

UNIVERSITE HENRI POINCARÉ-NANCY I
INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE
INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE RENNES

D.E.A. NATIONAL DE SCIENCE DU SOL

**Évaluation d'un modèle à réservoirs pour
simuler le bilan hydrique d'une vigne
enherbée en climat méditerranéen**

par

Florian CELETTE

dirigé par C. GARY (DR, INRA-SYSTEM)

soutenue le 2 juillet 2003 devant le jury composé de :

J. BERTHELIN (DR, CNRS-LIMOS)
L.M. BRESSON (PR, INAPG-AGER) (*rapporteur*)
B. JAILLARD (DR, INRA-Rhizosphère et Symbiose)
J.L. MOREL (DR, INRA-Sols et Environnement)
C. WALTER (PR, ENSAR-Agriculture, Espaces Ruraux et Environnement)

Évaluation d'un modèle à réservoirs pour simuler le bilan hydrique d'une vigne enherbée en climat méditerranéen.

Florian Celette

stagiaire au sein de l'UMR « Fonctionnement et conduite des SYStèmes de culture Tropicaux Et Méditerranéens » (SYSTEM) (INRA-CIRAD-ENSAM)

RÉSUMÉ

Des études récentes ont identifié dans l'enherbement du vignoble une réponse possible aux objectifs de durabilité et de qualité que se doit de s'approprier la viticulture de demain. Pourtant, la concurrence hydrique qu'il induit est un frein à son adoption dans les vignobles méditerranéens. Ce travail vise à évaluer une approche à réservoir pour modéliser le bilan hydrique de l'association vigneculture intercalaire. Il est une première étape vers l'obtention d'un outil d'évaluation de ces pratiques. Le choix s'est porté sur STICS qui a l'avantage d'avoir déjà été paramétré pour une vigne et de proposer un formalisme relativement élaboré de modèle de sol à réservoirs. Ce travail de modélisation s'appuie sur 4 campagnes de mesures réalisées sur des parcelles viticoles du Languedoc. Sur ces parcelles, les teneurs en eau du sol et la densité apparente ont été suivies à différentes profondeurs. D'autres éléments ont été mesurés qui permettent de paramétrer le modèle. L'association vigneenherbement, présente sur une seule de ces situations, a fait l'objet d'une étude plus complète avec une observation de son système racinaire et des flux hydriques. Outre ces données recueillies, le paramétrage du modèle a fait appel à un précédent paramétrage réalisé sur un vignoble de Côtes-du-Rhône et à des références trouvées dans la bibliographie.

L'évaluation du modèle sur la réserve hydrique du sol pour une vigne en sol nu en conditions méditerranéennes s'est avérée globalement satisfaisante. Les formalismes introduits dans STICS permettent une amélioration sensible de la qualité de la simulation par rapport à un modèle plus simple comme celui de Riou et al (1994), notamment pour l'évaporation et le ruissellement. L'étude de l'association culturale semble justifier d'essayer de modéliser l'association culturale en compartimentant le sol en deux réservoirs étanches, un pour chaque culture. L'évaluation de cette hypothèse montre cependant que le réservoir dédié à la vigne ne peut pas être seulement de la largeur du rang. L'analyse des profils racinaires des deux espèces prouve que la vigne peut trouver des ressources en eau soit plus en profondeur, soit dans la zone exploitée par la fétuque.

Mots clés : bilan hydrique, compétition, climat méditerranéen, culture intercalaire, modélisation, propriétés hydrodynamiques du sol, STICS, transpiration, vigne.

SUMMARY

Evaluation of a tipping bucket approach to model the water balance of vine-grass-soil system in the Mediterranean climate.

Recent studies have showed how integrating an intercrop in vineyard could bring to tomorrow viticulture elements to improve quality and durability. However, the induced hydric concurrence slow his adoption in the Mediterranean vineyards. This work aims to evaluate a tipping bucket approach to model the water balance of a vine-intercrop association. It is a first step to the attainment of an evaluation tool of these practices. STICS has been chosen because it has been parameterised for the modelling of a vine and because it proposes an elaborated formalism of tipping bucket model. This modelling work is based on 4 campaigns of measurements realized in Languedoc's vineyards. In each plot, soil humidity and bulk density have been followed at different depths. Other elements have been measured to parameterise the model. The intercropping of a grass cover and a vine, existing on one of the studied plots, has been studied more completely with the observation of the root system and of the hydric transfers. The model has been also parameterised with a previous parameterisation realized on a Côtes-du-Rhône vineyard and with references of the bibliography.

The model's evaluation on the soil hydric reserve for a Mediterranean weed controlled vineyard has been globally good. The modelling is better with STICS than with the Riou and al's model thank to a better consideration of the surface runoff and of the soil evaporation. The intercrop study seems to justify a division of the soil in two impermeable compartments, one for each crop, to model the intercropping. However, the evaluation of this hypothesis shows that the vine's compartment should be wider than the row. The root profiles analysis of the two species shows that the vine can find water resources much deeper or in the zone exploited by the grass.

Keywords : water balance, competition, Mediterranean climate, intercrop, modelling, soil hydrodynamics properties, STICS, transpiration, vine.

INTRODUCTION

L'enherbement du vignoble est une alternative technique envisagée de plus en plus favorablement par le monde de la viticulture. Elle présente un certain nombre d'intérêts mais pose la question d'une concurrence importante pour les ressources en eau induite par la culture intercalaire. Le fonctionnement hydrique des systèmes sol-cultures associées est complexe. Il nous a paru intéressant d'observer si un modèle "à réservoirs" apportait une approche de modélisation satisfaisante pour le système vigne-enherbement-sol.

A l'heure où la viticulture, et l'agriculture en général, prennent des orientations plus "raisonnées" et "durables", au travers notamment de chartes et de cahiers des charges (Charte TerraVitis, agriculture raisonnée, agriculture biologique...)(Gaudel, 2002), la mise en herbe du vignoble apparaît comme une pratique apte à satisfaire de nouvelles attentes environnementales et de qualité (diminution des rendements, limitation des traitements, lutte contre l'érosion...). Cette pratique connaît déjà un grand succès au sein des vignobles septentrionaux mais elle tarde à trouver sa place dans le contexte méditerranéen. Les conséquences de cette pratique ne sont pas encore toutes bien connues et la crainte du stress hydrique retient encore nombre de viticulteurs de la région (Gaudel, 2002).

En effet, la région méditerranéenne est caractérisée par des déficits hydriques importants (souvent supérieurs à 500 mm) pendant la période d'activité de la vigne (Mériaux, 1982 ; Trambouze et Voltz, 2001). Ces déficits hydriques peuvent permettre une amélioration certaine de la qualité du produit (Deloire et al., 2001) mais ils doivent être maîtrisés.

L'enherbement du vignoble : une pratique à maîtriser

Des enjeux environnementaux

Le vignoble est connu pour être l'une des occupations de sol les plus favorables à l'érosion et au ruissellement (Wicherek, 1993 ; Le Bissonais et al., 2001). L'enherbement de l'inter-rang crée une couverture du sol qui limite sensiblement ces deux phénomènes (Klik, 1991 ; 1994 ; Battany et Grismer, 2000 ; Lisa et al., 2001), en améliorant notamment la structure des horizons de surface et leur perméabilité (Morlat et al., 1993). Il permet également de réduire la dégradation des sols et d'améliorer leur fertilité en augmentant leur teneur en matières organiques, souvent limitée dans les sols viticoles (Rozier et al., 1989 ; Masson et Bertoni, 1996 ; Celette et Celette, 2002). L'enherbement accélère ainsi l'activité biologique du sol et joue un rôle dans la rétention et la dégradation des produits phytosanitaires. Enfin, il limite la lixiviation des nitrates en diminuant le drainage et en consommant les excès d'azote hivernaux (Schaller et al., 1991 ; Klik et al., 1998).

Un impact sur la production

L'enherbement améliore la portance du sol (Rozier et al., 1989 ; Carsouille, 1996), réduisant ainsi les dégâts liés à une mécanisation croissante de la viticulture. La contrainte qu'exerce la culture herbacée sur la vigne, principalement pour les ressources en eau et en nutriments, est importante à

considérer. Elle peut s'avérer agronomiquement intéressante pour peu que la compétition soit maîtrisée. Ainsi, elle limite la vigueur de la vigne (Mériaux et al., 1979 ; 1981 ; Morlat, 1987 ; Dry et Loveys, 1998), favorisant un indice de développement reproductif / végétatif supérieur. Les besoins d'interventions sur le végétal (rognages, éclaircissages...) s'en trouvent diminués. L'état sanitaire de la vigne et du raisin est amélioré du fait d'un microclimat plus sec et aéré et d'une teneur en azote des bois moindre (Rozier et al., 1989 ; Morlat et al., 1993 ; Pieri et al., 1996 ; Chantelot, 2002). L'enherbement peut contribuer à la maîtrise des adventices (Moulis, 1994 ; Porqueddu et al., 2000). Il a également un impact sur le raisin produit en diminuant la teneur en eau des baies récoltées et donc les rendements (Morlat, 1987 ; Rodriguez-Lovelle et al., 1999). La conséquence directe de cette diminution de teneur en eau est une augmentation relative de la teneur en composés phénoliques (McCarthy et Coombe, 1985 ; Morlat, 1987 ; Carsouille, 1996 ; Koundouras et al., 1999 ; Deloire et al., 2001) et en anthocyanes sur les cépages rouges (Deloire et al., 2001 ; Hilbert, 2002). On observe également une diminution légère de l'acidité totale de la baie (Morlat, 1987 ; Chantelot, 2002). Tous ces phénomènes affectent favorablement la qualité du raisin mais il existe un niveau optimal de stress (Mériaux et al., 1979 ; 1981). Un stress trop important peut affecter irréversiblement la photosynthèse, le remplissage des grains... Son impact est différent selon le moment de son apparition (Hilbert, 2002). La concurrence azotée induite par la culture herbacée entraîne une diminution de la teneur en azote des moûts qui, si elle est trop importante, ralentit, voire stoppe, la fermentation alcoolique (Maigre, 1996 ; Le Goff-Guillou et al., 2000).

La gestion de la concurrence de l'enherbement pour la vigne s'avère donc très délicate, ce qui justifie la demande des viticulteurs de la région pour un outil d'évaluation de leurs pratiques d'enherbement (Gaudel, 2002). Cet outil passera par un outil de modélisation des bilans hydrique et azoté du système associé à un modèle de culture de la vigne.

Les modèles de bilan hydriques

Cahier des charges pour un outil d'aide à la décision

Cet outil étant destiné aux viticulteurs, il convient d'adopter pour la modélisation des échelles de temps et d'espace adaptées aux besoins. Les simulations devant couvrir un, voire plusieurs cycle culturaux, le pas de temps journalier, pratique, apparaît pertinent. Les décisions étant prises à l'échelle de la parcelle, il est logique de la prendre comme échelle spatiale de simulation. Le modèle devra simuler un couvert en rangs avec deux cultures aux dynamiques de prélèvement différentes, dont l'une est pérenne.

Le bilan hydrique de la parcelle peut être appréhendé selon diverses approches guidées par les objectifs, les moyens expérimentaux pour estimer les paramètres et variables nécessaires au fonctionnement du modèle et la précision souhaitée sur son estimation. Deux grands principes s'opposent.

Les modèles simples à réservoirs

Ces modèles ("*tipping bucket*" en anglais) divisent le sol en une ou plusieurs couches superposées. Chacune d'entre elles est qualifiée par son humidité et une humidité minimale (généralement au point de flétrissement permanent) en dessous de laquelle on considère que la plante est incapable de puiser de l'eau. Les consommations en eau (transpiration et évaporation) sont calculées à partir de grandeurs climatiques mesurées (Penman, 1948), de l'état hydrique du sol et de caractéristiques de la plante (LAI¹ par exemple). Les transferts d'eau dans le sol sont fortement simplifiés et, bien souvent, les remontées capillaires et d'autres phénomènes de redistribution sont négligés. Un phénomène de drainage existe lorsque l'humidité d'un réservoir atteint une valeur maximale seuil (bien souvent la capacité au champ). Les prélèvements d'eau sont généralement répartis dans le sol selon des profils de densité racinaire. Vu la simplification des transferts dans le sol, le pas de temps journalier (parfois supra journalier) est classiquement adopté. La modélisation du bilan hydrique apparaît ici imparfaite. Pourtant, cette simplicité a conquis nombre de développeurs de modèles agronomiques (*tableau 1*).

