



HAL
open science

Caractérisation et éléments de modélisation de l'évapotranspiration réelle de la vigne à l'échelle de la parcelle

W. Trambouze

► **To cite this version:**

W. Trambouze. Caractérisation et éléments de modélisation de l'évapotranspiration réelle de la vigne à l'échelle de la parcelle. Sciences du Vivant [q-bio]. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 1996. Français. NNT: . tel-02841260

HAL Id: tel-02841260

<https://hal.inrae.fr/tel-02841260>

Submitted on 7 Jun 2020

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

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

École Nationale
Supérieure Agronomique
de Montpellier

Laurent BRUCKLER
TH. HC 65
Institut National de la
Recherche Agronomique
Montpellier

Ministère de l'Agriculture

THÈSE

présentée à l'École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier
pour obtenir le **DIPLOME DE DOCTORAT en SCIENCES AGRONOMIQUES**

CARACTÉRISATION ET ÉLÉMENTS DE MODELISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE DE LA VIGNE À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE

par **William TRAMBOUZE**

Soutenue le 1^{er} juillet 1996 devant le jury composé de :

MM. J.-C.	RÉMY	E.N.S.A.-M.	Président
C.	RIOU	I.N.R.A.	Rapporteur
M.	VAUCLIN	C.N.R.S.	Rapporteur
L.	BRUCKLER	I.N.R.A.	Examineur
A.	CARBONNEAU	E.N.S.A.-M.	Examineur
S.	RAMBAL	C.N.R.S.	Examineur
M.	VOLTZ	I.N.R.A.	Examineur

Avant toute chose ...

"Celui qui pose une question est idiot 5 minutes, celui qui ne la pose pas est idiot toute sa vie"

Proverbe chinois, selon B.Werber

"Si aujourd'hui n'est pas en progrès sur hier alors il n'y a plus de jeu"

A.Soljenitsine

Le travail dont vous allez lire la synthèse est le fruit de collaborations multiples et de tous ordres. Je me dois de remercier ici toutes les personnes initiatrices de l'étude, celles qui m'ont permis de l'effectuer dans les conditions les meilleures et celles qui sont restées des soutiens depuis des dates antérieures et qui le resteront, j'espère, jusqu'à des temps lointains.

En premier lieu, je sais gré à la Direction Générale des Études et de la Recherche du Ministère de l'Agriculture d'avoir financé cette étude.

Je voudrais remercier ensuite Jean-Claude Favrot de m'avoir accueilli au laboratoire de Science du sol de l'I.N.R.A. de Montpellier. Étant arrivé au laboratoire juste avant le changement de directeur, je tiens à remercier également Jean-Claude Arvieu pour m'avoir permis d'y travailler dans de bonnes conditions.

Jean-Claude Rémy, directeur de cette thèse, est à l'origine de la demande de son financement. Il est, de ce fait, le premier maillon de la longue chaîne de contributions humaines à cette étude. Il a également pris part à la lecture critique de ce rapport. Je le remercie donc pour l'ensemble de ces contributions mais également pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Merci à Charles Riou et Michel Vauclin d'avoir accepté de lire et critiquer cette thèse, ainsi que de contribuer, en tant que rapporteurs, au jury de sa soutenance publique.

Je remercie également tous les membres de ce jury pour leur présence. Elle garantit le jugement des travaux présentés par autant de compétences que de disciplines couvertes par le sujet traité. Merci donc à Jean-Claude Rémy, Charles Riou, Michel Vauclin, Alain Carbonneau, Serge Rambal, Laurent Bruckler et Marc Voltz.

En position intermédiaire entre les juges "officiels" de ce travail et les intervenants directs, je me dois de remercier les membres du comité de pilotage. Ces personnes ont suivi et aiguillé la recherche au long de son évolution. Que MM. Jean-Claude Rémy, Charles Riou, Alain Carbonneau, François Champagnol, Serge Rambal et Laurent Bruckler reçoivent ici ma gratitude pour leur investissement et les remarques critiques dont ils ont fait montre à chacune de nos rencontres.

Bien que les mots soient faibles au regard de la reconnaissance que je lui porte, je décernerai une mention particulière à Marc Voltz, encadrant de mon travail. Il a montré un intérêt critique constant à cette étude, de la conception du protocole à l'interprétation des données en passant par le suivi expérimental et l'élaboration de procédures de traitements. Son optimisme indémontable tout au long de ces trois ans de recherches a su transformer quelques thalwegs de motivation en lignes de crêtes. Sa disponibilité m'a été précieuse dans les périodes où la boussole interne ne parvenait plus à trouver le Nord mais également dans le partage des périodes d'enthousiasme.

Merci à Jean-Claude Cabrol, viticulteur roujanais plus que coopératif puisqu'il a accepté que l'on envahisse sa parcelle de matériels hétéroclites et somme toute un peu cocasses (ils sont fous ces chercheurs !). Cette étude a pu se dérouler dans les meilleures conditions grâce à sa collaboration. Il a accepté les contraintes d'une recherche encombrante sans nous en tenir rigueur et a même participé activement au bon déroulement de l'étude par ses interventions dans la parcelle.

Ma reconnaissance va ensuite à Patrick Bertuzzi, qui m'a initié aux plaisirs de la recherche expérimentale il y a 4 ans. Depuis, sans montrer quelque découragement ni dépit, il a suivi l'évolution chaotique et cahoteuse de mon travail. Ses critiques, toujours constructives, amicales mais sans complaisance, m'ont été d'un

Merci tout le monde

grand secours. Ses contributions à l'expérimentation présentée sont essentielles puisqu'il a assuré les acquisitions et traitements des données micro-météorologiques, il a participé à l'élaboration et à la mise en place des mini-lysimètres, il s'est escrimé (en vain) à employer la technique des aiguilles chauffantes pour mesurer le flux de sève et tant d'autres choses qu'elles ne peuvent être citées toutes en ces pages. Qu'il me soit permis de lui transmettre ici autant de mercis qu'il a versé de gouttes de sueur sur le sol roujanais !

Moult personnes ont apporté qui sa goutte, qui son litre, qui son jéroboam voire son nabuchodonosor à ce torrent encore jeune et impétueux ! Je voudrais leur adresser des remerciements qui se veulent chaleureux, même si l'énumération qui suit peut laisser penser à une liste de commissions :



Gérard Bruno, Pierre Domergue, Eric Lebon et toute l'équipe du laboratoire de viticulture de l'INRA de Montpellier ont toisé la vigne sous toutes ses coutures avec des yeux spécialistes ;



Je voudrais déposer également une dose de merci à Patrick Andrieux pour sa sympathie mise au service de contributions multiples à cette étude, notamment pour son carnet d'adresses de fournisseurs bien rempli...



Cyril Dejean, assistant d'un été, s'est fait griller sous le soleil de Roujan et a bien voulu accepter un peu de mes cals estivaux. Je le remercie aussi pour avoir trouvé une aussi jolie photo avec de si jolis ceps de vigne ;



Olivier Huttel est complice dans la mise en écran de ladite photo (que vous ne verrez pas ici...) mais ce n'est pas sa principale contribution à l'étude. Il a participé aux installations électroniques de matériel et aux expériences de caractérisation hydrodynamique du sol en laboratoire par la méthode de Wind ;



Gwenn Trotoux a été jetée au fond du trou dès son incorporation dans la famille INRA. Je suis fautif mais, grâce à moi, elle n'a pas pris de coups de soleil (ah ! le crachin breton !). Ses efforts dans la caractérisation hydrodynamique du sol (vous appelez ça un sol ???) se sont exercés tant sur le terrain qu'au laboratoire. Ils n'ont pas été stériles et son travail mérite d'être salué ;



Charles Valancogne a bien voulu me faire partager son savoir de la mesure du flux de sève. Il a accepté que je perturbe sa collaboratrice dans sa confection de manchons de mesures. Il a également participé à l'interprétation des mesures recueillies et ses conseils m'ont été plus que précieux ;

Puisque j'en parle, il est temps de la remercier : Sylvia Dayau m'a reçu au milieu de son usine à manchons pour m'y initier aux joies de la soudure et de la coulure de silicone. Par ce fait, elle a contribué à contaminer de sa science les laboratoires montpellierains de Science du sol et de Viticulture. Je la remercie pour sa bonne humeur et son accueil ;



Je voudrais remercier Paul Oullier du laboratoire de Mécanisme Agricole de l'ENSAM d'avoir fait des p'tits trous (5 mètres quand même !) dans la parcelle d'étude. L'équipe technique du laboratoire de Science du sol de l'INRA d'Avignon doit également trouver place dans ces remerciements. En effet, si Alain Auriol n'avait participé à la confection des mini-lysimètres, si Momo Monjusiau n'était pas venu à Roujan la bouche pleine d'imitations et d'anecdotes croustillantes, l'expérimentation aurait-elle eu un visage si souriant ? Non point ! Et si Michel Bourlet n'avait juré en cassant son matériel sur notre sol, nous aurait-il éclairé de mesures supplémentaires ? Et si Patrick Bertuzzi, Dalila Mohrath et Jean-Claude Gaudu n'avaient propagé la méthode de Wind à Montpellier, saurais-je comment circule l'eau du sol étudié ? Non et encore non ;



Merci aussi à l'équipe de Bioclimatologie de l'INRA Avignon pour leur assistance à la conception et la mise en place des mini-lysimètres, à François Mazzella pour LE dessin de cet ouvrage et pour l'album souvenir ;

Merci tout le monde



Compte tenu des nombreuses félicitations que j'ai reçues pour les délectations post-soutenance, je suis tenu d'adresser ma reconnaissance infinie aux cuisiniers (Odile, Gwenn et Tchétché) pour leur talent et leur disponibilité, au four qui a bien voulu fonctionner 11 heures de suite sans faire de zèle, aux metteurs en tables (Odile, Zaza, Tchétché, Gwenn, Vanessa, Jean-Pierre) pour leur célérité et leur coup de couteau.



Je tiens enfin à remercier ceux qui m'ont fait profiter d'une parcelle de leur savoir ou de leurs compétences dans des domaines divers : Thierry Bourgeois, Robert Bouzigues, François Champagnol et Serge Rambal.

La science et la connaissance ne progressent pas que par leurs acteurs directs. L'environnement humain doit être propice au bon développement du doctorant. La liste pourrait être longue de toutes les personnes qui ont agrémente ce séjour à Montpellier. Je tâcherai d'en regrouper un maximum et, pour ce faire, créerai des catégories, comme au festival de Cannes :

Dans la catégorie "Bonjour dans les couloirs", nous pourrions faire figurer un nombre de personnalités très énorme alors, sans les nommer, remercions les stagiaires, thésards, objecteurs de confiance, Contractuels Éphémères du Secrétariat (CES) et permanents qui m'ont offert un sourire ou un instant de discussion dans les moments de pause ;

Dans la catégorie "Une p'tite bouffe sympatoche", trouvons les Flaques (MC, Thieuthieu et ptit Pierre), Guillaume et Da, Nicoline et Perra, Isa et Tom, Gwenn et Chantal, les FaCa, Laurent et Lætitia, Corinne et Pierre-Jean (et le Stremon et Lulu) ;

Dans la catégorie "Ces colocataires que l'on a regretté (jadis)", on a pu voir Agnès (ouh ! c'est vieux ça), Fabrice, Bernd et Jeff ;

Dans la catégorie "Les épistolaires solidaires", merci à Christel, Anne, Rémy et Nathalie ;

Dans la catégorie "C'est pas souvent mais c'est toujours aussi bon" il faut remercier Totoche, Anita que je ne connais pas mais qui me fait un beau cadeau en me débarrassant du précédent, Paulo, Christôôphe (le Chuiche), les Chanziennes et le Chanzien (!), les Ruizka (Laurent, Fatimata, Cheikh et Guillaume-Oumar) ;

Dans la catégorie "On les aime sans les avoir choisis", le cercle se restreint : Père, Mère, Xav et Sandy (je ne cite pas Dgeowdge, l'ingrat, ni Lice-Lune, trop frisée) qui doivent se sentir intégrés en toute page de ce «bouquin» bien que tout ceci soit fort éloigné de l'histoire, des pansements, de Dreyer ou des planches !

Enfin, hors catégorie ou plutôt Prix spécial du Jury, on ne trouve qu'une personne et il ne peut y en avoir qu'une capable de me rappeler que la vie est belle quand on rentre chez soi après le boulot, même si c'est à minuit ! Merci Odile.

William

SOMMAIRE

AVANT TOUTE CHOSE...

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : L'ALIMENTATION EN EAU DE LA VIGNE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1. MORPHOLOGIE ET FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME RACINAIRE DE LA VIGNE	4
1.1. Occupation de l'espace par les racines. Étude morphologique.....	4
1.1.1. Distribution verticale de l'enracinement.....	4
1.1.2. Distribution horizontale	6
1.1.3. Densité racinaire de la vigne.....	8
1.2. Variabilité spatio-temporelle des zones d'absorption d'eau par les racines de vigne.....	10
1.2.1. Note préliminaire sur l'estimation des prélèvements racinaires	11
1.2.2. Répartition verticale des prélèvements.....	13
1.2.3. Répartition horizontale des prélèvements	15
1.3. Conclusions	16
2. INTERCEPTION DU RAYONNEMENT - DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE	17
2.1. Interception du rayonnement à l'échelle de la journée	18
2.1.1. Rayonnement intercepté par les plantes	18
2.1.2. Répartition du rayonnement arrivant au sol	20
2.1.3. Modèle d'interception du rayonnement de Riou et al. (1989).....	20
2.2. Distribution spatio-temporelle de l'énergie incidente à l'échelle de la saison.....	23

2.3. Conclusions	23
3. ADAPTATIONS ÉCOPHYSIologiques DE LA PLANTE À LA SÉCHERESSE - VALEURS D'ETR	24
3.1. Fonctionnement physiologique de la vigne - Régulation de la transpiration	24
3.1.1. Fonctionnement physiologique de la vigne	25
3.1.2. Facteurs environnementaux de la régulation stomatique	27
3.1.3. Effets d'une réduction de transpiration sur le développement de la vigne.....	29
3.1.4. Conclusions	30
3.2. Estimations chiffrées de l'évapotranspiration réelle de la vigne.....	30
3.2.1. L'évapotranspiration parcellaire	31
3.2.2. Transpiration et évaporation	35
3.3. Conclusions	38
4. MODÉLISATION DU BILAN HYDRIQUE D'UNE PARCELLE DE VIGNE	38
4.1. Modèles d'estimation de l'ETR de la parcelle sans séparation des flux.....	39
4.1.1. Modèles à bases hydrologiques	39
4.1.2. Modèles à bases énergétiques	40
4.1.3. Conclusion : estimer l'ETR globale d'une parcelle de vigne	41
4.2. Modèles séparant évaporation et transpiration	42
4.2.1. Flux maxima d'évaporation et de transpiration.....	42
4.2.2. L'évaporation du sol couvert.....	43
4.2.3. La transpiration.....	47
4.2.4. Conclusion : modéliser évaporation et transpiration dans une vigne.....	49
4.3. Modèles existants pour la vigne	50
4.3.1. Modèles à bases hydrologiques	50
4.3.2. Modèle à bases énergétiques.....	51
4.3.3. Modèles à bases physiologiques	51
4.3.4. Conclusion.....	52
5. CONCLUSION GÉNÉRALE	53
5.1. Évaluation et analyse des flux d'eau à l'échelle de la parcelle de vigne.....	53

5.2. Modélisation de l'ETR d'une parcelle de vigne.....	55
---	----

CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL 57

1. LE SITE EXPÉRIMENTAL	57
1.1. Le bassin versant de Roujan.....	57
1.1.1. Présentation générale.....	57
1.1.2. Équipement hydrologique du BV	58
1.2. La parcelle expérimentale	61
1.2.1. Choix.....	61
1.2.2. Présentation générale.....	61
1.2.3. Le sol.....	62
2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL.....	65
2.1. Mesures d'humidité et de potentiel hydrique du sol.....	67
2.1.1. Matériel.....	67
2.1.2. Difficultés et traitements	69
2.2. Méthodes micro-météorologiques.....	69
2.2.1. Principes	70
2.2.2. Matériel.....	71
2.2.3. Difficultés et traitements	72
2.3. Mesures de transpiration	73
2.3.1. Principes des mesures	73
2.3.2. Matériel.....	76
2.3.3. Difficultés et traitements	77
2.4. Évaporation du sol nu	78
2.4.1. Principes	78
2.4.2. Matériel.....	79
2.4.3. Difficultés et traitements	81

2.5. Mesures sur le végétal	81
2.5.1. Mesures descriptives	81
2.5.2. Mesures de l'état hydrique de la plante.....	82
3. CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE DU SOL.....	83
3.1. Objectifs	83
3.2. Méthodes et échantillonnage	83
3.2.1. Caractérisation en laboratoire par la méthode des presses à plaques	84
3.2.2. Caractérisation au laboratoire par la méthode de Wind	85
3.2.3. Caractérisation in situ de la relation $h(q)$	87
3.2.4. Détermination in situ de la conductivité hydraulique sous 10 mbars de succion par infiltrométrie à disques.....	88
3.2.5. Détermination in situ de la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat})	89
3.2.6. Conductivité aux potentiels supérieurs à -100 mbars.....	89
3.3. Résultats	90
3.3.1. Pré-traitements	90
3.3.2. Caractérisation par horizon (par matériau).....	92
3.3.3. Synthèse des résultats : caractérisation à l'échelle de la parcelle.....	95
4. CONCLUSION SUR L'ENSEMBLE DES MESURES	97
CHAPITRE 3 : ANALYSE DE COHÉRENCE DES MESURES INDIVIDUELLES ET CONFRONTATION DE PLUSIEURS MÉTHODES D'ESTIMATION DE L'ETR D'UNE PARCELLE DE VIGNE.....	101
1. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES	101
2. COHÉRENCE DES MESURES INDIVIDUELLES.....	102
2.1. Mesures d'humidité du sol.....	102
2.1.1. Évolution du stock hydrique	102
2.1.2. Évolution des profils d'humidité.....	103

2.2. Mesures des potentiels hydriques du sol	103
2.3. Le bilan d'énergie	104
2.4. La transpiration et l'évaporation.....	104
2.4.1. La transpiration.....	104
2.4.2. L'évaporation du sol.....	106
2.4.3. Parts relatives de la transpiration et de l'évaporation à l'échelle de la saison	107
2.5. Mesures sur la plante.....	108
2.5.1. Mesures de croissance	108
2.5.2. Mesures de fonctionnement physiologique.....	109
3. MESURE DE L'ETR PARCELLAIRE	109
3.1. Principes des calculs d'ETR.....	109
3.1.1. Le bilan hydrique du sol	110
3.1.2. Le bilan d'énergie.....	112
3.1.3. Séparation des flux ER et TR.....	112
3.2. Estimation de l'ETR parcellaire.....	112
3.2.1. Cinétiques	112
3.2.3. Valeurs	114
3.3. Conclusions	116
 CHAPITRE 4 : VARIABILITÉ ET MODÉLISATION DE L'ÉVAPO- RATION DU SOL SOUS VIGNE.....	 123

1. VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DE L'ÉVAPORATION DU SOL SOUS COUVERT DE VIGNE	123
1.1. Rappels expérimentaux et procédures de traitements utilisées	124
1.1.1. Contexte expérimental.....	124
1.1.2. Traitements de données	124
1.2. Résultats	124
1.2.1. Observations.....	124

1.2.2. Analyse	126
1.3. Conclusions	128
2. MODÉLISATION DE L'ÉVAPORATION	129
2.1. Modèle de Ritchie (1972).....	129
2.1.1. Principes du modèle	129
2.1.2. Améliorations testées.....	130
2.2. Le modèle de Van Keulen (1975)	132
2.2.1. Principe du modèle.....	132
2.2.2. Mise en œuvre.....	134
2.3. Procédure d'optimisation du calage des paramètres	134
2.4. Résultats	135
2.4.1. Estimation des paramètres.....	135
2.4.2. Étude de sensibilité des modèles d'évaporation testés à l'estimation de l'évaporation potentielle	140
2.4.3. Dynamique d'évaporation	142
3. CONCLUSION GÉNÉRALE : MESURE ET MODÉLISATION DE L'ÉVAPORATION DU SOL SOUS UNE VIGNE EN RANGS.....	143
 CHAPITRE 5 : VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE ET MODÉ- LISATION DE LA TRANSPIRATION ET DE L'EXTRACTION RACINAIRE DE LA VIGNE À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE.....	145
 1. TRANSPIRATION DE LA VIGNE	145
1.1. Variabilité spatiale du flux de sève	145
1.1.1. Variabilité intra-parcellaire des mesures	145
1.1.2. Variables morphologiques corrélées à la transpiration	146
1.2. Relation entre transpiration et humidité du sol.....	148
1.2.1. Objectifs	148

