plantation" de l'expansion foliaire en fonction du rang de la feuille. Chaque point représente la moyenne par rang de feuille des valeurs calées dans les essais SER-1, SER-2, AVI-01, VIS-00 et VIS-99.

L'utilisation du modèle de croissance foliaire nécessite donc au minimum de mesurer les profils initial et final de surfaces foliaires, et de noter le début de la formation de la pomme pour pouvoir caler le modèle pour la situation étudiée. La démarche d'évaluation a posteriori permet donc de disposer d'informations indispensables au calage du modèle.

Une fois calé, le modèle peut ensuite être utilisé pour simuler le rendement de la culture pour des stratégies d'irrigation alternatives en utilisant les données de température et de rayonnement de la situation observée, et l'état hydrique du sol simulé par un modèle de bilan hydrique (cf. chapitre III). Le chapitre suivant présente cette démarche dans le cas de l'essai VIS-99 pour lequel les modèles de bilan hydrique et le modèle de croissance foliaire ont été calés .

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

CHAPITRE V

Simulation de l’impact de stratégies alternatives d’irrigation sur les risques de pollution nitrique et le rendement d’une culture de laitues

CHAPITRE V

SIMULATION DE L'IMPACT DE STRATEGIES ALTERNATIVES D'IRRIGATION SUR LES RISQUES DE POLLUTION NITRIQUE ET LE RENDEMENT D'UNE CULTURE DE LAITUES

1.Objectifs et démarche

1.1.Objectifs

L'étude de diagnostic présentée dans le chapitre I montre que les risques de lixiviation du nitrate sont élevés dans toutes les situations alors que les pratiques de fertilisation respectent les bonnes pratiques agricoles en vigueur sur la zone d'étude depuis son classement en zone vulnérable dans 12 cas sur 14. Dans ces situations, les mesures de terrain et les simulations des flux d'eau sous les racines (chapitre III) montrent que les pertes en azote nitrique sont liées à un drainage quasi permanent en profondeur dû à des pratiques d'irrigation excessives. D'une manière générale, l'irrigation est un facteur primordial à maîtriser pour réduire les risques de pollution nitrique en cultures intensives irriguées (Snyder et al., 1981 ; Jackson et al., 1994, De Cockborne et al., 1995 ; Ersahin et Karaman, 2001).

L'utilisation de la modélisation pour tester l'impact de stratégies alternatives d'irrigation sur l'environnement s'est largement développée depuis une dizaine d'années (Musharrafieh et al, 1995 ; Pang et al., 1997; Pang et Letey, 2000 ; Leenhardt et al., 1998a et b; Asare et al., 2001 ; Hack-ten Broeke, 2001). Une des principales limites de ces travaux est de ne pas simuler l'impact des stratégies testées sur le rendement de la culture. Dans le meilleur des cas, un indice de stress est calculé (souvent le rapport transpiration réelle sur transpiration potentielle) pour chaque situation mais sans quantification du risque pour la production (Leenhardt, 1998a). Dans le cadre de négociations entre les agriculteurs et les gestionnaires de l'eau cette quantification est nécessaire pour déterminer le coût pour les producteurs de la mise en œuvre de pratiques respectueuses de l'environnement. Nous avons présenté dans le chapitre V un modèle permettant de simuler le rendement d'une laitue en fonction du climat et de l'état hydrique du sol. Ce modèle est opérationnel en parcelles agricoles pour évaluer à posteriori l'impact de la gestion de l'irrigation sur la production. Nous avons par ailleurs paramétré et

partiellement validé deux modèles de bilan hydrique pour des cultures de laitues sous abri froid. L'objectif de ce chapitre est d'utiliser ces modèles pour évaluer les pertes d'azote nitrique sous les racines et les pertes de rendement pour différentes stratégies alternatives d'irrigation d'une culture de laitues sous abri froid sur laquelle les deux modèles ont été préalablement calés. Nous prendrons pour exemple la situation VIS-99.

1.2.Choix du modèle de bilan hydrique

Dans le chapitre III, nous avons évalué et comparé 2 modèles de bilan hydrique différant dans l'approche utilisée pour simuler les transferts d'eau dans le sol. Il ressort de nos résultats que le modèle PASTIS (Lafolie et al., 1991), de type mécaniste pour ces processus, restitue mieux les flux d'eau dans le sol que le modèle STICS (Brisson et al., 1998), basé sur une approche analogue des transferts d'eau. La principale limite de STICS, commune à tous les modèles analogiques, est de ne pas simuler les phénomènes de remontées capillaires. Dans la plupart des situations étudiées dans le chapitre III, ces flux sont relativement peu important par rapport aux flux drainants car les irrigations fréquentes et abondantes maintiennent la teneur eau du sol proche de la capacité au champ. Quand les apports d'eau sont moins importants, on constate que le sens des flux sous les racines s'inverse rapidement dès que le sol en surface se dessèche dés que les potentiels hydriques atteignent –30 à –40 kPa. C'est le cas pour le site A de VIS-99 et surtout pour le site C de la situation S4 étudiée dans le chapitre I. On constate pour ce site que la période de stress hydrique, dûe à un dysfonctionnement du système d'irrigation, observée en milieu de cycle coïncide avec une phase de remontées capillaires (figure I.6a et c). Les flux redeviennent drainants dès que les potentiels hydriques en surface remontent au dessus de –30 kPa. Des stratégies d'irrigation visant à limiter le drainage sous les racines vont donc induire des phénomènes de remontées capillaires plus fréquents ce dont ne peut rendre compte un modèle de bilan hydrique de type STICS.

Nos simulations montrent par ailleurs que STICS sous estime la teneur en eau dans le sol au niveau de la zone racinaire (fig. III.9). Dans toutes les situations, cela provoque dans les simulations des phénomènes de stress qui se traduisent par une réduction de la transpiration réelle par rapport à la transpiration potentielle. Nos résultats montrent que STICS simule mal la répartition de l'eau entre les couches de sol qui dans la réalité va compenser le dessèchement du sol en surface dû à l'extraction racinaire. Là encore, ce phénomène risque d'être amplifié avec des stratégies limitant les volumes d'eau apportés. Dans ces conditions, STICS va surestimer le dessèchement du sol dans la zone racinaire et donc les pertes de poids

frais. Dans nos conditions, le modèle STICS conduirait donc à une évaluation biaisée des stratégies alternatives en surestimant les pertes nettes d'azote nitrique et de poids frais.
Le modèle PASTIS simule bien les flux d'eau sous les racines et la teneur en eau dans la zone racinaire. Nous avons déjà discuté de la difficulté de mise en œuvre des modèles de type mécaniste dans le cadre d'une démarche d'évaluation en parcelles agricoles. Nous avons vu que la disponibilité de mesures de potentiel hydrique, utilisées pour la diagnostic qualitatif (chapitre I), et de données simples sur le type de sol peuvent permettre de caler PASTIS sans avoir nécessairement recours à des mesures de laboratoires lourdes et coûteuses à mettre en œuvre. Dans ces conditions, on peut estimer que PASTIS est opérationnel pour simuler l'impact de différentes stratégies d'irrigation alternatives sur le bilan hydrique d'une culture de laitues.

1.3. Articulation des modèles de bilan hydrique et de calcul du rendement

L'adaptation du modèle PASTIS pour une culture de laitue réalisée par De Tourdonnet (1998) n'intègre pas l'effet du déficit hydrique du sol sur le fonctionnement de la culture. En conditions de production, l'état hydrique du sol est considéré comme non limitant, il n'est donc pas nécessaire de prendre en compte ce phénomène. Cela devient par contre nécessaire pour évaluer les risques de pertes de rendement pour des stratégies d'irrigation plus restrictives. Nous avons pour cela couplé l'utilisation du modèle PASTIS et celle du modèle de croissance foliaire et du calcul du rendement d'une laitue présenté dans le chapitre IV (figure V. 1). D'un point de vue informatique et fonctionnel, ce couplage est indirect puisque le modèle de croissance foliaire utilise chaque jour la FTSW calculée par PASTIS. Par contre, PASTIS ne reçoit aucune information du modèle de croissance foliaire. Ce couplage pourrait être fait dans ce sens pour pouvoir rendre compte de l'effet de la lumière sur le taux de couverture (§ 4.1.1).
La procédure mise en œuvre pour évaluer les stratégies d'irrigation consiste à simuler dans un premier temps le bilan hydrique de la culture avec PASTIS. Ces simulations permettent d'évaluer les risques de pollution nitrique. La fraction d'eau transpirable du sol est ensuite calculée au pas de temps journalier (FTSWj), à partir des profondeurs d'enracinement et des teneurs en eau par couches de sol. FTSWj est le rapport entre la quantité totale d'eau transpirable (TTSW) et la quantité d'eau transpirable du sol le jour j (ASWj) dans la zone racinaire. TTSW correspond au stock d'eau entre la capacité au champ (Hcc) et l'humidité à laquelle la plante n'est plus capable d'extraire l'eau du sol (Hmin). Cette borne minimum est difficile à déterminer car elle varie pour une même plante en fonction de la densité racinaire :

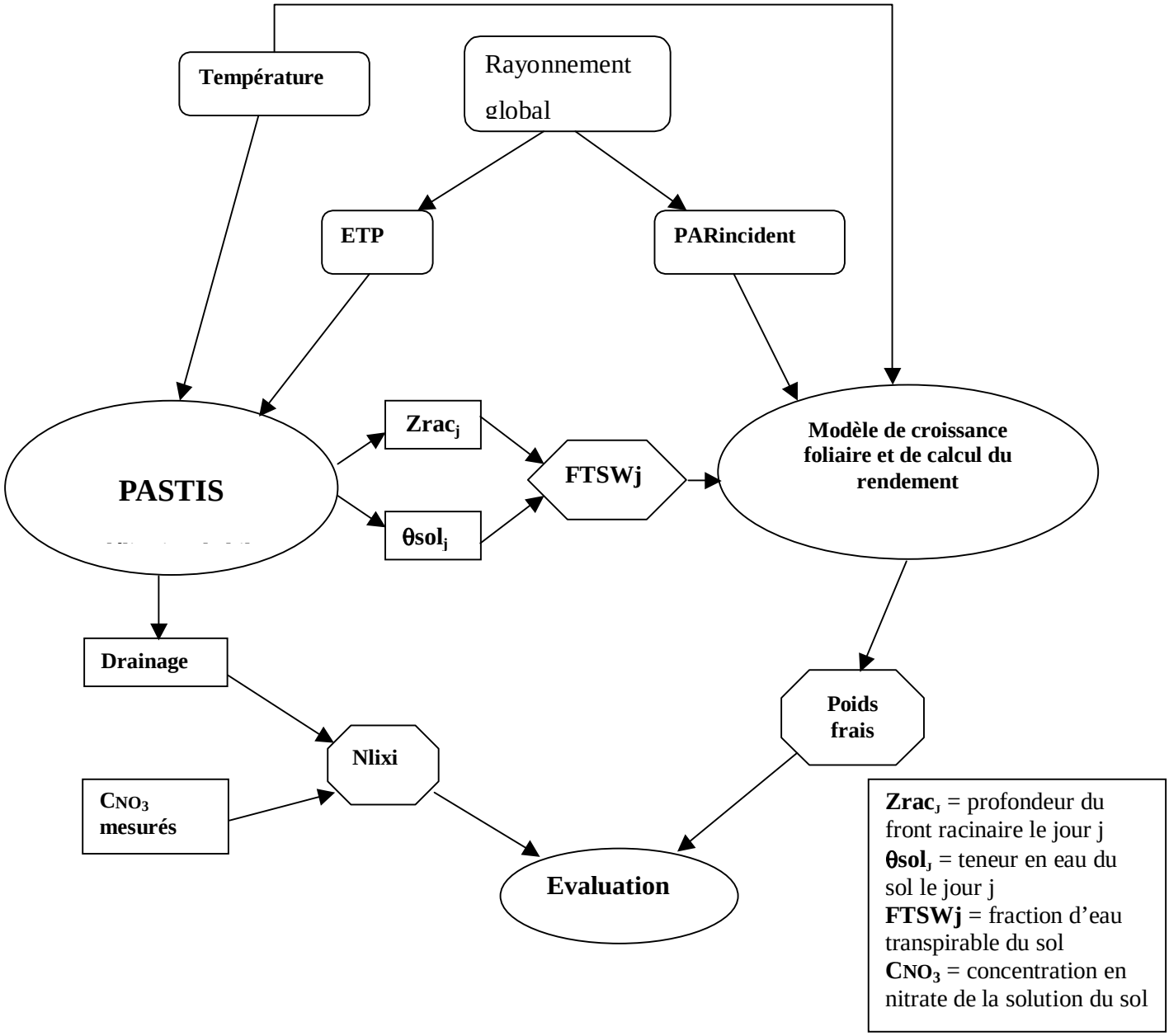


Figure V.1 : Schéma de principe de la démarche de modélisation et d'évaluation de stratégies alternatives d'irrigation d'une culture de laitues mise en place dans le chapitre V.

elle est plus faible que l'humidité au point de flétrissement permanent (Hpf) dans la zone de forte densité racinaire et plus élevée que Hpf en dessous d'une certaine profondeur (Cabelguenne et Debaeke, 1998 ; Lacape et al., 1998). Nous n'avons pas trouvé de références pour la laitue sur ce sujet dans la bibliographie. Dans l'essai SER-3, Hmin a été déterminée en comparant la transpiration des plantes bien alimentées en eau et celles des plantes stressées selon la méthode proposée par Sinclair et Ludlow (1986) (§II, 2.2.1). La valeur moyenne trouvée pour l'ensemble des pots est de 9% de teneur en eau pondérale et correspond à Hpf mesurée au laboratoire. Ce résultat est normal pour des plantes cultivées en pots car le densité racinaire est importante et homogène au sein du pot. La laitue ayant un enracinement peu profond, on a estimé pour nos simulations que Hmin est égal à Hpf sur tout le profil. Les valeurs de Hcc et Hpf pour le sol de l'essai VIS-99 sont données dans le tableau III.3. Une fois calculées, les valeurs de FTSWj sont entrées avec les données de température et de PAR dans le modèle de croissance foliaire pour simuler l'impact des stratégies alternatives d'irrigation sur le rendement.

Notre approche de modélisation présente toutefois une lacune au niveau de l'effet de l'état hydrique du sol sur la transpiration de la culture. Ce processus est pris en compte dans PASTIS à partir d'une fonction de régulation de l'absorption racinaire (cf. chap. III, 2.1.6). Cette fonction n'a pas fait l'objet d'un paramétrage spécifique pour la laitue en conditions hydriques limitantes. Les valeurs des paramètres définies par défaut dans le modèle sont issues des travaux de Lafolie et al (1997) qui ont déterminé ces valeurs par optimisation sur des données de potentiel mesurées ne dépassant pas –60 kPa. A partir des mesures de transpiration des plantes et de teneurs en eau du sol dans les essais SER-2 et SER-3, nous avons établi une relation entre la FTSW et le taux relatif de transpiration (TRN) de plantes soumises à un déficit hydrique par rapport à des plantes bien irriguées (figure V. 2). Cette relation montre que la transpiration n'est pas affectée jusqu'à des FTSW de l'ordre de 0.6, puis diminue, d'abord lentement jusqu'à des FTSW de 0.4, puis plus rapidement et quasi-linéairement jusqu'à épuisement de la TTSW. Lecoeur et Sinclair (1996) obtiennent des relations identiques entre FTSW et TRN pour plusieurs variétés de pois cultivées en pots, et montrent qu'elles sont également valables pour des plantes cultivées au champ. La fonction ajustée sur les données de la figure V.2 n'a pas encore été incorporée au modèle de bilan hydrique. Nous l'avons toutefois utilisée dans nos résultats pour comparer les taux de réduction de la transpiration qu'elle permet de calculer à partir des parcours de FTSW simulés et ceux calculés par PASTIS avec le formalisme qu'il contient (§ 3.2).