Modèles	Caractéristiques					Références bibliographiques
	vigne	pas de temps	cultures associées	bilan hydrique en	autres	
<i>Les modèles à réservoirs</i>						
STICS	oui	jour	oui	1D	robustesse simplicité	Brisson, et al., 2003 Brisson, 1998
INTERCOM	non	jour	oui	1D	simplicité	Van Ittersum et al., 2003 Baumann et al., 2002
RIOU	oui	jour	non	1D	simplicité robustesse à démontrer	Pellegrino, 2003 Celette et Celette, 2002 Riou et al., 1994
DSSAT*	non	jour	oui	1D	approche aide à la décision robustesse	Jones, 1993 Caldwell et Hansen, 1993
WaNuLCAS	non	jour	oui	2D		Van Noordwijk et Lusiana, 2000 Van Noordwijk et Lusiana, 1998
HyPAR	non	jour	oui	3D	bilan hydrique réservoir ou mécaniste	Mobbs et al., 2001
<i>Les modèles mécanistes</i>						
HYDRUS 2D	non	infrahoraire	non	2D	modélisation détaillée des flux du sol prélèvements racinaires incertains peu utilisé encore	Simunek et al., 1999
PASTIS	non	infrahoraire	oui	1D	modélisation détaillée des flux du sol	Reyes Gomez, 2002 Findeling, 2001 Lafolie et al., 1991
<i>Les modèles spécifiques</i>						
Modèle cultures associées	non	jour	oui	2D	robustesse à déterminer	Ozier-Lafontaine et al., 2000 Sillon et al., 2000

* modèles intégrés à DSSAT

tableau 1 – Description des modèles de fonctionnement hydrique du sol trouvés dans la bibliographie

table 1 – Description of the models of soil hydric behaviour encountered in the bibliography

STICS² (Brisson et al., 1998 ; Brisson et al., 2002 ; Brisson et al., 2003), est une plate-forme modulaire de modélisation paramétrée pour une douzaine de cultures dont la vigne (Lecoq, 2002). Sa robustesse a été démontrée pour les espèces les plus étudiées (blé, maïs) (Brisson et al., 2002 ; Ruget et al., 2002) et il est donc utilisable dans des conditions pédoclimatiques très diverses. STICS intègre à son bilan hydrique certaines approches plus élaborées que celles d'un modèle à réservoirs

¹ LAI Leaf Area Index

simple, parmi lesquelles celle de Shuttleworth et Wallace (Shuttleworth et Wallace, 1985) qui permet d'évaluer la demande transpirative à partir d'une analogie électrique ou encore celle de Ritchie (Ritchie, 1972), améliorée par Brisson et Perrier (Brisson et Perrier, 1991) pour évaluer l'évaporation réelle. STICS a récemment été adapté à la modélisation de deux cultures associées (Brisson, 1998). Les principales adaptations portent sur l'interception de la lumière par la culture dominante, la répartition de la demande climatique entre les deux cultures et la croissance des deux systèmes racinaires. Pour autant, le bilan hydrique est toujours monodimensionnel.

Le modèle **INTERCOM** (Van Ittersum et al., 2003) a été élaboré pour modéliser la compétition entre une culture et des adventices. Depuis, les chercheurs ont cherché à l'adapter à la modélisation de cultures associées (Baumann et al., 2002) en essayant de coupler des modèles de croissances de monoculture. La compétitivité pour l'eau de l'une ou l'autre espèce dépend de la profondeur d'enracinement et de la densité racinaire.

Le **modèle de Riou** (Riou et al., 1994 ; Lebon et al., 1995) est un modèle à réservoir unique très simplifié, destiné à modéliser une parcelle de vigne. Initialement, il modélise la réserve hydrique du sol au pas de temps mensuel. Il a depuis été adapté à l'échelle journalière (Laffosse, 2001 ; Pellegrino, 2003) et modélise l'eau transpirable disponible pour la plante (ATSW³). Transpiration de la plante et évaporation du sol sont considérées séparément. La part de la transpiration par rapport à la demande climatique est considérée identique à celle du rayonnement intercepté par la culture (Riou et al., 1989). L'évaporation du sol nu est son complément.

DSSAT⁴, développée par l'équipe d'IBSNAT⁵, n'est pas un modèle de culture mais il vise à offrir à ses utilisateurs un support pour l'utilisation de modèles et la simulation de cultures (Thornton et al., 1991 ; Jones, 1993). DSSAT s'est vu adjoindre divers modèles de cultures spécialisés, parmi lesquels les CERES (maïs, blé, sorgho...), CROPGRO (Boote et al., 1998) et SOYGRO pour le soja. Ils ont été par la suite adaptés afin de pouvoir simuler une association spécifique en cultures mixtes ou en rang (Caldwell et Hansen, 1993). Les modifications portent essentiellement sur la compétition pour la lumière, l'eau et l'azote. Le bilan hydrique est monodimensionnel.

WaNuLCAS⁶ (Van Noordwijk et Lusiana, 1998 ; 2000) a été développé comme une approche alternative aux modèles qui combinent différents modèles de monoculture pour simuler une association culturale, ceux-ci n'ayant pas toujours été très concluants (Caldwell, 1995). Ces créateurs visent à obtenir un modèle générique de cultures associées focalisé sur l'interception des ressources aériennes et souterraines et les interactions éventuelles. Le modèle est développé en 2D avec une division verticale en 4 horizons et une horizontale en 4 zones. Pour autant, les flux d'eau dans le sol sont simulés uniquement verticalement.

² **STICS** *Simulateur multIdisciplinaires pour les Cultures Standard*

³ **ATSW** *Available Transpirable Soil Water*

⁴ **DSSAT** *Decision Support System for Agrotechnology Transfer*

⁵ **IBSNAT** *International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer*

⁶ **WaNuLCAS** *Water, Nutrient and Light Capture in Agroforestry Systems*

HyPAR (Mobbs et al., 2001) est issu de deux modèles préexistants : le modèle "Hybrid" qui simule les canopées forestières (Leemans, 1991) et le modèle "PARCH"⁷ créé pour la culture du sorgho en milieu semi-aride. Différents modèles hydrologiques sont disponibles : un modèle simple à réservoirs ou un modèle de bilan hydrique mécaniste où les humidités, potentiels hydriques et conductivité hydrauliques du sol seront déterminées à partir des fonctions de pédotransfert de Brooks et Corey ou de Van Genuchten. La modélisation se fait en trois dimensions avec une division horizontale en cellules et verticale en horizons.

Les modèles "mécanistes"

Ces modèles ("mechanistic" en anglais) utilisent une approche issue de la physique du sol où les transferts d'eau sont calculés par l'équation de Richards (Richards, 1931), dérivée de la Loi de Darcy (Darcy, 1856) et de celle de conservation de la masse. Ici, l'eau se déplace selon les différences de potentiels hydriques du sol (analogie électrique). A partir de cette approche, un terme puits a été introduit dans de nombreux modèles pour simuler l'absorption racinaire, fonction de la densité de racines. Cette fonction puits fait généralement intervenir le potentiel racinaire (Lafolie et al., 1991). Basés sur des concepts purement physiques, ces modèles simulent tout mouvement d'eau dans le sol, y compris les remontées capillaires. Les paramètres et variables qui gèrent l'absorption racinaire sont généralement l'ETP⁸, la densité racinaire et la résistance aux transferts d'eau du sol aux racines. Ces modèles sont souvent couplés à des modèles atmosphériques physiques qui calculent la transpiration de la plante à partir de facteurs climatiques usuels. Le pas de temps utilisé dans ces modèles, le plus souvent infra-horaire, s'adapte à la complexité du phénomène modélisé. Cette forme est moins utilisée dans les modèles agronomiques car elle exige des paramètres et variables difficiles à évaluer in situ.

HYDRUS n'est pas, à proprement parler, un modèle de culture mais plutôt un modèle hydraulique. La dernière version de ce logiciel : HYDRUS 2D (Simunek et al., 1999) a l'avantage de modéliser les transferts en deux dimensions. Un terme "puits" est adjoint au modèle pour simuler les prélèvements racinaires. Malheureusement, sa précision actuelle est encore incertaine (Voltz, comm. pers.). De plus, il apparaît impossible de définir plusieurs conditions limites pour notre système et donc la consommation de plusieurs systèmes racinaires en compétition. Ce modèle est donc, pour le moment, incapable de modéliser des cultures associées.

PASTIS⁹ est un modèle unidimensionnel permettant une simulation couplée des flux d'eau (équation de Richards), de chaleur et de solutés (par convection-dispersion) (Lafolie et al., 1991 ; Reyes Gomez, 2002). Ces transferts peuvent être modélisés dans les systèmes sol, plante et paillis (Findeling, 2001). La demande climatique est répartie de manière homogène sur le profil (Reyes Gomez, 2002) et le potentiel d'extraction est déterminé en fonction de celle-ci et de la longueur racinaire. Ce modèle de flux peut ensuite être couplé à un modèle de culture.

⁷ **PARCH** *Predicting Arable Resource Capture in Hostile environments*

⁸ **ETP** *EvapoTranspiration Potentielle*

⁹ **PASTIS** *Prediccion of Agricultural Solute Transfer In Soils*

Les modèles spécifiques

Il existe dans la bibliographie un grand nombre de modèles plus spécialisés qui s'intéressent à un aspect particulier de la modélisation du bilan hydrique. Ils s'avèrent inutilisables pour la satisfaction de nos objectifs mais peuvent apporter des approches utiles au développement ou à la modification d'un modèle existant pour la modélisation de cultures associées. On peut citer certains modèles spécifiques au calcul de l'évaporation du sol (Ritchie, 1972 ; Brisson et Perrier, 1991 ; Hanks, 1991). D'autres s'intéressent particulièrement aux prélèvements racinaires (Campbel, 1991 ; Gardner, 1991 ; Doussan et al., 1999 ; Lafolie et al., 1999 ; Van der Berg et al., 2002). Certains auteurs enfin ont encore développé une approche simplifiée de la deuxième dimension (Ozier-Lafontaine et al., 1998 ; 2000 ; Sillon et al., 2000).

L'objectif de ce travail est d'étudier la dynamique hydrique du système composé d'une culture pérenne ligneuse : la vigne et d'une herbacée : la fétuque. Il est, plus particulièrement, d'identifier une approche de modélisation pertinente du bilan hydrique et de la culture qui nous permettra de mieux comprendre ce système et d'élaborer un outil d'évaluation des pratiques d'enherbement pour appuyer ces démarches auprès des viticulteurs. Un rapide tour d'horizon des modèles existants ne nous a pas permis d'en identifier un qui satisfasse à tous nos critères (*tableau 1*). Aussi, faisons-nous le choix, dans un premier temps, d'évaluer si une approche simple à réservoirs et monodimensionnelle peut rendre compte de la dynamique hydrique d'un système complexe et hétérogène comme celui étudié. Le modèle de Riou a déjà été étudié et a montré certaines limites (Laffosse, 2001 ; Celette et Celette, 2002 ; Pellegrino, 2003). Le choix est fait, ici, d'évaluer le modèle STICS qui intègre certains formalismes plus complexes à la modélisation du bilan hydrique et qui a déjà été paramétré pour la vigne. Il nous faudra d'abord évaluer s'il peut simuler de manière satisfaisante le bilan hydrique d'un vignoble en sol nu dans les conditions méditerranéennes. L'étude de l'association culturale vigne-enherbement (Celette et Celette, 2002) permet d'envisager deux approches simples avec un modèle à réservoirs. La première, évaluée dans ce travail, consiste en une compartimentation étanche entre un réservoir destiné à la vigne et un autre à l'enherbement. La seconde consiste à attribuer un même réservoir aux deux cultures, supposant alors que les transferts hydriques ne sont pas limitant pour la satisfaction des besoins des deux espèces.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Sites et protocoles expérimentaux

Trois sites expérimentaux, situés dans le Gard et l'Hérault, servent à notre étude : les parcelles de Roujan, Aspères et Gallargues-le-Montueux. Leur climat est méditerranéen avec des précipitations généralement concentrées sur la période automne-hiver (400 à 500 mm de précipitations entre septembre et février) et un été chaud et sec (moins de 100 mm). Les vignes étudiées ayant toutes 10

ans ou plus, l'enracinement est supposé avoir atteint une architecture relativement stable (Champagnol, 1984).