1.2.2. Résultats.....	148
1.2.3. Discussion.....	150
2. EXTRACTION RACINAIRE DE LA VIGNE	151
2.1. Variabilité parcellaire des variations de stock	151
2.1.1. Position du problème.....	151
2.1.2. Variabilité parcellaire à l'échelle de la saison	152
2.2. Variabilité d'extraction racinaire sur l'ensemble du profil	153
2.2.1. Position du problème.....	153
2.2.2. Analyse des différences de variations de stock globales	154
2.3. Variabilité d'extraction racinaire au sein du profil sur l'ensemble de la saison de mesure	155
2.3.1. Analyse préliminaire sur les transferts d'eau entre couches de 20 cm au sein du profil.....	155
2.3.2. Analyse de la différence rang/inter-rang par profondeur	159
2.4. Évolution des zones d'extraction au cours de la saison	162
2.4.1. Position du problème.....	162
2.4.2. Observation des zones d'alimentation et de leur évolution au sein du profil.....	162
2.5. Relations entre extraction racinaire de la vigne et humidité du sol.....	164
2.5.1. Principes des relations recherchées	164
2.5.2. Résultats.....	165
2.5.3. Discussion.....	166
3. CONCLUSIONS	167
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	175
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
TABLE DES MATIÈRES	
ANNEXE	

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

- 1-1 : Répartition du système racinaire d'un pied de vigne en l'absence de contraintes pédoclimatiques. D'après Ionescu *et al.*, 1978
- 1-2 : Effet de l'éloignement du cep sur la densité racinaire. Profils réalisés par Branass et Vergnes (1957) sous une vigne plantée en sol peu profond à la densité 3x0,5 m. (a) : Distribution pondérale des racines ; (b) : Distribution centésimale
- 1-3 : Illustration des termes du bilan hydrique d'une culture non couvrante
- 1-4 : Profils d'humidité mesurés lors de l'année 1983 (très sèche). Sol superficiel (55 cm) sur calcaire non fissuré. Région bordelaise. D'après Duteau (1987)
- 1-5 : Profils d'humidité mesurés sous une vigne plantée en sol peu profond (130 cm) sur substrat induré. L'enracinement n'a pas été observé sous 100 cm de profondeur. Sol sablo-caillouteux de la vallée de la Loire. D'après Jourjon *et al.* (1991)
- 1-6 : Profils d'humidité mesurés au cours de l'année 1980 dans un vignoble de Chypre (d'après Roumbas *et al.*, 1983). Consommation moyenne sur 270 cm : 1,71 mm.j⁻¹ soit 57 % de l'ETP
- 2-1 : Interception du rayonnement par un rang de vigne à l'échelle de la journée selon son orientation par rapport au soleil. Résultat de simulations en prenant le rang de vigne comme un parallélépipède plein. D'après Champagnol, 1984
- 2-2 : Principe général du modèle d'interception du rayonnement solaire par une vigne en rangs établi par Riou *et al.* (1989). Rg : rayonnement global ; Rav : rayonnement absorbé par la vigne ; D : distance entre deux rangs de vigne ; H : hauteur de feuillage ; L : largeur de feuillage ; p : porosité des faces latérales du rang de vigne
- 2-3 : Exemple d'évolution de la croissance de la surface des feuilles d'un rameau d'Aramon (d'après Ravaz et Geze, cités par Champagnol, 1984)
- 3-1 a-b : Bornes des potentiels foliaires dans leur évolution à l'échelle de la journée (a) et de la saison (b). D'après une synthèse bibliographique de résultats réunis par Winkel et Rambal (1993)
- 4-1 : Représentation schématique d'un modèle résistif sans séparation des flux. Illustration de l'incertitude quant à la représentativité de la température moyenne mesurée et difficulté d'accéder à une résistance globale. D'après Kustas, 1990
- 4-2 : Représentation d'un modèle d'évapotranspiration à bases énergétique selon un schéma résistif. D'après Shuttleworth et Wallace, 1985

Chapitre 2 :

- 1-1 : Bassin versant de Roujan : carte des sols, localisation de la parcelle expérimentale et des fosses pédologiques (A, B, C, D)
- 1-2 : Sites de mesure de la pluviométrie et de l'humidité du sol au sein du bassin versant de Roujan (d'après Voltz et Andrieux, 1994)
- 1-3 : Profils pédologiques observés sur les fosses C (ouest) et D (est)
- 1-4a-b : Granulométrie des profils pédologiques ouest (C) et est (D)
- 1-5 : Cartes d'impacts racinaires réalisées en 1993 sur fosses pédologiques. Les comptages sont exprimés en nombre d'impacts sur 10 cm²

- 2-1 : Parcelle expérimentale et dispositif de mesures
- 2-2 : Étalonage gravimétrique de la sonde à neutrons
- 2-3 : Manchon de mesure du flux de sève par bilan thermique (d'après Dayau, 1993)
- 2-4 : Présentation et installation des mini-lysimètres

- 3-1a : Courbes de rétention des couches limono-argilo-sableuses
- 3-1b : Courbes de conductivité hydraulique des horizons limono-argilo-sableux (Ap/B)
- 3-2a : Courbes de rétention des horizons sableux (C)
- 3-2b : Ajustements des relations entre conductivité hydraulique et potentiel matriciel pour les horizons sableux (C) en fonction de leur «induration»
- 3-3 : Distribution des matériaux le long des profils de mesure. L'attribution a été réalisée en fonction des rapprochements entre les mesures tensio-neutroniques et les courbes de rétention obtenues en laboratoire par la méthode de Wind

Chapitre 3 :

- 2-1a-b : Évolution du stock hydrique en 1993 sur 230 cm (a) et en 1994 sur 410 cm (b)
- 2-2a-b : Évolution des profils d'humidité moyens en 1993 et 1994
- 2-3a-b : Évolution de la moyenne parcellaire des potentiels au cours de la saison 1994 : (a) sous le rang ; (b) : sous l'inter-rang
- 2-4 : Cinétique journalière des flux d'énergie au cours d'une journée ensoleillée (3 août 1994)
- 2-5a-b : Évolutions comparées des flux de sève instantanés et des rayonnements nets mesurés lors d'une journée ensoleillée (12 août 94 ; a) et nuageuse (9 août 94 ; b)
- 2-6 : Rapport de la quantité de chaleur stockée dans le volume de tige où est réalisée la mesure du flux de sève sur la puissance de chauffage (constante). Évolution lors d'une journée ensoleillée (3 août 94)
- 2-7a-b : Évolutions de l'humidité pondérale des mini-lysimètres et du sol alentour au cours de l'été 1994 sous le rang de vigne (a) et dans l'inter-rang (b)
- 2-8 : Évolution de la part de transpiration réelle dans l'ETR au cours de l'été 1994
- 2-9 : Suivi de la croissance des rameaux de vigne en 1993. Rameaux palissés verticalement

- 2-10 : Comparaison du poids de bois de taille avec la surface foliaire. Les valeurs de 1993 portent sur des mesures sur rameaux individuels palissés verticalement, les valeurs de 1994 sont des relevés par cep
- 2-11 : Mise en évidence du potentiel foliaire «critique»
- 3-1 : Évolution du flux moyen à 260 cm (la moyenne est fonction de l'association d'une courbe de rétention pour le matériau de fond de profil sur chaque placette : figure 3-3, chapitre précédent)
- 3-2 : Évolution de l'ETR calculée par trois méthodes différentes. Été 1993
- 3-3 : Évolution de l'ETR calculée par trois méthodes différentes. Été 1994

Chapitre 4 :

- 1-1a-b : Suivi de l'évaporation du sol mesurée par mini-lysimètres selon leur position dans l'inter-rang - Étés 1993 (a) et 1994 (b)
- 2-1 : Schéma de la modification du module de prise en compte des pluies dans le modèle *R/hm*
- 2-2 : Isocontours de la somme des carrés des écarts entre les valeurs d'évaporation mesurées et simulées par les différents modèles testés : (a) : Ritchie journalier ; (b) : Ritchie horaire ; (c) : Ritchie modifié ; (d) : Van Keulen
- 2-3 : Effets d'une modification de certains paramètres du modèle de Riou *et al.* (1989) sur l'estimation de l'évaporation potentielle qui en découle. Les valeurs sont reportées en indice par rapport à la valeur prise en référence.
- 2-4a-b : Effets d'une variation de 20 % de l'évaporation potentielle sur les fonctions prises comme critères d'optimisation : (a) : biais du modèle ; (b) : somme des carrés des écarts. Simulations sur 2 années
- 2-5 : Cinétique d'évaporation du sol sous couvert. Confrontation dynamique des valeurs mesurées et simulées par le modèle VK au cours de l'été 1994.

Chapitre 5

- 1-1 : Évolution du flux de sève parcellaire moyen (moyenne de 10 mesures) au cours de l'été 1994. Écart-type sur la moyenne
- 1-2 : Évolutions comparées des coefficients de variation de la transpiration moyenne parcellaire et de la transpiration rapportée à la surface foliaire
- 1-3a : Mise en regard de la transpiration estivale totale de chaque cep avec son poids de bois de taille
- 1-3b : Mise en regard de la transpiration estivale totale par cep avec l'indice foliaire mesuré par prélèvement total du feuillage
- 1-4 : Mise en regard de la satisfaction de la demande transpiratoire avec l'état hydrique des 260 premiers centimètres du sol pour deux années différentes

- 1-5 : Courbe ajustée au nuage de points de la figure 1-4

- 2-1a-b : Classement relatif de la variation de stock par placette entre les années 1993 et 1994.
(a) : comparaison sur l'ensemble du profil ; (b) : comparaison pour deux tranches de sol
- 2-2a-b : Variation de stock totale par tube de mesure : (a) : sur 230 cm du 2 juillet au 3 septembre 1993 ; (b) : sur 410 cm du 25 mai au 1^{er} septembre 1994
- 2-3 : Bilan hydrique d'une couche de sol
- 2-4 : Évolution du bilan des flux verticaux entrant et sortant de couches de 20 cm d'épaisseur au cours du mois de juin 1994. Moyenne des flux mesurés sur la parcelle
- 2-5 : Importance relative des flux au sommet et à la base d'une couche de sol
- 2-6a-b : Variations de stock le long du profil de sol concerné par l'alimentation en eau de la vigne. Comparaison des variations mesurées sous le rang et sous l'inter-rang en 1993 (a) et 1994 (b)
- 2-7a-c : Différents types de répartition relative des variations de stock entre rang et inter-rang le long du profil de mesure
- 2-8a-b : Profils moyens de variations de stock mensuelles lors des deux années expérimentales
- 2-9a-b : Isocontours des variations de stock mesurées le long du profil d'extraction racinaire par pas de temps de 15 jours. Visualisation des zones d'exploitation préférentielle en 1993 (a) et 1994 (b). Les chiffres de la légende sont exprimés en $\text{mm.j}^{-1} / 20 \text{ cm de sol}$
- 2-10 : Fonction d'extraction racinaire établie pour les horizons à forte absorption hydrique (35-195 cm sous le rang et 35-155 cm sous l'inter-rang)
- 2-11 : Fonction d'extraction racinaire établie sur les couches de sol à forte exploitation racinaire à partir de mesures d'humidité rapportées au point de flétrissement

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1

- 1-1 : Densités racinaires extrêmes et moyennes de plusieurs espèces végétales exprimées en longueur de racine par volume de sol. Les données de cultures annuelles sont obtenues en plein développement de la végétation.
- 2-1 : Part du rayonnement reçue par les rangs de vigne selon leur orientation et la date. Résultat obtenus par simulations. D'après Champagnol, 1984
- 3-1a : Valeurs d'évapotranspiration réelle relevées dans la bibliographie. Les données en italique sont obtenues par les méthodes micro-météorologiques.
- 3-1b : Rapport de l'ETR à l'ETP dans différents contextes.
- 3-2 : Valeurs de transpiration parcellaire obtenue par moyenne arithmétique de la mesure sur respectivement 5, 6 et 10 pieds de vigne

Chapitre 2 :

- 3-1 : Nombre de répétitions disponibles pour la détermination des courbes hydriques caractéristiques du sol
- 3-2 : Nombre de répétitions disponibles pour la détermination de la conductivité hydraulique à -10 mbars.
- 3-3a : Paramètres des relations $h(\theta)$ déterminées par la méthode de Wind pour la résolution de l'équation [3.1] pour les horizons Ap et B.
- 3-3b : Paramètres des équations [3.2a-b] pour le calcul de la conductivité hydraulique des horizons de texture limono-argilo-sableuse (horizons Ap et B)
- 3-4 : Équations des ajustements utilisés pour l'estimation de la conductivité hydraulique des horizons sableux en fonction de la gamme de potentiels. Les paramètres A, B et h_{lim} sont donnés par le tableau 3-5b.
- 3-5a : Paramètres des relations $h(\theta)$ déterminées par la méthode de Wind pour les horizons C (équation [3.1]).
- 3-5b : Paramètres de l'ajustement utilisé pour le calcul de la conductivité hydraulique des horizons C (tableau 3-4).
- 4-1 : Résumé des mesures effectuées lors des deux années d'expérimentation

Chapitre 3 :

- 1-1 : Pluviométrie et ETP Penman (en millimètres) en 93 et 94 sur le bassin versant de Roujan. Comparaison à la pluviométrie moyenne (M) de Servian (commune voisine) de 1961 à 1990 et à l'ETP moyenne(M) de Montpellier-Fréjorgues de 1966 à 1990.
- 2-1 : Part de la transpiration dans l'ETR (en pourcentage). Les valeurs de 1993 et de juin 1994 calculent la transpiration par $TR = ETR_{BH} - ER_{lyse}$. Les valeurs entre parenthèses sont les extrêmes mensuelles.
- 2-2 : Évaporation lors de la saison de végétation (juillet-août 93 et juin-août 94) comparée au total des précipitations efficaces (infiltrées) dans la même période. Chiffres en millimètres. L'orage de fin août 94 a été exclu puisqu'il n'a pas eu d'effet sur les flux de la période considérée.
- 3-1 : Coefficients de ruissellement utilisés pour le calcul du bilan hydrique en 1993 et 1994
- 3-2 : Évapotranspiration réelle calculée mensuellement (mm). Entre parenthèses : extrêmes journaliers en mm.j⁻¹. Satisfaction de la demande atmosphérique correspondante (ETR/ETP)
- 3-3 : Intervalles de confiance à 95 % sur les valeurs des flux lors des trois périodes où toutes les mesures sont disponibles simultanément. Valeurs en millimètres.

Chapitre 4 :

- 1-1 : Pourcentage de périodes de mesures pour lesquelles on rejeterait l'hypothèse nulle ($H_0 =$ pas d'effet de la position du lysimètre sur l'évaporation) au risque de première espèce de 5 %.
- 1-2 : Importance quantitative des différences d'évaporation observées entre le rang (Rg) et l'inter-rang (IR) lors des périodes de pluie. La durée des périodes de mesures concernées est de 3 ou 4 jours.
- 2-1 : Valeurs des fonctions d'optimisation sur les deux années simultanément pour chaque modèle d'évaporation testé.

Chapitre 5

- 1-1 : Équation d'ajustement recherchée entre la satisfaction de la transpiration potentielle par la vigne et l'état hydrique du sol
- 2-1 : Variations de stock moyennes par placette de mesure (moyenne de deux tubes) pour les deux années expérimentales (mm). Les valeurs de 1994 sont plus élevées que celles de 1993 car elles portent sur une période plus longue (27 juin-3 septembre 93 ; 25 mai-25 août 94)

- 2-2 : Erreur relative sur les prélèvements racinaires lorsque les flux entre couches sont négligés.
- 2-3 : Évaluation de la participation maximisée des racines de la couches 175-260 cm à l'ETR parcellaire. Les chiffres sont en millimètres.
- 2-4 : Résultats des tests statistiques relatifs aux différences de variations de stock mesurées sous le rang et sous l'inter-rang de vigne. Chiffres en millimètres. Chaque test porte sur 5 individus (= 5 placettes). Diff.moy.= $\overline{\Delta S_{Rg}} - \overline{\Delta S_{IR}}$; les résultats des tests sont : NS : non significatif, * : P<10 %, ** : P<5%, *** : P<1%

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La vigne (*Vitis vinifera*, L.) est la principale production agricole du Languedoc-Roussillon. Depuis une quinzaine d'années, les quantités de vins produites à l'échelle européenne ne sont plus compatibles avec la diminution de la demande des consommateurs. De ce fait, les orientations agricoles de ces prochaines années sont axées sur la recherche d'une faible production mais de qualité en remplacement des quantités actuellement produites. Dans ce but, la caractérisation des critères influençant la qualité du produit final représenterait une façon d'optimiser cette production.

Or, on sait aujourd'hui que la consommation en eau de la vigne conditionne d'une façon générale et pour une grande partie la qualité des raisins et donc des vins produits. Cette notion est implicite dans le concept de terroir viticole. En effet, la notion de terroir a été créée pour pouvoir anticiper sur la qualité du produit final à partir de critères du milieu (sol, climat) faciles d'accès. Ainsi, pouvoir rattacher alimentation en eau et paramètres du milieu devient une étape fondamentale de la formalisation de la notion de terroir.

De plus, la vague d'arrachages du vignoble languedocien induite par la reconversion agricole nécessaire fait évoluer le paysage agricole en fonction de la nouvelle occupation du sol. En milieu méditerranéen, l'ETR est la composante principale du bilan hydrologique puisqu'elle peut représenter 70 % des précipitations. Le changement d'occupation des sols va provoquer des modifications de la gestion de la ressource en eau qu'il va falloir évaluer. Dans ce but, la caractérisation de la consommation en eau des vignes s'avère nécessaire.

Le travail ici présenté se situe donc dans un objectif de caractérisation et de modélisation de l'ETR de la vigne en fonction de paramètres du milieu facilement accessibles. Cette recherche fait partie d'un programme d'étude globale des flux d'eau et de polluants à l'échelle d'un bassin versant viticole languedocien (Roujan-Allegro)*. Au sein de cette étude générale, la quantification et la modélisation de l'ETR à l'échelle du bassin versant peut être faite à partir d'une caractérisation parcellaire distribuée. Cette échelle d'approche est privilégiée pour trois raisons principales :

- unité de cépage,
- unité de façons culturales (taille, formation des ceps, désherbage, traitements phytosanitaires,...),
- unité de sol comparativement à l'échelle du bassin versant

Les travaux consultés sur les rapports entre la vigne et son milieu à l'échelle de la parcelle ont souvent été réalisés dans une optique agronomique. Les chercheurs impliqués

* Dans la suite du document, les études hydrologiques portant sur l'ensemble du bassin versant seront référencées comme «études hydrologiques globales» par opposition avec l'échelle parcellaire

recherchaient des facteurs explicatifs de la production (quantité et/ou qualité) en fonction d'indicateurs de la consommation en eau des ceps. Ces travaux sont généralement restés descriptifs, sans recherche de relations extrapolables à d'autres sites. Ceci s'explique par les difficultés rencontrées à l'estimation proprement dite de l'ETR et aux problèmes de transposition d'une estimation ponctuelle (site de mesure de l'humidité par exemple) à une échelle plus petite (parcelle, micro-région).

L'estimation de l'ETR d'une parcelle de vigne est rendue difficile autant par la conformation du couvert que par la plante elle-même. En effet, s'il est aujourd'hui relativement aisé de mesurer la consommation d'un couvert continu, les méthodes classiquement utilisées trouvent leurs limites dans une utilisation appliquée aux couverts hétérogènes :

- les méthodes basées sur des mesures locales (humidité du sol, flux de sève, évaporation du sol) se heurtent au problème de l'échantillonnage,
- les méthodes intégratives fondées sur les échanges énergétiques à l'échelle du couvert sont compliquées par la définition de la "hauteur limite" caractérisant la zone où les mesures peuvent être effectuées,

Pour résoudre les difficultés énumérées ci-dessus, un effort expérimental conséquent a été consenti. Il doit être concrétisé par la recherche de relations formelles et de paramétrisation simple entre la consommation d'eau et l'état hydrique du sol à l'échelle de la parcelle de vigne.

Le premier chapitre de ce mémoire fait le point sur les moyens d'estimer et de modéliser l'ETR d'une vigne ainsi que les difficultés d'étude. Des options en sont tirées pour la construction d'un protocole expérimental en vue d'une modélisation.