Rapport-Gratuit.com

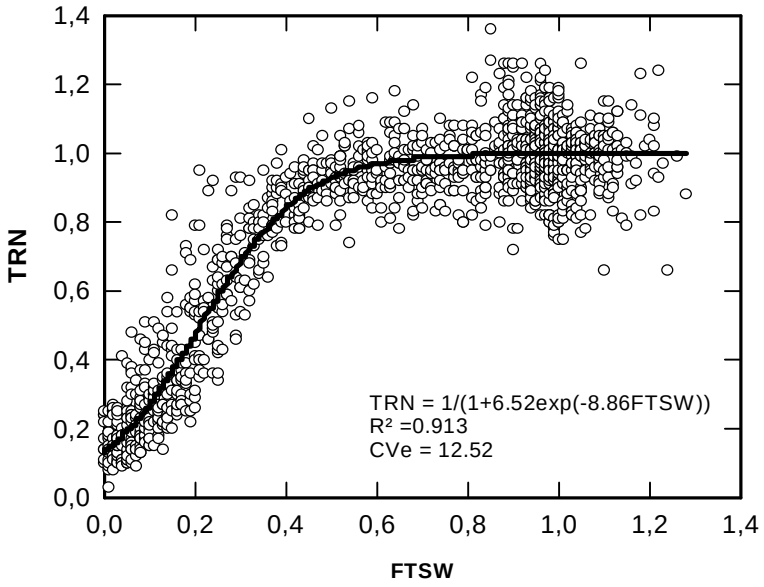


Figure V. 2 : Relation entre la fraction d'eautranspirable du sol (FTSW) et le taux de transpiration normalisé (TRN). Points expérimentaux (symboles) et ajustement (courbe).

1.4.Situation et stratégies alternatives évaluées

La démarche de simulation décrite ci dessus a été appliquée à l'essai VIS-99, présenté également comme la situation S10 dans la phase de diagnostic (chap. I). Cette situation correspond à une culture de laitues suivie entre le 17 février et le 9 avril 1999 sur l'exploitation E2 (chap. I), sur laquelle ont également été suivie les situations S8, S9 et l'essai VIS-00. Trois sites de mesure (sites A, B et C) ont été suivis sur la parcelle selon les protocoles décrit dans les chapitre I (§ 1.2.2) et II (§ 1.1.3).

Les simulations de stratégies alternatives d'irrigation ont été effectuées pour le site B. Les données issues de ce site ont en effet servi à caler à la fois PASTIS et le modèle de croissance foliaire. Les flux d'eau cumulés et les pertes d'azote nitrique nets et bruts (resp. avec et sans remontées capillaires) sous les racines étaient respectivement de 60 et 80mm, et de 24 et 13 kg $N\text{-}NO_3^-.ha^{-1}$ au niveau de ce site (chap. III, § 4.5). Le drainage net représente plus de 50% du volume total d'irrigation (90mm). Pour cette culture, 8 apports d'eau ont été réalisés avec une fréquence de 3 à 7 jours entre 2 irrigations, et des doses de 6 à 18 mm. Les volumes les plus importants sont apportés au cours de la première semaine après la plantation. La fréquence et les doses ont ensuite tendance à diminuer au cours du cycle jusqu'à l'arrêt des apports 10 jours avant la récolte (fig. III.8).

Par rapport à cette stratégie, nous avons testé 4 stratégies d'irrigation alternatives basées sur une modification des doses ou de la fréquence des apports (tableau V. 1). Ces stratégies ont été choisies après un entretien avec l'agriculteur sur les stratégies alternatives techniquement possibles pour lui. Dans la stratégie I50, la fréquence des apports est identique à celle

observée pour le site B, mais les doses ont systématiquement été divisées par 2. Cette stratégie correspond en fait à celle observée sur le site A qui a reçu environ 50% d'irrigation en moins que les 2 autres sites à cause d'un dysfonctionnement du système d'aspersion. La stratégie BAS est également basée sur une réduction des doses en conservant la même fréquence que celle observée. Les doses ont été calculées en limitant le temps d'irrigation à 30 min et en tenant compte du débit calculé pour chaque apport dans la situation de référence (i. e, pratiques de l'agriculture). Cette stratégie s'apparente à la pratique de « bassinage » souvent évoquée par les agriculteurs et les techniciens de terrain. Elle consiste à réaliser des irrigations fréquentes mais de faible volume pour une culture implantée sur un sol proche de la capacité au champ, afin de maintenir la motte humide en début de cycle pour favoriser la reprise du plant et ensuite entretenir l'humidité du sol en surface. Dans la stratégie TENS, nous avons utilisé la procédure de pilotage tensiométrique des irrigations incluse dans PASTIS. Le seuil de déclenchement des apports a été fixé à –30 kPa mesuré à 15 cm. Ce seuil correspond à la limite de stress pour la croissance végétative utilisée dans l'étude de diagnostic pour évaluer limite de stress pour la croissance végétative utilisée dans l'étude de diagnostic pour évaluer le stress hydrique (chap. I, § 1.2.3.). Le volume par apport a été fixé à 10 mm. Pour la dernière stratégie, notée SEC, la fréquence et les doses d'apport n'ont pas été modifiées par rapport à la stratégie de référence. Nous avons en fait diminué les conditions initiales d'humidité dans le sol. Le stock d'eau mesuré sur le site B en début de culture était de 190 mm. Cette valeur est au-dessus de la capacité au champ (183 mm) pour ce sol. Ce niveau élevé d'humidité dans le sol résulte des arrosages abondants réalisés avant le démarrage de la culture pour assurer « le plein en eau » du sol. Au travers de la stratégie SEC, nous avons voulu tester les conséquences d'un sol plus sec à la plantation. Pour cela, nous avons défini des valeurs initiales de potentiels hydriques plus faibles que celles mesurées comme le montrent les profils représentés dans la figure V.3. Le stock résultant de ces conditions initiales plus sèches est de 144 mm.

Tableau V .1 : Stock d'eau total initial, fréquence et doses des irrigations dans les différentes stratégies

Dénomination	Fréquence	Volume par apport	Stock initial
Site B	observée	mesuré	190 mm
I50	SiteB	Site B/2	190 mm
BAS	SiteB	site B x durée max = 30min	190 mm
TEN	ψ <= –30 kPa	10 mm	190 mm
SEC	SiteB	SiteB	144 mm

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

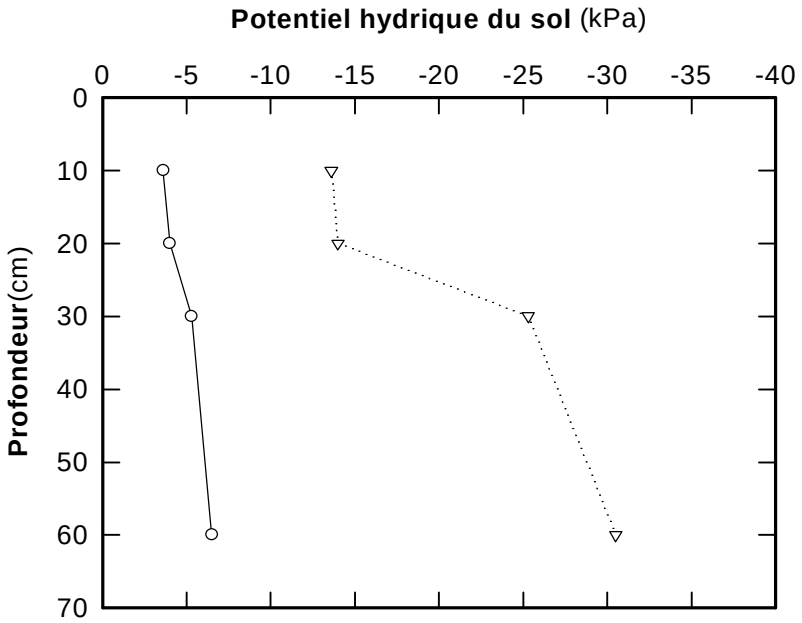


Figure V.3 : Profils de potentiel hydrique au démarrage de la culture observé pour le site B (cercles) et fixé pour la stratégie SEC (triangles).

2. Simulation du bilan hydrique

2.1. Régimes d'irrigation et volumes d'eau apportées

Le nombre et le volume total des apports d'eau et l'évolution au cours du temps du volume cumulé des apports pour les 4 stratégies testées (simulations) ainsi que pour les sites A et B (mesures) sont données respectivement dans le tableau V. 2 et la figure V. 4. Le nombre et la fréquence des apports sont modifiés seulement pour la stratégie TENS. Dans cette stratégie, le premier apport intervient le jour 79 soit 27 jours après la plantation (JAP) alors qu'il est pratiqué 3 JAP dans les autres situations. Cette première irrigation est suivie de 5 autres qui se succèdent à des pas de temps de plus en plus court. Les 2 derniers apports sont ainsi réalisés les 2 jours avant la récolte. Le volume total d'irrigation est de 60 mm pour cette stratégie contre 90 mm pour la situation de référence.

Les situations I50 (simulation) et SiteA (mesure) correspondent à une diminution de 50% de la quantité d'eau apportée au niveau du site B mais avec des répartitions différentes des doses par irrigation (figure V.4). Par définition, les doses dans I50 représentent la moitié de celles mesurées pour le site B. Pour le site A, elles représentent moins de 40% de celles du site B en début de cycle et leur sont quasiment équivalentes en fin de cycle, à partir du moment où le

système d'irrigation a été réparé. La stratégie BAS se traduit par des volumes par apport ne dépassant pas 6mm pour une quantité totale d'eau apportée de 36 mm.

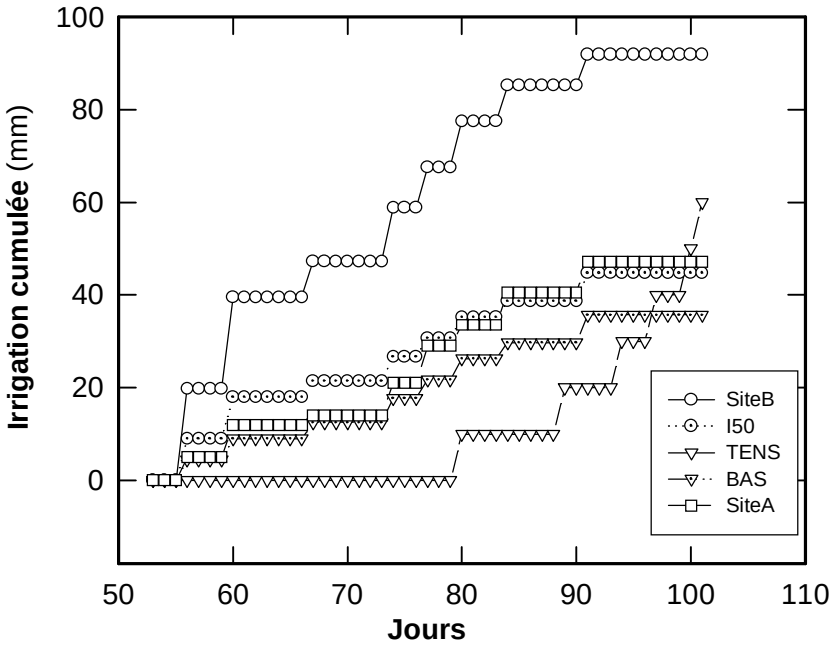


Figure V.4 : Evolution du volume cumulé des apports d'eau mesurés pour les sites A et B de VIS-99, et simulés pour les stratégies I50, BAS et TENS. La stratégie SEC n'est pas représentée car les apports d'eau dans cette stratégie sont identiques à SiteB.

Tableau IV.2 : Nombre et volume total des irrigations, variation de stock et transpiration potentielle (Tpot) et réelle (Tréel) simulées pour les 4 stratégies testées et les sites A et B de l'essai VIS-99.

Stratégie	Nombre d'apports	Volume total (mm)	Variation de stock (mm)	Tpot/Tréel (mm)
Site B	8	90.0	59	99/99
I50	8	45.0	59	99/99
BAS	8	35.8	59	99/99
SEC	8	90.0	23	99/96
TEN	6	60.0	42	99/99
Site A	8	47.0	53	99/99

2.2. Stocks d'eau et potentiels hydriques du sol

Evolution des stocks d'eau dans le profil

Les stratégies d'irrigation décrites ci dessus ont entraîné une diminution des stocks d'eau du sol dans le profil par rapport aux stocks simulés pour le site B (figure V. 5a). L'écart le plus

important avec la situation de référence s'observe pour la stratégie SEC. Dans ce cas, le stock initial a été volontairement diminué de 35mm par rapport à celui mesuré pour le site B. A partir cet état initial différent, les stocks simulés pour SEC montrent une évolution presque parallèle à ceux simulés pour SiteB, sur laquelle on remarque nettement l'impact des irrigations. A la récolte, l'écart entre les stocks est plus faible qu'à la plantation (10 mm contre 35 mm). La variation de stock sur le cycle est en fait moins importante dans la stratégie SEC que dans la situation de référence (23 mm contre 59mm). La différence de transpiration réelle entre ces 2 situations est à peine de 2mm et ne permet donc pas d'expliquer l'écart entre les variations de stock. Le volume et la fréquence des apports d'eau étant identiques dans les 2 cas (fig. V.4, tableau V.2), la plus faible variation de stock pour SEC par rapport à SiteB ne peut s'expliquer que par des différences sur les flux à la limite inférieure du système.

Dans la stratégie TENS, on observe un dessèchement continu, de l'ordre de 40 mm, jusqu'à la première irrigation, le jour 79. Au cours de cette période, le stock pour TENS est inférieur à celui simulé pour SiteB. En fin de cycle par contre, il est plus élevé que celui observé pour la situation de référence du fait des irrigations de plus en plus fréquentes qui maintiennent le stock entre 140 et 150 mm. La variation de stock entre la plantation et la récolte est d'un peu plus de 40 mm pour cette stratégie.

Dans les 2 autres stratégies, I50 et BAS, la variation de stock sur le cycle est équivalente à celle observée pour SiteB, mais avec des variations en cours de cycle différentes de celles observées pour ce site. I50 et BASS présentent d'ailleurs des évolutions quasi identiques du stock d'eau au cours du cycle. Sur les 10 premiers jours du cycle, les stocks sont peu différents entre SiteB, I50 et Bas. A partir du jour 66, ils diminuent pour I50 et BAS par rapport à SiteB jusqu'au jour 85. L'écart entre les stocks simulés pour I50 et BAS par rapport à SiteB est alors d'une dizaine de mm. Cet écart baisse sur la fin de cycle et à la récolte, les stocks sont identiques pour les 3 situations. Comme pour SEC, la variation de stock sur les 15 derniers jours avant la récolte est moins importante pour BAS et I50 que pour le SiteB. L'évolution du stock pour le site A est similaire à celles simulées pour I50 et BAS, mais avec des valeurs de stock environ 10 mm plus faibles directement liées aux différences entre les stocks de départ.