La parcelle de Roujan (43°30'19"N - 3°18'38"E) (Pellegrino, 2003)

Cette parcelle, d'environ 1 ha, est en pente légère (environ 8%). On n'observe pas de nappe phréatique jusqu'à une profondeur de 6 m au moins. Le sol appartient aux calcisols (Baize et Girard, 1995) avec une première couche limoneuse (de 1 à 2 m d'épaisseur) puis une couche inférieure limono-argileuse. Les racines de vigne se concentrent dans la première couche. Le taux de matières organiques est faible (1% environ dans l'horizon de surface). La vigne (*Vitis vinifera* cv. Syrah sur SO4) a été plantée en 1987 (2,5 m x 1,2 m) selon une orientation Nord-Sud.

Deux placettes homogènes sont équipées de 6 tubes de sonde à neutrons (Daudet et Vachaud, 1977 ; Pellegrino, 2003) (3 sur le rang et 3 sur l'inter-rang) de 2,90m de profondeur. C'est sur cette tranche de sol que serait réparti l'essentiel des consommations de la vigne (Trambouze et al., 1994 ; Trambouze, 1996). La densité du sol a été évaluée par des mesures de sonde gamma sur tout le profil et de cylindre en surface. Les campagnes de mesures ont été réalisées au cours des années 2000 et 2001.

La parcelle d'Aspères (43°48'30"N - 4°02'21"E)

Cette parcelle en pente très légère est d'une superficie de 2 ha environ. Elle possède une forte pierrosité (50% environ), ce qui rend difficile l'estimation de sa profondeur. Le sol est de nature argilo-limoneuse très calcaire avec de petites fentes de retrait en surface. La pénétration des racines est perturbée à partir de 60 cm de profondeur par l'existence d'horizons indurés et des traces d'hydromorphie apparaissent à cette profondeur (taches verdâtres et grisâtres). Ce sol est considéré comme un Calcisol avec des traces d'hydromorphie (Baize et Girard, 1995). Le taux de matières organiques (entre 1,5 et 2% dans les 50 premiers centimètres) est supérieur à ceux observés dans les sols viticoles de la région. La vigne (*Vitis vinifera* cv. Syrah sur Ru140) a été plantée en 1985 (2,5 m x 1,2 m) selon une orientation quasi N-S.

Au cours de l'année 2001, deux placettes ont été équipées de tubes de sonde à neutrons de 2m90 de profondeur selon un protocole identique à celui de Roujan (Pellegrino, 2003).

La parcelle de Gallargues (43°43'17"N - 4°10'25"E)

Cette parcelle de 4,2 ha se situe sur une plaine alluvionnaire inondable, à quelques centaines de mètres du Vidourle. Elle est entourée de parcelles maraîchères (melons, asperges) et viticoles. Le sol (Fluvisol), profond et très homogène, est limoneux à limono-argileux. La zone de battement du toit de la nappe était située entre 4 et 5 m de profondeur au cours de l'année d'étude. La teneur en matières organiques est d'environ 1%. Les systèmes racinaires des deux cultures ne rencontrent pas ou peu d'obstacle à leur développement mais se concentrent principalement dans le premier mètre cinquante (Celette et Celette, 2002). La vigne (*Vitis vinifera* cv. Sauvignon sur SO4) a été implantée en 1993 (2,35 m x 1 m) et les rangs sont orientés Nord Est-Sud Ouest. La fétuque (*Festuca arundinacea* cv.

Centurion) a été semée sur 1,5 m de large en 1998 et se comporte donc comme un couvert pérenne au moment des expérimentations.

Deux modalités, composées de 4 répétitions réparties en blocs complets randomisés, ont été suivies (enherbée et désherbage chimique). Les inter-rangs enherbés le sont sur 1,5 m de largeur (soit 70% de la surface). L'humidité du sol est suivie par des prélèvements gravimétriques réalisés à la tarière sur le rang et l'inter-rang jusqu'à une profondeur de 1,5 m. Une répétition de chaque traitement est équipée d'une batterie de tensiomètres constituée de 5 séries de cannes allant du rang à l'inter-rang. Chaque série est elle-même composée de 6 tensiomètres s'échelonnant de 0,5 à 1,75 m de profondeur. Ces batteries permettent l'observation des transferts hydriques. Pour cela, les propriétés hydrodynamiques du sol ont été déterminées en laboratoire à l'aide de la méthode de Wind (*figure 1*) (Tamari et al., 1993 ; Morhath et al., 1997 ; Bruckler et al., 2002). Dans le même temps, nous avons mesuré la densité apparente de chaque horizon grâce à la méthode des cylindres. Au cours de l'année, des prélèvements d'herbe ont été effectués et leur teneur en azote a été mesurée (méthode Dumas). Enfin, une fosse a été creusée dans chacune des modalités étudiées afin de réaliser une cartographie racinaire. Pour cela, une grille de comptage de 1m de côté, composée de mailles carrées de 10cm de côté a été appliquée sur un mur aplani, parallèle au sens du rang. Dans chacune des mailles, les racines de fétuque et de vigne sont comptabilisées et classées selon leur diamètre. La campagne de mesures a été réalisée en 2002.

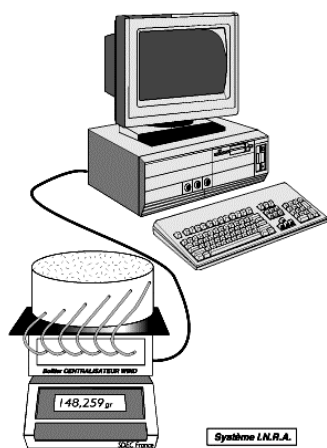


figure 1 – la méthode de Wind. Un cylindre de sol de volume connu initialement saturé est soumis à une évaporation sur sa face supérieure. La variation de masse du sol est ensuite suivie automatiquement afin de déterminer les pertes en eau et l'humidité moyenne de l'échantillon. Les potentiels matriciels $(h(z, t))$ sont également mesurés par une série de microtensiomètres échelonnés à différentes profondeurs.

figure 1 – *Wind's method.* A soil cylinder, initially saturated, is submitted to evaporation at the top face. the soil mass variation is followed automatically in order to determine the water losses and the mean humidity of the sample. The matricial potentials are measured to by microtensiometers staggered at different deeps.

Paramétrage et utilisation de STICS pour la modélisation du système vigne-enherbement-sol

La version 4 de STICS a été retenue car elle comporte une option Cultures Associées qui sera utilisée à la suite de ce travail. Les sols (humidités caractéristiques, densités apparentes, granulométries) et itinéraires techniques (structure de la plantation) ont été paramétrés grâce aux résultats de Pellegrino (2003) pour les parcelles d'Aspères et de Roujan et de Celette et Celette (2002) pour la parcelle de Gallargues. Pour utiliser l'approche de Shuttleworth et Wallace, nous avons utilisé les mesures de la forme végétale (hauteur et largeur des rangs) obtenues au cours de ces mêmes

travaux. Les fichiers climatiques ont été complétés par les données corrigées de stations climatologiques proches.

De nombreux paramètres sont estimés à partir de références bibliographiques (*tableau 2*) ou données par les auteurs de STICS (Brisson et al., 1999). Certains ont ensuite fait l'objet de légères modifications par optimisation en fonction des résultats obtenus à Roujan en 2000. D'autres ont été obtenus dans une modélisation des vignobles de côtes du Rhône (Lecoq, 2002). Enfin, STICS offre la possibilité d'une optimisation numérique des paramètres pour lesquels aucune référence n'est trouvée. Elle se fait dans un intervalle de valeurs données a priori par les auteurs du modèle.

	Paramètre	définition	valeurs			unité	réf.
			Rouj	Asp	Gall		
Paramètres techniques	orientrang		0,0873	2,723	0,698	rd	1, 2
	ilev	débourrement	92 - 81	89	85	jour calendaire	1, 2
	latitude	latitude du lieu pour le calcul de la photopériode	43,51	43,80	43,72	degrés	1, 2
Sol	albedo	albedo du sol nu	0,21	0,20	0,25	SD*	3
	q0	limite d'évaporation de la phase potentielle d'évaporation du sol	9	10	12	mm	3
	ruisolnu	fraction de la pluie ruisselée en sol nu	0,35	0,10	0,10	SD	optim
Paramètres plantes	croirac	vitesse de croissance du front racinaire		0,30		cm/degré.jour	optim
	draclong	vitesse maximale de production de longueur racinaire		4000		cm/degré.jour	optim
	hautbase	hauteur de base du couvert végétal		0,5		m	1, 2
	hautmax	hauteur maximale du végétal		2		m	1, 2
	lvfront	densité racinaire au niveau du front d'enracinement		0,05		cm/cm3	5
	rapforme	rapport épaisseur/largeur de la forme du végétal		3,5			1, 2
	rsmn	résistance stomatique minimale		397	500	s/m	1
	stlprmat	somme de température entre floraison et maturité		1100	1250	degrés.jour	1, 2, 4
	stlevdrp	somme de température entre levée et floraison		370	280	degrés.jour	1, 2, 4
Paramètres généraux	aclim	composante climatique		15,0		SD	3
	cfes	paramètre de décroissance de l'évaporation avec la profondeur		4,0		SD	3, optim
	codecaltemp	option calcul de la température		1		SD	
	codeh2oact	activation de l'effet stress hydrique		1		SD	
	codeinnact	activation du stress azoté		1		SD	
	pminruis	quantité minimale de pluie pour déclencher le ruissellement		5,0		mm	1
	zesx	profondeur maximale affectée par l'évaporation		40,0		cm	1, 2
Conditions initiales	hinitf	humidité initiale de chaque horizon				g/g	1, 2
	densinitial	densité racinaire initiale de chaque horizon		0,05 à 0,30		cm/cm3	2, 5
	zrac0	profondeur du front racinaire initial	55	50	40	cm	2
	stade0	stade de démarrage de la simulation		levée			

* Sans Dimension ; 1-Pellegrino, 2003 ; 2-Celette et Celette, 2002 ; 3-Brisson, 1999 ; 4-Hilbert, 2002 ; 5-Trambouze, 1996 ; optim-optimisés

tableau 2 – paramètres de STICS modifiés pour la modélisation du vignoble en conditions méditerranéennes

table 2 – STICS' modified parameters for vineyard's modelling in the Mediterranean conditions

Procédure de modélisation d'un compartiment de sol réservé à la vigne

Afin d'évaluer l'hypothèse simplificatrice d'une compartimentation étanche du sol en un réservoir pour chacune des cultures, un compartiment pour la vigne, dont les ressources hydriques sont limitées à celles du rang (soit 1 m de largeur), est simulé.

Le paramétrage du système aérien est conservé pour ne pas modifier l'interception de la lumière par la vigne. L'enherbement est remplacé par un paillage plastique dont l'albédo est celui d'un couvert végétal (0,23)(Brisson et al., 1999) afin de réfléchir autant de rayonnement que la fétuque. Ce paillage étant étanche, il empêchera toute évaporation de l'inter-rang. Seule l'humidité créée dans le couvert par la transpiration de la fétuque n'est pas reproduite. Il est alors possible que la transpiration de la vigne soit légèrement surestimée.