Dans un deuxième chapitre, après avoir présenté le cadre étudié et les contraintes expérimentales, le protocole a été choisi conformément aux exigences posées en fin de premier chapitre.

Le troisième chapitre analyse et vérifie la cohérence de chacune des mesures mises en œuvre. Il valide également l'estimation de l'ETR par recoupement des données acquises séparément.

Pour étudier l'ETR d'une parcelle de vigne en vue d'une extrapolation à différentes parcelles, on analyse séparément l'évaporation du sol et la consommation en eau des ceps.

Le quatrième chapitre porte donc sur la caractérisation du flux d'évaporation sous couvert de vigne. L'importance est mise sur la variabilité intra-parcellaire de ce flux. Un modèle d'évaporation à l'échelle de la parcelle est présenté dans une seconde étape.

Le dernier chapitre aborde la consommation en eau de la vigne. Celle-ci est étudiée à partir de deux mesures distinctes qui apportent chacune des éléments de compréhension des variabilités spatio-temporelles d'alimentation hydrique. Des relations, premières étapes d'une modélisation, sont finalement dressées entre l'état hydrique du milieu et l'alimentation en eau des vignes.

CHAPITRE 1

L'ALIMENTATION EN EAU DE LA VIGNE ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'étude de l'alimentation hydrique de la vigne pose de nombreuses difficultés en raison des caractéristiques propres de sa biologie d'une part et de son mode de culture d'autre part.

Les particularités de la vigne tiennent dans le fait qu'il s'agit d'une culture pérenne, considérée comme relativement résistante à la sécheresse grâce à un enracinement puissant. Cette forte extension spatiale du système racinaire complique l'estimation de la consommation en eau d'une parcelle par bilan hydrique au sol. En effet, le bilan hydrique est généralement effectué sur une couche de sol d'épaisseur au moins égale à la profondeur de colonisation par les racines. Sa détermination étant difficile, les travaux sur vigne se limitent nécessairement à une profondeur choisie en fonction de critères le plus souvent pédologiques.

Une autre singularité de la vigne en tant que culture est que son couvert est discontinu et périodique. Cette variabilité spatiale structurée a des incidences sur les prélèvements d'eau par les racines mais également sur les circulations atmosphériques (problèmes de rugosité de couvert et d'orientation des flux le long des rangs par exemple).

La structure discontinue du couvert a également une incidence sur la distribution de l'énergie au sein de la parcelle. Celle-ci conditionne la partition des flux, c'est-à-dire les parts relatives de l'évaporation du sol nu et de la transpiration dans l'ETR.

En dernier point, la vigne possède des mécanismes de régulation de sa consommation en eau propres à chaque cépage. Ces mécanismes, induits par l'environnement (humidités de l'air et du sol), sont complexes et mal connus.

La construction d'un modèle de fonctionnement hydrique d'une parcelle de vigne à partir de mesures de terrain pose donc les questions suivantes :

- quelle est la distribution des racines et leur fonctionnalité par rapport à l'absorption d'eau (donc la zone de sol fonctionnelle) ?
- comment se répartit l'énergie incidente en énergie disponible pour le sol et pour la plante ?

- quelles sont les interactions entre la vigne et son milieu et leurs conséquences sur l'alimentation en eau des ceps ?

Ces trois points seront abordés successivement dans l'étude bibliographique qui suit. Les conclusions des travaux les concernant seront réunies dans l'étude critique d'une modélisation envisageable de l'évapotranspiration réelle d'une parcelle de vigne..

1. MORPHOLOGIE ET FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME RACINAIRE DE LA VIGNE

Pour appréhender les facultés d'alimentation hydrique de la vigne, il est utile de savoir comment se distribuent les racines dans le sol. Cette répartition doit être étudiée verticalement le long d'un profil afin de connaître les couches de sol qui contribuent aux prélèvements d'eau du sol. Elle doit aussi être observée horizontalement compte tenu de la forte hétérogénéité du couvert qui peut induire des hétérogénéités parallèles dans la distribution racinaire.

Lorsqu'on sait où sont les racines, rien ne renseigne sur leur fonctionnalité vis-à-vis de l'absorption d'eau. Ce problème fera l'objet d'une analyse dans la seconde partie de ce paragraphe.

1.1. Occupation de l'espace par les racines. Étude morphologique.

La vigne possède potentiellement un système racinaire développé, tant en profondeur que latéralement (Branas, 1974). L'installation du système racinaire dépend concrètement de nombreux facteurs édaphiques, variétaux ou de conduite de la parcelle. Selon Carbonneau (comm.pers.), la qualité de la colonisation racinaire est induite par une conduite du couvert favorisant la vigueur des ceps.

1.1.1. Distribution verticale de l'enracinement

Les auteurs sont unanimes, la vigne possède une faculté d'enracinement en profondeur très étendue. Seguin (1972) cite la présence de racines à 7 mètres de profondeur sous les terrasses alluviales de la Garonne. Ionescu *et al.* (1978) recensent des racines à plus de 11 mètres sous la surface du sol. Les difficultés expérimentales à l'étude du système racinaire de la vigne au champ (Morlat *et al.*, 1981) permettent rarement de le décrire complètement.

Les caractéristiques d'enracinement sont souvent rattachées à une variété de porte-greffe. Swanepoel et Southey (1989) confirment que le porte-greffe induit une distribution racinaire qui lui est propre lorsque le sol n'oppose aucune contrainte à son installation. On retrouve cette nuance dans les commentaires de Branas et Vergnes (1957) qui ne donnent une influence génétique à la distribution des racines que dans les deux ou trois premières années de la vie de la vigne. Le sol n'est alors pas limitant car la couche superficielle a généralement été défoncée. Morlat et Jacquet (1993) ont effectué des comptages racinaires sur plusieurs sols et ont noté que l'utilisation d'un porte-greffe unique (associé à un greffon unique) n'induisait pas une répartition verticale unique des racines. Cela signifie que le sol est plus influent que la variété dans la distribution verticale des racines. De nombreux auteurs considèrent en fait que les conditions pédologiques seules contraignent l'implantation racinaire (Ribereau-Gayon et Peynaud, 1971 ; Seguin, 1973 ; Branas, 1974 ; Ionescu *et al.*, 1978 ; Champagnol, 1984 ; Morlat et Jacquet, 1993). Seguin (1972) indique qu'en l'absence de contraintes mécaniques (horizon induré, roche mère) ou hydriques (excès d'eau - nappe - ou sécheresse trop prononcée - surface du sol -), la croissance racinaire est maximale. Elle peut donc être très étendue en profondeur.

Champagnol (1984) estime, au vu d'une bibliographie étendue, que l'examen du premier mètre de sol suffit généralement pour connaître la plus grande partie du système racinaire de la vigne en milieu méditerranéen tempéré. Il a relevé de nombreuses références pour lesquelles s'identifiait une zone de colonisation préférentielle entre 30 et 70 cm de profondeur. Ces conclusions rejoignent celles de Smart et Coombe (1983) et confirment les observations de Branas et Vergnes (1957) à Montpellier, de Morlat (1989) en moyenne vallée de la Loire, de Roumbas *et al.* (1983) à Chypre ou encore de Stevens et Nicholas (1994) dans le sud de l'Australie. Ainsi, certaines études du système racinaire portent sur une épaisseur délibérément réduite : 125 cm pour Branas et Vergnes (1957), 90-120 cm pour Morlat (1981), 120 cm pour Swanepoel et Southey (1989).

Deux constats s'opposent donc : d'une part les auteurs se rejoignent pour dire que la vigne a des facultés d'enracinement exceptionnelles, d'autre part, certains d'entre eux estiment que les racines qui descendent en profondeur sont trop peu nombreuses pour devoir être quantifiées.

En réalité, l'adjectif "profond" employé tel quel par les auteurs pour caractériser le système racinaire ne représente pas une cote de référence : les racines profondes d'un sol de Graves bordelaises sont situées à plus de 3 mètres (Seguin, 1969), celles mentionnées par Morlat (1989) sont les racines des horizons inférieurs à 1,20 m. Le terme de "profond" dépend en fait du type de sol puisque le critère pris en référence est généralement la résistance relative des plantes à la sécheresse : une vigne à racines "profondes" ne présente pas de symptômes de

souffrance à la sécheresse. Ainsi, il est normal que, quelle que soit la zone d'étude préconisée ou l'importance quantitative apportée au système racinaire profond, **de nombreux chercheurs estiment que les racines "profondes" sont un atout pour résister à la sécheresse** (Seguin, 1969, 1973 ; Ionescu *et al.*, 1978 ; Smart et Coombe, 1983 ; Champagnol, 1984 ; Morlat *et al.*, 1992).

Des recherches ont donc été organisées pour connaître les pratiques culturales qui favoriseraient l'implantation de racines en profondeur. Les travaux de Morlat et son équipe (Morlat, 1981 ; Morlat *et al.*, 1984) visent à comprendre l'influence de la conduite de la culture sur la répartition des racines. La densité de plantation intervient de façon complexe, en liaison notamment avec la profondeur du sol (Laurent, 1979). Morlat *et al.* (1984) montrent que les vignes plantées en large inter-rang ont un enracinement plus profond que les vignes plus étroites. Branassas et Vergnes (1957) et Hidalgo et Candela (1969) ont au contraire relevé des quantités de racines qui augmentaient en profondeur avec la densité de plantation.

En revanche, lorsque l'inter-rang est enherbé, le système racinaire de la vigne est plus profond par effet de compétition pour l'eau dans les couches de surface (Delas *et al.*, 1986 ; Morlat, 1981 ; Morlat *et al.*, 1984).

Pour résumer l'ensemble de ces nombreux travaux sur la distribution verticale des racines de la vigne, on peut mettre en relief plusieurs points à partir des observations mentionnées :

- l'enracinement de la vigne peut être très étendu en profondeur,
- la majeure partie des racines est souvent concentrée dans le premier mètre du sol,
- la distribution verticale des racines dépend d'une relation complexe entre les conditions physico-chimiques imposées par le sol, les caractéristiques variétales et la conduite de la culture (densité de plantation, système de conduite).

1.1.2. Distribution horizontale

Pour une vigne désherbée chimiquement, le système racinaire se distribuerait suivant le schéma de la figure 1-1. Une telle disposition laisserait penser que, malgré un nombre de racines sensiblement identique sous rang et inter-rang en surface, les différences deviendraient plus nettes en profondeur.

Les études de dénombrement réalisées montrent une réalité plus complexe. Laurent (1979) met en évidence que, pour toute densité de plantation, à conditions édaphiques similaires, le rang présente plus de racines que l'inter-rang dans les couches de surface. Branassas et Vergnes

(1957) ont pour leur part montré que le nombre des racines (exprimé en masse de racines par mètre carré de sol horizontal) est nettement moins élevé sous l'inter-rang que sous le rang à toute profondeur (de 0 à 125 cm).

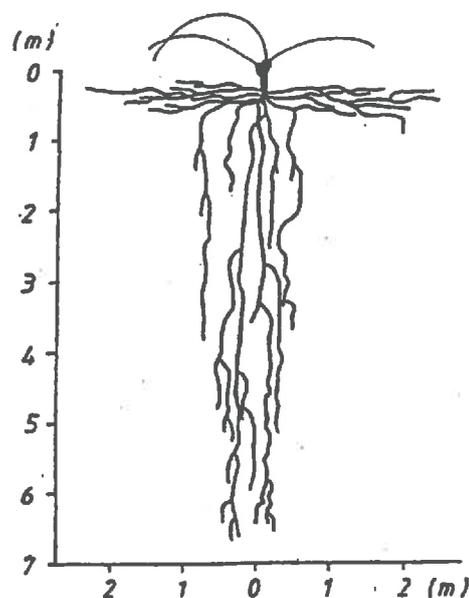


Figure 1-1 : Répartition du système racinaire d'un pied de vigne en l'absence de contraintes pédoclimatiques. D'après Ionescu *et al.* (1978)

En moyenne sur le profil, en large inter-rang et faible espacement des pieds sur le rang (3 x 0,5 m) les mêmes auteurs ont observé trois fois moins de racines sous l'inter-rang ; lorsque l'espacement augmente (3 x 2 m), la masse de racines sous l'inter-rang égale 80 % de la masse de racines sous le rang. Stevens et Nicholas (1994) ont même relevé des densités racinaires plus élevées dans l'inter-rang que dans le rang pour des conditions d'espacement similaires (3,1 x 2,2 m) dans une parcelle de Syrah.

Malgré ces différences de densité, selon Branas et Vergnes (1957), la distribution des pourcentages de racines le long du profil est sensiblement identique entre rang et inter-rang (fig. 1-2), pour une densité de plantation déterminée.

Les autres recherches comptabilisant les racines sous rang et inter-rang ont été menées pour étudier les effets d'un enherbement sur la distribution racinaire. Morlat *et al.* (1984) montrent que la différence entre le nombre de racines sous le rang et sous l'inter-rang (exprimé en impacts de racines au mètre carré) est plus importante pour une vigne enherbée que pour une vigne dés herbée chimiquement. Ceci s'explique par la compétition plus intense entre racines de l'enherbement (fétuque) sous l'inter-rang enherbé que sous le rang, toujours exempt

de racines concurrentes, quelle que soit la densité de plantation. Cette différence numérique n'est pourtant pas apparue statistiquement significative malgré un inter-rang de 2,60 m.

Il peut donc exister une différence de distribution racinaire entre rang et inter-rang. L'étude du système racinaire de la vigne doit donc préférentiellement séparer les dénombrements de racines dans les deux positions.

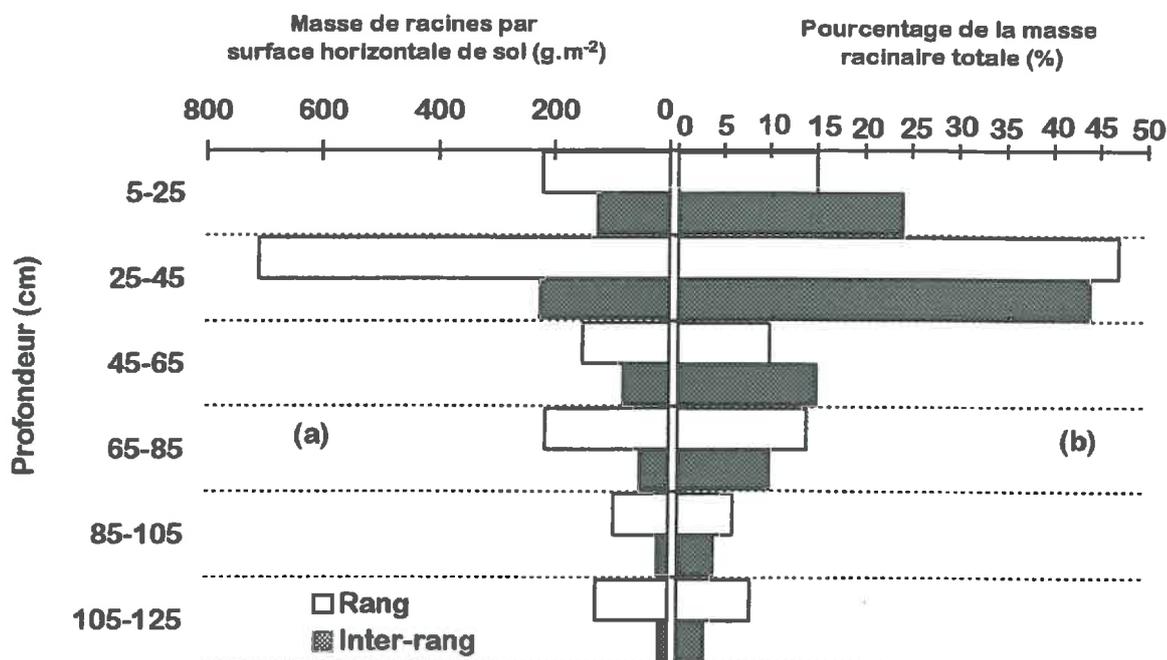


Figure 1-2 : Effet de l'éloignement du cep sur la densité racinaire. Profils réalisés par Branas et Vergnes (1957) sous une vigne plantée en sol peu profond à la densité 3x0,5 m. (a) Distribution pondérale des racines; (b) Distribution centésimale

1.1.3. Densité racinaire de la vigne

Les résultats de dénombrements racinaires publiés sont donnés dans des unités très variables d'une étude à l'autre. Ce peuvent être des masses racinaires (Branas et Vergnes, 1957), des impacts sur une grille verticale ou horizontale (Morlat, 1981), ou des longueurs de racines (Ionescu *et al.*, 1978). Chacune de ces grandeurs peut être exprimée telle quelle (Ionescu *et al.*, 1978) ou rapportée à la surface horizontale de sol (Branas et Vergnes, 1957), à la surface verticale ou horizontale de comptage (Morlat, 1981), ou au volume de sol exploré (Smart et Coombe, 1983). Ceci rend difficile les comparaisons des dénombrements publiés.

Plante	Densité racinaire (cm.cm ⁻³)	Référence bibliographique
Pommier	0,01-0,2	Smart et Coombe, 1983
Poirier	0,12-0,56	"
Prunier	0,13-0,56	"
Conifères	0,5-0,69	"
Soja	1-3	Reicosky <i>et al.</i> , 1972
Sorgho	0,5-1,5	Gardner, 1964
Coton	1,5-2,5	Taylor et Klepper, 1974 cités par Trocmé, 1994
Maïs	0,5-3	Grimes <i>et al.</i> , cités par Trocmé, 1994
Vigne	0,002-0,030	Smart et Coombe, 1983
Vigne	0,001-0,008	Archer, 1988
Vigne	0,003	Garcia et Gil, 1982 cités par Champagnol, 1984
Vigne	0,015-0,020	Ionescu <i>et al.</i> , 1978
Vigne	0,100-0,200	Stevens et Nicholas, 1994
Vigne	<i>0,001-0,012</i>	Champagnol, 1984
Vigne	<i>0,002-0,004</i>	Branas et Vergnes, 1957

Tableau 1-1 : Densités racinaires extrêmes (fourchettes) et moyennes (chiffres seuls) de plusieurs espèces végétales exprimées en longueur de racines par volume de sol (caractères droits) ou en masse racinaire transformée en longueur (voir texte) (italique). Les données des cultures annuelles sont celles obtenues en plein développement de la végétation.

Smart et Coombe (1983) ont réalisé un tableau de confrontation des données de densités racinaires (en longueurs de racines par volume de sol exploré). Le tableau 1-1 reprend leurs résultats. Il présente également des chiffres de densités racinaires de cultures annuelles et de vigne publiés par d'autres auteurs. **La densité de colonisation racinaire de la vigne est faible par rapport à celle d'autres cultures** (Smart et Coombe, 1983). Les densités les plus fortes de la fourchette présentée par Smart et Coombe (1983) pour la vigne rejoignent les valeurs publiées par Ionescu *et al.* (1978) en conditions très favorables. Champagnol (1984) indique également que ces densités correspondent à celles de l'horizon de colonisation maximale. Considérant une masse métrique de racines de 5 g.m⁻¹ approximativement (Champagnol, 1984), les données de Champagnol (1984) et de Branass et Vergnes (1957) restent dans la même variation (chiffres en italique tableau 1-1).

Comparer ces chiffres donne une importance quantitative de la variabilité de colonisation racinaire d'une espèce à l'autre et de la position basse de la vigne dans cette gamme de variation. Les données du tableau 1-1 montrent somme toute que la vigne a un potentiel d'exploitation de la réserve hydrique moins élevé que les autres plantes de par un système racinaire plus dispersé. Champagnol quantifie cette dispersion par une distance moyenne entre deux racines de 7 cm en conditions favorables.

Excepté le travail de Branas et Vergnes (1957), les descriptions morphologiques référencées dans cette partie ont toutes été menées pour connaître les zones d'exploitation de la réserve hydrique du sol par la vigne. Ceci sous-tend que toute racine présente est potentiellement active pour absorber de l'eau. Or tout le système racinaire ne participe pas nécessairement à l'absorption de l'eau. Outre des questions sur la répartition des racines dans le sol se posent alors des questions sur le rôle qualitatif et quantitatif que jouent ces racines dans l'absorption d'eau.