Evolution des potentiels hydriques dans la couche 0-30cm

On constate également des différences notables entre les évolutions des potentiels hydriques moyens dans la couche 0-30 cm ($\psi_{0\text{-}30}$) simulées pour le site B et les différentes stratégies (figure V.5b). Comme pour les stocks, les potentiels les plus bas sont observés pour la

stratégie SEC. Après une courte période d'augmentation due aux premières irrigations, les potentiels ont tendance à chuter en dépit des irrigations, pour atteindre moins de -100 kPa à la récolte. Le seuil de -30 kPa, considéré comme limitant pour la croissance foliaire dans la phase initiale de diagnostic (chap I, §1.2.3) est dépassé une première fois le jour 72, soit 20 JAP, puis une seconde fois le jour 79. A partir de là $\psi_{0\text{-}30}$ ne remonte plus au-dessus de cette limite ce qui laisse supposer une forte réduction de croissance foliaire et de rendement pour SEC par rapport au Site B.

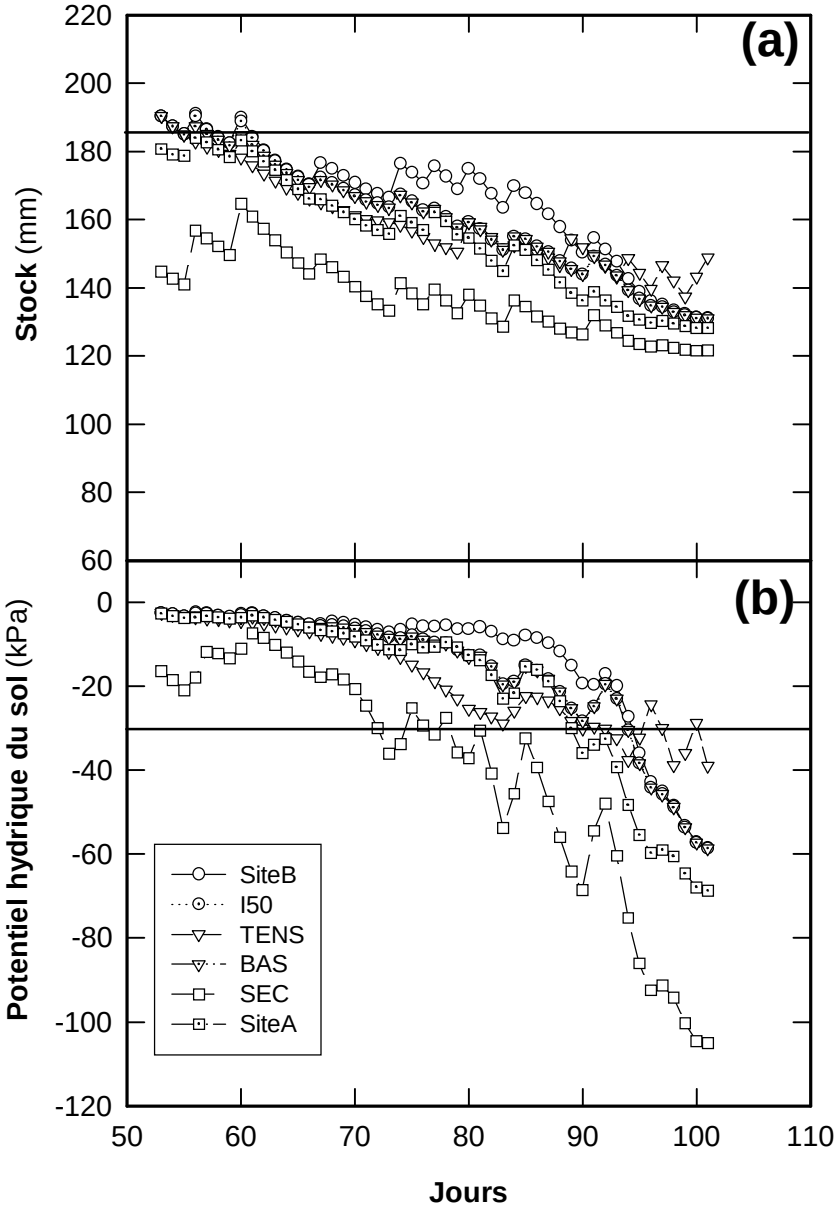


Figure V.5 : Evolution (a) des stocks d'eau sur 0-60 cm, (b) du potentiel hydrique moyen dans 0-30 cm simulés pour les sites A et B de VIS-99, et pour les stratégies alternatives d'irrigation testées pour le site B. Les lignes horizontales représentent dans (a) le stock à la capacité au champ, dans (b) le seuil de -30 kPa.

Dans la stratégie TENS, la première irrigation est déclenchée quand $\psi_{0\text{-}30}$ atteint –40 kPa, et les suivantes autour de -45 kPa. La quantité d'eau apportée à chaque fois permet de faire remonter $\psi_{0\text{-}30}$ à -25 kPa au maximum. Le seuil de déclenchement est donc très vite atteint de nouveau ce qui explique l'augmentation de la fréquence des apports au cours du cycle. Dans cette situation, la limite de -30 kPa est donc dépassée très fréquemment au cours de la deuxième moitié du cycle comme pour SEC, mais les valeurs de $\psi_{0\text{-}30}$ ne descendent pas en dessous de -45 kPa.

Les autres stratégies présentent moins de risque de pertes de rendement au regard de ce seuil de –30 kPa. Le potentiel moyen dans la couche 0-30 cm franchit cette limite 12 jours avant la récolte pour le site A, et seulement 8 jours avant la récolte pour BAS et I50 comme pour le site B. Comme cela a été observé pour les stocks, BAS, I50 et SiteA montrent par ailleurs un dessèchement du sol plus précoce que sur le site B à partir du jour 80.

2.3. Flux d'eau et d'azote en profondeur

Le drainage et les pertes d'azote nitrique ont été réduits dans toutes les stratégies alternatives par rapport aux flux simulés pour le SiteB (tableau V.3). Dans le tableau V.3, nous avons indiqué les pertes brutes et nettes, c'est à dire, respectivement, en ne tenant pas compte et en tenant compte des remontées capillaires. Nlixi a été calculé, à partir de la simulation du drainage t de la mesure des concentrations en nitrate, selon la procédure présentée dans le chapitre III (§ 4.5.3). Les flux simulés pour le SiteA ne sont pas aisément comparables à ceux obtenus pour les autres situations à cause des différences de conditions hydriques initiales et de concentrations en nitrate sous les racines.

En flux brut, c'est la stratégie TENS qui permet de réduire de plus de 70% des pertes d'eau et d'azote par rapport au SiteB. Cette stratégie présente également la durée de drainage la plus courte. En flux net par contre, c'est la stratégie BAS qui donne les meilleurs résultats. Que ce soit pour l'eau ou pour l'azote, cette stratégie permet de récupérer par remontées capillaires plus de ce qui a été perdu au cours du cycle. Les moins bonnes performances de TENS en flux net s'expliquent par des remontées capillaires moins intenses que dans les autres stratégies, malgré une période de remontées capillaires plus longue.

Sur la figure V. 6, qui représente l'évolution au cours du cycle des flux d'eau cumulés, on distingue deux phases dans la dynamique de ces flux dans toutes les situations. A partir de la plantation, ils sont d'abord drainants sur une période de durée variable selon les cas (tableau V.3). L'intensité du drainage a tendance à décroître au cours de cette période puis le sens des flux s'inverse jusqu'à la récolte. L'évolution des flux présente une allure similaire pour les

stratégies I50, BAS, SEC ainsi que pour le site A avec une baisse rapide et linéaire des flux cumulés après la fin du drainage. Dans la stratégie TENS, cette baisse est plus lente pour s'annuler à l'approche de la récolte, témoignant de remontées capillaires d'intensité plus faible. Cette dynamique s'explique par la répartition des apports d'eau qui interviennent dans cette stratégie au cours de la deuxième moitié du cycle (fig. V.4), contrairement aux autres stratégies pour lesquelles les irrigations sont concentrées en début de cycle et s'arrêtent 10 jours avant la récolte. Comme on peut le voir sur l'évolution des stocks et des potentiels hydriques (fig. V.5a et b), ces apports en fin de cycle dans TENS vont limiter le dessèchement du sol dans la zone racinaire, par rapport aux autres stratégies, sans toutefois provoquer de drainage mais en réduisant l'intensité des remontées capillaires.

Tableau V.3 : Principales caractéristiques des flux d'eau et d'azote nitrique simulés pour chaque stratégie.

Stratégie	Pertes d'eau brut	Pertes d'eau net (mm)	Remontées capillaires (mm)	Durée du drainage[1] (jours)	Nlixi brut (kg $N\text{-}NO_3^-.ha^{-1}$)	Nlixi net (kg $N\text{-}NO_3^-.ha^{-1}$)
Site B	79.9	59.7	20.2	40	23.5	13.4
I50	42.3	8.6	33.6	23	12.0	-3.7
BAS	33.5	-0.34	33.8	22	9.7	-6.1
SEC	48.3	6.7	41.6	29	15.2	-4.0
TEN	26.5	5.3	21.1	21	7.5	-0.9
SITE A	33.2	-1.9	35.1	30	5.3	-6.2

(1) la durée du cycle est de 55 jours.

La stratégie SEC permet de réduire de 40% les flux bruts par rapport à SiteB, et de récupérer la totalité ou presque des pertes d'eau et d'azote en fin de cycle. Cette stratégie présente le volume des remontées capillaires le plus élevé, égal au double de celui obtenu pour SiteB (tableau V.3). Ces résultats montrent ue les pertes en eau et en azote sous les racines peuvent être réduites de façon importante sans modifier, comme dans les autres stratégies, la fréquence et le volume des irrigations observés pour la situation de référence, mais en limitant le plein en eau du sol réalisé avant la plantation. La situation TENS illustre également l'impact des conditions initiales de teneur en eau du sol sur le drainage. En effet, comme on l'observe sur la figure V.6, le drainage a lieu dans cette situation alors qu'il n'y a pas d'irrigation (fig. V.4). Ces pertes d'eau sont en fait du aux apports d'eau avant la plantation qui ont permis de recharger le sol au niveau de la capacité au champ (fig. V.5a) et sont drainés progressivement ensuite.

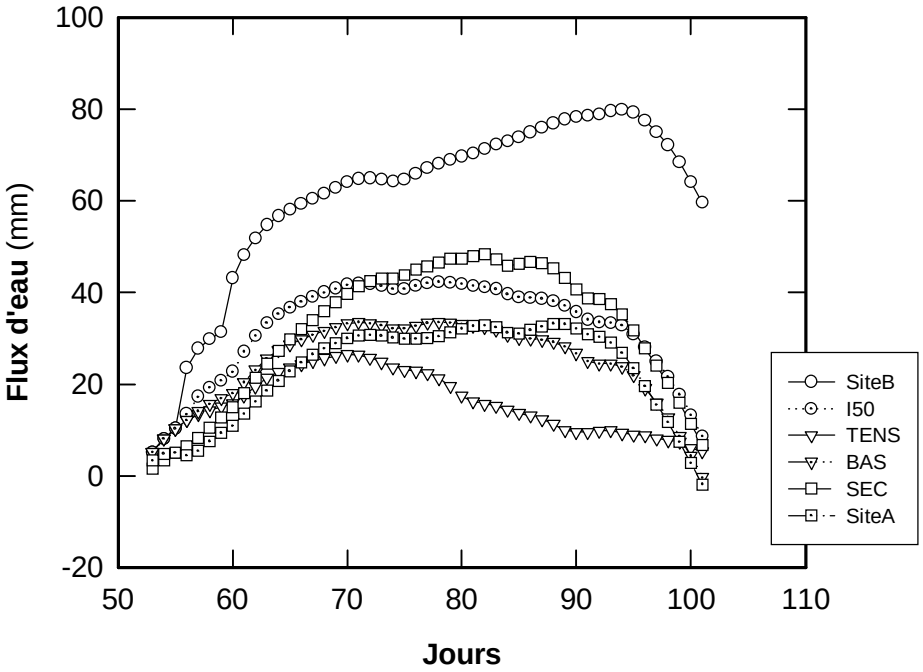


Figure V.6 : Evolution des flux d'eau cumulés simulés pour les sites A et B de VIS -99, et les stratégies d'irrigation testées sur le site B.

3. Croissance foliaire, transpiration et rendement de la culture

3.1. Evolution de FTSW dans les différentes stratégies et impact sur la croissance foliaire

La comparaison de l'évolution de FTSW dans les différents situations étudiées montre les même tendances que celles observées sur les stocks et les potentiels hydriques (figure V. 7). Les stratégies I50, BAS et SEC présentent des dynamiques de FTSW similaires à celles des site B et site A. Après les premières irrigations du début du cycle, les valeurs de FTSW sont élevées, au-dessus de 0.8 y compris pour la stratégie SEC. Ensuite, FTSW a tendance à diminuer plus ou moins vite selon les stratégies, avec une évolution en dents de scie due aux irrigations. La stratégie SEC donne le déficit hydrique le plus fort (faibles valeurs de FTSW) par rapport au site B. Les cinétiques de FTSW sont quasiment identiques pour I50 et BAS, et sont très proches de celle de SiteA. Dans la stratégie TENS, FTSW diminue de façon continue de 1 à 0.4 entre la plantation et le déclenchement de la première irrigation. Les apports d'eau successifs jusqu'à la récolte maintiennent ensuite FTSW entre 0.4 et 0.6.

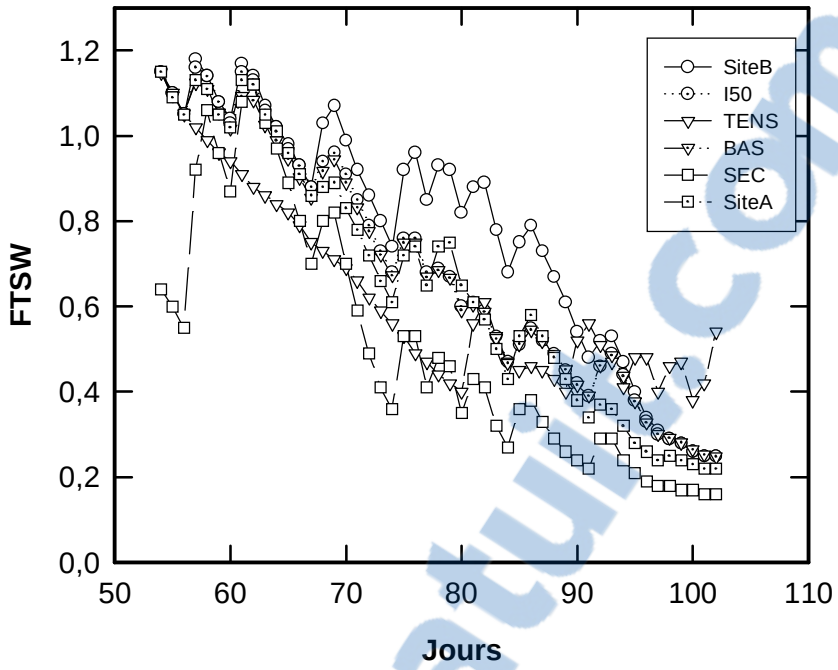


Figure V.7 : Evolution de la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW) calculée à partir des profondeurs d'enracinement et des teneurs en eau simulées pour les sites A et B de VIS-99, et les stratgies d'irrigation testées pour le site B.