STICS étant monodimensionnel, il est impossible de modifier la largeur des réservoirs. Aussi, afin d'obtenir le volume recherché, la profondeur de chaque horizon, ainsi que la vitesse d'avancement du front d'enracinement et sa position initiale ont été divisés par le rapport $\frac{l_r}{d_{ir}}^{10}$. Les précipitations sont également divisées par ce rapport afin de simuler la pluie reçue par le rang. L'évaporation directe qui peut exister sur le paillage plastique est donc négligée et toute la pluie reçue par celui-ci est considérée comme ruisselant directement sur le rang.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Évaluation de la modélisation du bilan hydrique par STICS-vigne au vignoble méditerranéen

Cette évaluation porte sur les données de Roujan et d'Aspères, deux parcelles plantées du même cépage : la Syrah. Une tentative de modélisation sur ces situations a déjà été menée avec le modèle de Riou (Pellegrino, 2003). Il nous est donc possible de comparer les performances de ces deux modèles et de voir si les compléments apportés par le modèle STICS améliorent la qualité des simulations. Le modèle vigne pourra être également évalué sur les résultats de la modalité désherbée de Gallargues.

Simulation du développement de la vigne

Le cycle de développement de la vigne a été paramétré car il a un impact sur le fonctionnement physiologique de la plante. La date de débourrement est forcée à partir des données observées. Le cumul de température nécessaire à chaque stade est paramétré par rapport aux observations de Roujan en 2000 pour la Syrah et de Gallargues 2002 pour le Sauvignon. Ces données sont cohérentes avec celles recueillies au cours de précédentes expérimentations sur d'autres vignobles (Hilbert, 2002). Les stades simulés sont conformes aux moyennes observées sur deux répétitions de chaque parcelle (*tableau 3*).

Situation simulée	débourrement		floraison*		maturité	
	obs	obs	sim	obs	sim	
Roujan-2000	01-avr	03-juin	06-juin	11-sept	12-sept	
Roujan-2001	22-mars	01-juin	31-mai	03-sept	03-sept	
Aspères-2001	30-mars	01-juin	31-mai	06-sept	06-sept	
Gallargues-2002	25-mars	25-mai	27-mai	?	03-sept	

* STICS 4 ne reconnaît pas la floraison mais on la considère presque confondue au début de remplissage des grains car la pollinisation correspond au début de croissance de l'ovaire (Champagnol, 1984)

tableau 3 – simulation du développement de la vigne sur les sites étudiés

table 3 – *vine's development modelling of the studied sites*

¹⁰ l_r largeur du rang
 d_{ir} distance entre rangs

Simulation de la croissance et de la production

Les résultats concernant la production n'ont pu être évalués faute de données expérimentales. Seule leur cohérence par rapport à d'autres vignobles est vérifiée (Lecoq, 2002). Ne possédant pas de mesures du LAI sur les campagnes étudiées, celui-ci a été forcé à partir d'une dynamique tirée de données expérimentales obtenues dans d'autres études (Lebon, comm. pers.).

Évaluation du bilan hydrique simulé

Les paramètres affectant le ruissellement ont d'abord été calés. Il est apparu que seule la parcelle de Roujan connaissait sensiblement ce phénomène. Pellegrino (2003), lors de ses simulations, a cherché à estimer cette variable à partir de la typologie des états de surface établie par Leonard et Andrieux (Leonard et Andrieux, 1998 ; Hatier, 2000). Le modèle a donc été paramétré afin d'obtenir un ruissellement annuel du même ordre de grandeur que celui estimé par Pellegrino (environ 60mm en 2000 et 30 en 2001) (*tableau 3*). Le paramétrage de la résistance stomatique (RSMIN), utilisée dans l'approche de Shuttleworth et Wallace (1985), a été réalisé à partir des valeurs de conductance stomatique mesurées par Pellegrino (2003). Enfin, la croissance du système racinaire a été simulée selon un profil de densité vraie. Les divers paramètres ont été estimés d'après les observations de fosses racinaires (Trambouze, 1996 ; Celette et Celette, 2002) réalisées dans les vignobles de la région (CA34¹¹).

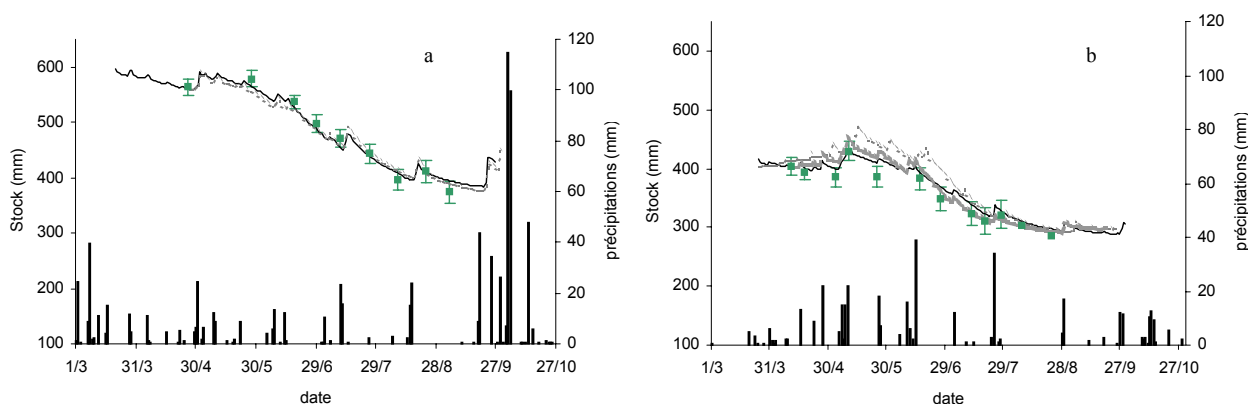


figure 2 – évolution des stocks simulés et observés pour les situations a/ Aspères 2001 et b/ Roujan 2000
figure 2 – observed and simulated stocks' evolution for the sites of a/ Aspères 2001 and b/ Roujan 2000

La simulation des stocks (sur 2 m pour Roujan et Aspères et 1,5 m pour Gallargues) est globalement satisfaisante dans un intervalle de confiance de 5% (*figure 2*). On observe malgré tout une légère surestimation du stock en début de cycle (jusqu'à fin juin) sur les simulations de Roujan puis une sous-estimation de celui-ci, alors que c'est plutôt le phénomène inverse sur la simulation d'Aspères. Pellegrino (2003) avait observé sensiblement la même chose avec le modèle de Riou. Cependant, à la différence du modèle de Riou, STICS simule un stock qui reste dans l'intervalle de

¹¹ CA34 Chambre d'Agriculture de l'Hérault

confiance. La différence entre les deux modèles est d'autant plus sensible à Roujan, particulièrement pour l'année 2000. Dans cette situation, le modèle de Riou surestime fortement le stock en début de cycle. Cet écart (près de 10% de stock mi-mai) se réduit progressivement à partir de fin juin, du fait probablement d'un retard dans la détection du stress de la vigne par le modèle de Riou lié à la surestimation des stocks disponibles. La régulation de la transpiration est alors elle aussi retardée. L'écart entre les deux simulations est très limité sur les parcelles de Gallargues et Aspères. Or c'est l'intensité du ruissellement qui différencie ces situations de Roujan. C'est ce qui a conduit Pellegrino à retarder le début de simulation avec le modèle de Riou, faute de pouvoir mieux estimer le ruissellement des premiers épisodes pluvieux (*figure 2*). L'écart avec la simulation de STICS est alors réduit. La qualité prédictive de STICS est meilleure comme le montre son évaluation statistique (*tableau 4*). Ceci s'explique apparemment par une meilleure prise en compte du ruissellement mais aussi de l'évaporation. Dans STICS, la demande évaporative est répartie sur un horizon superficiel avec un phénomène d'atténuation avec la profondeur. La surface s'assèche donc plus rapidement

	STICS				Riou			
	RRMSE	corrélation	R ²	efficience	RRMSE	corrélation	R ²	efficience
Roujan-2000	0,0352	0,97x + 21,68	0,9803	0,9220	0,0847	1,12x - 19,62	0,8780	0,7297
Roujan-2001	0,0219	1,03x - 13,07	0,9809	0,9790	0,0363	1,04x - 9,27	0,9510	0,9450
Aspères	0,0235	0,89x + 50,11	0,9839	0,9680	0,0261	0,85x + 67,89	0,9878	0,9570
Gallargues	0,0390	1,03x-7,77	0,9522	0,9496				

avec STICS, ce qui a limité plus précocement l'évaporation.

tableau 4 – Évaluation statistique de la simulation du stock par STICS et le modèle de Riou et al. (1994) par l'erreur relative (RRMSE), le coefficient de corrélation (R²) et l'efficience

table 4 – *Statistical evaluation of the stock's modeling by STICS and the Riou and al's model (1994) by the Relative Root Mean Squared Error, the correlation factor (R²) and the efficiency*

Les profils d'humidité (*figure 3*) permettent d'évaluer la répartition de l'humidité dans les horizons, notamment au cours du rechargement du profil (souvent mal simulé). Malgré quelques approximations, la répartition de l'humidité au sein des profils est bien simulée. La simulation des stocks n'est pas remise en cause par des phénomènes de compensation entre humidité des horizons superficiels et profonds. Ceux-ci sont en effet rares et d'importance limitée. Les dynamiques des horizons profonds (plus simples) sont les mieux rendues. Celles des horizons de surface montrent des imperfections (*figure 3*), particulièrement pour la parcelle de Roujan et celle de Gallargues, où les intervalles de confiance sont importants du fait d'une hétérogénéité dans les résultats des différentes répétitions. Ceci apparaît lors de l'évaluation statistique de la modélisation (*tableau 5*). Une estimation imparfaite de l'évaporation du sol ou des consommations en eau de la vigne en surface, ou encore de l'infiltration superficielle peut être à craindre. L'efficience du modèle est également mauvaise pour les simulations de l'horizon profond. Il apparaît que la consommation de la vigne dans cet horizon est sous-estimée (*tableau 5*).

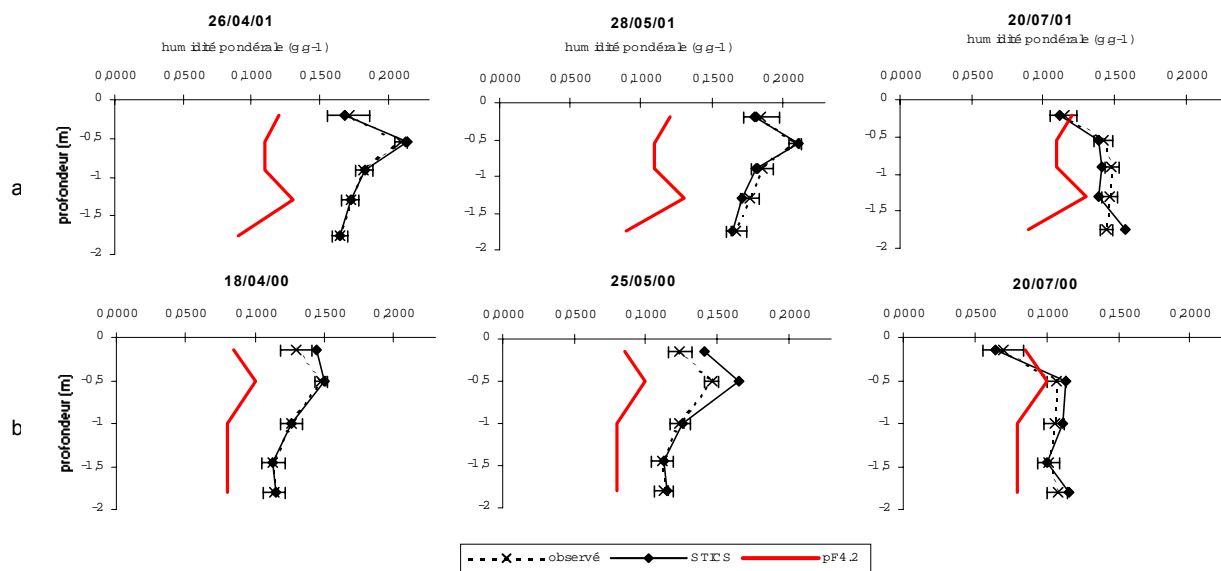


figure 3 – Profils d’humidité simulés et observés pour a/ Aspères-2001 et b/ Roujan-2000

figure 3 – Simulated and observed humidity profiles for a/ Aspères-2001 and b/ Roujan-2000