1.2. Variabilité spatio-temporelle des zones d'absorption d'eau par les racines de vigne

Pour répondre aux questions précédentes, beaucoup d'auteurs quantifient les racines par classes de diamètres, exprimant ainsi leur volonté de dissocier les racines actives (racines fines) des autres (voir entre autres Laurent, 1979 ; Morlat *et al.*, 1984). D'autres auteurs recherchent des critères synthétiques exprimant la capacité des racines à extraire de l'eau. Par exemple, Dupont et Morlat (1980, cités par Morlat *et al.*, 1981) ont créé un indice de division racinaire traduisant la "qualité de la colonisation du sol par les racines fines". Selon Stevens et Nicholas (1994), la masse linéaire de racines, très variable selon les espèces et les modes de culture, renseigne bien sur la faculté des vignes à extraire de l'eau. En effet, les racines fines (diamètre inférieur à 2 mm) se caractérisent par une longueur élevée pour une masse faible (soit une masse linéaire faible). Ainsi, Randall et Coombe (1978, cités par Stevens et Nicholas, 1994) ont mesuré des masses linéaires qui s'étendaient de 3,6 à 26,5 g.m⁻¹, ce qui traduirait une capacité d'extraction de 1 à 8. Malgré ces efforts, il n'apparaît pas de moyen aisé d'anticiper sur la consommation d'eau par les racines.

Lorsqu'on aborde les problèmes d'absorption d'eau par les racines, la dimension temps intervient nécessairement dans l'analyse. Les besoins en eau de la vigne croissent chaque année du débourrement (avril) au plein développement foliaire (juillet-août) pour atteindre un maximum aux alentours de la véraison. Cependant, la plupart du temps, les réserves hydriques

du sol ne peuvent fournir la quantité d'eau nécessaire à une alimentation hydrique optimale de la plante tout au long de la saison. Ceci s'avère particulièrement en pays méditerranéens où l'été est généralement caractérisé par une sécheresse prononcée.

La variabilité spatiale des prélèvements engendrée probablement par des hétérogénéités d'enracinement doit donc être étudiée sous un angle dynamique. Les zones d'extraction racinaire changent-elles avec le dessèchement du sol ou peut-on définir une zone d'exploitation préférentielle unique dans le temps et l'espace ?

1.2.1. Note préliminaire sur l'estimation des prélèvements racinaires

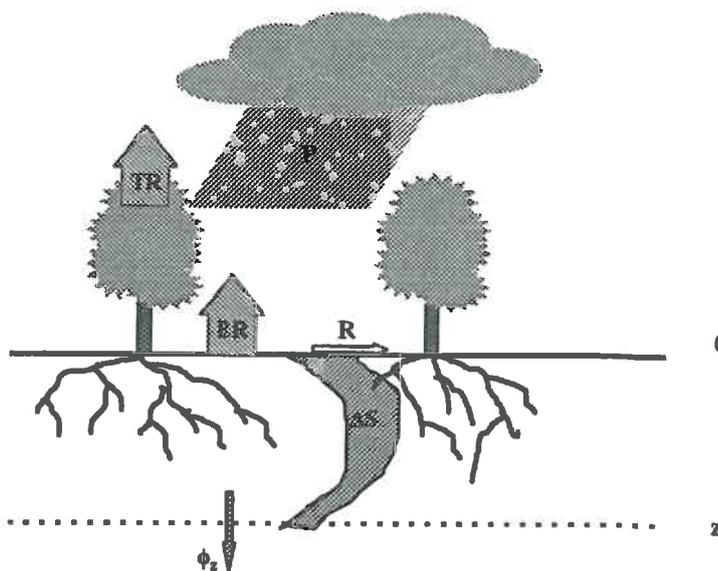


Figure 1-3 : Illustration des termes du bilan hydrique d'une culture non couvrante

Les prélèvements d'eau par les racines sont estimés au moyen de suivis des profils d'humidité du sol, les auteurs assimilant la variation de stock à l'extraction racinaire. Pourtant, en toute rigueur, le bilan hydrique d'un sol et son couvert s'écrit (figure 1-3):

$$\Delta S_{0-z} = (P+I) - (PR_{0-z} + ER) - \phi_z \pm R \quad \text{Equ.}[1.1a]$$

où: ΔS_{0-z} est la variation d'humidité du sol de la surface à la profondeur z

(P+I) sont les apports d'eau par les pluies et/ou les irrigations

PR_{0-z} sont les prélèvements d'eau par les racines dans la tranche de sol étudiée

ER est l'évaporation directe par le sol sous couvert

$(PR_{0-z} + ER) = ETR$

ϕ_z est le flux à la profondeur z , c'est-à-dire la quantité d'eau circulant à cette cote sous l'effet des gradients de potentiels, compté positivement lorsqu'il est orienté vers le bas. Le flux peut être cependant être ascendant auquel cas il est négatif. Il est calculé par la loi de Darcy

R est le ruissellement, difficile à mesurer

Les auteurs réduisent généralement cette équation à :

$$\Delta S_{0-z} = (P+I) - PR_{0-z} \quad \text{Equ.}[1.1b]$$

Ce faisant, ils négligent l'existence éventuelle d'une circulation d'eau en fond de profil de mesure (drainage ou remontées capillaires) et l'évaporation directe du sol.

L'évaporation du sol peut être mesurée facilement par mini-lysimètres (Boast et Robertson, 1982). En revanche, le flux de fond de profil est difficile à quantifier car son calcul impose la connaissance de la courbe de conductivité hydraulique à la profondeur d'estimation et la mesure des gradients de potentiels autour de cette cote. Le profil de mesure pouvant être très profond pour l'étude de la vigne, la mise en place d'une telle mesure est difficile.

Négliger l'évaporation réelle par le sol provoque une surestimation des prélèvements dans la couche de surface. Négliger le flux profond pose en revanche des problèmes plus complexes puisque cela peut mener à surestimer les prélèvements en cas de flux positif (drainage) ou les sous-estimer en cas de flux négatif (remontées capillaires).

La quantité d'eau fournie à la plante par remontées capillaires peut devenir une partie importante de la quantité totale d'eau qu'elles consomment, comme l'ont montré Katerji *et al.* (1984) et Bertuzzi *et al.* (1994) sur des couverts de blé, luzerne et soja.

Sur vigne, la plupart des auteurs garantissent l'absence de drainage dans les variations d'humidité publiées. Pour ce faire, ils réalisent le plus souvent une expérience de drainage interne* qui fixe le profil de capacité au champ à partir duquel le drainage peut être supposé négligeable (Seguin, 1969, 1973, 1978 ; Roumbas *et al.*, 1983 ; Duteau, 1987 ; Morlat, 1989). En revanche, comme nous l'avons signalé, les remontées capillaires ne sont pas contrôlées par ces auteurs. Duteau (1982 ; 1987) et Jourjon *et al.* (1991) ont observé de fortes variations d'humidité jusqu'au fond de la couche de sol colonisée par les racines (voir figures 1-4 et 1-5). Jourjon *et al.* (1991) estiment que la vigne puise dans les réserves hydriques de cette couche l'essentiel de son alimentation hydrique. Duteau (1982), ayant pour sa part réalisé

* Expérience de drainage interne : la parcelle est arrosée abondamment puis couverte pour limiter les pertes par évaporation du sol (l'expérience est réalisée en hiver pour qu'il n'y ait pas extraction racinaire). L'humidité du sol est suivie jusqu'à stabilisation du profil. On estime alors que l'on est à la capacité au champ.

des mesures d'humidité au-delà de la zone de colonisation racinaire, estime que la plus grande partie de l'alimentation en eau des vignes provient de la roche-mère sous-jacente. Il met ainsi en évidence que les remontées capillaires en fond de profil racinaire peuvent correspondre à une source d'alimentation substantielle pour les vignes même si les racines n'y sont pas présentes.

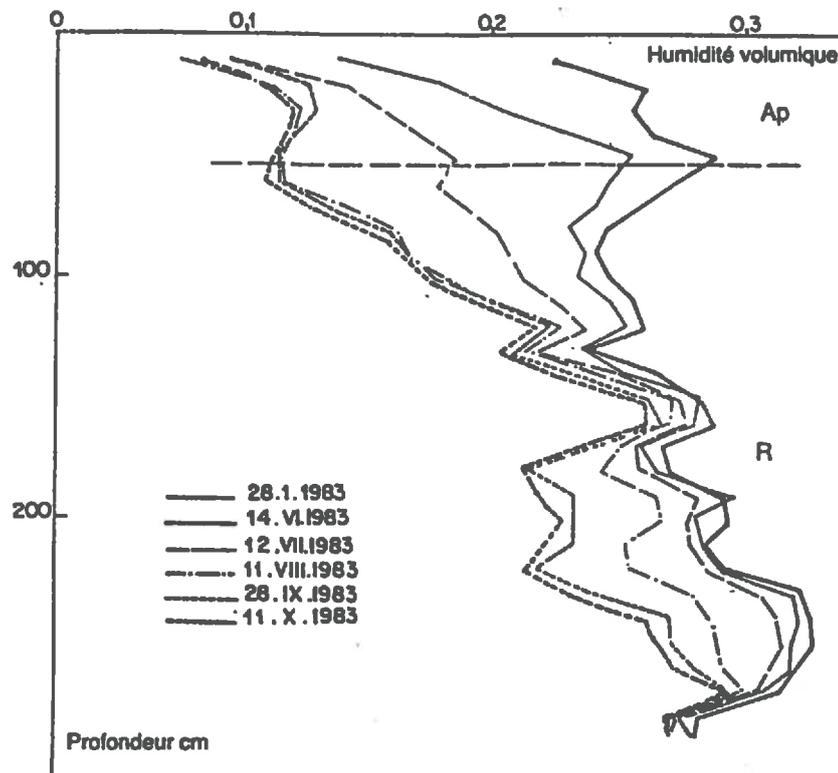


Figure 1-4 : Profils d'humidité mesurés lors de l'année 1983 (très sèche). Sol superficiel (55 cm) sur calcaire non fissurée. Région bordelaise. D'après Duteau (1987)

1.2.2. Répartition verticale des prélèvements

Etant donné l'enracinement potentiellement profond de la vigne, les mesures de variations de stock hydrique publiées sont généralement réalisées sur plus de 2 mètres d'épaisseur. Les années climatiques décrites sont très sèches à très humides et les sols sont profonds ou superficiels. On observe le plus souvent une diminution du stock régulière au cours de la saison et de la profondeur (Seguin, 1969, 1978 ; Roumbas *et al.*, 1983 ; Delas *et al.*, 1986 ; Morlat, 1989 ; Jourjon *et al.*, 1991 ; Winkel et Rambal, 1993). Les profils de variation de stock publiés montrent que, en l'absence de drainage, les couches profondes commencent à s'assécher dès le débourrement, c'est-à-dire en même temps que les horizons plus superficiels (Seguin, 1969 ; Duteau, 1982 ; Roumbas *et al.*, 1983 ; Morlat, 1989 ; Jourjon *et al.*, 1991).

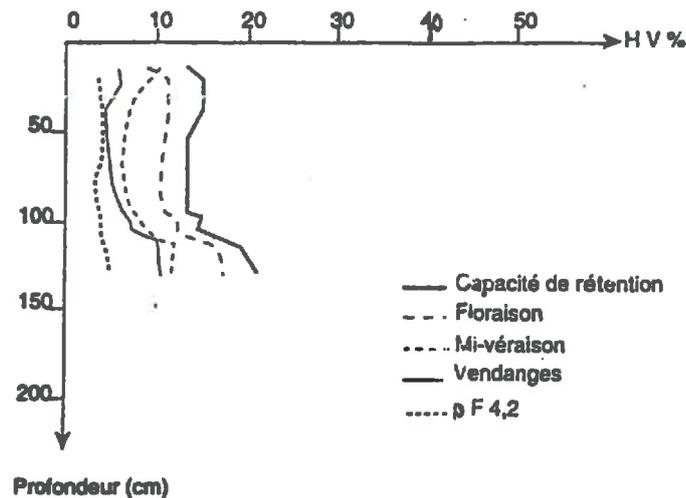


Figure 1-5 : Profils d'humidité mesurés sous une vigne plantée en sol peu profond (130 cm) sur substrat induré. L'enracinement n'a pas été observé sous 100 cm de profondeur. Sol sablo-caillouteux de la vallée de la Loire. D'après Jourjon *et al.* (1991).

La figure 1-6 montre des variations d'humidité souvent mesurées en cas d'enracinement potentiellement profond. Les variations de stock sont observables jusqu'à 270 cm de profondeur dès le débourrement. Elles sont moins intenses en profondeur qu'en surface, sans doute pour des raisons de densité racinaire moindre qu'en surface. Par contre, l'assèchement se poursuit plus longtemps. En surface, les racines abondantes assèchent le sol avec une cinétique rapide, si bien que les variations de stock y apparaissent négligeables dès le 7 août, exprimant que l'eau est moins disponible pour les plantes. L'intensité des variations de stock diminue aussi en profondeur, à moindre titre toutefois puisque les racines, moins nombreuses, n'ont pas autant asséché le sol. Cette évolution avait également été montrée par Morlat (1989) sur sol profond.

Au vu de ces profils de variations d'humidité, les auteurs concluent que la vigne, lorsque le sol est sec, s'alimente à partir des couches les plus profondes. Il est vrai que la variation de stock semble parfois augmenter en profondeur au cours de l'été (Morlat *et al.*, 1992). Par calcul sur les variations de stock, on peut même établir que la majorité de l'alimentation en eau des plantes provient des horizons les plus profonds.

Toutefois, on peut émettre des réserves quant à cette interprétation en l'absence de contrôle des flux à l'intérieur du profil. On peut en effet envisager que l'assèchement des couches supérieures provoque des remontées capillaires depuis les couches profondes, colonisées ou non par les racines, où l'eau est moins retenue. Dans ce cas, la variation de stock calculée dans les couches profondes ne sera pas imputable aux seuls prélèvements par les

racines de l'horizon étudié. De cette manière, les racines de surface qui, en apparence, ne participaient qu'en proportion minoritaire à l'alimentation totale des ceps, peuvent être toujours actives voire essentielles à la survie de la vigne en cas de sécheresse.

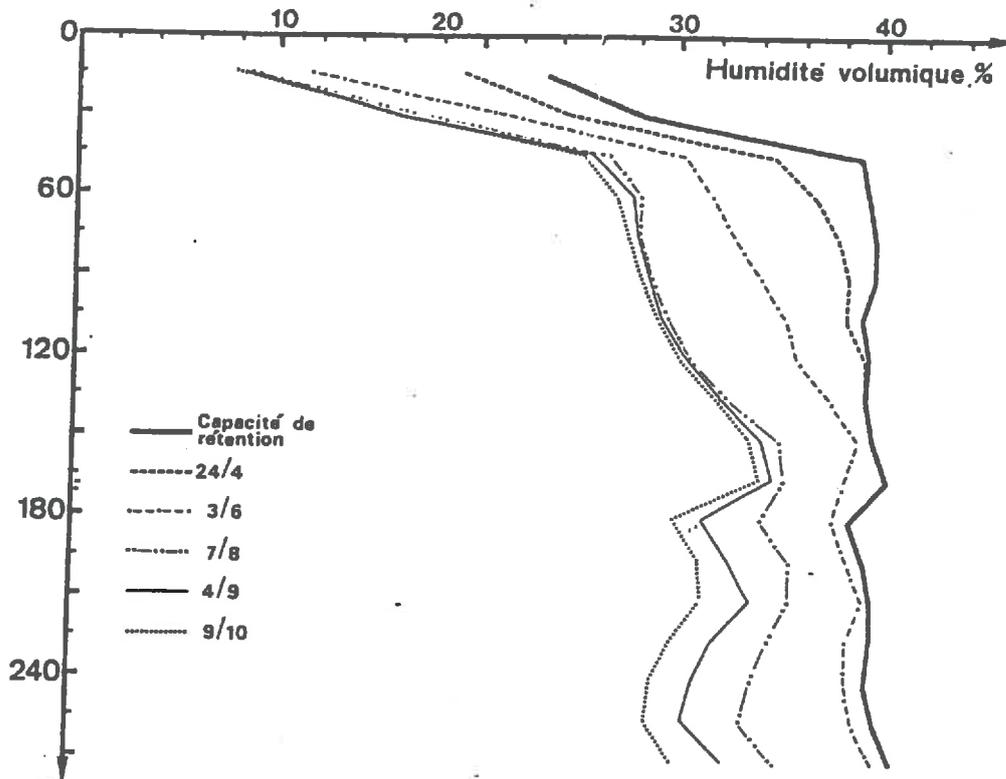


Figure 1-6 : Profils d'humidité mesurés au cours de l'année 1980 dans un vignoble de Chypre (d'après Roumbas *et al.*, 1983). Consommation moyenne sur 270 cm : $1,71 \text{ mm.j}^{-1}$, soit 57 % de l'ETP

1.2.3. Répartition horizontale des prélèvements

Comme la distribution latérale du système racinaire, la variabilité horizontale des prélèvements par la vigne n'a pas été beaucoup étudiée. Puech *et al.* (1969) ont montré, sous maïs, que les variations de stock sous les interlignes pouvaient être significativement différentes de celles mesurées sous les lignes. Ils concluent que, pour des cultures pérennes (vergers), les hétérogénéités peuvent être les mêmes voire amplifiées par des phénomènes comme la collecte des eaux de pluie par le feuillage ou le ruissellement direct de la pluie sur les troncs.

Morlat (1986) compare l'évolution de profils d'humidité sur 170 cm sous vigne désherbée totalement (pas d'effet de compétition en surface pour la colonisation racinaire, comme on a pu le voir paragraphe 1.1.2). Les résultats montrent des variations de stock plus fortes sous le rang que sous l'inter-rang pendant toute la saison de mesure, à toute profondeur supérieure à 40 cm. Galais (1992) n'a pas observé de différences significatives de variations de stock entre le rang et l'inter-rang pour un gobelet planté à 1,80 m d'espacement. Dourthe Larrère (1988) arrive aux mêmes conclusions sans toutefois pouvoir effectuer de test de significativité par manque de répétitions.

1.3. Conclusions

La vigne possède un système racinaire très étendu dans l'espace. Il se répartit de façon très hétérogène selon la structure du sol. Ceci pose le problème de l'épaisseur de sol à étudier lorsqu'on veut quantifier l'alimentation en eau de la vigne à partir des mesures d'humidité du sol. La bonne connaissance du sol peut permettre d'appréhender la colonisation racinaire sans toutefois renseigner avec précision sur le potentiel d'exploitation des réserves hydriques que cet enracinement représente. De par la variabilité horizontale de son couvert, la vigne peut présenter des discontinuités parallèles dans la distribution de ses racines. Les différences montrées dans la bibliographie ne sont pas toujours nettes.

Quelle que soit sa distribution spatiale, le système racinaire de la vigne se caractérise par une maille de colonisation très faible au regard de celle d'autres plantes. La colonisation racinaire étant très hétérogène, il doit exister des horizons où l'absorption est plutôt contrôlée par le nombre de racines (horizons de colonisation préférentielle) et des horizons où la vitesse de circulation de l'eau dans le sol est limitante. Le sol, déterminant pour l'installation des racines, l'est alors également pour la disponibilité en eau.

Les travaux publiés ne permettent pas de faire un parallèle entre la présence de racines et l'absorption d'eau. La variabilité spatio-temporelle de l'extraction racinaire de la vigne a été étudiée par différents auteurs en posant que les prélèvements par les racines sont égaux aux variations d'humidité du sol. Cette formulation simplificatrice ne permet pas d'appréhender les différences le long d'un profil compte tenu du rôle majeur que peuvent jouer les remontées capillaires dans l'alimentation totale de la plante. L'approximation joue aussi lorsqu'il y a drainage : si les variations de stock mesurées en profondeur sont dues à une percolation de l'eau vers des couches plus profondes, la consommation en eau de la plante est surestimée. L'observation des profils d'humidité a fait conclure généralement que le système racinaire profond était un atout pour résister à la sécheresse. Cependant, les variations de stock observées en profondeur peuvent ne pas être imputables qu'aux prélèvements par les racines.

En effet, des redistributions d'eau au sein du profil peuvent avoir lieu et induire des variations de stock en profondeur correspondant à un flux de remontées capillaires vers la zone de colonisation préférentielle par les racines.

En ce qui concerne la variabilité horizontale des prélèvements, il semble qu'il existe une différence de comportement entre les rangs et les inter-rangs. La plupart des travaux consultés ne mentionnent pas l'échantillonnage utilisé pour l'estimation de ce qui est appelé "consommation en eau de la parcelle". Les calculs doivent généralement porter sur l'humidité mesurée en un seul point de la parcelle. Certains auteurs ont insisté sur le nombre de sites de mesure de l'humidité (Delas *et al.*, 1986 : 3 à 4 tubes ; Duteau, 1987 : 2 tubes ; Morlat *et al.*, 1992 : 2 à 3 tubes). Lorsqu'elle est indiquée (Delas *et al.*, 1986 ; Duteau, 1987), la position des mesures est l'axe des ceps. Autrement dit, s'il existe une différence entre les variations de stock mesurées sous les rangs et sous les inter-rangs, l'ensemble des résultats publiés jusque là sont surestimés. Les descriptions morphologiques du système racinaire invitent à dissocier les mesures d'humidité du sol sous rang et inter-rang pour une meilleure estimation de l'alimentation en eau moyenne de la parcelle.