Ces cinétiques de FTSW permettent d'évaluer qualitativement les risques de stress hydrique pour la croissance foliaire, donc le rendement, de la culture à partir des relations établies entre FTSW et les vitesses de production et d'expansion des feuilles (fig. IV.20 et IV.23). Ces relations montrent que la croissance foliaire commence a être affectée à partir de valeurs de FTSW entre 0.4 et 0.6. Nous avons donc calculé pour les différents situations le nombre de jours où FTSW<0.5 ainsi que la valeur moyenne de FTSW au cours du cycle pour caractériser les contraintes hydriques (tableau V.4).

Selon ce tableau, la stratégie SEC présente les risques de stress hydrique les plus élevés avec 29 jours en dessous du seuil de FTSW de 0.5, soit plus de la moitié du cycle, et une valeur moyenne de FTSW de 0.51. La situation de référence, SiteB, montre également une petite période de stress de 10 jours mais elle est située en fin de cycle et a donc peu d'effet sur la croissance foliaire (fig. V.6). La durée de la contrainte est intermédiaire entre ces deux extrêmes pour les stratégies I50, BAS, TENS et le site A. La stratégie TENS se distingue des autres par le début de la phase de stress qui commence 12 jours plus tôt (fig. V.6).

Rapport-Gratuit.com

Tableau V. 4 : Caractérisation des contraintes hydriques dans les différentes stratégies : valeur moyenne de FTSW sur le cycle, et nombre de jours au cours desquels FTSW est inférieur au seuil de stress de 0.5.

Stratégies	FTSW moyenne	nombre de jours avec FTSW<0.5
SiteB	0.78	10
I50	0.70	16
BAS	0.69	16
TENS	0.63	20
SEC	0.51	29
SiteA	0.67	17

3.2. Impact sur la transpiration

A partir des valeurs de FTSW et de transpiration potentielle (Tpot) simulées pour chaque situation, nous avons calculé la transpiration réelle (Tr) dans ces situations en utilisant la relation de la figure V.2 entre FTSW et le taux relatif de transpiration (=Tréel/Tpot) établie dans nos essais sur des plantes en pots. En flux cumulé à la récolte, l'écart entre Tpot et Tréel varie de 15mm pour SiteB à 36mm pour la stratégie SEC, alors que les différences simulées par PASTIS ne dépassent pas 2mm (tableau V. 5).

Les simulations avec PASTIS surestiment donc probablement la transpiration de la culture. Cela signifie que les stocks d'eau ou les flux à la limite inférieure du système sont sous-estimés, donc que, dans la réalité, le drainage est peut être plus fort et les stress hydriques moins importants. Il est difficile d'évaluer l'impact de ces différences de taux de transpiration sur le bilan hydrique sans avoir recours à de nouvelles simulations. On peut toutefois estimer que les flux bruts d'eau et d'azote sont correctement simulés et que les remontées capillaires sont certainement surestimées. En effet, dans toutes les situations, on constate que les réductions importantes de Tréel par rapport à Tpot interviennent en fin de cycle alors que la période de drainage est quasiment terminée (figure V. 8, tableau V.5). Par contre, les remontées capillaires doivent être plus faibles puisque les prélèvements d'eau de la culture en fin de cycle sont surestimés. Si les plantes prélèvent moins d'eau dans le sol, le dessèchement du sol sera moins prononcé ce qui va réduire le gradient de potentiel hydrique et les flux ascendants vers la zone racinaire. Dans ces conditions, la teneur en eau du sol va être plus élevée, notamment dans la zone racinaire, et les stress hydriques seront donc moins importants.

Pour les situations SiteB, SiteA, I50 et BAS, les période de stress sont assez courtes et situées en fin de cycle. Ces modifications de FTSW vont avoir peu d'impact sur le fonctionnement de la culture. Elles risquent de peser plus de poids dans les stratégies TENS et surtout SEC dans lesquelles les stress sont plus précoces.

Tableau V.5 : Transpiration réelle calculée pour chaque stratégie à partir de la relation entre FTSW et le taux de transpiration relatif, et comparaison des dates des périodes de drainage et de stress pour la tranpiration

Stratégies	Transpiration réelle (mm)	Début de la période de stress pour la transpiration (jour)	Fin de la période de drainage (jour)
SiteB	84	90	94
I50	81	83	78
BAS	81	83	78
TENS	86	75	70
SEC	62	71	79
SiteA	76	83	82

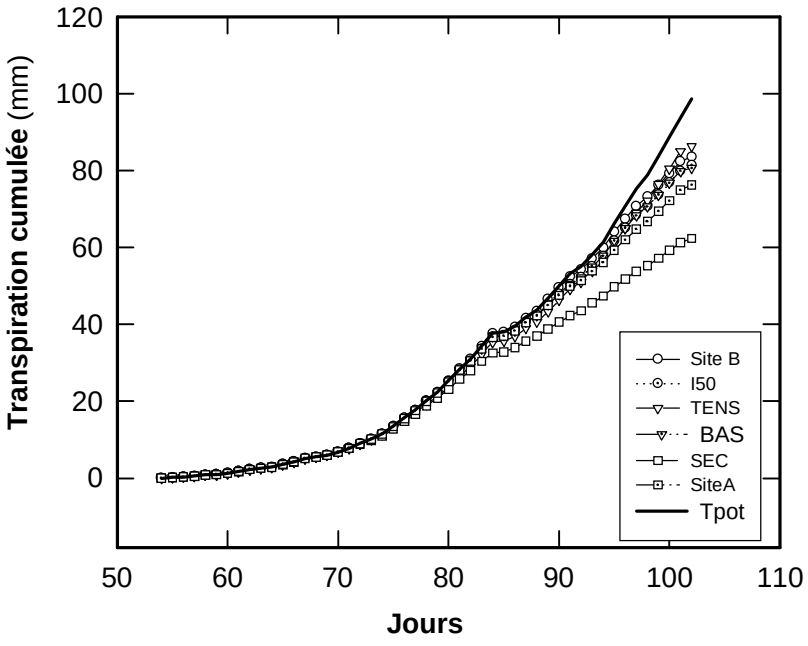


Figure V.8 : Evolution de la transpiration potentielle cumulée simulée par PASTIS et des transpirations réelles cumulées estimées à partir des valeurs de FTSW calculées avec les données des simulations effectuées avec PASTIS pour les sites A et B de VIS-99, et les stratégies d'irrigation testées pour le site B.

3.3. Impact sur le rendement

Le tableau V.6 donne les poids frais (Pf) et les surfaces foliaire (SFp) par plante calculées à partir du modèle de croissance foliaire et des cinétiques de FTSW présentées en 3.1. Pf et SFp

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

ont été réduits dans toutes les stratégies testées par rapport à la situation de référence SiteB. Le poids frais calculé dans ce cas est très proche de celui mesuré (628 g/plante). Il en est de même pour le site A (523 g/plante simulé contre 546 g/plante mesuré). Ce résultat démontre la validité du calage du modèle dans une situation avec un léger stress hydrique en fin de cycle.

Les stratégies I50 et BAS permettent d'obtenir quasiment les même rendement autour de 500 g/plante. Ces niveaux de rendement, bien que 17% plus faible par rapport à SiteB, sont tout à fait acceptables pour des cultures récoltées en avril. La stratégie TENS donne un rendement légèrement plus faible (450 g/plante) mais également dans la gamme de poids commercialisable. Par contre, Pf atteint seulement 221 g/plante dans la stratégie SEC en deçà du calibre minimum commercialisé de 350 g/plante environ (CTIFL, 1998).

Tableau V. 6 : Poids frais et surface foliaire par plante à la récolte simulés pour chaque stratégie

Stratégie		Pf (g/plante)	SFp (cm^2)
Site B	**simulé**	616	11197
	mesuré	628	11864
I50		512	9301
BAS		508	9236
SEC		221	4010
TEN		450	8173
Site A	**simulé**	523	9512
	mesuré	546	10298

4. Discussion

Le couplage d'un modèle de bilan hydrique (PASTIS) et d'un modèle de prévision du rendement d'une culture de laitue nous a permis d'évaluer 4 stratégies alternatives d'irrigation, par rapport à la stratégie appliquée par l'agriculteur, pour une situation préalablement étudiée dans la phase de diagnostic (chap. I) et sur laquelle les modèles ont été calés (chap. III et IV). Les simulations pour le site A de cette situation peuvent être considérées comme une validation du modèle puisque la stratégie d'irrigation sur ce site a été, par accident, proche d'une de celles que nous voulions tester (I50).

Dans le travail présenté, le couplage des 2 modèles est indirect et se fait par une variable intermédiaire d'état hydrique du sol, la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW), calculée à partir des simulations du bilan hydrique et fournie en entrée du modèle de prévision du

rendement (fig. V.1). Comme nous l'avons montré dans le chapitre V, cette variable permet de caractériser et de quantifier l'impact des contraintes hydriques subies par les plantes sur la croissance foliaire. Dans ce chapitre, nous avons également utilisé cette variable pour évaluer l'impact des stratégies d'irrigation sur la transpiration de la culture. En effet, dans les précédentes utilisations de PASTIS pour simuler le bilan hydrique d'une culture de laitues, la fonction régulant la transpiration en fonction de l'état hydrique du sol n'a pas fait l'objet de paramétrage spécifique (Lafolie et al., 1997 ; Leenhardt et al., 1998 ; De Tourdonnet, 1998). Les auteurs considéraient à chaque fois que l'état hydrique du sol était en permanence, ou presque, non limitant pour la plante. La même hypothèse est faite par Gallardo et al (1996) et Heinen (1997) dans leurs travaux sur la modélisation du bilan hydrique d'une culture de laitues. Cette hypothèse peut être considérée comme valable pour simuler le bilan hydrique de cultures de laitues irriguées selon les pratiques des agriculteurs, qui consistent à maintenir le sol à une humidité proche de la capacité au champ comme nous l'avons montré dans le chapitre I. Elle ne l'est plus dès lors que l'on veut évaluer des stratégies d'irrigation visant à limiter le drainage (Musharrafieh et al, 1995).

La relation utilisée pour calculer le rapport Tréel/Tpot en fonction de FTSW a été établie à partir des données des essais SER-3 et SER-2. Cette relation présente une allure typique de la réponse de la transpiration et des échanges gazeux à l'état hydrique du sol (Sinclair et Ludlow, 1986 ; Sadras et Milroy, 1996 ; Lacape et al., 1998). Nos résultats montrent que PASTIS surestime la consommation en eau de la culture, de 15 à 36mm selon les situations, y compris pour la situation de référence (site B), par rapport au calcul réalisé en tenant compte de FTSW. On peut estimer que cette erreur n'affecte pas les valeurs de drainage brut simulé car les réductions de transpiration interviennent après la fin de la période de drainage. Elle conduit par contre à surestimer les remontées capillaires donc à sous estimer le drainage net et certainement à amplifier les contraintes hydriques, notamment dans la stratégie SEC dans laquelle le volume des remontées capillaires est le plus élevé. Dans les autres stratégies, la réduction de Tréel est quasiment équivalent à celle observée pour SiteB. Dans ces situations, on peut donc estimer que l'erreur sur les variables de sortie des modèles servant à l'évaluation est identique et ne change donc pas leur comparaison. Il est malgré tout nécessaire d'envisager d'améliorer PASTIS pour que le modèle rende mieux compte de la régulation de la transpiration en fonction de l'état hydrique du sol pour une culture de laitues. L'utilisation de la relation de la figure V.2 devrait y contribuer.

Du point de vue des résultats, les simulations effectuées montrent que les stratégies testées ont permis de réduire les pertes en eau et en azote par rapport à la situation de référence représentée par le site B, mais ont également entraîné une diminution du poids frais des plantes. La réduction du drainage a été obtenue soit par une diminution des doses d'irrigation mesurées sur le siteB (stratégies I50 et BAS), soit en modifiant la dates des apports en fonction de l'état hydrique du sol (stratégie TENS), soit en modifiant les conditions initiales de teneur en eau du sol (stratégie SEC). Les deux premiers types de stratégies (réduction des doses et pilotage tensiométrique) sont couramment étudiés dans les travaux portant sur l'évaluation de l'impact des pratiques d'irrigation sur les pertes en eau et en azote sous une culture (Thompson et Doerge, 1996 ; Leenhardt et al., 1997 ; De Tourdonnet, 1998 ; Hack_ten Broeke, 2001). La diminution des doses permet de limiter le drainage en début de cycle et favorise les remontées capillaires avant la récolte, tout en maintenant une fréquence élevée après la plantation pour favoriser l'humidification de la motte et éviter une augmentation du déficit de pression de vapeur saturante préjudiciable pour la croissance foliaire (Tibbits et Bottenberg, 1976). Le pilotage de l'irrigation en fonction de l'état hydrique du sol modifie complètement le calendrier des apports (Leenhardt et al., 1997). Dans la stratégie TENS, les irrigations sont localisées en fin de cycle alors qu'elles sont essentiellement pratiquées en début de cycle par l'agriculteur. Dans cette situation, on observe toujours des flux drainants après la plantation alors qu'aucun apport d'eau est réalisé. Ce drainage est en fait lié aux irrigations effectuées avant la plantation pour assurer le plein en eau du sol. La stratégie SEC montre que des conditions initiales plus sèches correspondant à un plein en eau incomplet permet de réduire de 40% le drainage sans modifier les apports d'eau en cours de cycle.

Les pertes de poids frais (Pf) observées pour toutes les stratégies sont liées à un état hydrique du sol plus sec dans la zone racinaire par rapport au site B, comme le montre l'évolution des potentiels hydriques ($\psi_{0\text{-}30}$) et de FTSW sur la couche 0-30cm, c'est à dire l'horizon prospecté par les racines (fig. V.5b et V.6). La comparaison des cinétiques au cours du temps de FTSW et $\psi_{0\text{-}30}$ montre par ailleurs que la croissance foliaire de la laitue, donc son rendement, est affectée dans nos simulations dés que le potentiel hydrique atteint –20 à -30 kPa dans la zone racinaire. Ce seuil de stress hydrique pour la croissance foliaire est proche du seuil de –30 kPa utilisé dans le diagnostic initial (chap I §1.2.3). Cela confirme la grande sensibilité du rendement de la laitue à l'état hydrique du sol. Le meilleur rendement est obtenu avec un sol proche de la capacité au champ, conduit par l'agriculteur, comme cela a fréquemment été

montré pour des cultures de laitues (Majmudar et Hudson, 1957 ; Sale, 1966 ; Sammis et al., 1988 ; Gallardo et al., 1996, Sutton et Merit, 1993 ; Thompson et Doerge, 1996). Malgré les pertes de Pf par rapport à la conduite de l'agriculteur, les plantes dans les stratégies I50, BAS et TENS conservent un calibre supérieur au minimum commercialisable ce qui n'est pas le cas dans la stratégie SEC. Cette stratégie n'est pas viable pour l'agriculteur.