	Roujan-2000	Roujan-2001	Aspères	Gallargues
Hp1				
RRMSE	0,1091	0,3005	0,1130	0,0827
y=	1,15x - 0,01	1,09x - 0,03	0,82x + 0,02	1,01x-0,01
R ²	0,9274	0,7708	0,8366	0,9702
efficience	0,8983	0,4228	0,7630	0,9032
Hp2				
RRMSE	0,0671	0,0702	0,0338	0,0755
y=	0,97x + 0,01	1,14x - 0,02	1,01x	0,79x + 0,03
R ²	0,9539	0,8928	0,987	0,8811
efficience	0,8657	0,8775	0,9784	0,8196
Hp3				
RRMSE	0,0346	0,0648	0,0350	0,0939
y=	0,84x + 0,02	1,25x - 0,03	1,12x - 0,02	1,01x + 0,01
R ²	0,9532	0,9455	0,9951	0,9134
efficience	0,8666	0,8985	0,9521	0,7693
Hp4				
RRMSE	0,0237	0,0448	0,0305	0,0737
y=	1,16x - 0,02	1,31x - 0,04	x	1,31x - 0,041
R ²	0,9493	0,9648	0,9615	0,7433
efficience	0,9131	0,9114	0,9287	0,7011
Hp5				
RRMSE	0,0538	0,0965	0,0829	
y=	9E-14x + 0,12	0,20x + 0,12	0,38x + 0,10	
R ²	0,0001	0,9563	0,9827	
efficience	-0,9648	-0,4415	-0,2750	

tableau 5 – Évaluation statistique des simulations des humidités pondérales par horizon par la RRMSE, le coefficient de corrélation (R²) et l’efficience du modèle

table 5 – Statistical evaluation of the weight humidity modeling by soil layer by the RRMSE, the correlation factor and the efficiency

Évaluation des transpiration et évaporation modélisées

Trambouze (1996) a quantifié expérimentalement la transpiration de la vigne et l’évaporation du sol sur la parcelle de Roujan (tableau 6) au cours de l’année 1994. Il mesure ainsi une ETR¹² cumulée, ainsi que la transpiration moyenne journalière de la vigne (Tv¹³) et l’évaporation du sol cumulée (Es¹⁴) sur les mois de juillet et août (Trambouze et Voltz, 2001). Les valeurs simulées de STICS pour l’ETR et la Tv sont moindres. En revanche, l’ordre de grandeur de l’évaporation du sol simulée est identique à celui observé. L’aspect dynamique de l’évaporation apparaît également conforme aux observations de Trambouze (1996) avec de très fortes évaporations après une pluie (plusieurs mm/j) puis une chute de cette évaporation jusqu’à une valeur plancher comprise entre 0,2 et 0,5mm/j. Le rapport Tv/ETR

¹² ETR Évapotranspiration Réelle

¹³ Tv Transpiration de la vigne

¹⁴ Es Évaporation du Sol

des simulations en 2000 et 2001 est inférieur à celui observé en 1994. Si une sous-estimation de la transpiration par le modèle est possible, les données disponibles sont insuffisantes pour pousser l'analyse. La qualité des simulations de réserves en eau du sol étant satisfaisante sur l'ensemble des situations, il est raisonnable de considérer que STICS simule globalement bien le bilan hydrique d'une vigne en sol nu en conditions méditerranéennes. Il peut donc être utilisé dans la modélisation de l'association culturale.

	ETR (mm)	Tv (mm/j)	Es (mm)	Tv/ETR (%)
Roujan				
1994	153	2,2	58	89,2
2000	112	1,02	49	56,5
2001	117	1,1	48	58,3
Aspères				
2001	184	1,56	87	52,6

tableau 6 – Comparaison des ETR, Tv, Es et du rapport Tv/ETSR observés par Trambouze (1996) en 1994 et simulés par STICS en 2000 et 2001

table 6 – Comparison of the ETR, Tv, Es and of the Tv/ETSR ratio observed by Trambouze (1996) in 1994 and simulated by STICS in 2000 and 2001

Résultats expérimentaux sur l'association culturale vigne-enherbement

Étude des profils racinaires de la parcelle enherbée (Gallargues)

Le sol de la parcelle est très homogène et peu d'obstacles perturbent la colonisation racinaire. Ainsi, les racines de vigne, souvent torturées, apparaissent ici très lisses et rectilignes. Les cartes racinaires de la modalité désherbée chimiquement (*figure 4*), montrent que le système racinaire de la vigne investit indifféremment le rang et l'inter-rang. Les racines de diamètre supérieur à 1 mm sont peu nombreuses et comprises, pour l'essentiel, dans le premier 0,5 m de sol. Elles partent horizontalement du cep pour plonger verticalement à quelques décimètres du cep. Les racines fines, considérées comme les plus actives dans l'absorption, sont présentes dans tout le profil de sol avec un nombre plus important entre 0,2 et 0,7 m de profondeur (70% des racines dénombrées). Des racines sont présentes jusqu'au fond de la fosse, à 1,5 m de profondeur et certaines d'entre elles plongent encore en dessous, démontrant que le système racinaire de la vigne colonise une profondeur plus importante. Le nombre de racines concerné est toutefois bien moindre. Ces observations vont dans le sens de la représentation faite du système racinaire de la vigne par certains auteurs (Ionescu et al., 1978).

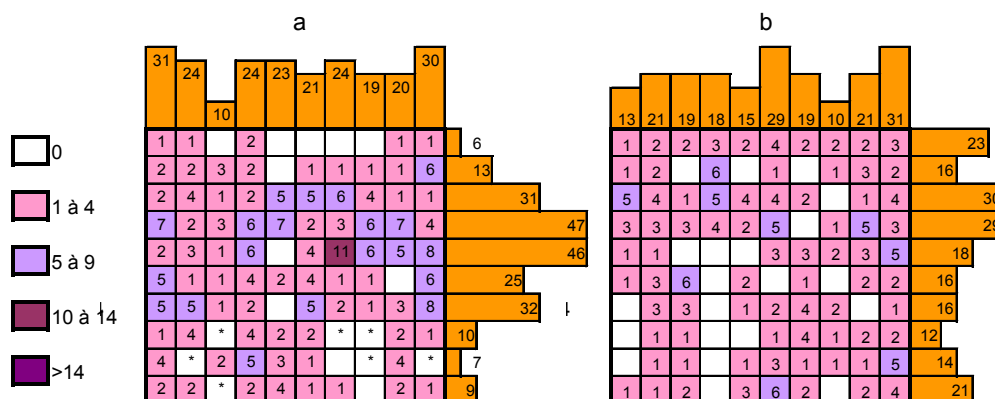


figure 4 – cartes de comptage de racines fines sur un vignoble désherbé. a/ à 65cm du cep, b/ à 35cm
figure 4 – maps of fine roots count for a weed controlled vineyard. a/ at 65cm of the stock, b/ at 35cm

Les cartes de la modalité enherbée montrent un système racinaire de la fétuque bien plus dense dans le premier mètre de sol que celui de la vigne (*figure 5*). Si quelques racines ont pu être observées jusqu'à 1,40 m, l'essentiel se concentre dans le premier 0,5 m de sol (plus de 80% des racines dénombrées). Le comptage réalisé plus près du cep montre une importante diminution du nombre de racines de fétuque (environ -30%) mais leur nombre reste important. Concernant la vigne, on trouve un nombre de racines sous l'inter-rang bien inférieur à celui observé sur la modalité désherbée, il est en revanche plus important sous le rang. La vigne semble ainsi avoir cherché à s'adapter à la concurrence. Certains auteurs avaient déjà observé un tel phénomène pour une association culturale pérenne-herbacée (Morlat, 1981 ; Lehmann et al., 1998), avec une culture pérenne qui concentre son exploration racinaire sous le rang. Ceci pourrait aller dans le sens d'une compartimentation des réservoirs de consommation de chacune des cultures. Quelques racines de vigne sont présentes à plus de 1,5 m de profondeur.

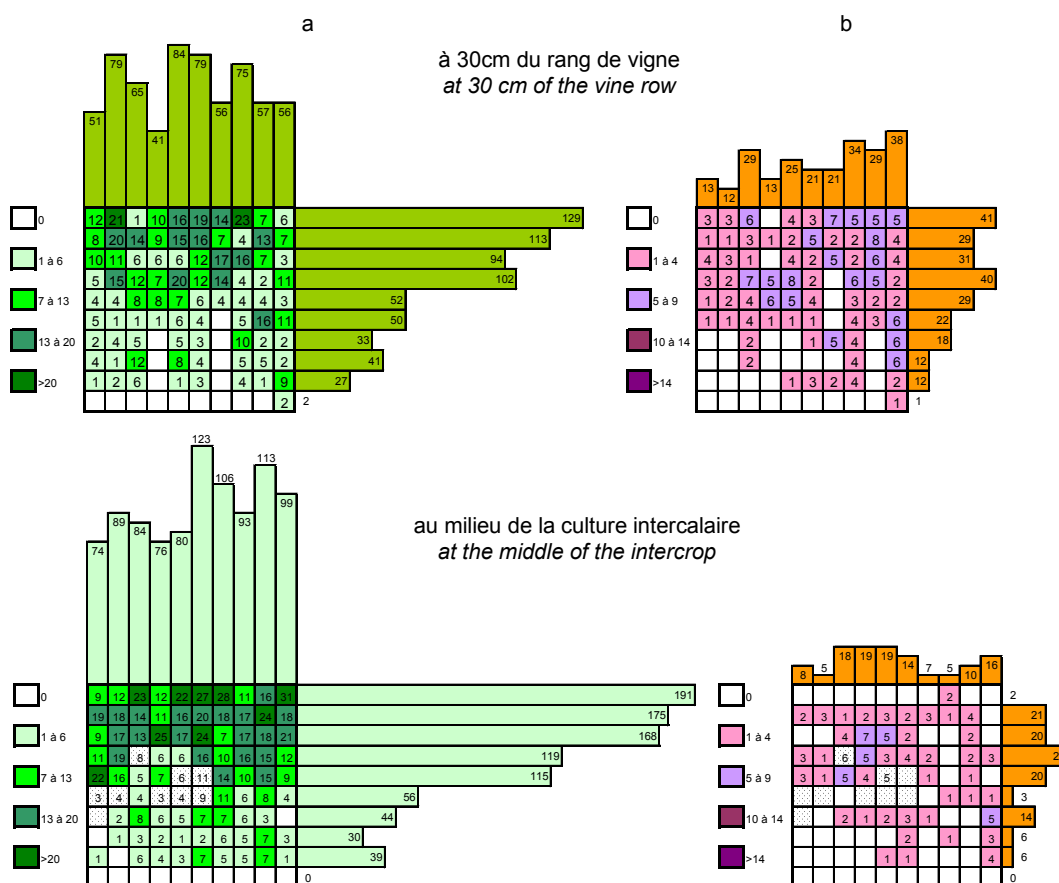


figure 5 – cartes de comptage racinaire sur un vignoble enherbé. a/ comptage des racines de fétuque, b/ comptage des racines fines de vigne.

figure 5 – maps of fine roots count on a turf vineyard. a/ grass roots count, b/ vine fine roots count.