Les hétérogénéités liées au sol semblent donc difficiles à maîtriser pour l'étude de l'ETR parcellaire. Pour n'avoir pas à travailler sur une zone inconnue, des méthodes existent qui permettent une estimation de l'ETR à partir des parties aériennes. Les hétérogénéités impliquées sont alors visibles et l'étude spatiale en paraît simplifiée. Les hétérogénéités de comportement du couvert vis-à-vis des transferts d'eau vers l'atmosphère sont liées à la distribution de l'énergie au sein de la parcelle. C'est la raison pour laquelle le paragraphe suivant fait le point sur les travaux relatifs à la répartition de l'énergie dans une parcelle en rangs.

2. INTERCEPTION DU RAYONNEMENT - DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

L'évapotranspiration réelle d'une culture est sous l'influence de l'énergie incidente sur la parcelle. Le rayonnement net (R_n) est obtenu par bilan énergétique de la surface du sol (rayonnement solaire + rayonnement atmosphérique - rayonnement du sol). Il correspond à la partie du rayonnement incident à la surface du sol mobilisable pour l'évaporation et la transpiration. La séparation de cette source d'énergie en énergies disponibles pour le sol et la

plante est sous l'influence de la structure du couvert végétal, elle-même dépendante, dans le cas de la vigne, du cépage, de la conformation de la parcelle (rangs/gobelets, distances de plantation, orientation des rangs) et de son mode de conduite (forme de la végétation). A une échelle de temps plus longue, cette séparation dépend de la variation du degré de couverture végétale.

La distribution de l'énergie sera d'abord étudiée à l'échelle de la journée. On se rendra compte qu'elle dépend beaucoup de l'état végétatif de la plante, si bien que l'influence de la croissance des plantes sur l'interception du rayonnement sera envisagée dans un second paragraphe.

2.1. Interception du rayonnement à l'échelle de la journée

En une journée, la course décrite par le soleil a diverses conséquences sur l'éclairement de la parcelle. L'orientation des rangs, la densité de plantation et la morphologie des rangs sont les facteurs principaux influant sur la partition de l'énergie à l'échelle de la journée.

Riou *et al.* (1989) ont construit un modèle d'interception du rayonnement à bases géométriques. Il sera présenté après une analyse de la séparation du rayonnement incident en rayonnements interceptés par la plante et le sol.

2.1.1. Rayonnement intercepté par les plantes

Champagnol (1984) montre l'effet de l'orientation des rangs de vigne sur leur interception du rayonnement solaire. La figure 2-1 est dressée à partir d'un modèle géométrique d'interception en assimilant le rang de vigne à un parallélépipède. L'observation de ces courbes théoriques montre deux choses :

- la distribution de l'énergie est très différente au cours de la journée selon l'orientation des rangs ;
- en début d'été, une orientation Nord-Sud (NS) des rangs sera plus propice à l'interception du rayonnement global par les plantes qu'une orientation Ouest-Est (OE), en cours d'été, les proportions interceptées se rejoignent pour les deux types d'organisation.

Smart (1973) a utilisé un modèle d'interception du rayonnement par une vigne en rangs du même type que le précédent. Il a réalisé diverses simulations visant à quantifier l'importance de plusieurs paramètres sur l'interception du rayonnement. Il en ressort que l'orientation des rangs est un facteur prépondérant de l'interception : des rangs orientés NS captent plus

d'énergie que des rangs OE. Une orientation NS favorise l'interception du rayonnement dans la matinée et l'après-midi, avec un minimum local à midi solaire. C'est l'inverse pour une vigne dont les rangs sont orientés OE. Les conséquences peuvent être importantes en milieu sec. En effet, en rangs OE, la demande climatique imposée par le rayonnement sur les vignes coïncide avec le pic de déficit hydrique de l'atmosphère. Si la plante est stressée, les stomates restent fermés au moment de la journée le plus propice à l'activité photosynthétique. Les conséquences sont donc avant tout nutritionnelles mais se ressentent sur la transpiration quotidienne. En fin de saison, l'interception du rayonnement est meilleure pour une vigne OE que pour une vigne NS (tab.2-1).

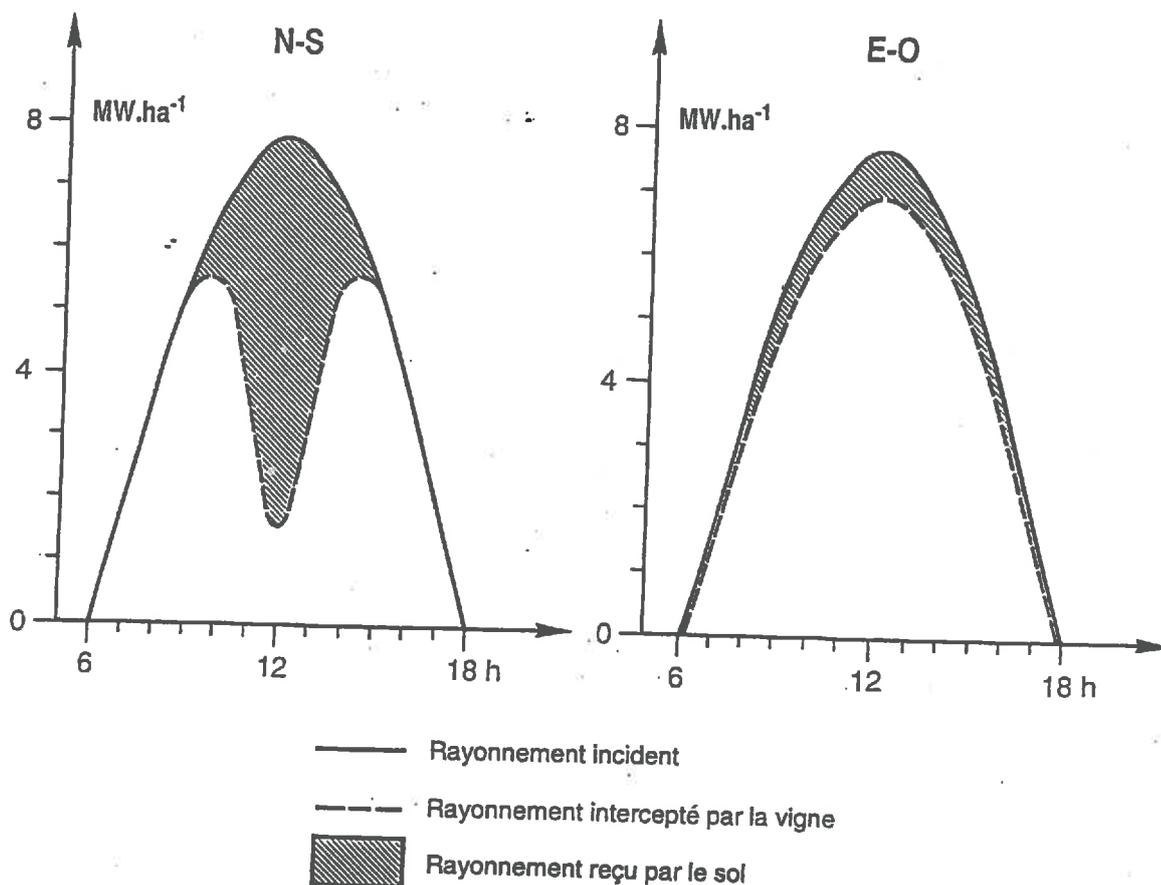


Figure 2-1 : Interception du rayonnement par un rang de vigne à l'échelle de la journée selon son orientation par rapport au soleil. Résultats de simulations en prenant le rang de vigne comme un parallélépipède plein.

Les autres facteurs influant sur l'interception du rayonnement sont la hauteur des rangs et leur inclinaison par rapport à la verticale. L'interception s'accroît avec l'augmentation de chacun de ces paramètres.

	NS	OE
21 juin	70 %	44 %
21 sept.	72 %	91 %

Tableau 2-1 : Part du rayonnement reçue par les rangs de vigne selon leur orientation et la date. Résultats obtenus par simulations. D'après Champagnol, 1984

2.1.2. Répartition du rayonnement arrivant au sol

La plupart des travaux publiés faisant référence à une mesure du rayonnement sous couvert utilisent des valeurs de rayonnement moyennes obtenues par des solarimètres linéaires. Ces travaux permettent entre autres de mettre en évidence des redistributions d'énergie : les mesures effectuées montrent souvent que l'évaporation d'un sol couvert n'est pas proportionnelle au rayonnement incident, ce qui signifie un apport d'énergie indirect si l'on considère que l'énergie est limitante dans le phénomène évaporatoire (Walker, 1984).

Les résultats issus de mesures directes de rayonnement net sous couvert discontinu montrent que le rayonnement reçu par l'inter-rang est plus fort que celui arrivant au sol sous les rangs (Ham et Kluitenberg, 1993). Ham et Kluitenberg (1993), sous soja, ont noté que des redistributions horizontales d'énergie pouvaient se produire entraînant un apport sous le rang d'une énergie reçue sur l'inter-rang. Ils mentionnent également que le rayonnement reçu par le sol à midi est plus élevé que le rayonnement reçu par la parcelle entière. Ils concluent à des réflexions de la lumière du couvert végétal vers le sol. La distribution de l'énergie à l'échelle de la journée varie selon la dimension de l'inter-rang, la hauteur du couvert et les déplacements de masses d'air.

2.1.3. Modèle d'interception du rayonnement de Riou *et al.* (1989)

Ce modèle a été conçu pour estimer la part d'énergie interceptée par une vigne à partir du rayonnement incident sur une parcelle. Le modèle fonctionne pour des vignes en rangs dont la géométrie est simplifiée (parallélépipède) et stable dans le temps.

Partant de cette forme stricte, le modèle d'interception de Riou *et al.* est un modèle géométrique considérant la rangée de vignes comme infinie. Les paramètres nécessaires sont (figure 2-2):

- morphologiques : dimensions en coupe de ce parallélépipède, largeur de l'inter-rang, porosité du feuillage (proportion de rayonnement qui peut traverser le feuillage);
- géographiques et météorologiques : latitude, angle solaire (lié au jour julien), angle de l'orientation des rangs avec le Nord, rayonnement global.

Les faces horizontales du rang de vigne sont prises opaques à la lumière (porosité nulle) si bien que les rayonnements les atteignant ne parviennent pas au sol (fig.2-2).

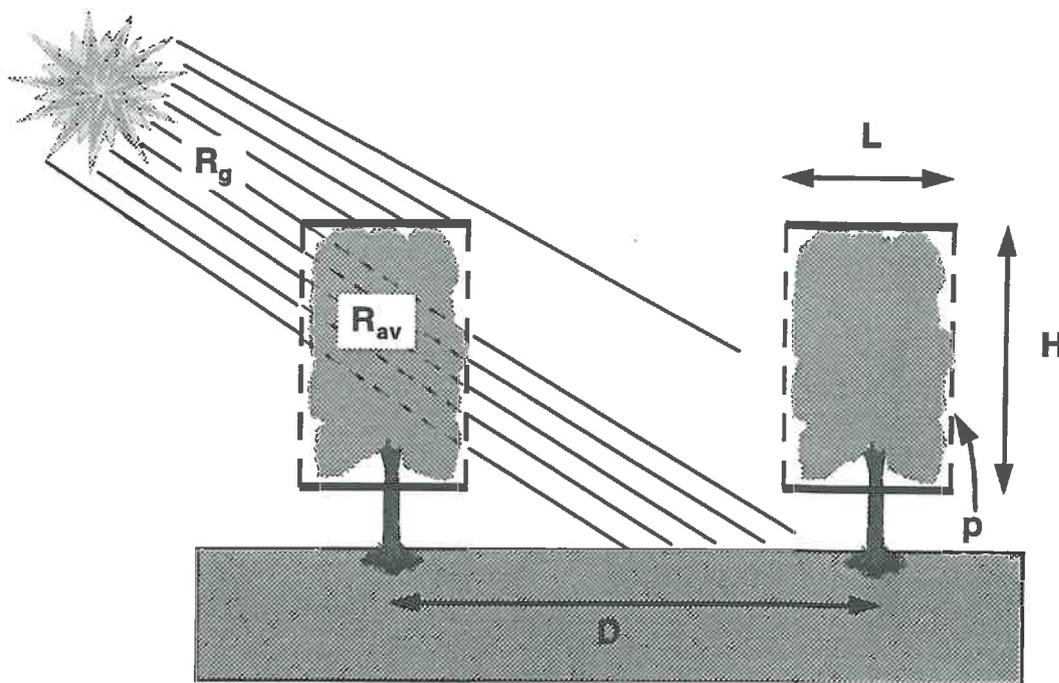


Figure 2-2 : Principe général du modèle d'interception du rayonnement solaire par une vigne en rangs établi par Riou *et al.* (1989). R_g : rayonnement global ; R_{av} : rayonnement absorbé par la vigne ; D : distance entre 2 rangs de vigne ; H : hauteur de feuillage ; L : largeur du feuillage ; p : porosité des faces latérales du rang de vigne

Le modèle prend en considération l'ombrage d'un rang sur le rang voisin mais néglige les effets des rangs plus éloignés. Il intègre également le rayonnement réfléchi du sol vers les plantes mais néglige celui des plantes vers le sol ou d'un rang sur son voisin.

Il calcule le rayonnement intercepté par la vigne (R_i) en fonction de la course du soleil (échelle de temps courte) et de paramètres morphologiques de la vigne. La course du soleil dans le ciel est intégrée sous la forme du paramètre λ qui est le rapport du rayonnement incident sur une surface verticale (I_v) au rayonnement reçu par une surface horizontale (I_h) :

$$\lambda = \frac{I_v}{I_h} \quad \text{Equ.}[2.1]$$

Selon la valeur de λ par rapport aux proportions géométriques du couvert, le modèle calcule R_i par une formulation générale du type :

$$R_i = f(H,L,p,D,\lambda) \times I_h + n_d \times R_d \quad \text{Equ.}[2.2]$$

avec : f , fonction arithmétique simple (polynomiale) des paramètres géométriques de la parcelle (hauteur H , largeur L , porosité p du rang de vigne et inter-rang D) et de λ ,

I_h , rayonnement solaire direct incident sur la parcelle,

n_d , coefficient d'interception du rayonnement diffus par la vigne, calculé en fonction de l'angle solaire et des paramètres géométriques de la parcelle,

R_d , rayonnement solaire diffus dans la parcelle.

Le modèle traduit enfin la part du rayonnement intercepté par le rang de vigne en rayonnement absorbé (R_{av}), à partir du rayonnement global (R_g), des albédos du sol (a_s) et du feuillage (a_f) :

$$R_{av} = (1 - a_f) \cdot R_i + a_s \cdot n_d \cdot (1 - a_f) \cdot (R_g - R_i) \quad \text{Equ.}[2.3]$$

Ce modèle présente l'avantage majeur d'être le seul disponible capable de séparer les énergies disponibles pour le sol et la plante à partir de données d'entrées simples. Sinoquet et son équipe (Sinoquet, 1989 ; Sinoquet *et al.*, 1992) ont aussi proposé un modèle d'interception du rayonnement par une vigne. Son fonctionnement est cependant trop complexe pour être appliqué facilement dans le cadre de l'étude du bilan hydrique à l'échelle de la saison de culture (prise en compte de l'ombre portée des pieds de vigne et de l'orientation des feuilles).

Les inconvénients du modèle de Riou *et al.* sont de plusieurs types :

- c'est un modèle créé pour les vignes à forme stricte, ce qui exclut du cadre théorique de son application les vignes conduites en gobelets ou en rangs non rognés (cas du Languedoc) ;
- la forme du rang de vignes n'évolue probablement pas dans les proportions d'un parallélépipède au cours de la croissance. Les conditions théoriques d'application du modèle ne sont donc pas respectées en période de croissance.

Le modèle de Riou *et al.* a été conçu pour une application spécifique mais sa base géométrique permet de le modifier pour l'adapter à d'autres conformations. Il s'avère un outil très utile pour les études séparées de la transpiration et de l'évaporation sur vigne car il permet d'évaluer, à partir de paramètres simples, les quantités d'énergie incidente disponibles pour les vignes et pour le sol.

2.2. Distribution spatio-temporelle de l'énergie incidente à l'échelle de la saison

Lorsqu'elle n'est pas perturbée par des interventions culturales, la croissance végétative de la vigne suit une évolution logistique : d'abord lente, elle s'accélère brusquement pour atteindre finalement un plateau (voir figure 2-3). Il s'ensuit une interception du rayonnement par les plantes variable au cours de l'année.

Peu de travaux ont étudié l'évolution du rayonnement sous vigne ni la relation entre croissance de la vigne et interception du rayonnement. Oliver et Sene (1992) ont suivi la répartition des flux énergétiques dans une parcelle de vigne plantée en gobelets en large espacement (2,50 x 2,50 m). Leur étude porte sur une saison de végétation. Ils montrent que la proportion d'énergie arrivant au sol, sous les ceps, passe de 60-95 % de l'énergie incidente 1 mois après le débourrement (variable selon la vigueur du cep) à 30-50 % en plein développement végétatif.

Les travaux de Oliver et Sene (1992) ne donnent pas de loi d'interception du rayonnement en fonction de l'état de la végétation. Les modèles d'estimation de l'ETR d'une parcelle cultivée fonctionnant sur des bases énergétiques utilisent généralement une relation exponentielle entre le rayonnement incident sur le sol et la surface foliaire (voir 4.2.1). En raison des forts espacements qui existent dans une parcelle de vigne et du taux de couverture généralement faible, de telles relations sont inapplicables. L'évolution de l'interception du rayonnement n'a donc pas encore été étudiée.

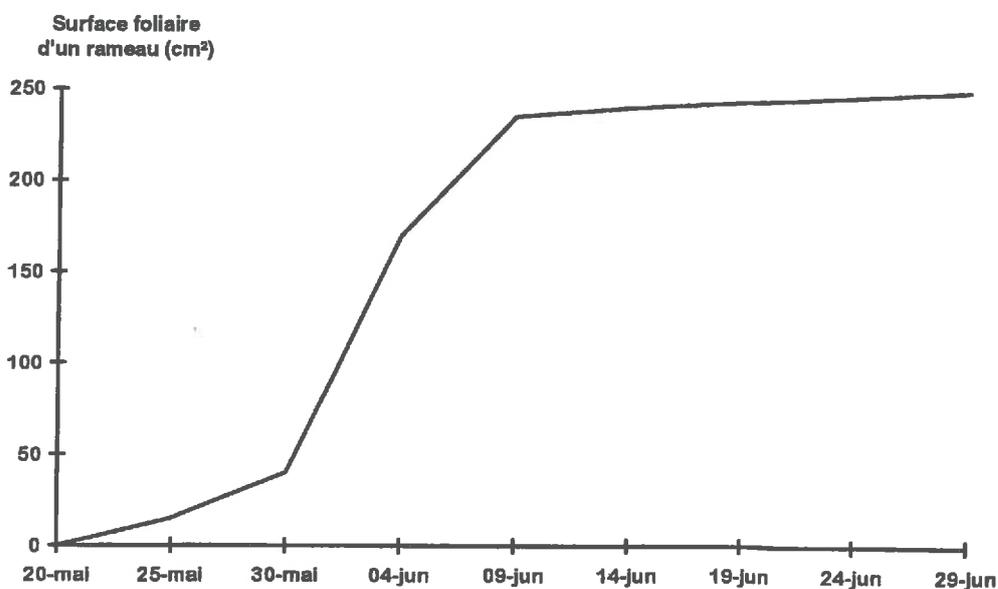


Figure 2-3 : Exemple d'évolution de la croissance de la surface des feuilles d'un rameau d'Aramon (d'après Ravaz et Geze, cités par Champagnol, 1984)

2.3. Conclusions

La distribution énergétique au sein d'un couvert discontinu conditionne la partition des flux dans l'ETR. Plusieurs possibilités se présentent pour déterminer les poids relatifs des rayonnements incidents sur le sol et la plante :

- la surface foliaire rapportée à la surface de sol (indice foliaire) traduit bien l'interception du rayonnement par les plantes pour un couvert continu. Par contre, **son utilisation pour les couverts discontinus paraît peu envisageable** en raison de l'hétérogénéité de l'ombrage;
- l'énergie peut être distribuée de façon géométrique entre plante et sol en appliquant une porosité de feuillage à la plante ;

Le problème est de savoir quels paramètres sont les plus appropriés pour rendre compte de l'interception du rayonnement par les plantes et de sa variabilité temporelle. Le modèle géométrique de Riou *et al.* (1989) donne de bons résultats pour une vigne en rangs mais l'évolution de ses paramètres au cours de la croissance de la vigne n'est pas connue.