La stratégie TENS permet de réduire de 2/3 les pertes d'eau et d'azote nitrique tout en assurant un niveau de production acceptable malgré près de 30% de pertes de poids frais des plantes. L'effet de cette stratégie sur le rendement est toutefois ma simulé par le modèle e croissance foliaire. En effet, dans la réalité, l'état hydrique du sol n'est pas le seul critère de déclenchement des irrigations par les agriculteurs. En début et en fin de cycle, c'est l'état de la culture qui détermine les apports d'eau. Nous avons vu dans le chapitre précédent que la phase dite de « reprise des plants » suivant la plantation constitue une période sensible au cours de laquelle la plante subit un stress important (Mac Kee, 1981). Il est important pendant cette période d'éviter tout autre stress (Aloni et al , 1991). C'est ce que font les agriculteurs en pratiquant des irrigations très fréquentes après la plantation. L'absence d'irrigation en début de cycle dans la stratégie TENS va donc probablement limiter la croissance voire compromettre la reprise. Le rendement est donc probablement surestimé pour cette stratégie car le modèle ne rend pas compte de l'effet de l'état hydrique de la motte ou du VPD qui peuvent être limitant au cours de cette période de reprise. On constate par ailleurs dans la situation de référence (essai VIS-99), ainsi que dans certaines des situations étudiée dans les précédents chapitres (essai VIS-00, situation S4), que les apports d'eau sont stoppés quelques jours avant la plantation entraînant un dessèchement rapide du sol au delà des seuils de stress pour la croissance foliaire. Selon les agriculteurs, cette pratique permet pour des plantes ayant atteint un poids commercialisable de ralentir la croissance de la culture pour éviter le processus de montaison (allongement de la tige) néfaste pour la qualité des produits. Ces processus ne sont également pas pris n compte dans le modèle. La stratégie TENS telle qu'elle a été définie et simulée ne tient pas compte de ces pratiques et va à l'encontre même puisque aucun apport n'est réalisé en début de cycle et leur fréquence augmente à l'approche de la récolte. Il conviendrait donc de tester ce type de stratégie en intégrant ces contraintes et ces restrictions sur les apports d'eau en début et en fin de culture. Les stratégies I50 et BAS sont plus faciles à mettre en œuvre car elles sont basées sur la stratégie de l'agriculteur en conservant la même fréquence d'apport mais en diminuant les doses d'irrigation. Elles permettent ainsi de réduire les pertes d'eau et d'azote de 47% pour I50 et 57% pour BAS avec une perte de poids frais acceptable de 18% (par rapport à la pratique de l'agriculteur). Pour

l'agriculteur, la maîtrise des doses d'irrigation est simple mais nécessite un minimum d'équipement de régulation des volumes (électrovanne et programmateur, vanne volumétrique).

La dernière étape de la démarche présentée dans la figure I.11 consiste à tester chez l'agriculteur les stratégies alternatives sélectionnées après l'étape de modélisation. L'objectif de cette étape est de valider ces stratégies en conditions de production et d'enclencher un processus itératif d'amélioration des pratiques selon une la démarche de « boucle de progrès » proposée par Meynard et al. (2002) pour la gestion de la fertilisation. Cette procédure a récemment été mise en place sur certaines parcelles de l'exploitation E1 (cf. chapitre I) en relation avec un conseiller technique intervenant dans la conception et le suivi des itinéraires techniques sur cette exploitation.

Chapitre VI

Conclusion générale

CHAPITRE VI

CONCLUSION GENERALE

Les travaux que nous avons mené s'inscrivent dans le cadre de l'élaboration d'une méthode d'évaluation pour le diagnostic-pronostic des risques de pollution nitrique et des pertes de rendement en parcelles agricoles pour des cultures intensives. Ils ont été centrés sur le cas de la gestion des irrigations en cultures de laitues sous abri froid mais la démarche présentée pourrait être appliquée à d'autres cultures irriguées et d'autres techniques culturales.

1. Bilan des travaux effectués

La démarche d'évaluation que nous proposons est basée sur le couplage d'outils de métrologie et de modèles dynamiques du système sol-plante utilisables en parcelles agricoles (figure VI.1). Par rapport à cette démarche, nos travaux ont porté sur l'élaboration de procédures de modélisation permettant de quantifier les pertes d'azote nitrique sous les racines par lixiviation et les pertes de poids frais d'une laitue en fonction de l'état hydrique du sol (étapes 2 et 3), puis sur le test de stratégies d'irrigation alternatives préalablement discutées avec l'agriculteur (étapes 4 et 5). Cette démarche est susceptible de renouveler les interactions entre les agriculteurs, leurs conseillers et les gestionnaires de l'eau car elle fournit des tableaux de bord constitués d'indicateurs permettant de partager un constat sur les pratiques de l'agriculteurs (étape 1) et de tester des stratégies compatibles avec les contraintes de l'agriculteur (étape 5) recherchant un compromis entre les risques de pertes de rendement et les risques de pollution de la nappe. La première étape de cette démarche (Chapitre I) consiste à établir un diagnostic qualitatif de la lixiviation du nitrate et des stress pour la culture à partir de mesures de potentiel hydrique du sol et de concentration en nitrate de la solution du sol effectuées avec des tensionics (Cuny et al., 1998 ; Gay et Wery, soumis). Cette approche a été développée et appliquée avant le travail de thèse dans le cadre d'une étude portant sur l'analyse des pratiques d'un petit groupe de producteurs légumiers sur la zone vulnérable de la Vistrenque. Les résultats de cette étude nous ont permis de définir les caractéristiques du système et des processus à modéliser qui ont ensuite orienté nos choix des modèles à utiliser pour évaluer les risques de pollution nitrique et les pertes de rendement pour des cultures de laitue sous abri.

Rapport-Gratuit.com

La procédure de **quantification des pertes d'azote nitrique par lixiviation** que nous avons développée consiste à combiner les mesures de concentration en nitrate sous les racines effectuées au cours du cycle pour le diagnostic initial avec un modèle de bilan hydrique d'une culture de laitue sous abri froid permettant de simuler les quantités d'eau drainées sous le système racinaire (chapitre III). La question que nous avons traitée était de déterminer quel type de modèle, entre un modèle mécaniste (PASTIS, Lafolie, 1991 ; De Tourdonnet, 1998) et un modèle analogique (STICS, Brisson et al., 1998), est le plus adapté pour simuler les flux d'eau sous les racines dans le contexte de cette démarche (parcelles agricoles, cultures irriguées). Nos résultats montrent que PASTIS restitue correctement les principaux termes du bilan hydrique d'une culture de laitue ainsi que la dynamique des flux d'eau sous la zone racinaire. Par contre STICS a tendance à sous estimer les stocks d'eau totaux et les teneurs en eau dans la zone racinaire dès que la consommation en eau de la culture devient supérieure aux apports. Ces écarts par rapport à la réalité s'expliquent par la non prise en compte dans STICS, contrairement à PASTIS, des phénomènes de remontées capillaires qui peuvent être quantitativement importants dans le bilan hydrique de certaines situations. STICS reproduit également mal l'évolution des flux d'eau sous les racines au cours du cycle mais simule malgré cela des quantités totales d'eau drainées sur le cycle proches de celles obtenues avec PASTIS. Compte tenu de sa simplicité de mise en œuvre, on peut donc envisager d'utiliser STICS pour compléter le diagnostic des risques de pollution nitrique en calculant la quantité totale d'eau drainée, qui est ensuite multipliée par la concentration moyenne en nitrate mesurée sur le cycle. Cette approche suppose cependant que la concentration en nitrate de l'eau drainée soit constante sur le cycle, ce qui était le cas dans la majorité des situations que nous avons étudiées. Cependant, l'utilisation de PASTIS apparaît préférable pour les situations dans lesquelles les remontées capillaires jouent un rôle important. La limite pratique à l'utilisation de ce modèle est évidemment le problème du paramétrage des propriétés hydrodynamiques du sol. Ce problème conduit généralement à ne pas utiliser ce type de modèle en parcelles agricoles, mais les données acquises à l'étape 1 pour ouvrir le dialogue avec l'agriculteur permettent de lever en partie ces contraintes. Nous avons vu dans le chapitre III qu'il est possible de caler ces paramètres sur les données observées de potentiel hydrique par modélisation inverse à partir d'une estimation de ces paramètres pour le sol considéré. La faisabilité et la validité d'une telle procédure dans le cadre de notre démarche d'évaluation reste toutefois encore à tester.

Pour **l'évaluation des pertes de rendement en fonction de l'état hydrique du sol**, nous avons élaboré un modèle de prévision du poids frais d'une laitue en fonction de la surface foliaire de la plante basé sur la modélisation de la croissance et du développement de chaque feuille en fonction de la température, du rayonnement et de l'état hydrique du sol (chapitre IV). Nous avons fait l'hypothèse que ce type de modèle était plus approprié qu'un modèle basé sur la simulation de l'indice foliaire de la plante pour rendre compte du type de contraintes hydriques (précoces, temporaires et modérées) susceptibles d'affecter le rendement d'une culture de laitue en conditions de production. Nous avons vu que ce modèle pouvait facilement être mis en œuvre en parcelles agricoles pour le diagnostic à posteriori des pertes de rendement à partir des données climatiques et de quelques observations sur la plante permettant de caler les principaux paramètres (durée de cycle, profils de surface foliaire initial et final, date de la pommaison). Là encore l'insertion de ce modèle dans une démarche de diagnostic permet de résoudre certains problèmes de paramétrage. On peut en effet ajuster certains paramètres sur des mesures sur la plante en conditions non limitantes, puisque c'est ainsi que les agriculteurs les conduisent en première approche (chapitre I). Les premiers tests montrent que le modèle reproduit bien la variabilité des rendements observés en conditions hydriques non limitantes selon la saison de production. Nous n'avons par contre pas pu évaluer le modèle en conditions hydriques non limitantes. Il reste donc à faire un important travail de validation du modèle sur des données indépendantes de celles ayant servi à sa construction, ainsi qu'une étude de sensibilité des variables de sorties aux paramètres du modèle. Il serait également intéressant de comparer les performances de ce modèle avec des modèles plus classiques de prévision du rendement basés sur la simulation directe de l'indice foliaire de la plante pour vérifier l'hypothèse que le formalisme feuille à feuille que nous avons employé possède un jeu de paramètres insensible aux stress précoces, temporaires et modérés.

Le couplage de PASTIS et du modèle de prévision du rendement nous a permis **de tester des stratégies d'irrigations alternatives** sur une situation sur laquelle ces deux modèles avaient été préalablement calés à partir des mesures effectuées en cours de culture (chapitre V). Les résultats des simulations montrent qu'une stratégie de réduction des doses d'eau sans modification de la fréquence des apports pratiqués par l'agriculteur permet de réduire de plus de la moitié les pertes brutes d'eau et d'azote tout en maintenant le rendement à un niveau acceptable par l'agriculteur. Le couplage informatique des deux modèles reste à réaliser pour

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

disposer d'un outil complet pour évaluer les risques de pollution nitrique et les pertes de rendement en fonction des pratiques d'irrigation.

L'utilisation des tensionics a été déterminante dans la mise en œuvre de cette démarche. Ces appareils permettent d'accéder aux variables d'état du sol indispensables pour la construction d'indicateurs d'évaluation (chapitre I) et pour l'ajustement des paramètres du modèle PASTIS (chapitre III), dans des conditions compatibles avec l'activité agricole et à un coût raisonnable. A ce titre il n'existait aucun autre appareillage permettant d'obtenir les mêmes variables dans les mêmes conditions. A partir de la bibliographie existante nous avons fait l'hypothèse que les tensionics permettaient de mesurer, dans nos conditions (sols peu desséchés), la teneur en nitrate de la solution drainante (pour le calcul de la lixiviation) et de la solution la plus proche du contenu rhizosphérique (pour l'indicateur de stress azoté). Le domaine de validité de cette hypothèse mériterait d'être explorée mais cette question sortait largement du cadre de cette thèse. En cas de rejet de l'hypothèse, ou de forte fréquence de situations hors de son domaine de validité, notre travail et la démarche mise au point garderaient cependant leur pertinence. Le caractère opérationnel de cette démarche serait cependant limité par la complexité et le coût des solutions alternatives. On pourrait en effet accéder aux mêmes variables en remplaçant les tensionics par des tensiomètres et des bougies poreuses implantées aux mêmes profondeurs.

2. Perspectives

2.1. Extension de la démarche proposée à la gestion de la fertilisation

Dans la définition de la problématique de notre travail, nous avons écarté l'utilisation de modèles de prévision de la dynamique de l'azote dans le système sol-plante. Une telle approche ne nous a pas paru indispensable dans l'immédiat pour évaluer et tester des pratiques d'irrigation. A partir des résultats de l'étude préliminaire (chapitre I), nous avons en effet estimé que l'état azoté du sol n'était pas limitant pour la croissance de laitue dans nos conditions, et que la gamme de variation des flux d'eau induite par les stratégies alternatives n'était pas suffisante pour limiter l'absorption de nitrate par les plantes.

La modélisation de l'azote apparaît toutefois nécessaire pour pouvoir évaluer et tester à la fois des stratégies alternatives d'irrigation et de fertilisation. Il serait alors possible d'agir sur les deux pratiques déterminants les flux d'azote nitrique sous les racines. Les travaux de De Tourdonnet (1998) avec PASTIS fournissent de nombreux éléments pour paramétrer un

modèle simulant la dynamique de l'azote dans le système sol-plante pour une culture de laitue. Certains points nécessitent cependant d'être approfondis par rapport à notre démarche et aux systèmes que nous avons étudiés. Il s'agit de la prévision de dynamique de minéralisation des engrais organiques qui sont à la base de la fertilisation pratiquée dans toutes les situations que nous avons étudiées (chapitre I). La prise en compte de ces engrais nécessite d'utiliser un modèle simulant le cycle de l'azote et du carbone dans le sol plus complexe que celui utilisé par De Tourdonnet (1998). Ce dernier a en effet étudié des systèmes sans apport de matière organique autres que les résidus de culture- qui représentent des quantités de biomasse faible. Cette complexité s'accompagne d'une augmentation du nombre de paramètres du sol et de l'engrais à déterminer ce qui limite les possibilités d'utilisation d'un tel modèle en parcelles agricoles. Comme pour la modélisation du bilan hydrique avec PASTIS, il est possible d'envisager que les mesures de concentration en nitrate de la solution du sol effectuées pour le diagnostic qualitatif initial puissent servir pour estimer ces paramètres par modélisation inverse (Schmied et al., 2000).

Il faudrait également intégrer dans le modèle l'effet des stress azotés sur le rendement ce qui ne sera pas facile compte-tenu du caractère précoce, temporaire et modéré des stress compatibles avec une production de laitue. Le formalisme utilisé pour la simulation de l'effet des stress hydriques pourrait être une voie pour l'élaboration d'un tel modèle, à condition d'identifier une variable de caractérisation du stress azoté subi par la plante pouvant jouer le même rôle que la FTSW dans le cas de l'eau (chapitre IV).