Étude des dynamiques de potentiel hydrique du sol

Les potentiels hydriques mesurés en début de cycle sur la modalité enherbée sont supérieurs à ceux de la modalité témoin (Celette et Celette, 2002). Ceci est dû vraisemblablement à une infiltration améliorée par l'enracinement de la fétuque qui augmentent l'efficacité des pluies hivernales. Jusque mi-avril, la fétuque consomme superficiellement et seules les mesures des tensiomètres à 50 cm de

profondeur varient (*figure 6*). C'est de début avril à mi-mai que la consommation de la fétuque est la plus importante. La forte consommation de l'espèce herbacée sur cette période entraîne une diminution des potentiels hydriques mesurés jusqu'à une profondeur de 0,8 à 1 m sur l'inter-rang. La deuxième tonte, réalisée le 15 mai, entraîne un début de sénescence de la fétuque et un fort ralentissement de sa croissance. Pourtant, c'est à partir de la floraison de la vigne, fin mai, que l'assèchement du profil s'accélère fortement, autant en conditions enherbées que désherbées. Ces observations témoignent d'une augmentation de la consommation en eau de la vigne à cette période. Cette augmentation est liée à celles de la demande climatique et des besoins de la vigne du fait d'un LAI supérieur. A partir de ce stade, l'assèchement du profil est plus intense sous le rang mais existe également sous l'inter-rang, sans qu'il soit possible de dire quelles sont les parts respectives des consommations de la vigne et de l'enherbement. L'assèchement affecte également les horizons plus profonds. La dernière carte de potentiels hydriques présentée (*figure 6*) montre une réhumectation en profondeur sous l'inter-rang sans qu'il soit possible de déterminer s'il s'agit de remontées capillaires ou d'un décrochage lent du tensiomètre. Cependant, la très faible conductivité hydraulique du milieu, liée à son aridité, fait privilégier la deuxième hypothèse. Les échantillons étudiés par la méthode de Wind permettent de déterminer certaines propriétés hydrodynamiques du sol et notamment les fonctions de $K(\theta)$ et $h(\theta)$, par optimisation avec le modèle de Van Genuchten (1980). Grâce à cela et aux mesures tensiométriques, l'importance des flux a été évalué par le formalisme de Richards (1931). Ainsi, si la conductivité hydraulique à saturation mesurée est relativement importante (environ 3 cm/h dans la modalité enherbée), elle chute rapidement avec le potentiel matriciel (environ 1 $\mu\text{m/h}$ pour $\psi=-400$ hPa). Ceci explique que les flux calculés en conditions insaturées soient très faibles dès le début du mois de mai (*figure 6*), confirmant l'hypothèse de certains chercheurs (Voltz, comm. pers.) selon laquelle les transferts hypodermiques sont très limités dans ce type de système. En revanche, des transferts latéraux sont possibles par une consommation directe des racines. Malgré tout, ces résultats confirment qu'il est envisageable de modéliser le système étudié en distinguant des compartiments de sol séparés pour chaque espèce.

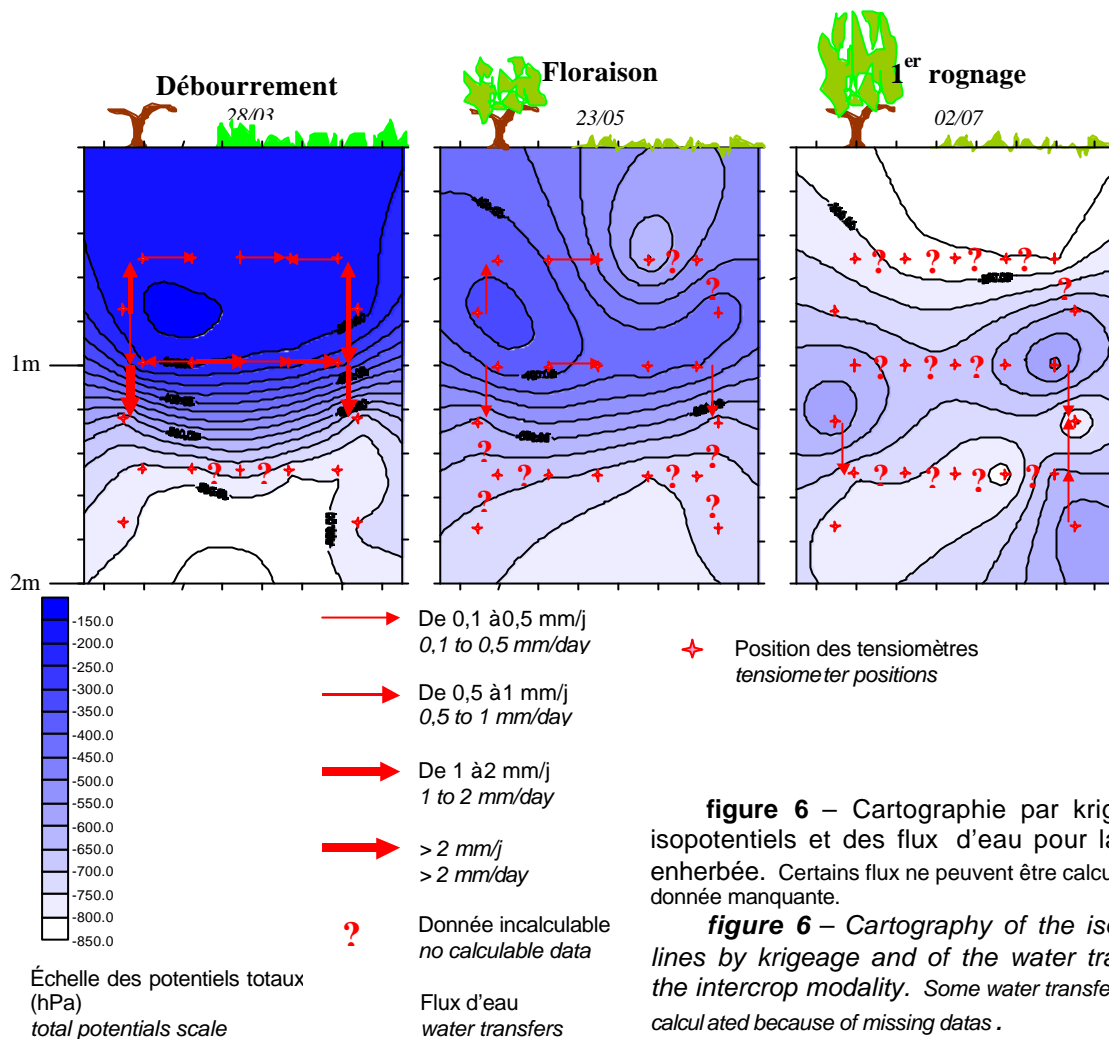


figure 6 – Cartographie par krigeage des isopotentiels et des flux d'eau pour la modalité enherbée. Certains flux ne peuvent être calculés du fait de donnée manquante.

figure 6 – Cartography of the isopotentials lines by krigage and of the water transfers for the intercrop modality. Some water transfers can not be calculated because of missing datas.

Évaluation d'une approche à compartiments de sol étanches pour la modélisation d'une association vigne-enherbement

STICS vigne ayant produit une représentation satisfaisante du bilan hydrique de la vigne sur sol nu, il peut être utilisé pour analyser le comportement de la vigne lorsqu'elle est associée à une culture intermédiaire. Pour évaluer une hypothèse de compartimentation, le système est simplifié en considérant que la vigne exploite uniquement les ressources comprises sous le rang. La mise en herbe entraînant une diminution sensible de la vigueur de la vigne, il nous faut simuler une nouvelle dynamique conforme aux données recueillies sur la parcelle étudiée au cours des années 2000 et 2001 (Chantelot et Sainrat, 2000 ; 2001).

Évaluation du bilan hydrique simulé

La dynamique du stock d'eau du sol (*figure 7*) est bien simulée jusqu'à la fin du mois d'avril. Sur la période allant de début mai à fin juin, l'écart se creuse entre le stock simulé et le stock observé, le premier est inférieur à celui observé de près d'un tiers le 20 juin (144 mm contre 101 mm). L'eau disponible est alors quasi nulle. A partir de cette date, la vigne modélisée stresse très fortement, entre en sénescence prématurément et finit par mourir.

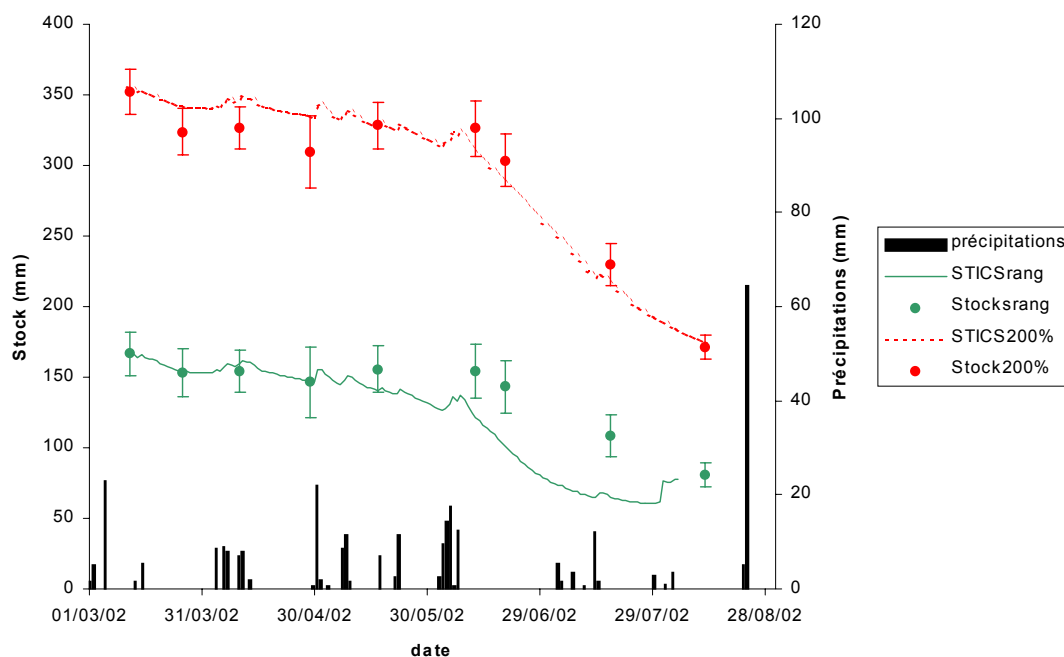


figure 7 – Évolution des stocks simulés et observés pour un compartiment de sol dédié à la vigne de la largeur du rang (soit 43% du volume total), de 75% du volume total et de 90% du volume total.

figure 7 – Observed and simulated stocks' evolution for a compartment dedicated to the vine of the row's width (about 43% of the total volume), of 75% of the total volume, of 90% of the total volume.

Les profils d'humidité (*figure 8*) montrent dès fin avril que l'humidité de l'horizon de surface est fortement sous-estimée. En revanche, l'humidité des deux horizons intermédiaires apparaît surestimée, tout en restant dans l'intervalle de confiance de 5%. La répartition de l'humidité dans le profil est imparfaite et un phénomène de compensation a lieu lors du calcul du stock sur cette période. Par la suite, les consommations apparaissent trop importantes par rapport au stock disponible. Cette surestimation affecte d'abord les horizons les plus superficiels avant de toucher les horizons plus profonds au début de l'été. Dès la mi-juin, les humidités simulées sont très proches de celle au point de flétrissement permanent.

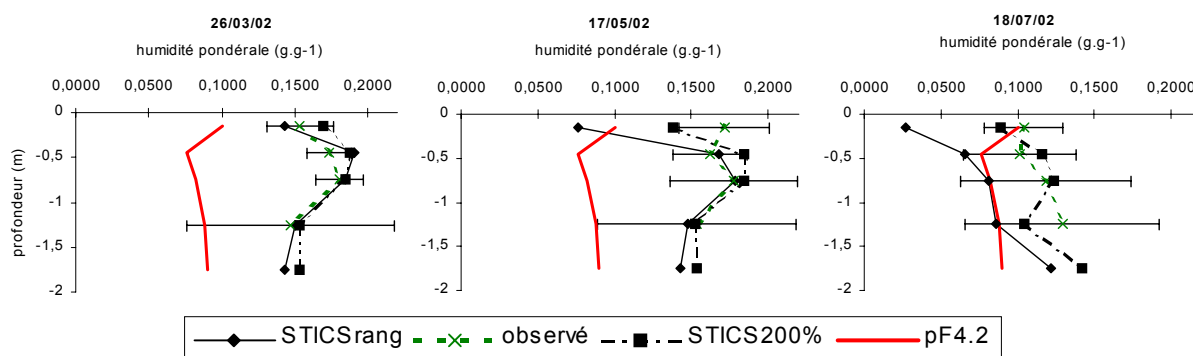


figure 8 – profils d'humidité simulés et observés sous le rang de vigne de la modalité enherbée avec un réservoir dédié à la vigne de la largeur du rang et de 90% du volume total.

figure 8 – simulated and observed humidity profiles on the vine's row of the modality with intercrop with a compartment dedicated to the vine of the width of the row and of 90% of the total volume.