3. ADAPTATIONS ÉCOPHYSIOLOGIQUES DE LA PLANTE À LA SÉCHERESSE - VALEURS D'ETR

Nous avons jusque là analysé l'adaptation de la vigne à la sécheresse sous l'angle du développement en profondeur du système racinaire. Ce paragraphe a pour objet de montrer comment se font les échanges entre la plante et son milieu sous l'angle de l'écophysiologie. Il doit permettre de mettre en évidence les modifications du fonctionnement hydrique de la plante induites par les changements d'humidité du milieu. Dans une seconde partie, une synthèse réunira les valeurs d'évapotranspiration réelle publiées pour la vigne.

3.1. Fonctionnement physiologique de la vigne - Régulation de la transpiration

Les mécanismes de régulation du flux hydrique par la plante jouent un rôle central dans le cadre d'une étude écophysiologique. La vigne réagit aux conditions imposées par son environnement par une régulation stomatique. Cependant, ces mécanismes physiologiques, mis en évidence par des mesures très localisées, doivent pouvoir être compris et analysés à l'échelle

d'une parcelle. C'est pourquoi ce paragraphe traitera dans un premier temps des mécanismes de régulation qui ont été identifiés chez la vigne. Il abordera ensuite les paramètres intégrateurs de cette réduction d'alimentation, qui peuvent être pris en compte pour une analyse spatialisée des transferts d'eau au sein d'une parcelle.

3.1.1. Fonctionnement physiologique de la vigne

La transpiration des végétaux (notamment la vigne ; Champagnol, 1984) s'effectue majoritairement par les stomates même si le phénomène de transpiration cuticulaire peut exister de façon anecdotique (Ribereau-Gayon et Peynaud, 1971). On parle de conductance stomatique (g_s) pour traduire la proportion de stomates ouverts ou le degré d'ouverture de ces stomates. Cette mesure est en fait celle de la vitesse de circulation de l'eau de la feuille vers l'atmosphère.

L'état hydrique d'un végétal est estimé par le potentiel foliaire (ψ_f). Celui-ci représente la force de rétention de l'eau dans la feuille. Il traduit de ce fait l'état d'équilibre entre la feuille, la plante et l'atmosphère (Slatyer, 1967). C'est un paramètre qui fluctue fortement au cours de la journée en fonction de la variation de l'état hydrique de l'air ou de la plante. Deux mesures de potentiels sont communément pratiquées :

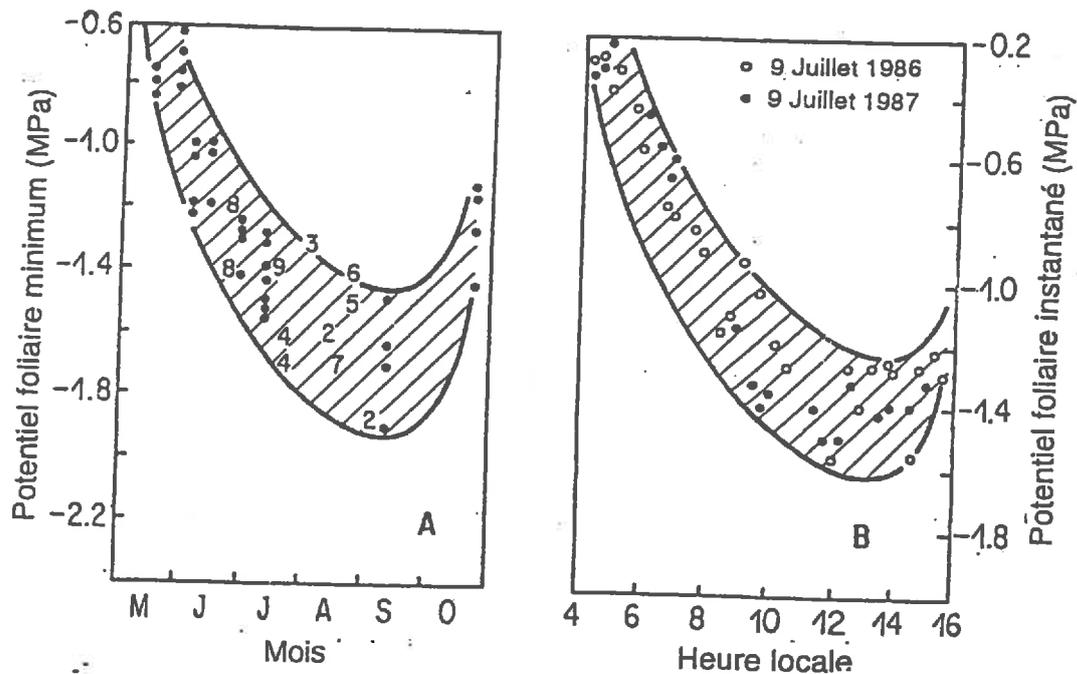
- le potentiel "de base" (ψ_b), mesuré avant le lever du soleil, qui traduit l'état d'équilibre entre le sol et la plante (la plante a reconstitué ses réserves en eau internes et n'a pas encore commencé à transpirer). On estime généralement que le potentiel de base équivaut à un potentiel "moyen" de l'eau du sol sur l'ensemble du profil racinaire actif pour l'absorption d'eau,
- le potentiel minimal (ψ_m) mesuré à midi solaire, lorsque la plante subit les plus importantes contraintes hydriques : forte demande atmosphérique et réserves hydriques internes déjà entamées.

La circulation de l'eau à travers la plante, du sol à l'atmosphère, se fait par gradients de potentiels successifs. Le potentiel foliaire évoqué ci-dessus conditionne les échanges entre la feuille et l'atmosphère. Des gradients existent également entre le sol et les racines, les racines et la base des rameaux, la base et le haut des rameaux (gradients mesurés sur vigne par Liu *et al.*, 1978 et Schultz et Matthews, 1988). Le gradient général sol-plante-atmosphère dépend de la composition de ces gradients intermédiaires, la part de chacun n'étant pas stable dans le temps. On peut identifier les localisations des résistances au transfert d'eau par une étude précise des potentiels dans la plante.

Les ajustements de potentiels hydriques internes à la plante jouent un rôle qui n'est pas encore bien connu dans la régulation de la transpiration. On sait depuis une trentaine d'années que la circulation de la sève dans les vaisseaux de la vigne peut être perturbée par le phénomène de cavitation. Celui-ci consiste en l'apparition de bulles d'air dans la sève en cas de flux de sève rapides ou de déficit hydrique. La cavitation provoque des hausses de potentiels entre la base et le haut des rameaux (Schultz et Matthews, 1988). Selon Schultz et Matthews (1988), cette hausse de potentiels serait le frein principal aux transferts d'eau en cas de sécheresse. Au contraire, Liu *et al.* (1978) ont montré, sur une seule journée de mesure, que la résistance du sol aux racines était prépondérante sur l'ensemble des résistances affectant le transport de l'eau du sol à l'atmosphère en période de sécheresse. Cette dernière étude est une illustration de l'effet de la faible maille de colonisation racinaire de la vigne : lorsque l'eau est peu disponible pour les plantes, son transfert dans le sol jusqu'aux racines est souvent limitant pour une alimentation hydrique satisfaisante (Gardner, 1960).

Conductance stomatique et potentiel foliaire sont liés par des relations complexes dépendantes de l'environnement (notamment de la satisfaction des besoins en eau ; Winkel et Rambal, 1990). On estime généralement qu'il existe un potentiel qualifié de "critique" au-delà duquel les stomates commencent à se fermer. Pour être plus précis, Winkel et Rambal (1990) suggèrent de considérer $\psi_{1/2}$, potentiel auquel la conductance stomatique maximale (constante liée au cépage) est réduite de moitié. La qualité de l'adaptation à la sécheresse s'estime généralement par ce paramètre. Même s'il dépend du cépage étudié (Düring, 1987 ; Winkel et Rambal, 1990 et 1993), $\psi_{1/2}$ reste dans une gamme relativement étroite pour la vigne, quelles que soient les conditions de culture. Les potentiels "critiques" relevés oscillent entre -1,3 et -1,8 MPa (Kriedemann et Smart, 1971 ; Smart, 1974 ; Liu *et al.*, 1978 ; Winkel et Rambal, 1990).

Le potentiel foliaire n'est pas une grandeur reliée directement à la transpiration. Il est pourtant facile à mesurer et traduit malgré tout un état de satisfaction hydrique du végétal. Il peut servir de base à des modèles physiologiques de la transpiration (voir paragraphe 4). Winkel et Rambal (1993) ont montré que le potentiel foliaire de la vigne est borné par des limites *a priori* constantes quel que soit le cépage étudié. Ils montrent que ces limites existent aussi bien à l'échelle de la journée que de la saison (figures 3-1a et b). Cela signifie que la vigne possède un système complexe de régulation de son état hydrique. Celui-ci permet à la vigne de conserver des potentiels relativement élevés par rapport à ceux d'autres plantes considérées comme très résistantes à la sécheresse (par exemple, le potentiel foliaire d'un chêne vert peut être inférieur à -3,0 MPa selon Rambal, comm.pers.). Cette particularité est rendue possible par la régulation stomatique pour certains cépages ou par diminution de la vitesse de croissance et arrêt précoce de la croissance (d'où des surfaces transpirantes réduites) pour d'autres cépages (Winkel et Rambal, 1993).



Figures 3-1a et b : Bases des potentiels foliaires dans leur évolution à l'échelle de la journée (a) et de la saison (b). D'après une synthèse bibliographique de résultats réunis par Winkel et Rambal (1993)

3.1.2. Facteurs environnementaux de la régulation stomatique

Le flux de sève est influencé par un ensemble de conditions environnementales et internes. Sans vouloir examiner les détails physico-chimiques des mécanismes d'adaptation de la plante aux conditions extrêmes de sécheresse, il est pourtant nécessaire de savoir quelles conditions extérieures ou intérieures limitent la transpiration. Les paramètres physiologiques à choisir pour rendre compte de la dynamique de l'état hydrique de la vigne et de ses effets sur la transpiration ne sont pas encore déterminés avec certitude.

La plante réagit au manque d'eau imposé par le sol et/ou l'atmosphère par une réduction de sa transpiration. On peut cerner le moment où les conditions environnementales deviennent limitantes pour l'ouverture stomatique par un suivi régulier de paramètres physiologiques comme le potentiel foliaire.

La conductance stomatique est l'illustration directe de la capacité de transpiration de la vigne. Ainsi, Winkel et Rambal (1990) ont conçu un modèle permettant de calculer la conductance stomatique de la vigne (g_s) à partir d'une conductance stomatique maximale (g_{sm})

et des conductances stomatiques annexes qui réduisent g_{sm} chacune par l'action d'un facteur interne et/ou environnemental :

$$g_s = g_{sm} \cdot g_{RPA} \cdot g_{DPVS} \cdot g_T \cdot g_{\psi_f} \quad \text{Equ.}[3.1]$$

où RPA est la part du rayonnement utile à la photosynthèse,
 DPVS est le déficit de pression de vapeur saturante,
 T est la température de l'air,
 ψ_f est le potentiel foliaire.

Ils font principalement intervenir les facteurs atmosphériques comme influant directement sur la conductance stomatique. Les facteurs d'humidité du sol ont aussi un effet mais il est intégré indirectement dans le modèle par le biais du potentiel foliaire. Nous allons examiner à présent quels sont les effets des conditions d'humidité de l'atmosphère et du sol sur la transpiration des pieds de vigne.

a) Conditions atmosphériques

Les conditions de microclimat lumineux influent sur l'ouverture des stomates (Smart, 1974 ; Carbonneau, 1980) ainsi que les conditions de températures extrêmes (Ribereau-Gayon et Peynaud, 1971, Smart et Coombe, 1983) ou d'âge des feuilles (Kriedemann, 1977 cité par Carbonneau, 1992). Il est utile d'avoir ces contraintes en conscience mais elles ne vont généralement avoir d'influence que sur des comportements locaux : des feuilles âgées coexistent avec des feuilles jeunes dans le couvert de vigne, les feuilles exposées voilent le soleil aux feuilles du centre du houppier,...etc.

En conditions hydriques satisfaisantes, la transpiration de la vigne s'ajuste en fonction de l'état hydrique de l'atmosphère (déficit de pression de vapeur d'eau saturante*, DPVS) (Daudet et Katerji, 1987 ; Düring, 1987 ; Winkel et Rambal, 1990). Daudet et Katerji (1987) ont observé une conductance stomatique plus faible sur le bras ouest d'une vigne en lyre (en V ouvert) que sur le bras est en raison du DPVS subi par le premier. Düring (1987) a mesuré une baisse de conductance stomatique sur des vignes bien alimentées en eau lorsque l'atmosphère était plus sèche. L'effet inhibiteur du DPVS ainsi illustré n'a pas été quantifié expérimentalement. Winkel et Rambal (1990) et Düring (1987) ont chacun montré la prépondérance de l'effet du cépage sur l'adaptation stomatique au stress provoqué par le

* Déficit de pression de vapeur d'eau saturante : noté DPVS, il exprime l'état de sécheresse de l'air au voisinage des feuilles. La pression de vapeur saturante est calculée à partir de la courbe psychrométrique qui permet de connaître la pression à laquelle l'eau se condense (pression de vapeur saturante) pour une température donnée. On a donc indirectement accès au DPVS à partir des températures foliaire et de l'air qui les environne.

DPVS. En fait, on peut identifier plusieurs modes d'adaptation physiologique d'une vigne à la sécheresse : certains cépages présentent des réactions stomatiques marquées à un DPVS, d'autres se caractériseront par un ajustement général des potentiels de la sève des racines aux feuilles (Schultz et Matthews, 1988 ; Winkel et Rambal, 1993). Dans leur modèle de fonctionnement stomatique, Winkel et Rambal (1990) relient le DPVS à la part de la conductance stomatique qui la concerne (g_{DPVS}) par une relation linéaire ou exponentielle :

$$g_{DPVS} = 1 - K_2 \cdot DPVS$$

$$\text{ou } g_{DPVS} = e^{-K_2 \cdot DPVS}$$

K_2 est une constante déterminée par calibration du modèle. Ces deux équations sont censées traduire la variabilité des réactions selon les cépages.

b) Conditions d'humidité du sol

L'effet de la sécheresse du sol sur la transpiration est plus intuitif. Il a donc été regardé plus souvent que l'effet du DPVS. Düring (1979, cité par Smart et Coombe, 1983) a noté un accroissement de la résistance stomatique (environ 4 fois) couplé à une forte baisse du potentiel (de -0,4 à -2,0 MPa) lorsque la réserve en eau du sol diminuait de 100 à 60 % de la réserve utile. En accord avec ces chiffres, Magrisso (1987) a mesuré une diminution de transpiration de 5,5 fois lorsque le sol s'asséchait de 70 à 0 % de la réserve utile. On observe donc que la vigne réagit à l'assèchement du sol par un ajustement de sa transpiration fortement dépendant du cépage (Düring, 1987 ; Winkel et Rambal, 1990). La plupart des résultats publiés restent très comparatifs : aucun article consulté ne fait référence à un état d'humidité du sol "critique" au-delà duquel la transpiration de la vigne décroîtrait. En revanche, de nombreux articles font état de différences marquées entre les transpirations de vignes bien irriguées et "stressées" mais elles n'ont pas été quantifiées. Les transpirations des vignes stressées s'accompagnent généralement de faibles potentiels foliaires (inférieurs à -1,3 MPa en pleine journée) et de fortes résistances stomatiques (Smart, 1974 ; Liu *et al.*, 1978 ; Daudet et Katerji, 1986 ; Düring, 1987 ; Winkel et Rambal, 1993).

3.1.3. Effets d'une réduction de transpiration sur le développement de la vigne

Le déficit hydrique a des conséquences sur le développement végétatif de la vigne (Williams et Grimes, 1988). Lorsque la réserve hydrique du sol n'est pas rechargée pendant la période végétative de la vigne, les effets de la sécheresse sur les parties aériennes sont des paramètres intégrateurs de la quantité d'eau consommée à l'échelle de la saison. Les effets

mesurés publiés portent sur la longueur et le poids des rameaux (Mériaux *et al.*, 1981 ; Champagnol, 1984) mais également sur la surface foliaire (Carbonneau, 1980 ; Mériaux *et al.*, 1981 ; Morlat *et al.*, 1992), le poids de récolte (Mériaux *et al.*, 1979, 1981) ou alors des critères qualitatifs sur les jus et les moûts (Seguin, 1978 ; Morlat *et al.*, 1992). Une réduction d'alimentation en eau induit un développement végétatif moindre.

Comme la croissance n'est pas linéaire, les effets ne devraient pas être les mêmes selon la période à laquelle intervient la réduction d'alimentation (Smart et Coombe, 1983). Reynolds et Naylor (1994) ont cherché à connaître l'effet d'un retard du stress sur les fruits (quantité et qualité) à partir d'expérimentations en serres. Ils n'ont pas observé d'effet de la période du stress sur le poids moyen d'une baie, généralement représentatif de la quantité d'eau transpirée par la vigne (Mériaux *et al.*, 1979).

3.1.4. Conclusions

Le flux de transpiration dépend de nombreux facteurs dont des facteurs environnementaux (lumière, humidité de l'air, température, humidité du sol) et des facteurs internes à la plante (état hydrique du végétal, âge des feuilles, résistances internes à la circulation de l'eau).

La régulation interne du flux de sève met en jeu un mécanisme d'adaptation écophysiological propre au cépage étudié. Cette adaptation est la conjugaison de mécanismes "rapides" tels que la fermeture stomatique et de phénomènes plus "pérennes" tels que la réduction des surfaces transpirantes (Winkel et Rambal, 1993).

Malgré ces études, les effets des critères de stress liés au sol et/ou à l'atmosphère ne sont pas encore quantifiés.

Il paraît difficile de dresser un modèle de fonctionnement hydrique à bases écophysiological pour la vigne. En effet, une des caractéristiques de la vigne est de présenter, par la variété de ses cépages, une gamme de mécanismes adaptatifs très divers. Ceci va se traduire par des dynamiques de régulation de la consommation en eau très variées selon les cépages. Cependant, des constantes de ces mécanismes sont que **la transpiration décroît avec l'assèchement du sol et avec l'assèchement de l'air.**

La première de ces réactions est un mécanisme qui se fait sentir à long terme (diminution de la transpiration moyenne au cours de la saison par réduction du stock hydrique). La seconde est plus instantanée, elle provoquera des "creux" de transpiration lors de journées plus particulièrement sèches.

3.2. Estimations chiffrées de l'évapotranspiration réelle de la vigne

Les études sur la consommation en eau de la vigne sont nombreuses. Ce paragraphe propose de montrer les résultats des mesures de consommation en eau de la vigne pour une grande diversité de traitements, de cépages et de climats. L'échelle spatiale des résultats présentés va de l'échelle de la parcelle à celle du cep.

3.2.1. L'évapotranspiration parcellaire

Les valeurs présentées dans ce paragraphe ne distinguent pas l'évaporation du sol de la transpiration des plantes. Les méthodes utilisées pour estimer l'ETR parcellaire sont basées soit sur le bilan hydrique du sol (mesures d'humidité et de potentiels hydriques) soit sur la mesure des transferts d'énergie au dessus de la parcelle (méthodes micro-météorologiques).

a) Méthodes

- Bilan hydrique

Nous avons abordé les incertitudes sur les chiffres d'ETR publiés au paragraphe 1.2.1. La difficulté majeure posée par la vigne est sa profondeur d'exploitation racinaire. Il faut que la cote z ait été choisie avec soin pour intégrer la plupart des prélèvements. La plupart des travaux publiés montrent les résultats acquis à partir de tubes de mesure de l'humidité du sol implantés jusqu'à plus de 2 mètres, cela n'étant parfois pas suffisant (Roumbas *et al.*, 1983 ; Jourjon *et al.*, 1991).

Les travaux publiés pèchent aussi par un échantillonnage spatial insuffisant, malgré une hétérogénéité avérée de l'humidité du sol et de ses variations (Nielsen *et al.*, 1973). Les résultats portent sur les données d'un point de mesures, parfois deux ou trois. Galais (1992) a calculé que 10 sites de mesures distribués sur une parcelle de vigne de 0,26 ha de superficie permettent une précision sur l'ETR parcellaire de 10 à 200 % sur des périodes courtes (3 jours), 5 à 10 % sur une quinzaine de jours et 4 % sur 2 mois. Les résultats publiés sur vigne à partir d'un seul site de mesure sont entachés d'une erreur environ 3 fois plus grande quelle que soit la durée de la période considérée (Galais, 1992).