Dans le modèle de De Tourdonnet, l'effet d'un stress azoté sur le rendement est modélisé par une relation statistique entre le poids sec final et un indice de carence azotée égal au rapport entre la disponibilité en azote dans le sol et les besoins de la plante. Ce type de relation a souvent un domaine de validité restreint qui rend difficile l'utilisation d'un seul jeu de paramètres pour les différentes parcelles d'un réseau. On peut de plus émettre l'hypothèse ,comme pour le stress hydrique, que ce modèle n'est pas capable de rendre compte de contraintes précoces et d'intensité modérées qui vont avoir des conséquences importantes sur le rendement (Burns and Miles, 1992) alors qu'elles interviennent à un moment où les stocks d'azote du sol sont élevés en comparaison des besoins de la plante évalués par la biomasse. Il serait donc intéressant d'étudier la possibilité de caractériser, au moins en début de cycle, le stress azoté à partir de la concentration en nitrate de la zone racinaire, pour traduire, comme pour l'eau, la probable capacité de la plante à ajuster précocement la croissance de ses feuilles à la richesse en azote du milieu qu'elle perçoit avec ses racines.

2.2. Mise en œuvre de la démarche chez les agriculteurs

La démarche complète de diagnostic-pronostic des pratiques d'irrigation n'a pas encore été appliquée chez des agriculteurs en dehors des essais mis en place dans le cadre de nos travaux. Depuis 2 ans cependant, nous avons mis en place une procédure d'évaluation et de modification des pratiques sur l'exploitation E1 présentée dans le chapitre I et qui est sous la triple contrainte du cahier des charges de l'Agriculture Biologique (uniquement des engrais organiques), des marchés nord-européens (faible teneur en nitrate des laitues) et de la Société Perrier-Vittel France (eau drainée sous la culture avec une concentration moyenne inférieure à 20 mg NO_3/l d). En liaison avec le chef de culture et un conseiller technique intervenant sur l'exploitation nous avons essayé d'intégrer dans la gestion des cultures les résultats du diagnostic de lixiviation du nitrate et des stress pour les cultures conduit avec les tensionics sur 5 parcelles guide correspondant aux grands types de situations de l'exploitation (combinaisons sol-espèce-saison de culture). Cette procédure, qui consiste à analyser collectivement en fin de culture l'évolution des indicateurs de pollution et de stress en fonction des interventions culturales pratiquées, a déjà permis d'engager des améliorations dans le mode de raisonnement des irrigations (prise en compte du stock d'eau avant la plantation avant de réaliser « le plein en eau ») et de la fertilisation (recherche d'engrais organiques à minéralisation plus lente pour éviter les stress azotés en fin de cycle). L'utilisation des modèles permettraient certainement, pour les cultures de laitue dans un premier temps, d'accélérer ce processus de modification des pratiques et d'enrichir le partage de point de vue des différents acteurs (agriculteur, conseiller, gestionnaire de l'eau) sur les performances et les impacts du système de culture.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Addiscott, T.M. 1977. A simple computer model for leaching in structured soils. *Journal of Soil Science*. 28, 554-563.

Addiscott, T.M. and Wagenet, R.J. 1985. Concepts of solute leaching in soils : a review of modelling approaches. *Journal of Soil Science*. 36, 411-424.

Addiscott, T.M. 1990. Measurements of nitrate leaching: a review of methods. *in Nitrates, Agriculture, Eau. INRA eds*, 157-168.

Addiscott, T.M. 1996. Measuring and modelling nitrate leaching : parallel problems. *Plant and Soil.* 181, 1-6.

AFNOR. 1999. Qualité des sols. Prélèvement et conservation des échantillons de sol en vue de la détermination de l'azote minéral sur sol frais. *In, AFNOR,* 193-200

Aloni, B., Jaleh Daie and Leah Karni. 1991. Water relations, photosynthesis and assimilate partitioning in leaves of pepper transplants : effect of water stress after transplanting. *Journal of Horticultural Science.* 66, 75-80.

Alt, D., Strüwe, S. 1982. Decline of the nitrate content of lettuce (Lactuve sativa, var. capitata L.) by means of monitoring the nitrogen content of the nutrient solution in hydroponic systems. *in: Plant nutrition. Proceedings of the 9th International Plant Nutrition colloquum, Warwick.*1, 17-21

Amir, J., and Sinclair, T.R. 1991. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. *Field Crop Research*. 28, 59-69.

Asare, D.K., Sammis, T.W., Smeal, D., Zhang, H., Sitze, D.O. 2001. Modeling an irrigation management strategy for minimizing the leaching of atrazine. *Agriculture Water Management*. 48, 225-238.

Aubry, C., Loyce, C., Meynard, J.M., Chatelin, M.H., Rellier, J.P. et Verjux, N. 1997. Outils et méthodes pour la conception et l'évaluation d'itinéraires techniques. *In Aide à la décision et choix de stratégies dans les entreprises agricoles. INRA-ESR ed.*111-126.

Ballif , J.L.et Muller, J.C.1990. Les bougies poreuses et les lysimètres. *Perspectives Agricoles.*144, 72-81.

Bar-Yosef, B., and Sagiv B. 1982a. Response of tomatoes to N and water applied via a trickle irrigation system. I. Nitrogen. *Agronomy Journal*, 74: 633-637.

Bar-Yosef, B., and Sagiv B. 1982b. Response of tomatoes to N and water applied via a trickle irrigation system. II. Water. *Agronomy Journal*, 74: 637-639.

Begg, J.E.and Tunre, N.C. 1976. Crop water deficits. *Adavances in agronomy*. 28 : 161-217.

Bel, F., Lacroix A., Mollard A. et Regairaz, E. 1999. Réduire la polltuion azotée : les choix préalables d'une politque publique. *Courrier de l'environnement de l'INRA.* 36.

Belaygue, C., Wery J., Cowan A.A. and Tardieu F. 1996. Contribution of leaf expansion, rate of leaf appearance and stolon branching to growth of plant leaf area under water deficit in white clover. *Crop Science.* 36, 1240-1246.

Bellon, S., Lescourret F., Calmet J.P. 2001. Characterisation of aplle orchard management systems in a French Mediterranean Vulnerable Zone. *Agronomie.* 21, 203-213.

Ben Haj Salah, H., Tardieu, F. 1996. Quantitative analysis of the combined effects of temperature, evaporative demand and light on leaf elongation rate in well-watered field and laboratory-grown maize plants. *Journal of Experimental Botany*. 47, 1689-1698.

Benoît M. 1992. Un indicateur des risques de pollution azotée nommé "BASCULE" (Balance Azotée Spatialisée des systèmes de CULture de l'Exploitation). *Fourrages*. 129, 95-110.

Benoît M., Sainto, D., Gaury, F. 1995. Mesures en parcelles d'agriculteur des pertes en nitrate. Variabilité sous divers systèmes de culture et modélisation de la qualité de l'eau. *Comptes Rendus de l'Académie d' Agriculture Française*. 81, 175-188.

Bensink, J. 1971. On morphogenesis of lettuce leaves in relation to light and temperature. *Mededelingen landbouwhogeschool Wageningen*.71 (15), 1-91.

Bergstrom, L., Johnsson, H., and Torstensson, G.1991. Simulation of soil nitrogen dynamics using the SOILN model. *Fertilizer Research*.27, 181-188.

Bertuzzi, P., Bruckler, L., Gabilly, Y. and Gaudu, J.C. 1987. Calibration, field testing, and error analysis of a gamma-ray probe for in situ measurement of dry bulk density. *Soil Science*. 144, 425-436.

Bertuzzi P., Musset J., Vanier S., Penel J.P., Puig J.M., Couren M. 1998. Recherche des nitrates dans les eaux de la nappe du Comtat Venaissin. *PHM Revue Horticole*. 391, 27-28.

Bertuzzi, P., Raynal-Lacroix, C., Gay, F., de Cockborne, A.M., Abarza, E., Bardet, A., Bressoud, F., Dumoulin, J., Mounier, A. 2002. Savoir évaluer la minéralisation nette de l'azote au champ. *Infos CTIFL*.183, 40-45 ;

Bierhuizen, J.F., Ebbens, J.L. and Koomen N.C.A. 1973. Effects of temperature and radiation on lettuce growing. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 21, 110-116.

Bissuel-Belaygue C., Cowan A.A., Athole H.M., Wery J. 2002a. Reproductive development of white clover (Trifolium repens L.) is not impaired by a moderate water deficit that reduces vegetative growth I. Inflorescence, floret and ovule production. *Crop Science*, 42:406-414

Bissuel-Belaygue C., Cowan A.A., Athole H.M., Wery J. 2002b. Reproductive development of white clover (Trifolium repens L.) is not impaired by a moderate water deficit that reduces vegetative growth II. Fertilization efficiency and seed set. *Crop Science*, 42:414-422

Black, C.A. 1965. Methods of soil analysis chemical and microbiological properties.*American Society of Agronomy, Inc publisher*.

Bockstaller K., Girardin P, van der Werf H.M.G. 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *European Journal of Agronomy*. 7, 261-270.

Bouma, J., Wopereis, M.C.S., Wosten, J.H.M. and Stein, A. 1993. Soil data for crop-soil models. *in Systems Approaches for Agricultural Development. Penning de Vries et al. eds*, 207-220.

Bressoud, F. 2002. Fertirrigation et hétérogénéité des nitrates en système de culture salade-tomate. *in Journées annuelles du FLHOR, session Agronomie. CIRAD*.

Brisson, N., Seguin, B. and Bertuzzi, P. 1992. Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *Agricultural and Forest Meteorology*. 59, 267-287.

Brisson, N., Ozier-Laffontaine, H., Dorel, M. 1997. Effects of soil management and water regime on banana growth between planting and flowering. Simulation using the STICS model. *Acta Horticulturae*. 490, 229-238.

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Baret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet P., Meynard J.M., Delécolle R. 1998. STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.

Brisson, N. 1998. Ananalytical solution for the estimation of the critical available soil water fraction for a single layer water balance model under growing crops. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2, 221-231.

Brisson, N. et Mary, B. 2002. STICS, version 5.0. Notice, concepts et formalismes.72p.

Bruckler L., De Cockborne A.M., Renault P., Claudot B. 1997. Spatial and temporal variability of nitrate irrigated salad crops. *Irrigation Science*, 17, 53-61.

Bruno J.F., Papy F. 1992. Mieux gérer la sole de laitue dans la vallée de la Seine. *Cahiers agriculture*, 1:95-100.

Burns I.G., 1974. A model for predicting the redistribution of salts applied to fallow soils after excess rainfall or evaporation. *Journal of. Soil Science*. 25, 165-178.

Burns, I.G. 1980. Influence of the spatial distribution of nitrate on the uptake of N by plants : a review and a model for rooting depth. *Journal of. Soil Science*. 31, 155-173.

Burns, I.G. 1991. Short and long term effects of change in the spatial distribution of nitrate in the root zone on N uptake, growth and root development of young lettuce plants. *Plant, Cell and Environment*. 14,21-33.

Burns I.G., Miles P.D. 1992. Long-term effects on growth and development of short periods of N deficiency during the seedlings stage of lettuce. *Proceedings of th 2nd ESA congress*, 40-41.

Cabelguenne, M. and Debaeke, P. 1998. Experimental determination and modelling of the soil water extraction capacities of crops maize, sunflower, sota bean, sorghum and wheat. *Plant and Soil*. 202, 175-192.

Cabelguenne M., Debaeke P., Bouniols, A. 1999. EPICphase, a version of the EPIC model simulating the effect of water and nitrogen stress on biomass and yield, taking account of delevopmental stages: validation on maize, sunflower, sorghum, soybean and winter wheat. *Agricultural Systems*, 60:175-196

Cavero, J.,Farre, I., Debaeke, P., and Faci, J.M. 2000. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agronomy Journal*. 679-690.

Cellier, P., Germon, J.C., Henault, C., Genermont, S. 1997. Les émissions d'ammoniac et d'oxydes d'azote par les sols cultivés : mécanismes de production et quantification des flux. *In Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. Lemaire, G. et Nicolardot, B. (eds)*. 25-38.

Cellule Prospective et Stratégie, 1999. Agriculture, monde rural et environnement : qualité oblige. *La documentation française*. 599p.

Childs, S.W., Gilley, J.R., Splinter, W.E. 1977. A simplified model of corn growth under moisture stress. *Transactions of the ASAE*. 858-865.

Cosserat M.,Decau J., Patcq-Croutzet H., Pujol B.1990. Irrigation fertilisante en sol sablo-caillouteux. Conséquences sur la production et la pollution par les nitrates. *in Nitrates, agriculture, eau. INRA eds*, pp 257-262

Crawford N.M., 1995. Nitrate : Nutrient and Signal for plant growth. *The Plant Cell*, 7, 859-868

CTIFL. 1997. Monographie Laitues.*CTIFL, PARIS*. 281 p.

CTIFL. 1999. Azote, cultures, légumières et fraisier.*CTIFL, PARIS*. 223 p.

Cuny H., Wery J. and Gauffres F.1998. Diagnosis of nitrate leaching risk in farmers fields with measurement of soil water potentiel and nitrate content of the soil solution. *Agronomie*, 18, 521-535.

Dale, J.E. 1964. Leaf growth in Phaseolus vulgaris. I. Growth of the first pair of leaves under constant conditions. *Annals of Botany*. 28, 579-589.

Dapoigny, L. 1997. Accumulation du nitrate chez la laitue (Lactuce sativa L.). *Thèse INA P-G, Paris*, 170 P.

De Cockborne A.M., Bruckler L., Auge G. 1995. Estimation des bilans hydriques et azotés : le cas d'une petite région maraîchère méditerranéenne. *Sécheresse*, 6:189-200

De Costa, W.A.J.M, Dennet M.D., Ratnaweera, U, Nyalemegbe, 1997. Effects of different water regimes on field grown determinate and indeterminate faba bean. I. Canopy growth and biomass production.*Field Crop Research.* 49, 83-93.

De Tourdonnet, S. 1998. Maîtrise de la qualité et de la pollution nitrique en culture de laitues sous abri plastique : diagnostic et modélisation des systèmes de culture. *Thèse INA P-G, Paris*, 192 p.

De Tourdonnet, S., 1999. Control of quality and N pollution in greenhouse lettuce production : a modelling study. *Acta Horticulturae*, 507:263-270

De Tourdonnet, S., Meynard J.M., Lafolie F., Estrade J.R., Lagier J., Sebillote M. 2001. Non uniformity of environmental conditions in greenhouse lettuce production increases the risk of N pollution and lower product quality. *Agronomie.* 21, 297-309.

De Villele, O. 1989. Problème de bioclimatologie : estimation des besoins en eau des cultures de serre. *In Colloque sur les méthodes d'irrigation améliorées pour préserver et protéger les ressources en eau*. pp. 25

De Willigen, P.1991. Nitrigen turnover in the soil-crop-system; comparison of fourteen simulation models. *Fertilizer Research*. 27, 141-149

Demyttenaere P., Hofman G., Ronse D., Van Ruymbeke. 1990. Excessive soil mineral-N at harvest of field grown vegetables : impact on the nitrate pollution of ground and surface water. *in Nitrates, agriculture, eau. INRA eds*, pp 239-244

DIREN L.R, DDAF30. 1998. Programmes d'actions en vue de la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole. 19p.