Analyse des facteurs pouvant influencer sur les écarts entre simulé et observé

Les expérimentations menées sur la parcelle de Gallargues pour étudier l'association culturale nous ont montré que c'est sur la période de mai à juin, période où le stock d'eau du sol simulé décroche, que la vigne augmente fortement ses consommations. La transpiration de la vigne simulée est donc trop importante pour l'importance des réserves hydriques disponibles sous le rang. Deux hypothèses peuvent l'expliquer : la transpiration de la vigne est surestimée et/ou la taille du réservoir sous-estimée. Nous ne possédons malheureusement pas de mesures de la transpiration de la vigne enherbée et il est toujours difficile d'évaluer la taille du réservoir réellement exploité par une culture. En revanche, la transpiration simulée sur la période mai-juin dans les conditions du témoin désherbé est sensiblement la même que celle simulée dans en conditions enherbées (1,17mm/j pour 1,03mm/j). Ceci permet de supposer que l'écart simulé-observé serait plutôt le fait d'un stock sous-estimé. Le modèle doit permettre d'évaluer l'importance du stock nécessaire à la satisfaction des besoins de la plante.

Éléments justifiant un réservoir plus grand

De nombreux auteurs décrivent le système racinaire de la vigne comme pouvant coloniser des profondeurs très importantes (Seguin, 1972 ; Ionescu et al., 1978). Trambouze (1996) estime que la consommation de la vigne est principalement répartie dans les 3 premiers mètres de sol. Or, la version 4 de STICS ne permet pas de simuler un profil plus profond que 2 m. Vraisemblablement, la vigne concurrencée par la culture intercalaire explore des couches plus profondes. Elle pourrait également exploiter des réserves situées sous l'inter-rang car, si l'étude de la conductivité hydrique en conditions insaturées a montré que les flux latéraux devaient être limités, celle des profils racinaires dévoile des systèmes racinaires en partie entremêlés. Il est probable que chaque culture ne se contente pas d'exploiter le profil sous elle mais qu'elle va aussi chercher au delà. Les observations montrent que le prélèvement d'eau par la fétuque est sensible principalement dans les 80 premiers centimètres de sol environ. La période de forte transpiration de la vigne arrive après que la fétuque ait déjà bien asséché les horizons superficiels ; elle est vraisemblablement capable d'aller chercher de l'eau à une profondeur supérieure à 1 m sous l'inter-rang.

Évaluation du bilan hydrique avec un stock plus important

La dynamique du stock simulé (*figure 7*) est la meilleure avec un stock disponible pour la vigne double de celui précédemment simulé. Cette simulation entraîne toutefois une importante surestimation des stocks en début de cycle qui pourrait être due à une consommation de la fétuque, alors en pleine activité et non simulée ici. Ceci est rendu possible par la présence de son système racinaire dans les horizons de surface sous le rang. La dynamique du stock est ensuite bien simulée sur la période de forte consommation de la vigne. L'écart simulé-observé est limité et reste dans l'intervalle de confiance. Les profils d'humidité (*figure 8*) confirment qu'une consommation n'est pas prise en compte dans les horizons compris entre 0 et 1 m de profondeur jusqu'à mi-mai. Il s'agit vraisemblablement de celle de la fétuque, très active en cette période de l'année. Plus tard dans

l'année, les écarts entre humidité simulée et observée pour chacun des horizons sont compris dans un intervalle de confiance de 5%. Contrairement à la simulation initiale, il reste de l'eau disponible pour les plantes dans le profil simulé.

CONCLUSION

L'introduction d'un enherbement dans les vignobles méditerranéens est encore récente. Les quelques études menées sur cette pratique ont montré que sa gestion était délicate et qu'en cas de maîtrise imparfaite, elle pouvait remettre en cause la pérennité du vignoble. Toutefois, les nombreux avantages qu'elle apporte explique que les viticulteurs soient intéressés et justifie l'élaboration d'un outil d'évaluation de ces pratiques. Celui-ci passe nécessairement par un outil de modélisation du bilan hydrique et azoté et ce travail est une étape en ce sens. Une recherche bibliographique n'a malheureusement pas permis d'identifier un modèle existant qui puisse répondre, dans un premier temps, à au cahier des charges de cet outil d'évaluation. Ce travail visait donc à évaluer si une approche simple, à réservoirs, peut simuler correctement le système étudié. L'un de ces modèles, STICS, a déjà été paramétré pour une vigne, justifiant son choix.

L'évaluation du modèle vigne dans les conditions méditerranéennes s'est avérée satisfaisante. STICS apporte une amélioration dans la simulation du bilan hydrique d'une vigne en sol nu par rapport à des modèles à réservoirs plus simples comme celui de Riou et al. (1994). La différence semble notamment se jouer avec le module d'évaporation et le ruissellement. En revanche, ce travail a identifié un risque de sous-estimation de la transpiration de la vigne pour le paramétrage utilisé.

Considérant que l'évaluation du modèle de bilan hydrique de STICS pour la vigne était concluante, un travail de modélisation de l'association culturale vigne-enherbement a été engagé. Pour cela, plusieurs démarches sont envisagées. Ce travail en teste une consistant à compartimenter le sol de manière étanche avec un réservoir pour chacune des cultures. La détermination de la taille du réservoir à attribuer à la vigne a été délicate. Les simulations réalisées ont montré que la vigne ne se contentait vraisemblablement pas d'exploiter les réserves hydriques sous le rang mais qu'elle allait également sous l'inter-rang enherbé. Cette hypothèse est confortée par l'étude expérimentale qui montre des systèmes racinaires partiellement entremêlés avec des racines de vigne sous l'inter-rang et de fétuque sous le rang. Il apparaît également que la version 4 de STICS rend délicate la modélisation d'une vigne en limitant la profondeur du réservoir à 2 m. Ce travail permet encore d'observer une éventuelle consommation de la fétuque dans les horizons superficiels du sol sous le rang. Ceci rend difficile une compartimentation du sol en deux réservoirs étanches et fixes pour modéliser le système étudié.

Ce travail est une étape et d'autres démarches devront être envisagées afin de répondre aux questions qu'il pose. Pour confirmer les résultats obtenus, une simulation de l'inter-rang enherbé pourra être menée de la même manière afin de confirmer que la fétuque ne suffit pas à consommer toute l'eau réellement prélevée dans le réservoir qui lui est attribué. Une autre démarche est envisagée qui consiste à ne simuler qu'un seul réservoir dans lequel puiseraient les systèmes racinaires des deux

cultures, supposant implicitement qu'il n'existe pas de résistance significative au transport de l'eau. Cette simulation pourra être évaluée simplement avec la version cultures associées de STICS. Enfin, si ces deux approches devaient s'avérer insatisfaisantes, il conviendra d'envisager une modélisation plus détaillée de ces flux à l'aide de modèles mécanistes tel que PASTIS ou HYDRUS 2D. Les transferts hydriques peuvent également être pris en compte en deux dimensions de manière simplifiée comme ont pu le faire Sillon et al. (2000).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baize, D. et Girard, M.-C., 1995 - Le référentiel pédologique. INRA, Paris - France, 332p.
- Battany, M. C. et Grismer, M. E., 2000 - Rainfall runoff and erosion in Napa Valley vineyards : effects of slope, cover and surface roughness. *Hydrological processes*, 14: 1289-1304.
- Baumann, D. T., Bastiaans, L., Goudriaan, J., Van Laar, H. H. et Kropff, M. J., 2002 - Analysing crop yield and plant quality in an intercropping system using an eco-physiological model for interplant competition. *Agricultural systems*, 73: 173-203.
- Boote, K. J., Jones, J. W., Hoogenboom, G. et Pickering, N. B., 1998 - The CROPGRO model for grain legumes. *in Understanding options for agricultural production*. G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom and P. K. Thornton (Ed), Kluwer Academic, Dordrecht. 99-128.
- Brisson, N. et Perrier, A., 1991 - A semiempirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. *Water resources research*, 27: (5), 719-727.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M. H., Ruget, F., Nicoulaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Dürr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J.-M. et Delécolle, R., 1998 - STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18: 311-346.
- Brisson, N., 1998 - STICS-APC ou l'adaptation d'un modèle de culture pure aux cultures associées et à certaines composantes de l'agronomie tropicale. INRA, 41 p.
- Brisson, N., Mary, B., Gary, C., Ruget, F. et Ripoche, D., 1999 - STICS version 4.0 : Notice entrées-sorties. INRA, 35 p.
- Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoulaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M. H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B. et Justes, E., 2002 - STICS : a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie*, 22: (1), 69-92.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussièrre, F., Cabidoche, Y. M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.-P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B. et Sinoquet, H., 2003 - An overview of the crop model STICS. *European journal of agronomy*, 18: 309-332.
- Bruckler, L., Bertuzzi, P., Angulo-Jaramillo, R. et Ruy, S., 2002 - Testing an infiltration method for estimating soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil science society of america journal*, 66: 384-395.
- Caldwell, R. M. et Hansen, J. W., 1993 - Simulation of multiple cropping systems with CropSys. *in Systems approaches for agricultural development*. F. Penning de Vries, P. Teng and K. Metselaar (Ed), Kluwer academic - IRRI, 397-412.
- Caldwell, R. M., 1995 - Simulation models for intercropping systems. *in Ecophysiology of tropical intercropping*. H. Sinoquet and P. Cruz (Ed), INRA, Paris. 353-368.
- Campbel, G. S., 1991 - Simulation of water uptake by plant roots. *in Modeling Plant and Soil systems*. J. Hanks and J. T. Ritchie (Ed), American Society of Agronomy, Inc., Madison (Wisconsin - USA). 273-285.
- Carsouille, J., 1996 - Enherbement permanent du vignoble. Influence sur la production viticole. *Progrès agricole et viticole*, 114: (4), 87-91.
- Celette, J. et Celette, F., 2002 - Etude de la dynamique de l'eau et de l'azote dans le système vigne-enherbement-sol. MSc thesis. 84p.
- Champagnol, F., 1984 - Elements de physiologie de la vigne et de viticulture generale. F. Champagnol (Ed), 351p.
- Chantelot, E. et Sainrat, D., 2000 - Enherbement permanent du vignoble : étude de la concurrence hydro-azotée. *ITV*, 26 p.
- Chantelot, E. et Sainrat, D., 2001 - Enherbement permanent du vignoble : étude de la concurrence hydro-azotée. *ITV*, 16 p.
- Chantelot, E., 2002 - L'enherbement permanent : une technique permettant d'obtenir une concurrence bénéfique. *Les entretiens viticoles Rhône-Méditerranée*, 10-12.
- Darcy, 1856 - Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont (Ed), Paris, 647p.
- Daudet, F. A. et Vachaud, G., 1977 - La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique. *Annals of Agronomie*, 28: (5), 503-519.
- Deloire, A., Carbonneau, A., Ojeda, H. et Silva, P., 2001 - Relations entre l'état hydrique de la vigne et les composés phénoliques de la baie de raisin des cépages Syrah et Grenache noir. *Propositions de principes de gestion de la végétation. Compte rendu GESCO*, 1: 253-258.
- Doussan, C., Vercambre, G. et Pagès, L., 1999 - Water uptake by two contrasting root systems (Zea mays L., peach tree), : results from a model of hydraulic architecture. *Agronomie*, 19: 255-263.