Pour résumer, les valeurs d'ETR obtenues par bilan hydrique sont à prendre avec prudence. Elles peuvent être sous-estimées lorsqu'il y a des remontées capillaires ou surestimées lorsqu'il y a drainage. Dans tous les cas, la variabilité spatiale a été négligée si bien qu'il faut se garder de prendre les résultats publiés comme des moyennes parcellaires.

- Méthodes micro-météorologiques

Plus récemment, quelques auteurs ont effectué des mesures d'ETR de parcelles de vigne par des méthodes micro-météorologiques. Leur application aux couverts discontinus pose de nombreux problèmes en raison notamment de la rugosité de surface et de l'influence du vent qui peut induire des circulations d'air préférentielles (Riou *et al.*, 1987).

Les méthodes des corrélations tourbillonnaires (= des fluctuations) et méthodes aérodynamiques ne sont pas fréquemment employées en raison d'une part de la lourdeur expérimentale qu'elles imposent (méthodes aérodynamiques surtout) ou de la sensibilité des appareils aux conditions naturelles (méthode des fluctuations). C'est souvent la technique du rapport de Bowen (Tanner, 1960) qui est employée pour des raisons de commodités expérimentales.

Les mesures intègrent les hétérogénéités locales de la parcelle mais ne sont généralement pas suivies sur une saison entière à cause de la lourdeur du suivi expérimental.

b) Résultats

- Évapotranspiration réelle

Les résultats sont donnés Tableau 3-1a. Les chiffres publiés recouvrent une grande gamme de sol, de mode de conduite, de traitements d'irrigation, de cépage... Les chiffres du Tableau 3-1a affichent une certaine homogénéité malgré la grande diversité des méthodes et des cultures. La vigne évapotranspire peu au regard de cultures comme le maïs ou même le blé. Les limites mesurées sont de 1 à 5 mm.j⁻¹ sur des périodes d'environ 1 semaine à un mois, avec une grande majorité de valeurs aux alentours de 1-3 mm.j⁻¹. Les valeurs présentées par Riou *et al.* (1994) et Lascano *et al.* (1992) sont très élevées (jusqu'à 7 mm.j⁻¹) en raison du fort régime d'irrigation appliqué aux vignes. Dans les deux cas, l'ETR mesurée égale pratiquement l'ETP.

- Rapport ETR/ETP

Les auteurs qui se sont penchés sur le problème de l'alimentation en eau de la vigne l'ont généralement fait dans une optique agronomique. Ils ont donc souvent publié les rapports ETR/ETP traduisant la satisfaction de la demande atmosphérique (Tableau 3-1b). L'ETP est une référence bioclimatique calculée pour un couvert continu de ray-grass bien alimenté en eau. Pour la vigne, une telle grandeur n'est pas assimilable à la quantité d'eau maximale pouvant être évapotranspirée compte tenu des grandes proportions de sol nu que l'on peut trouver dans certains vignobles. Sur les cultures qui ne sont pas assimilables à un couvert de graminées, cette quantité maximale est définie par l'ETM (évapotranspiration maximale), généralement calculée à partir de l'ETP et d'un coefficient cultural.

Réf.biblio	Estim ¹	Cépage	Expé ²	Irr ³	Conduite ⁴ et densité de plantation	Période ⁵	ETR (mm.j ⁻¹)
Seguin, 1969	BH	Merlot noir	PC (Bordelais)	NI	Rgs ; densité var.	juin-sept.	1-3,2
Seguin, 1971	BH	Merlot noir	PC (Bordelais)	NI	Rgs ; densité var.	août-oct.	1,5-3,5
Carbonneau, 1980	BH	Cabernet-Sauvignon	PC (Bordelais)	NI	Rgs ; 2 densités	mai-sept.	2-3,1
Duteau, 1982	BHJ	Merlot noir	PC (Bordelais)	NI	Rgs ; 5500 ceps/ha	juillet-oct.	1-2,7
Roumbas <i>et al.</i> , 1983	BH	divers	PC (Chypre)	NI	G ; 2200 ceps/ha	mai-juillet	1,6-1,9
Delas <i>et al.</i> , 1987	BH	Merlot noir	PC (Bordelais)	NI	Rgs ; 1,8x1,1	août-sept.	1,1-1,6
Jourjon <i>et al.</i> , 1991	BH	Cabernet	PC (Anjou)	NI	Rgs ; 2x1	juillet-sept.	1,6-2,2
Hicks, 1973	BE	?	PC (Australie)	NI	Rgs ; 5x1,5	oct.-janv.	2-4
Oliver <i>et Sene</i> , 1992	Bowen	Airen	PC (Espagne)	NI	G ; 2,5x2,5	26/5-13/7	1
Heilman <i>et al.</i> , 1994	Bowen	Chardonnay	PC (Texas)	NI	Rgs ; 3x1,7	31/5-7/6	3,5-5,1
Lascano <i>et al.</i> , 1992	BH	Chardonnay	PC (Texas)	I++	Rgs ; 3,05x1,22	mai-août	5
Riou <i>et al.</i> , 1994	BE	?	PC (Bordelais)	I++	Rgs ; 2x1	juillet-août	3-7

Tableau 3-1 a : Valeurs d'évapotranspiration réelle relevées dans la bibliographie. Les données en italique sont celles obtenues par méthodes micro-météorologiques

¹Méthode d'estimation de l'ETR : BH : bilan hydrique ; BHI : bilan hydrique avec justification de la non prise en compte du drainage ; BE : bilan d'énergie ; Bowen : rapport de Bowen

²Expérimentation : PC : plein champ suivi du lieu de l'expérimentation

³Irrigation : NI : pas d'irrigation ; I++ : forte irrigation ; I+ : irrigation «normale»

⁴Conduite : G : gobelets ; Rgs : rangs

⁵Période : les «fourchettes» d'ETR données sur une période indiquent généralement le minimum et le maximum rencontrés au cours de cette période. Une valeur unique est une moyenne sur la période mentionnée. Les mesures de Hicks (1973) ayant été réalisées en Australie, la période d'étude est bien celle de la croissance végétative de la vigne. Elle correspond approximativement à avril-juillet dans l'hémisphère Nord.

Réf.biblio	Estim	Cépage	Expé	Irr	Conduite et densité de plantation	Période	ETR/ETP
Seguin, 1973	BH	Merlot noir	PC (Bordelais)	NI	Rgs ; densité var.	août-sept.	0,4-0,75
Seguin, 1978	BH	Merlot noir	PC (Bordelais)	NI	Rgs ; densité var.	Années sèches/humides	0,4-0,9
Carbonneau, 1980	BH	Cabernet-Sauvignon	PC (Bordelais)	NI	Rgs ; 2 densités	mai-sept. ; 2 années	0,56-0,98
Duteau, 1982	BHJ	Merlot noir	PC (Bordelais)	NI	Rgs ; 5500 cepcs/ha	juillet-oct.	0,4-0,58
Roumbas <i>et al.</i> , 1983	BH	divers	PC (Chypre)	NI	G ; 2200 cepcs/ha	mai	0,6-0,75
						juin-juillet	0,46-0-53
						août	0,35-0,46
						sept.	0,47-0,61
Delas <i>et al.</i> , 1987	BH	Merlot noir	PC (Bordelais)	NI	Rgs ; 1,8x1,1 ; enherbé	juillet-sept.	0,42
					non enherbé		0,3-0,58
Duteau, 1987	BHJ	Merlot noir	PC (Bordelais)	NI	Rgs ; 5500 cepcs/ha	juin-sept.	0,8-0,9
Morlat, 1989	BH	Cabernet	PC (Anjou)	NI	Rgs ; densité var. ; sol profond	11/5-18/9	0,65-0,82
					sol superficiel		0,45
Morlat <i>et al.</i> , 1992	BH	Cabernet	PC (Anjou)	NI	Rgs ; densité variable	mars-juin	0,4-0,6
						juin-août	0,6
						août-sept.	0,4-0,6
Panine et Mériaux, 1983	BH	Carignan	PC (Gard)	NI/I+	?	Sec-Irrigué	0,39-0,74
Mériaux et Panine, 1986	BH	7 différents	PC (Gard)	NI/I+	?	Années sèches/humides	0,3-0,8

Tableau 3-1b : Rapport de l'ETR à l'ETP dans différents contextes (légendes identiques à celles du tableau 3-1a)

Par conséquent, même en conditions de bonne réserve hydrique du sol, le rapport ETR/ETP calculé sur vigne sera généralement inférieur à 1. Il variera selon le mode de conduite et la densité de plantation de la parcelle.

Les valeurs du rapport ETR/ETP relevées dans la bibliographie s'étagent de 0,3 à 0,9. Les valeurs de 0,3 sont obtenues dans les conditions les plus sèches (mois d'août, années peu pluvieuses, vignes non irriguées). Les valeurs de 0,9 sont obtenues lorsque la vigne peut puiser dans une réserve aquifère (Seguin, 1978 ; Duteau, 1987). Riou *et al.* (1994), en conditions d'irrigation excédentaire, ont mesuré une ETR égale à l'ETP Penman. La parcelle d'étude était plantée en rangs à une densité de plantation de 2 x 1 m. Ceci laisserait penser que ces conditions culturales permettent d'assimiler l'ETP Penman à l'ETM lorsque le feuillage est pleinement développé. Ces quelques exemples mis à part, lorsque les conditions édaphiques sont très favorables (sol profond avec forte réserve utile), l'ETR mesurée excède rarement 0,6.ETP (fin juin-début juillet). Elle décroît ensuite assez vite au cours de la saison pour atteindre le minimum en août. Le rapport ETR/ETP augmente ensuite plutôt par diminution de l'ETP que par augmentation de l'ETR. Celle-ci recommence à augmenter à partir de septembre grâce aux pluies qui permettent une évaporation du sol sous couvert plus élevée.

Dans une culture comme la vigne, l'estimation de l'ETR à l'échelle parcellaire se heurte à de nombreuses difficultés méthodologiques en raison de la forte hétérogénéité du couvert. L'estimation de l'ETR par séparation des flux d'évaporation du sol et de transpiration de la plante permet de rendre compte de la contribution relative de chacune à l'ETR.

3.2.2. Transpiration et évaporation

Les études visant à séparer les flux de transpiration et d'évaporation en culture discontinue ont recours à des mesures séparées de chacun par voie directe ou par méthodes énergétiques, indirectes.

a) Méthodes

Dans toutes les études visant à séparer les flux d'évaporation et de transpiration d'une parcelle de vigne qui ont été publiées, l'ETR parcellaire et l'un de ces deux flux sont mesurés directement. Le second des deux flux est alors déduit des deux mesures par soustraction.

Le plus souvent, c'est le flux de sève qui est mesuré par bilan thermique sur le tronc (voir méthodologie détaillée Chapitre 2 § 1.4.). Certains auteurs publient des mesures de transpiration à l'échelle de la feuille obtenue par potomètre ou poromètre. Les mesures sur

feuilles ne sont pas envisagées ici car elles représentent le plus souvent un flux instantané qui ne renseigne pas sur les quantités d'eau quotidiennes consommées par la vigne.

La méthode du bilan thermique semble donner de bons résultats (précision meilleure que 10 %), compte tenu des vérifications expérimentales qui ont été menées dans de nombreux travaux par comparaison avec des suivis par pesées (par exemple Baker et Van Bavel, 1987).

L'évaporation du sol sous couvert est généralement calculée par soustraction de la transpiration à l'ETR estimée par une méthode micro-météorologique.

b) Résultats

• Transpiration

Les résultats sont donnés tableau 3-2 et peuvent être rapprochés de ceux du tableau 3-1a

Réf.biblio	Expé.	Conduite et densité de plantation	Cépage	Irr.	TR (mm.j ⁻¹)	TR /ETR	Période (mois)
Lascano <i>et al.</i> , 1992	PC (Texas)	Rgs ; 3,05x1,22	Chardonnay	I++	0,6-1,8	0,27	05-07
					1,2-1,8	0,18	07-08
Riou <i>et al.</i> , 1994	PC (Bordelais)	Rgs ; 2x1	?	I++	0,8-3,4	0,50	07-08
Heilman <i>et al.</i> , 1994	PC (Texas)	Rgs ; 3x1,7	Chardonnay	NI	0,8-1,6	0,40	31/5-7/6

Tableau 3-2 : Valeurs de transpiration parcellaire obtenue par moyenne arithmétique de la mesure sur respectivement 5, 6 et 10 pieds de vigne.

Les rapports de la transpiration à l'ETR pris tels quels minimisent fortement la part de la vigne dans l'ETR. En effet, sur les trois résultats présentés, deux sont issus d'expérimentations en irrigation très abondante et une en conditions hydriques très favorables (21,8 mm de pluie sont tombés pendant les 7 jours d'expérimentation). Dans de telles circonstances, et avec un inter-rang aussi large, l'évaporation par le sol nu est sans aucun doute le flux majoritaire dans l'ETR. Les résultats obtenus par Lascano *et al.* (1992) sont particulièrement faibles. Ceci peut s'expliquer par la méthode utilisée puisque l'ETR est estimée par bilan hydrique du sol. Or, en

conditions d'irrigation excédentaire, l'eau peut ne pas être retenue par le sol et être drainée vers les couches plus profondes. Le flux de drainage en fond de profil de mesure n'a pas été contrôlé. L'ETR calculée peut ainsi être surestimée et le rapport TR/ETR sous-estimé.

Aucun auteur n'a donc publié de valeurs de transpiration de la vigne en conditions naturelles sur de longues périodes.

• Évaporation

L'évaporation est le flux complémentaire de la transpiration dans l'ETR. Son estimation à l'échelle de la parcelle pose le problème de l'hétérogénéité spatiale de la mesure. En culture discontinue, les auteurs ont montré que l'évaporation du sol dans les zones dégagées (sans couverture végétale) est généralement plus forte que dans les zones couvertes (Al-Khafaf *et al.*, 1978 ; Walker, 1983 ; Ham et Kluitenberg, 1993). Pourtant, certains ont montré que des redistributions d'énergie sont possibles avec notamment transfert d'énergie incidente sur l'inter-rang vers le rang (Ham et Kluitenberg, 1993). De manière similaire, Walker (1984) a montré que le sol sous couvert de maïs évapore autant lorsque le LAI égale 4 que lorsqu'il vaut 3, pour un rayonnement reçu 1,5 fois inférieur. Il a expliqué cette observation par un échange passif d'énergie entre le haut du couvert (chaud) et le sol (plus froid) par gradient thermique. Ces échanges sont accélérés par transport actif (vent) qui homogénéise les énergies incidentes. Ham *et al.* (1991) ont ainsi montré, sous couvert discontinu de coton, que le flux d'énergie peut aller du sol vers les plantes ou des plantes vers le sol. Ces phénomènes de redistributions d'énergie ont également été observés par Yunusa *et al.* (1993a-b) sur blé et Heilman *et al.* (1994) sur vigne. Dans ce dernier exemple, le vent semble être le moteur principal des échanges. L'importance du vent sur les transferts d'eau dans une parcelle de vigne a déjà été soulignée précédemment par Hicks (1973) et par Riou *et al.* (1987). Hicks (1973) a montré que des vents parallèles aux rangs de vigne provoquent une ETR parcellaire de 0,5 mm inférieure au cas où les vents sont perpendiculaires aux rangs.

La connaissance des rayonnements incidents peut donc ne pas suffire à connaître la distribution du flux d'évaporation au sein d'une parcelle.

Les seules valeurs d'évaporation sous couvert de vigne trouvées dans la bibliographie sont issues du travail de Heilman *et al.* (1994). Elles s'étagent entre 1,7 et 3,3 mm.j⁻¹. La vigne étudiée est plantée en large inter-rang (3 mètres) et l'analyse publiée porte sur 10 jours pendant lesquels la croissance de la vigne était inachevée et le sol encore humide. Les conditions étaient donc réunies pour que l'évaporation soit très élevée.

3.3. Conclusions

L'analyse des mécanismes de régulation de la consommation en eau de la vigne permet de conclure que la vigne est effectivement un végétal bien adapté aux conditions de sécheresse. Les mécanismes morphologiques d'adaptation évoqués au premier paragraphe de ce chapitre, à savoir la profondeur d'enracinement, sont complétés par des adaptations physiologiques spécifiques. Celles-ci touchent la circulation d'eau dans le végétal (flux de sève, conductance stomatique) pour une adaptation à courte échelle de temps et la réduction des surfaces transpirantes à une échelle plus longue. Ces adaptations sont propres à chaque cépage.

Quel que soit le mécanisme mis en jeu, la vigne apparaît comme une plante à faible consommation en eau. En conséquence, la mesure séparée de la transpiration des plantes et de l'évaporation du sol montre que la contribution du sol à l'ETR parcellaire peut ne pas être négligeable. Cependant, cette proportion varie fortement en fonction du système de conduite et des conditions hydriques. Aussi, dans l'étude de la consommation en eau d'une parcelle de vigne, l'évaporation du sol entre les ceps ne doit pas être négligée comme cela a souvent été le cas.

Les outils méthodologiques existants pour caractériser la consommation en eau d'une culture à l'échelle d'une parcelle se révèlent limités par les caractéristiques de la culture. Les méthodes "classiques" que sont les bilans hydrique au sol et énergétique dans la basse atmosphère sont limitées par les caractéristiques du couvert. Les mesures obtenues sont entachées d'une imprécision mal quantifiable. Le développement des technologies permettant une mesure séparée du flux de sève et de l'évaporation du sol devrait permettre des mesures plus précises pour peu que le soin soit apporté lors de l'échantillonnage.

4. MODÉLISATION DU BILAN HYDRIQUE D'UNE PARCELLE DE VIGNE

Nous avons vu, dans les précédents paragraphes, que l'étude de la consommation en eau d'une parcelle de vigne est contrainte par de nombreuses incertitudes inhérentes à la culture. La modélisation de l'ETR d'une culture discontinue est rendue difficile par les nombreuses hétérogénéités spatiales qui se superposent dans la parcelle. Il n'a pas été trouvé de modèle d'estimation de l'ETR sur vigne à l'échelle de la parcelle et à une échelle de temps inférieure ou égale à la journée. Ce chapitre porte donc sur des modèles existants, généralement créés pour grandes cultures. Deux voies sont utilisées pour modéliser les transferts d'eau : une

analyse des mouvements d'eau à travers le sol et la plante ou une analyse des échanges de chaleur dans le système sol-plante-atmosphère.

Leenhardt *et al.* (1994) ont réalisé une synthèse sur les modèles utilisant la première approche. Ce paragraphe s'inspirera fortement de leur travail en orientant la réflexion sur le champ d'application des modèles cités au cas d'une parcelle de vigne. En effet, la plupart des modèles créés l'ont été pour des couverts continus mais des options peuvent être retenues et appliquées aux cas de cultures discontinues voire pérennes.

La seconde approche sera également abordée dans ce paragraphe. C'est une voie en développement sur les couverts discontinus même si les études récentes tendent à prouver que les problèmes théoriques de mise en équation des phénomènes sont loin d'être résolus (Sene, 1994).

Les modèles prennent tous en référence une grandeur qui maximise l'ETR (ou la transpiration et l'évaporation). C'est ce qu'on pourrait appeler un potentiel d'évapotranspiration, imposé par la disponibilité de l'énergie sur la parcelle et par la capacité des plantes à la mobiliser. Les modèles réduisent ensuite ces valeurs potentielles pour calculer les valeurs réelles (ETR, ER, TR) selon des hypothèses de travail préétablies.

Un dernier paragraphe fera l'état des travaux sur les modélisations créées pour simuler le comportement de la vigne en plein champ.

4.1. Modèles d'estimation de l'ETR de la parcelle sans séparation des flux

4.1.1. Modèles à bases hydrologiques

Les modèles à bases hydrologiques ont souvent un fonctionnement sur des principes empiriques. L'ETR de la parcelle est calculée à partir de la consommation en eau maximale de la parcelle (ETP ou ETM selon que le couvert est assimilable à un couvert de graminées oui non) et d'une relation décroissante entre la consommation en eau et l'état hydrique du sol.

La vigne n'étant pas un couvert continu, sa consommation hydrique en conditions non limitantes (ETM) pourrait être calculée en connaissant les coefficients cultureux reliant ETP et ETM. Ces coefficients, s'ils peuvent être établis, doivent être très variables en fonction du mode de conduite de la parcelle, de l'organisation du couvert et également selon le cépage et la croissance du feuillage. De Laroche (1994) utilise un coefficient cultural obtenu par

modélisation (Riou, 1994) qui augmente linéairement du débourrement à la fin de la croissance de 0 à une valeur oscillant entre 0,4 et 0,6.