Dosio,G. 2002. Analyse conjointe des développements végétatif et reproducteur chez des plantes de tournesol soumises à des déficits précoces en eau et en lumière. *Thèse ENSA Montpellier*.66 p.

Dullforce, M. and Garcia, J. 1974. Water relations of lettuce crops under glass.*Acta Horticulturae*. 35, 95-99.

Ersahim, S. Karaman, M.R. 2001. Estimating potentiel nitrate leaching in nitrogen fertilized and irrigated tomato using the computer model NLEAP. *Agriculture Water Management.* 51, 1-12.

Fabeiro, C., Martin de Santa Olalla, F., de Juan, J.A. 2002. Production of muskmelon (Cucumis melo L.) under controlled deficits irrigation in a semi-arid climate. *Agriculture Water Management.* 54, 93-105.

FAO, 1996. Control of water pollution from agriculture. *Irrigation and drainage paper 55, FAO, Rome*.

Feddes, R.A., Kowalik, P.J. and Zaradny H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. *Halsted press, John Wiley & Sons (Eds), New York.*188p.

Feraud, J., Bressoud, F., Benech, C. et Marchall, J.P. 1997. Eléments de diagnostic sur la pollution nitratée des aquifères du Roussillon. *Chambre d'Agriculture- BRGM, Perpignan.*

Findeling, A. 2001. Etude et modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique. *Thèse ENGREF, Montpellier*. 357 p.

Franck, N. 2001. Utilisation de la modélisation 3D pour analyser l'effet du rayonnement incident sur la mise en place de la surface foliaire de 3 génotypes d'Arabidopsis thaliana. *DEA Développement et adaptation des plantes. Université de Montpellier 2, Université de Perpignan, , ENSA.M. Montpellier*. 22 p.

Franko, U., and Mirschell, W. 2001. Integration of a crop growth model with a model of soil dynamics. *Agronomy Journal.* 93, 666-670.

Freixinos, E. Raynal-Lacroix, C. 1999. Tests rapides et analyses de laboratoire. Bilan d'une étude comparative. *Ctifl Infos*. 156, 32-35.

Fujisaka, S. 1991. A set of farmed-based diagnostic methods for setting post 'green revolution' rice research priorities. *Agricultural Systems*. 36, 191-206.

Gabrielle B., Menasseri S. and Houot S. 1995. Analysis and field evaluation of the Ceres Models water balance components. *Soil Science Society of America Journal*. 59, 1403-1412.

Gallardo, M., Snyder, R.L., Schulbach, K. and Jackson, L.E. 1996a. Crop growth and water use model for lettuce. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 122, 354-359.

Gallardo, M., Jackson, L.E., Schulbach, K., Snyder, R.L., Thompson, R.B., Wyland, L.J. 1996b. Production and water use in letucces under variable water supply. *Irrigation Science*. 16, 125-137.

Garnier, P., Néel, C., Mary, B. et Lafolie, F. 2001. Evaluation of a nitrogen transport and transformation model in a bare soil. *European Journal of Soil Science*. 52, 253-268.

Gay, F.,Wery, J.1998. Diagnostic agro-environnmental a la parcelle en cultures légumières dans la zone de la Vistrenque. *Centre de Transfert en Production Végétale et Environnement, Agro Montpellier*.22p.

Germon, J.C., et Couton, Y. 1999. La dénitrification dans les sols : régulation de son fonctionnement et applications à la dépollution. *Courrier de l'environnement de l'INRA*. 38, 67-74.

Girardin, P., Bockstaller, C., Van der Werf, H. 1999. Indicators : tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. *Journal of Sustainable Agriculture*. 13, 5-21.

Gouldin K. 2000. Nitrate leaching from arable and horticultural land. *Soil Use Management*, 16:145-151.

Granier, C. 1998. Analyse de l'expansion des tissus et des divisions cellulaires dans les feuilles de tournesol. Effest de la température, du rayonnement et du déficit hydrique. *Thèse, ENSA Montpellier*. 111 p.

Granier, C., Tardieu, F. 1998a. Spatial and temporal analysis of expansion and cell cycle in sunflower leaves. A common pattern of developement for all zones of a leaf and different leaves of a plant. *Plant Phyisiology*.116, 991-1001.

Granier, C., Tardieu, F. 1998b. Is thermal time adequate for expressing the effects of temperature on sunflower leaf development? *Plant Cell and Environment*. 21, 695-703.

Granier, C., Tardieu, F. 1999a. Leaf expansion and cell division are affected by reduced intercepted light but not after the decline in cell division rate in sunflower leaf. *Plant Cell Environment*. 22, 1635-1376.

Granier, C., Tardieu, F. 1999b. Reductions in area, cell number and cell area in sunflower leaves subjected to short water deficits with different timings. Variability in responses can be simulated using a simple model of leaf development. *Plant Physiology*. 119, 609-619.

Greenwood, D.J., Gerwitz A., Stone D.A. and Barnes A. 1982. Root development of vegetables crops. *Plant and Soil*.68, 75-96.

Grossmann, J. Udluft, P. 1991. The extraction of soil water by the suction cup method: a review. *Journal of Soil Science*. 42, 83-94.

Guimerà J., Marfà O., Candela L., Serrano L. 1995. Nitrate leaching and strawberry production under drip irrigation management. *Agriculture Ecosystems Environment*. 56, 121-135.

Haag D., Kaupenjohann M. 2001. Landscape fate of nitrate flux and emissions in Central Europe. A critical review of concepts, data, and models for transport and retention. *Agriculture Ecosystems Environment*. 86, 1-21.

Rapport-Gratuit.com

Hack-ten Broeke, M. J. D. 2001. Irrigation management for optimizing crop production and nitrate leaching on grassland. *Agriculture Water Management.* 49, 97-114.

Hanks, R.J., and Rassmussen, V.P. 1982. Predicting crop production as related to plant water stress. *Advances in Agronomy*. 35, 193-215.

Hansen, S., Jensen, H.E., Nielsen, N.E., Svendsen, H. 1991. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the danish simulation model DAISY. *Fertilizer Research.* 27, 245-259.

Heinen, M. 1997. Dynamics of water and nutrients in closed, recirculating cropping systems in glasshouse horticuture. *PhD Thesis Wageningen Agricultural University*. 210 p.

Hunt, R., Warren Wilson, J., Hand, D.W. and Sweeney, D.G. 1984. Integrated analysis of growth and light interception in winter lettuce. I. Analytical methods and environmental influence. *Annals of Botany*. 54, 743-757.

Jackson L.E., Wyland, L.J. and Stivers, L.J. 1993. Winter cover crops to minimize nitrate losses in intensive lettuce production. *Journal of Agricultural Science*.121, 55-62.

Jackson L.E., Stivers L.J., Warden B.T., and Tanji K.K.1994. Crop nitrogen utilization and soil nitrate loss in a lettuce field. *Fetilizer research*, 37:93-105.

Jamieson, P.D., Porter, J.R., Goudriaan, J., Ritchie, J.T., van Keulen, H., Stol, W. 1998. A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. *Field Crop Res*earch. 55, 23-44.

Jarvis, S.C., Stockdale, E.A., Shepherd, M.A. and Powlson, D.S.1996. Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils : processes and measurement. *Advances in Agronomy*. 57, 188-235

Katerji, N., Daudet, F. et Valancogne C. 1984. Contribution des réserves profondes du sol au bilan hydrique des cultures. Détermination et importance.*Agronomie*. 4, 779-787.

Katerji, N., Itier, B. et Ferreira I. 1988. Etude de quelques critères de l'état hydrique de la plante d'une culture de tomate en région semi-aride. *Agronomie*. 8, 425-433.

Kirchmann H. and Bergstrom L. 2001. Do organic farming practices reduce nitrate leaching ?. *Communications in soil science and plant analysis*, 32:7/8, 997-1028

Kirkham, M.B., Keeney, D.R., Gardner, W.R. 1974. Uptake of water and labelled nitrate at different depths in the root zone of potato plants grown on sandy soil. *Agro-ecosystems*. 1, 31-44

La Recherche. 2001. Nitrates : une norme aux pieds d'argiles. *In Numéro spécial La Recherche "Le risque alimentaire"*.31-35

Lacape J.M, Wery J., Annerose J.M. 1998. Relationships betwen plant and soil status in 5 field grown cotton (Gossypium hirsutum L.) cultivars. *Field Crops Research*, 57:29-43

Lafarge, T., De Raissac, M. et Tardieu, F. 1998. Elongation rate of sorghim leaves has a common response to meristem temperature in diverse African and European environmental conditions. *Field Crops Research.* 58, 69-79.

Lafarge, T., et Tardieu, F. 2002. A model coordinating the elongation of all leaves of a sorghum cultivar, applies to Medditerranean and Sahelian conditions. *Journal of Experimental Botany*. Accepté.

Lafleuriel, P. 1990. La mesure d'azote minéral dans le sol. *Perspectives Agricoles*. 144, 66-71.

Lafolie, F. 1991. Modelling water flow, nitrogen transport and root uptake including physical non-equilibirum and optimization of the root water potential. *Fertilizer Research.* 27, 219-231.

Lafolie F. 1995. Modélisation des transferts d'azote et possibilités d'application grâce à l'utilisation des données de la lysimétrie. *Compte Rendu de l'Académie d'Agriculture Française*. 4, 101-119.

Lafolie F., Bruckler L., De Cockborne A.M., Laboucarié C. 1997. Modelling the water transport and nitrogen dynamics in irrigated salad crops. *Irrigation Science.* 17, 95-104.

Lafolie F., Neel, C. 1997. Migration du nitrate dans la zone non saturée et impacts sur la qualité des eaux souterraines. *In Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. Lemaire G., Nicolardot, B. (eds).* 55-68.

Lebon, E., Pellegrino, A., Lecoeur, J., Tardieu, F. 2001. Shoot architectural responses induced by controlled water deficit in vine. *In 12èmes journées du Groupe d'Etudes des Systèmes de Conduite de la Vigne, GESCO*.

Lecoeur J., Wery, J., Turc, O., Tardieu, F. 1995. Expansion of pea leaves subjected to short water deficit : cell number and cell size are sensitive to stress at different periods of leaf development. *Journal of Experimental Botany*. 46, 1093-1101.

Lecoeur J., Sinclair T.R., 1996. Field pea transpiration and leaf growth in response to soil water deficit. *Crop Science.* 36, 331-335.

Lecoeur J., Wery, J. and Sinclair, T.R.1996. Model of leaf area expansion on field pea (Pisum sativum L.) plants subjected to soil water deficits.*Crop Science.* 36, 331-335.

Lecoeur J., et Guilioni, L. 1998. Rate of leaf production in response to soil water deficits in field pea. *Field Crops Research*. 57, 319-328.

Lennhardt, D. Voltz, M. and Rambal, S. 1995. A survey of sevral agroclimtic soil wtare balance models in refernce to their spatial application. *European Journal of Agronomy*.4, 1-14.

Leenhardt, D. Lafolie, F., Bruckler L. 1998a. Evaluating strategies for lettuce by simulation : I. water flow simulations. *European Journal of Agronomy*. 8, 249-265.

Leenhardt, D. Lafolie, F., Bruckler L., De Cockborne, A.M.1998b. Evaluating strategies for lettuce by simulation : I. water flow simulations. *European journal of agronomy.* 8, 267-282.

Letey, J., Jarrel, W.M., Valoras, N. 1982. Nitrogen and water uptake patterns and growth of plants at various minimum solution nitrate concentrations. *Journal of plant nutrition.* 5, 73-89.

Lindeman, Y. 1986. Contribution à l'étude statistique des répartitions et à la modélisation de la dynamique de l'azote nitrique dans le sol. *Thèse, Université Parsi-Sud*.

Lord, E.I., and Shepherd, M.A. 1993. Developments in the use of porous ceramic cups for measuring nitrate leaching. *Journal of Soil Science*. 44, 435-449.

Mac Donald, A.J., Powlson, D.S., Poulton, P.R. and Jekinson, D.S. 1989. Unused fertiliser nitrogen in arable soils. Its contribution to nitrate leaching. *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 46, 407-409.

Machet, J.M, Laurent, F., Chapot, J.Y., Doré, T. et Dulout, A. 1997. Maîtrise de l'azote dans les intecultures et les jachères. *In Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. G.Lemaire, B. Nicolardot (Ed.)*, p271-288.

Magid, J., and Christensen, N. 1993. Soil solution sampled with and without tansion in arable and heatland soils. *Soil Science Society of America Journal* . 57, 1463-1469.

Mailhol, J.C., Ruelle, P., Nemeth, I. 2001. Impact of fertilisation practices on nitrogen leaching under irrigation. *Irrigation Science.* 21, 139-147.

Majmudar, A.M. and Hudson, J.P. 1957. The effects of different water regimes on the growth of plant under glass. II Experiments with lettuces. *Journal of Horticultural Science*. 32, 201-213.

Maraux, F. 1994. Modélisation mécaniste et fonctionnelle du bilan hydrique des cultures. Le cas des sols volcaniques du Nicaragua. *Thèse INA P-G, Paris*. 268p.

Maraux, F. and Lafolie, F. 1998. Modeling soil water balance for a maize-sorghum sequence. *Soil Science Society of America Journal.* 62, 75-82.

Mary, B. et Recous, S. 1994. Measurement of nitrogen mineralization and immobilization fluxes in soil as a means of predicting net mineralization.*European Journal of Agronomy*. 3, 291-300.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Mary, B., Beaudouin, N., Justes, E. and Machet, J.M. 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of. Soil Science*. 50, 549-566.

Massonet, C. 2000. Effet du rayonnement intercepté sur la croissance foliaire de A. thaliana : rôle de la diposnibilité en carbone et de la transition entre les statuts importateur et exportateur des feuilles. *DEA " Développement et adaptation des plantes. Université de Montpellier 2, Université de Perpignan, , ENSA. Montpellier*.18p.

Mc Kee, J.M.T. 1981. Physiological aspects of transplanting vegetables and other crops. I. Factors wich influence re-establishement .*Horticultural abstracts*. 51, 265-272

Meynard J.M., Justes, E., Machet J.M. et Recous, S. 1997. Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ. *In Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. G.Lemaire, B. Nicolardot (Ed.)*, p 183-200.

Meynard, J.M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M.H., Makowski, D. 2002. The nitrogen cycle and the quality spiral of environmental management. *Agronomie*. à paraître.

Montagu, K.D., Conroy, J.P. and Francis, G.S. 1998. Root and shoot response of field-grown lettuce and broccoli to a compact subsoil. *Australian Journal of Agricutltural Research*. 49, 89-97.

Monteith, J.L.1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 281, 277-294.

Moutonnet, P., Pagenel, J.F., Fardeau, J.C., 1993. Simultaneous field measurement of nitrate-nitrogen and matric pressure head. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 1458-1467.

Muchow, R.C.and Sinclair, T.R. 1991. Water deficits effects on maize yields modeled under currents and "greenhouse" climates. *Agronomy Journal*. 83, 1052-1059.