- F. Celette, 2001- Évaluation d'un modèle à réservoirs pour simuler le bilan hydrique d'une vigne enherbée en climat méditerranéen
- Dry, P. R. et Loveys, B. R., 1998 - Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying. *Australian journal of grape and wine research*, 4: 140-148.
- 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. PhD thesis. 356p.
- Gardner, W. R., 1991 - Modeling water uptake by roots. *Irrigation science*, 12: 109-114.
- Gaudel, M., 2002 - Enquête sur les pratiques d'enherbement des viticulteurs adhérant à la charte Terra Vitis dans le Languedoc-Roussillon. BSc thesis. 38p.
- Hanks, J., 1991 - Soil evaporation and transpiration. in *Modeling Plant and Soil systems*. J. Hanks and J. T. Ritchie (Ed), American Society of Agronomy, Inc., Madison (Wisconsin - USA). 246-272.
- Hatier, A., 2000 - Etats de surface et infiltrabilité des sols d'un bassin versant viticole en milieu méditerranéen. MSc thesis. 21p.
- Hilbert, G., 2002 - Effets de la nutrition azotée et du stress hydrique sur la maturation et la composition en anthocyanes des baies de *Vitis vinifera* L. au vignoble et en conditions contrôlées. PhD thesis. 189p.
- Ionescu, E. M., Budan, C., Calistru, G. H., Pomohaci, N., Pituc, P., Popa, V. G. H. et Vladu, C. R., 1978 - Particularités du développement de l'appareil racinaire de la vigne, induites par le spécifique écologique du sol. 1er symposium international sur l'écologie de la vigne, 209-217.
- Jones, J. W., 1993 - Decision support systems for agricultural development. in *Systems approaches for agricultural development*. F. Penning de Vries, P. Teng and K. Metselaar (Ed), Kluwer academic - IIRRI, 459-471.
- Klik, A., 1991 - Effets de diverses mesures d'entretien du sol sur le ruissellement et l'érosion pluviale dans le vignoble. IIIe symposium international sur la non culture de la vigne et les autres techniques d'entretien des sols viticoles, Montpellier, 367-374.
- Klik, A., 1994 - Soil conservation and crop productivity in austrian vineyards. International agricultural engineering conference, Bangkok, Thailand, 422-429.
- Klik, A., Rosner, J. et Loiskandl, W., 1998 - Effects of temporary and permanent soil cover on grape yield and soil chemical and physical properties. *Journal of soil and water conservation*: (3), 249-253.
- Koundouras, S., Van Leeuwen, C., Seguin, G. et Glories, Y., 1999 - Influence de l'alimentation en eau sur la croissance de la vigne, la maturation des raisins et les caractéristiques des vins en zone méditerranéenne (exemple de Némée, Grèce, Cépège Saint Georges, 1997). *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*, 33: (4), 149-160.
- Laffosse, E., 2001 - Analyse systémique d'une parcelle de vigne enherbée. MSc thesis. 45p.
- Lafolie, F., Bruckler, L. et Tardieu, F., 1991 - Modeling root water potential and soil-root water transport : II. Model presentation. *Soil science society of america journal*, 55: 1203-1212.
- Lafolie, F., Bruckler, L., Ozier-Lafontaine, H., Tournebize, R. et Mollier, A., 1999 - Modeling soil-root water transport and competition for single and mixed crop. *Plant and soil*, 210: 127-143.
- Le Bissonais, Y., Montier, C., Jamagne, M., Daroussin, J. et King, D., 2001 - Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena*, 46: 207-220.
- Le Goff-Guillou, I., Marsault, J. et Riou, C., 2000 - Impact de l'enherbement sur le fonctionnement de la vigne. La composition des moûts, les durées de fermentation et la qualité des vins. synthèse d'un essai de 5 ans mené sur les principaux terroirs du saumurois. *Progrès agricole et viticole*, 117: (5), 103-110.
- Lebon, E., Schultz, H. R. et Dumas, V., 1995 - Applications d'un modèle d'interception du rayonnement solaire par la vigne pour la simulation du bilan hydrique et de la photosynthèse à l'échelle du couvert : résultats préliminaires. *Comptes-rendus GESCO*, 8ème journées: 31-37.
- Lecoq, R., 2002 - Paramétrisation du modèle STICS-vigne reposant sur quelques situations caractéristiques du vignoble des Côtes du Rhône méridionales. MSc thesis. 50p.
- Leemans, R., 1991 - Sensitivity analysis of a forest succession model. *Ecological modelling*, 53: 249-287.
- Lehmann, J., Peter, I., Steglich, C., Gebauer, G., Huwe, B. et Zech, W., 1998 - Below-ground interactions in dryland agroforestry. *Forest ecology and management*, 111: 157-169.
- Leonard, J. et Andrieux, P., 1998 - Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena*, 32: 209-223.
- Lisa, L., Parena, S. et Lisa, L., 2001 - Erosion in traditionally cultivated or grass-established piedmontese hillside vineyards. *Compte rendu GESCO*: 193-200.
- Maigre, D., 1996 - Influence de l'enherbement et de la fumure azotée sur la qualité des vins de Chasselas. *Progrès agricole et viticole*, 114: (11), 255-258.
- Masson, P. et Bertoni, G., 1996 - Essai d'enherbement d'un vignoble méridional à base de trèfle souterrain. Synthèse de 6 années d'expérimentation. (version provisoire). XI Kolloquium begrünung, Weinbau, 16.
- McCarthy, M. G. et Coombe, B. G., 1985 - Water status and winegrape quality. *Acta horticulturae*, 171: 447-456.
- Mériaux, S., Rollin, H. et Rutten, P., 1979 - Effets de la sécheresse sur la vigne (*Vitis vinifera* L.) I. Etudes sur Cabernet-Sauvignon. *Annales Agronomie*, 30: (6), 553-575.
- Mériaux, S., Rollin, H. et Rutten, P., 1981 - Effets de la sécheresse sur la vigne (*Vitis vinifera* L.) II. Etudes sur "Grenache". *Agronomie*, 1: (5), 375-382.
- Mériaux, S., 1982 - La vigne et l'eau dans le midi méditerranéen. 22-26.
- Mobbs, D. C., Lawson, G. J. et T.A.W., B., 2001 - HyPAR v. 4.1 Model for agroforestry systems. Centre for Ecology & Hydrology (CEH) - Forestry Research Programme (FRP), 52 p.

- F. Celette, 2001- Évaluation d'un modèle à réservoirs pour simuler le bilan hydrique d'une vigne enherbée en climat méditerranéen
- Morhath, D., Bruckler, L., Bertuzzi, P., Gaudu, J. C. et Bourlet, M., 1997 - Error analysis of an evaporation method for determining hydrodynamic properties in unsaturated soil. *Soil science society of america journal*, 61: (3), 725-735.
- Morlat, R., 1981 - Effets comparés de deux techniques d'entretien du sol sur l'enracinement de la vigne et sur le milieu édaphique. *Agronomie*, 1: (10), 887-896.
- Morlat, R., 1987 - Influence du mode d'entretien du sol sur l'alimentation en eau de la vigne en Anjou. *Conséquences agronomiques. Agronomie*, 7: 183-191.
- Morlat, R., Jacquet, A. et Asselin, C., 1993 - Principaux effets de l'enherbement permanent contrôlé du sol, dans un essai de longue durée en Anjou. *Progrès agricole et viticole*, 110: (9), 406-410.
- Moulis, I., 1994 - L'enherbement des vignobles méditerranéens : importance de la compétition hydrique vigne / culture intercalaire herbacée en vue d'une maîtrise de la production viticole. PhD thesis.
- Ozier-Lafontaine, H., Lafolie, F., Bruckler, L., Tournebize, R. et Mollier, A., 1998 - Modelling competition for water in intercrops : theory and comparison with field experiments. *Plant and soil*, 204: 183-201.
- Ozier-Lafontaine, H., Lafolie, F., Bruckler, L., Tournebize, R. et Mollier, A., 2000 - Modélisation de la compétition pour l'eau dans une association culturale : influence de la distribution des racines, des propriétés physiques du sol et de la répartition de la demande climatique. in *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*. P. Maillard and R. Bonhomme (Ed), INRA, Paris. 459-479.
- Pellegrino, A., 2003 - Elaboration d'un outil de diagnostic du stress hydrique utilisable sur la vigne en parcelle agricole par couplage d'un modèle de bilan hydrique et d'indicateurs de fonctionnement de la plante. PhD thesis. 138p.
- Penman, H. L., 1948 - Natural evaporation from open water bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society A.*, 193: 120-145.
- Pieri, P., Pradel, E., Soyer, J. P., Valancogne, C. et Dayau, S., 1996 - Bilans hydriques de la vigne avec et sans enherbement. *Compte-Rendu GESCO*:
- Porqueddu, C., Fiori, P. P. et Nieddu, S., 2000 - Use of subterranean clover and burr medic as cover crops in vineyards. *Cahiers Options Méditerranéennes*, 45: 445-448.
- Reyes Gomez, V. M., 2002 - Quantification et modélisation des flux hydriques, thermiques, et azotés dans les systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale dans la région des Cerrados brésiliens. PhD thesis.
- Richards, L. A., 1931 - Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1: 318-333.
- Riou, C., Valancogne, C. et Pieri, P., 1989 - Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne - vérification expérimentale. *Agronomie*, 9: 441-450.
- Riou, C., Pieri, P. et Le Clech, B., 1994 - Consommation d'eau de la vigne en conditions hydriques non limitantes. *Formulation simplifiée de la transpiration. Vitis*, 33: 109-115.
- Ritchie, J. T., 1972 - Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water resources research*, 8: (5), 1204-1213.
- Rodriguez-Lovelle, B., Soyer, J. P. et Molot, C., 1999 - Efectos del enherbado en viticultura sobre la nutricion mineral, el rendimiento y el vigor. *Investigacion agraria : produccion*, 14: 1-12.
- Rozier, J., Meyer, E. et Planas, R., 1989 - Les techniques d'entretien des sols viticoles. *Progrès agricole et viticole*, 106: (12), 287-290.
- Ruget, F., Brisson, N., Delécolle, R. et Faivre, R., 2002 - Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. *Agronomie*, 22: (2), 133-158.
- Schaller, K., Berthold, G. et Löhnertz, O., 1991 - Investigations on the nitrogen turnover in permanent grass cover vineyards as a tool for better fertilization practices. 3rd international symposium on no-tillage and other management techniques in vines, 173-180.
- Seguin, G., 1972 - Répartition dans l'espace du système racinaire de la vigne. *Comptes rendus de l'académie des Sciences de Paris*, 274: 2178-2180.
- Shuttleworth, W. J. et Wallace, J. S., 1985 - Evaporation from sparse canopy - an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111: 839-855.
- Sillon, J. F., Ozier-Lafontaine, H. et Brisson, N., 2000 - Modelling daily root interactions for water in a tropical shrub and grass alley cropping systems. *Agroforestry systems*, 49: 131-152.
- Simunek, J., Sejna, M. et Van Genuchten, M. T., 1999 - Hydrus-2D. Simulating water flow, heat, and solute transport in two dimensional variably saturated media. *International ground water modeling center (IGWMC) - Colorado school of Mines*, 227 p.
- Tamari, S., Bruckler, L., Halbertsma, J. et Chadoeuf, J., 1993 - A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil science society of america journal*, 57: (3), 642-651.
- Thornton, P. K., Dent, J. B. et Bacsi, Z., 1991 - A framework for crop growth simulation model applications. *Agricultural systems*, 37: 327-340.
- Trambouze, W., Voltz, M., Bertuzzi, P. et Huttel, O., 1994 - Variabilité spatio-temporelle des prélèvements d'eau au sein d'une vigne en rangs. *Comptes-rendus journées scientifiques du GFHN*: 31-36.
- Trambouze, W., 1996 - Caractérisation et éléments de modélisation de l'évapotranspiration réelle de la vigne à l'échelle de la parcelle. PhD thesis. 175p.
- Trambouze, W. et Voltz, M., 2001 - Measurement and modelling of the transpiration of a mediterranean vineyard. *Agricultural and forest meteorology*, 107: 153-166.
- Van der Berg, M., Driessen, P. M. et Rabbinge, R., 2002 - Water uptake in crop growth models for land use systems analysis : II. Comparison of three simple approaches. *Ecological modelling*, 148: 233-250.

- F. Celette, 2001- Évaluation d'un modèle à réservoirs pour simuler le bilan hydrique d'une vigne enherbée en climat méditerranéen
- Van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., Van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L. et Goudriaan, J., 2003 - On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European journal of agronomy*, 18: (3), 201-234.
- Van Noordwijk, M. et Lusiana, B., 1998 - WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. *Agroforestry systems*, 43: (1-3), 217-242.
- Van Noordwijk, M. et Lusiana, B., 2000 - WaNuLCAS 2.0. Background on a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF), 183 p.
- Wicherek, S., 1993 - The soil asset : preservation of a natural resource. *in Farm land erosion : in temperate plains environment and hills*. S. Wicherek (Ed), Elsevier, Amsterdam. 1-16.