Muller, B., Reymond, M. et Tardieu F. 2001. The elongation rate at the base of a maize leaf shows an invariant pattern during both the steady-state elongation and the establishement of the elongation zone. *Journal of Experimenta. Botany*. 52, 1259-1268.

Musharrafieh, G.R. and Peralta, R.C.1995. Optimizing irrigation management for pollution control and sustainable crop yield. *Water resources research*.31, 1077-1086.

Mustaers, H.J.W. 1983a. Leaf growth in Cotton (Gossypium hirsutum L.) 1. Growth in area of main-setm and sympodial leaves. *Annals of Botany*. 51, 503-520.

Mustaers, H.J.W. 1983b. Leaf growth in Cotton (Gossypium hirsutum L.) 1. The influence of temperature, light, wtare stress and root restriction on the growth and initiation of leaves. *Annals of Botany*. 51, 503-520.

Neuman, SP., Feddes, RA. And Bresler, E. 1975. Finite element analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots: I. Theory. *Soil Science Society of. American Proceedings*. 39, 224-230.

Nicolardot, B., Mary, B., Houot, S. et Recous, S. 1997. La dynamique de l'azote dans les sols cultivés. *In Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. Lemaire G., Nicolardot, B. (eds)*.87-104.

Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Machet, J.M., Marcovecchio, F. 1998. Proposal of an integrated approach to characterize "the nitrogen value" of organic products spred in agriculture. *In Proceedings of the 8th International conference on management strategies for organic waste use in agriculture, Martinez, J. and Maudet M.N. (eds).*305-315.

Nicolardot, B., Recous, S. and Mary, B. 2001. Simulation of C and N mineralisation during cop residue decomposition : a simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant and Soil*. 1-21.

Nishihara E., Inoue M;, Kondo K., Takahashi K., Nakata N., 2001. Spinach yield and nutritional quality affected by controlled soil water matric head. *Agriculture Water Management*, 51: 217-229.

Nothmann, J.1976. Morphology of hed formation of cos lettuce. 1. The process of hearting. *Annals of Botany*. 40, 1067-72.

Pang, X.P., Letey, J., Wu, L. 1997. Irrigation quantity and uniformity and nitrogen applications effects on crop yield and nitrogen leaching. *Soil Science Society of America Journal*. 61, 257-261.

Pang, X.P., and Letey, J. 2000. Organic farming : challenge of timing nitrogen availability to crop nitrogen requirements. *Soil Science Society of America Journal*. 64, 247-253.

Pantel, J. 2000. Etude et modélisation des couplages entre l'hydrodynamique et les mécanismes de transfert de pollutions azotées en milieu alluvial fortement hétérogène. *Thèse, Université Montpellier II*.

Papadopoulos, A.P., Pararajasingham, S., Shipp J.L., Jarvis, W.R. and Jewett, T.J. 1997. Integrated management of greenhouse vagetable crops. *Horticultural Reviews*. 21, 1-39.

Passioura, J.B. 1994. The yield of crops in relation to drought. *In Physiology and determination of crop yield. ASA, CSSA, SSSA*. 343-359.

Pearson, S., Wheeler, T.R., Hadley, P. and Wheldon, A.E.1997. A validated model to predict the effects of envitonment on the growth of lettuce : implications for climate change. *Journal of Horticultural Science.*72, 503-517.

Pellegrino, A., Lebon, E., Simmoneau, T., Riou, C. and Wery, J. 2001. Could the relationships between plant water status and gas exchanges of vine be used to diagnose drought stress in farmers fields? *In 12èmes journées du Groupe d'Etudes des Systèmes de Conduite de la Vigne, GESCO*.37-42.

Penel, .J.P., 1996. Vulnérabilité et état de pollution des nappes : cas du bassin de Carpentras. *In Agriculture et qualité des eaux. INRA Avignon.*

Piriou, J.Y.,1991. Marées vertes littorales en nitrate. *in Nitrates, agriculture, eau. INRA eds.* 113-120.

Poss R., Noble A.D., Dunin F.X. and Ryenga W. 1995. Evaluation of ceramic cup samplers to measure nitrate leaching in the field. *European Journal of Soil Science*, 46:667-674.

Ray, J. D.Sinclair, T. R. 1998. The effect of pot size on growth and transpiration of maize and soybean during water deficit stress. *Journal of Experimental Botany*. 49, 1381-1386.

Recous, S., Loiseau, P., Machet, J.M., Mary, B. 1997. Transformations et de venir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles. *In Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*. *Lemaire G., Nicolardot, B. (eds)*.105-120.

Rémy, J.C.et Hébert, J. 1977. Le devenir des engrais azotés dans lesol. *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture Française*.63, 700-710.

Richards, L.A. 1931. Capillary conductions of liquids in porous mediums. *Physics*. 1, 318-333.

Rickmann R.W., and Klepper, B.L. 1995. The phyllochron : where do we go in the future? *Crop Science*. 35, 35-44.

Robin, D.1997. La matière organique livre ses secrets. *PHM, revue Horticole*.385, 21-24.

Robin, D.et Berling, J.P.1998. Prédire la libération de l'azote des fertilisants organiques. *PHM, revue Horticole* .391, 20-23.

Rosenthal, W.D., Arkin, G.F., Shouse, P.J. and Jordan, W.R. 1987. Water deficits effects on transpiration and leaf growth. *Agronomy Journal*. 79, 1019-1026.

Rossing W.A.H., Meynard J.M., van Ittersum M.K. 1997. Model-based explorations to support development of sustainable farming systems: case studies from France and The Netherlands.*European Journal of Agronomy*. 7, 271-283.

Sadras, V.O.et Milroy, S.P. 1996. Soil water tresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. *Field Crops Research*. 47, 253-266.

Salardini A.A., Sparrow L.A.and Holloway R.J. 1992. The mobility and transformation of soil nitrogen and the relationships between soil and plant nitrogen and yield at different times following application of various nitorgen fertlizers to sweet corns. *Australian Journal of Agricultural Research*. 43, 1643-52.

Sale, P.J.M. 1966. The response of summer lettuce to irrigation at different stages of growth. *Journal of Horticultural Science*.41, 43-52.

Sammis, T.W., Kratky, B.A. and Wu, I.P. 1988. Effects of limited irrigation on lettuce and chinese cabbage yields. *Irrigation Science*. 9, 187-198.

Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., and Papendick, R.I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of American Journal*. 50, 1031-1036.

Scaife, A., Cox, E.F. and Morris G.E.L. 1987. The relationship between shoot weight, plant density and time during the propagation of four vegetables species.*Annals of Botany*. 59, 325-334.

Schmied, B., Abbaspour, K., and Schulin, R. 2000. Inverse estimation of parameters in a nitrogen model using field data. *Soil Science Society of America Journal*. 64, 553-542.

Scholefield D., Brown L., Jewkes E.C. and Preedy N. 1995. Integration of soil testing and modelling as a basis for fertiliser recommendations for grassland. *in Diagnosis procedures for crop N management. INRA ed.,* 139-147

Scokart, P. O.Guns, M. Borger, R.1990. Nitrate leaching under various agricultural systems: first results obtained in lysimeter trials. *in Nitrates, agriculture, eau. INRA eds*. 227-232.

Sebillote, M. 1990. Systèmes de culture, un concept opératoire pour les agronomes. *In Les systèmes de culture. L.Combe et D.Picard (eds)*.165-196.

Sexton B.T., Moncrief J.F., Rosen C.J., Gupta S.C., and Cheng H.H. 1989. Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrate leaching and yield on a coarse-textured soil. *Journal of Environmental Quality*. 25, 982-992.

Sims J.T., Vasilas B.L., Gartley K.L., Milliken B., and Green V. 1995. Evaluation of soil and plant nitrogen tests for maize on manured soils of the atlantic coastal plain. *Agronomy Journal*. 87, 213-222.

Sinclair, T.R. et Ludlow, M.M. 1986. Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. *Australian Journal of Plant Physiology*. 13, 329-341.

Smettem, K.R.J., Oliver, Y.M., Heng, L.K., Bristow, K.L., and Ford, E.J. 1999. Obtaining soil hydraulic properties for water balance and leaching models from survey data. 1. Water retention. *Australian Journal of Agricultural Research*. 50, 283-289.

Snyder, G.H., Augustin, B.J. and Davidson, J.M. 1981. Moisture sensor-controlled irrigation for reducing N leaching in bermudagrass turf. *Agronomy Journal*. 76, 964-969.

Steduto, P., Pocucea, V., Caliandro, A. and Debaeke, P. 1995. An evaluation of the crop-growth simulation submodel of EPIC wheat grown in a mediterranean climate with variable soil-water regimes. *European Journal of Agronomy*. 4, 335-345.

Stirzaker, R.J., Passioura, J.B., Sutton B.G., Collis-George, N. 1993. Soil management for irrigated vegetable production. II. Possible causes for slow vegetative growth of lettuce associated with zero tillage. *Australian Journal of Agricultural Research*. 44, 831-44.

Stockle C.O., Martin S.A. and Campbell G.S. 1994. CropSyst, a Cropping System Simulation Model : Water/Nitorgen Budgets and Crop Yield. *Agricultural Systems*. 46, 335-359

Strebel O., Duynisveld W.H.M, Bottcher J. 1989. Nitrate pollution of groundwater in Western Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 26, 189-214.

Sulser, T.B., Duryea, M.L., Frolich, L.M., Guevara-Cuaspud, E. 2001. A field practical approach for assessing biophysical sustainability of alternative agricultural systems. *Agricultural Systems*. 68, 113-135.

Sutton, B.G., Merit N.1993. Maintenance of lettuce root zone at field capacity gives best yields with drip irrigation. *Scientia Horticulturae.* 56, 1-11.

Tamari, S., Bruckler, L.,Halbertsma, J. and Cadoeuf, J. 1993. A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Science Society of America Journal*. 57, 642-651.

Tardieu, F.1994. Growth and fucntionning of roots and root systems subjected to soil compaction. *Soil Tillage Research*. 30, 217-283.

Tardieu, F., and Simmoneau, T. 1998. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand : modelling isohydric and anisohydric behaviours. *Journal of Experimental Botany*. 49, 419-432.

Tardieu, F., Granier, C. and Muller, B. 1999. Modelling leaf expansion in a fluctuating environment : are changes in specific leaf area a consequence of changes in expansion rate? *New Phytologist*. 143, 33-43.

Tayot, X., Ruget, F., Bouthier, A., Lorgeou, J., Lacroix, B., Pons, Y. 1999. STICS Poitou-Charentes. Calibration et validation sur maïs et sorgho. *Perspectives Agricoles*. 242, 86-95.

Tei, F., Scaife, A. and Aikman, D.P. 1996a. Growth of lettuce, onion and red beet. 1. Growth analysis, ligth interception, and radiation use efficiency. *Annals of Botany*. 78, 633-643.

Tei, F., Scaife, A. and Aikman, D.P. 1996b. Growth of lettuce, onion and red beet. 2. Growth modelling. *Annals of Botany*. 78, 645-652.

Thicoïpe, J.P., Roger-Estrade, J.1991. Laitues : pilotage de la fertilisation azotée à l'aide de mesures rapides des nitrates dans le sol. *Infos CTIFL*. 72.

Thompson T.L., Doerge T.A. 1996. Nitrogen and water rates for subsurface trickle-irrigated romaine lettuce. *HortScience,* 60, 163-168

Thony J.L., Vachaud G., Vauclin M. 1988. Analyse critique des mesures tensiométriques par capteur de pression portatif. *Bulletin du groupe français d'humidité neutronique*. 2, 37-60.

Tibbits, T.W., and Bottenberg, G. **1976.** Growth of lettuce under controlled humidity levels. *Journal of the American Society of Horticultural Science.* 101, 70-73.

Trambouze, W. 1996. Caractérisation et éléments de modélisation de l'évapotranspiration réelle de la vigne à l'échelle de la parcelle.*Thèse ENSA Montpellier*.191p.

Turc, O., Lecoeur J. 1997. Leaf primordium initiation and expanded leaf production are co-ordinated trough similar reponse to air temperature in pea (Pisum sativum L.). *Annals of Botany.* 80, 265-273.

Turner, N.C. and Rawson, H.M. 1982. Yield and harvest index of sunflower cultivars : influence of duration of water stress. *Proceedings 10th International Sunflower Conferenc*e. 38-42

United States Environment Protection Agency, 1994. National water quality inventory. *Report to congress. Office of water, Washington DC.*

Valles, V.Bruckler, L., de Cockborne, A.M., Garcia, B., Lafolie, F., Leenhardt, D., Renault, P. et Delacourt, A. 1997. Rapport final d'étude sur la nappe de la Vistrenque. INRA Avignon.

Van Genuchten, M.T. 1980. A close form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsatured soils. *Soil Science Society American Journal.* 44, 892-898.

Van Holsteijn, H.M.C. 1980a. Growth of lettuce I. covering of soil surface. *Mededelingen landbouwhogeschool Wageningen.*7, 1-27.

Van Holsteijn, H.M.C. 1980b. Growth of lettuce I. quantitative analysis of growth.*Mededelingen landbouwhogeschool Wageningen.*13, 1-24.

Vereecken, H, Maes, J., Feyen, J. ansd Darius, P. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture , bulk density, and carbon content. *Soil Science.* 148, 389-403.

Vereijken, P. 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal Agronomy*.7, 235-250.

Wang, S., Boulard, T. 2000. Measurement and prediction of solar radiation distribution in full-scale greenhouse tunnels. *Agronomie*. 20, 41-50.

Webster C.P., Shepherd M.A., Goulding K.W.T. and Lord E. 1993. Comparisons of methods for measuring the leaching of mineral nitrogen from arable land. *Journal of Soil Science.* 44:49-62

Webster C.P., Poulton, P.R., 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.

Wery, J., Gay, F., Metral, R. and Lecoeur, J. 2001. A control board for in situ evaluation of cropping systems sustainability in farmer's fields. *3rd International crop science congress. 17-22 août, Hambourg, Allemagne.*

Wosten, J.H.M., and Van Genuchten, M.T. 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Science Society of America Journal*. 52, 1762-1770.

Wosten, J.H.M., Schuren, C.H.J.E., Bouma, J. and Stein, A. 1990. Functional sensitivity of four methods to generate soil hydraulic functions. *Soil Science Society of America Journal* . 54, 832-836.

Wosten, J.H.M., Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J. 2001. Pedotransfer functions : bridging the gap between available basic soil data and missing hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*. 251, 123-150.

Wurr, D.C.E., Fellows, J.R. and Pittam, A.J. 1987. The influence of plant raising conditions and transplant age on the growth and development of crisp lettuce. *Journal of Agriculture Science*. 109, 573-581.

Wurr, D.C.E., Fellows, J.R., Hiron, R.W.P., Antill, D.N. and Hand D.J. 1992. The development and evaluation of techniques to predict when to harvest iceberg lettuce heads. *Journal of horticultural science*. 67, 385-393.

Yiridoe E.K. 2000. Risk of public disclosure in environmental farm plan programs : characteristics and mitigating legal and policy strategies. *Journal of Agriculture and Environmental Ethics*. 13, 101-120.