Compte tenu de la forte sensibilité du coefficient cultural aux conditions de culture, **une modélisation globale à bases hydrologiques est difficile à envisager sur vigne.**

4.1.2. Modèles à bases énergétiques

Dans un modèle à bases énergétiques, la limite supérieure au flux de chaleur sensible (équivalent énergétique de l'évapotranspiration réelle) est le rayonnement net (R_n). Cette mesure est facile à obtenir directement. Des problèmes expérimentaux existent néanmoins en raison de la discontinuité du couvert : l'estimation de R_n résulte d'un bilan des rayonnements incident sur la parcelle et réfléchi de la parcelle vers l'atmosphère (albédo), la position du bilanmètre peut avoir une influence sur la valeur de R_n (voir discussion Chapitre 2 § 1.3.3.). Oliver et Sene (1992) ont montré que cette influence est négligeable.

Les modèles énergétiques estiment rarement le flux de chaleur latente (L.E) global d'une parcelle lorsque son couvert est discontinu (voir la revue de Goudriaan, 1989). La schématisation d'un modèle à bases énergétiques global est montrée par la figure 4-1 (d'après Kustas, 1990). Ces modèles sont construits à partir du modèle général dit de Penman-Monteith (Wallace, 1995). Celui-ci calcule L.E ($W.m^{-2}$) à partir du DPVS (kPa) et de résistances aux transferts d'eau :

$$L.E = \frac{\Delta \cdot R_{np} + \rho \cdot C_p \cdot g_a \cdot DPVS}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{g_a}{g_c}\right)} \quad \text{Equ. [4.1]}$$

avec Δ , pente de la courbe psychrométrique ($kPa.K^{-1}$),

R_{np} , rayonnement net disponible pour les plantes ($= R_n - G$) ($W.m^{-2}$),

ρ , la masse volumique de l'air ($m^3.m^{-3}$)

C_p , la chaleur spécifique de l'air à pression constante ($J.m^{-3}.K^{-1}$),

γ , la constante psychrométrique ($0,066 kPa.K^{-1}$),

g_a , la conductance de la couche limite (qui dépend de la vitesse du vent et de la rugosité de couvert) ($m.s^{-1}$),

g_c , la conductance du couvert ($m.s^{-1}$).

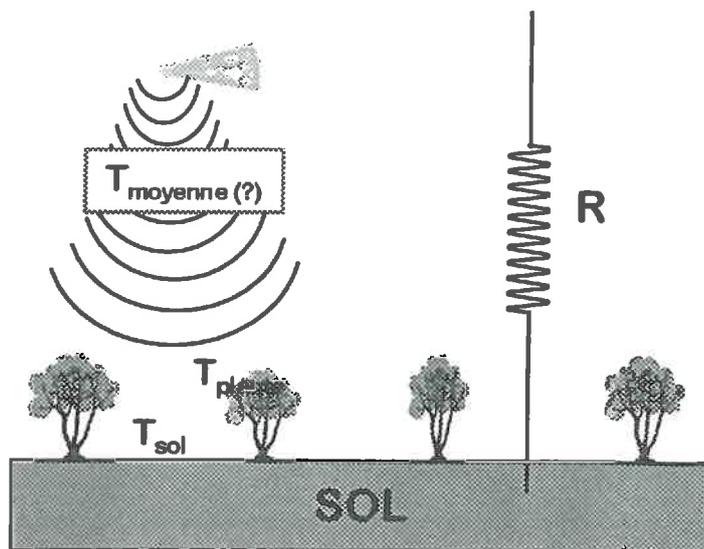


Figure 4-1 : Représentation schématique d'un modèle résistif sans séparation des flux. Illustration de l'incertitude quant à la représentativité de la température moyenne mesurée et difficulté d'accéder à une résistance globale. D'après Kustas, 1990

La difficulté de calibration de ces modèles est d'accéder aux conductances. Un modèle global ne considère qu'une conductance globale entre la surface et l'atmosphère (c'est le concept de "Big Leaf", "Grande Feuille", cité par Goudriaan, 1989). Cette conductance est difficile à estimer en raison des discontinuités horizontales et verticales de la parcelle. Il est en effet difficile de rendre compte d'un état énergétique moyen d'une parcelle dont le couvert est discontinu et parfois haut (voir figure 4-1, Kustas, 1990).

Sur vigne, Sene (1994) a cherché à paramétrer les résistances du modèle de Shuttleworth et Wallace (1985 ; voir plus loin) en négligeant l'évaporation de façon à obtenir une estimation de l'ETR à partir de l'estimation de la transpiration. L'expérimentation qu'il présente se situe en milieu semi-aride si bien que les hypothèses posées sont acceptables. Par contre, le modèle ne peut fonctionner en période de pluie ou lorsque la vigne est peu développée.

4.1.3. Conclusion : estimer l'ETR globale d'une parcelle de vigne

Il apparaît donc, conformément à ce que les précédents chapitres laissaient entrevoir, que la modélisation de l'évapotranspiration réelle d'une parcelle de vigne doit passer par une modélisation séparée de l'évaporation et de la transpiration.

Les modèles à bases énergétiques n'existent pas sur couvert discontinu et une application paraît difficile à construire (Goudriaan, 1989 ; Kustas, 1990) en conditions climatiques et culturales contrastées.

Les modèles à bases hydrologiques pourraient exister mais ils passent par la connaissance assez précise de l'ETM, étape par trop fastidieuse puisqu'elle nécessite d'être renouvelée pour chaque conformation de parcelle étudiée.

La vigne étant une culture partiellement couvrante, il serait intéressant de comprendre comment se distribuent les flux (ER et TR) au sein de la parcelle d'autant plus que, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, l'évaporation du sol peut être quantitativement importante dans l'ETR.

4.2. Modèles séparant évaporation et transpiration

4.2.1. Flux maxima d'évaporation et de transpiration

Ces flux sont appelés évaporation potentielle (EP) et transpiration potentielle (TP) dans les modèles à bases hydrologiques et rayonnement net reçu par le sol (R_{ns}) et rayonnement net reçu par les plantes (R_{np}) dans les modèles à bases énergétiques.

On calcule chacun de ces flux à partir d'un coefficient d'extinction du rayonnement dans le couvert (k_e) introduit dans une loi de Beer-Lambert. Cette loi s'applique à l'extinction d'un rayonnement lorsqu'il traverse un milieu homogène et isotrope, c'est-à-dire qu'elle n'est théoriquement pas utilisable pour un couvert discontinu. Elle s'exprime par :

$$EP = ETM \cdot e^{-k_e X} \quad \text{Equ.}[4.2a]$$

$$R_{ns} = R_n \cdot e^{-k_e X} \quad \text{Equ.}[4.2b]$$

où X représente un paramètre dépendant soit de l'indice foliaire, soit du taux de couverture végétale, soit du coefficient cultural (Leenhardt *et al.*, 1994). Ce type d'équation a néanmoins été utilisé (mais non validé) par Sene (1994) sur vigne. Il utilise la loi d'extinction du rayonnement pour estimer la proportion de rayonnement parvenant au sol sous les ceps. À partir de là, il répartit l'énergie incidente sur la parcelle en fonction du taux de couverture du sol par les plantes.

Sur vigne toujours, Riou (1992) propose de calculer l'évaporation potentielle par une fonction linéaire de l'ETP :

$$EP = (1-k) \cdot ETP \quad \text{Equ.}[4.3]$$

où k est le taux de couverture par les plantes.

Étant données les difficultés rencontrées pour estimer l'ETM ou pour partitionner l'énergie à partir d'un modèle d'extinction de type Beer-Lambert, il s'avère que le meilleur moyen de dissocier les flux maxima de transpiration et d'évaporation est sans doute d'utiliser le modèle de Riou *et al.* (1989) (voir § 2.1.3.). Riou *et al.* (1994) ont vérifié en effet que, en conditions hydriques non limitantes, la transpiration potentielle était liée au rayonnement intercepté par la vigne par :

$$TP = ETP \frac{R_{av}}{(1-a_s) \cdot R_g} \quad \text{Equ.}[4.4]$$

avec R_{av} le rayonnement absorbé par la vigne (calculé par le modèle) et $(1-a_s) \cdot R_g$ le rayonnement global amputé de l'albédo du sol*. L'équation [4.4] signifie que l'énergie disponible pour la parcelle est réduite à $(1-a_s) \cdot R_g$, ce qui revient à réduire le rayonnement net à sa partie radiative directe en négligeant la partie convective. Cette hypothèse pourrait être discutée en climat languedocien compte tenu de la fréquence des vents.

On déduit EP par différence entre ETP et TP :

$$EP = ETP - TP \quad \text{Equ.}[4.5]$$

4.2.2. L'évaporation du sol couvert

a) Modèles à bases hydrologiques

Les modèles à bases hydriques chargés d'estimer l'évaporation ont pour la plupart été construits pour simuler l'évaporation d'un sol nu (Idso *et al.*, 1974 ; Lascano et Van Bavel, 1986 ; Chanzy et Bruckler, 1993 ; Cresswell *et al.*, 1994).

Après une pluie, il est admis que l'évaporation du sol évolue en trois phases (Idso *et al.*, 1974):

- une phase où l'énergie seule est limitante pour le phénomène évaporatoire ;
- une où la conductivité hydraulique de la surface du sol ne permet pas de maintenir un niveau élevé d'évaporation ;
- la dernière où les forces d'adsorption de l'eau sur le sol contrôlent l'évaporation.

Les modèles d'évaporation sont décrits par Leenhardt *et al.* (1994). Ils mentionnent les modèles à bases physiques (loi de Darcy) pour lesquels l'évaporation est régulée par le DPVS

* : albédo : fraction de la lumière incidente réfléchiée par la parcelle. L'albédo du sol sec (brun) et de la végétation varie approximativement entre 0,18 et 0,22

entre l'atmosphère et la surface du sol (par exemple Childs *et al.*, 1977 cités par Leenhardt *et al.*, 1994). D'autres modèles sont plus empiriques ou analogiques.

• Modèles empiriques basés sur le temps écoulé entre 2 événements pluvieux

Ritchie (1972) est à l'origine d'un modèle empirique qui en a inspiré plusieurs. Il considère que l'évaporation, après une pluie, est à son niveau potentiel jusqu'à un seuil d'évaporation cumulée U (déterminé expérimentalement). Au-delà de ce seuil, l'évaporation diminue en fonction de la racine carrée du temps écoulé depuis la dernière pluie :

$$\Sigma ER = \Sigma EP ; \text{ Si } \Sigma ER < U \quad \text{Equ.}[4.6a]$$

$$\Sigma ER = \alpha \cdot t^{1/2} ; \text{ Si } \Sigma ER \geq U \quad \text{Equ.}[4.6b]$$

ER et EP sont respectivement l'évaporation réelle et l'évaporation potentielle de la culture. Les paramètres implicites U et α dépendent du sol. Ils sont considérés comme constants au cours de la saison alors que Jackson *et al.* (1976) et Gill et Prihar (1983, cités, comme les précédents, par Boesten et Stroosnijder, 1986) les ont montrés variables en fonction de la demande atmosphérique (EP).

Boesten et Stroosnijder (1986) ont dérivé un modèle d'évaporation qui calcule l'évaporation en phase II par :

$$\Sigma ER = \beta \cdot (\Sigma EP)^{1/2} \quad \text{Equ.}[4.7]$$

où $\beta = U^{1/2}$. Ces deux types de modèles travaillent à l'échelle journalière.

Le problème des modèles empiriques de ce type est leur réinitialisation après une pluie. Le modèle de Ritchie (1972) traite les pluies avec des règles qu'il a établies à partir d'observations répétées sur plusieurs types de sols. C'est une fonction réservoir : une partie de la pluie déterminée empiriquement par Ritchie (0,8.P) se soustrait à l'évaporation cumulée (ΣER) et le modèle continue avec la nouvelle ΣER . Lorsqu'on est en phase II depuis quelques jours, il est rare d'avoir des pluies suffisamment abondantes pour que l'évaporation repasse en-deçà de U . Dans ce cas, l'évaporation réelle ne peut donc que difficilement revenir à un niveau d'évaporation potentielle en phase II, même après une forte pluie. Ceci doit probablement éloigner le modèle de la réalité. C'est la raison pour laquelle Boesten et Stroosnijder (1986) ont modifié ce module selon deux voies : l'une similaire à celle de Ritchie, mais où toute la pluie se soustrait à ΣER ; la seconde où une pluie provoque automatiquement le retour en phase I. Le cycle d'évaporation se déroule alors jusqu'à évaporation totale de la pluie. Ensuite, le niveau d'évaporation reprend tel qu'avant la pluie. Cette évolution paraît plus proche des phénomènes que l'on pressent.

- Modèles empiriques régulés par le niveau d'humidité du sol

D'autres modèles empiriques existent qui relient l'évaporation à la teneur en eau de surface par une relation linéaire (Stockle et Campbell, 1985, cités par Leenhardt, 1992) ou exponentielle (Rambal et Cornet, 1982) :

$$ER_t = EP_t \cdot \left(a + b \cdot e^{-\frac{c}{S_t^*}} \right) \quad \text{Equ.}[4.8a]$$

où S_t^* est l'état hydrique de la couche de surface défini par :

$$S_t^* = \frac{S_t - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \quad \text{Equ.}[4.8b]$$

avec S_t , stock hydrique de la couche de surface au temps t
 S_{\min} et S_{\max} les stocks hydriques maximum et minimum de la couche de surface
 a , b et c des coefficients à déterminer expérimentalement.

L'humidité du sol est parfois choisie à la place de l'état hydrique du sol pour fixer le niveau d'évaporation (Chanzy et Bruckler, 1993). Les modèles utilisés ne sont alors pas transposables à différents types de sols.

Le problème de ces modèles réside dans la délimitation de la couche de surface dont l'humidité peut être rattachée au niveau d'évaporation. Chanzy et Bruckler (1993) ont testé leur modèle à partir de relevés d'humidité sur 2 à 10 cm. Il apparaît que l'humidité d'une couche de 2 cm varie trop et trop vite pour que le phénomène évaporatoire puisse être suivi. Il semble que l'humidité de la couche de surface sur une épaisseur d'au moins 5 cm et jusqu'à 10 cm permette de suivre l'évaporation de façon satisfaisante.

Dans une seconde phase, l'évaporation calculée peut être redistribuée dans le sol en fonction d'un critère de répartition (exponentielle) lui-même fonction de l'humidité du sol et d'un coefficient d'extinction empirique (Van Keulen, 1975 ; Rambal et Cornet, 1982). Les couches concernées ont une épaisseur de quelques centimètres.

b) Modèles à bases énergétiques

Un modèle radiatif basé sur l'équation de Penman-Monteith peut être représenté tel que le montre la figure 4-2 (d'après Shuttleworth et Wallace, 1985).

L'évaporation du sol sous couvert végétal dans un modèle énergétique est conditionnée par l'énergie disponible et les résistances aux transferts d'eau. Le modèle énergétique simule

souvent le flux de chaleur sensible (H_s^*) en parallèle du flux de chaleur latente (LE_s). Les résistances aux flux thermiques et hydriques sont alors considérées équivalentes (Shuttleworth et Wallace, 1985 ; Massman, 1992).

L'observation de la figure 4-2 montre que pour estimer LE_s , il faut parvenir à estimer trois résistances :

- la résistance aérodynamique du sol qui dépend de la conformation de la parcelle (rugosité, vitesse de friction,...) et/ou de la vitesse horizontale du vent (Shuttleworth et Wallace, 1985 ; Massman, 1992 ; Sene, 1994) ;
- la résistance aérodynamique de l'atmosphère qui est calculée par les mêmes paramètres que la précédente.
- la résistance de surface, particularité introduite par Shuttleworth et Wallace (1985) que l'on ne retrouve pas, par exemple, dans le modèle de Kustas (1990). Shuttleworth et Wallace (1985) l'estiment à partir du DPVS (déficit de pression de vapeur saturante, voir définition §3.2.1.a.) entre la couche superficielle du sol et l'atmosphère juste au-dessus et du taux de couverture végétale. Ne pouvant la calculer, ils prennent trois valeurs (2 extrêmes, une moyenne) pour simulation.

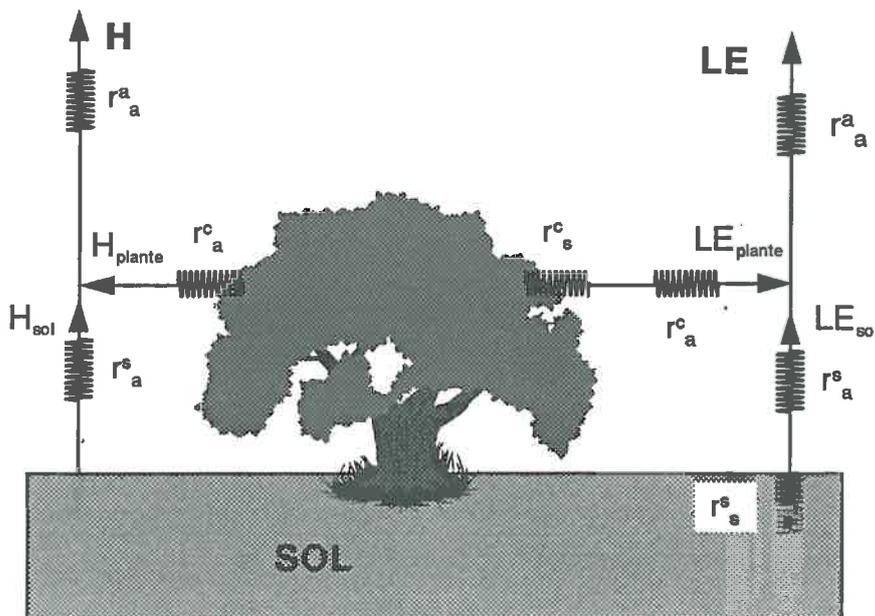


Figure 4-2 : Représentation d'un modèle d'évapotranspiration à bases énergétiques selon un schéma résistif. D'après Shuttleworth et Wallace (1985).

* l'indice s sera utilisé pour évoquer les flux du bilan énergétique du sol ; l'indice p évoque les flux du bilan de la plante ; l'absence d'indice se rapporte à des grandeurs parcellaires.

La variabilité spatio-temporelle des paramètres à mesurer et la précision requise sur certaines grandeurs (l'humidité de la couche de surface, obtenue généralement par température de surface) rendent l'application de ces modèles difficile sur vigne, particulièrement à l'échelle de la parcelle.

c) Conclusion sur les modèles d'évaporation

Une saison d'expérimentation sur l'évaporation du sol en place (par des mini-lysimètres par exemple ; voir Boast et Robertson, 1982) permet de calibrer les modèles empiriques (Ritchie, 1972 ; Van Keulen, 1975 et leurs dérivés).

Leurs différences résident principalement dans la prise en compte des pluies. La réinitialisation des pluies indispensable aux modèles de type Ritchie n'est pas nécessaire dans les modèles type Van Keulen. Dans ces derniers, la pluie va réhumecter le sol de la surface vers la profondeur selon un module de redistribution à définir (réservoirs empilés, fonction mécaniste de transfert intercouches,...). Le nouveau profil d'humidité et notamment le nouvel état hydrique de la couche de surface conditionne l'évolution de l'évaporation. Cette option évite bien des interrogations quant à la validité des hypothèses émises par Ritchie pour calculer une pluie infiltrante. La simplification proposée par Boesten et Stroosnijder (1986) peut également être retenue comme se rapprochant probablement plus des phénomènes réels.

4.2.3. La transpiration

a) Modèles à bases hydrologiques

La modélisation de la transpiration de la plante dans un modèle à bases hydrologiques peut se faire selon deux grandes voies : une voie totalement empirique et une voie plus mécaniste.

La première est une modélisation de la transpiration selon des relations similaires à celles reliant l'ETR à l'état d'humidité du sol. Comme pour l'ETR, ces relations sont données comme univoques, variables selon la transpiration potentielle ou alors dépendantes d'un potentiel foliaire "critique", ou bien impliquant le potentiel en eau du sol (voir la revue de Leenhardt *et al.*, 1994). Le sol est considéré comme un réservoir unique ou le plus souvent comme une superposition de réservoirs. L'extraction racinaire ne dépend alors que de l'humidité de chacune de ces couches et elle lui est liée par une relation empirique. Elle est cependant limitée par une "extraction racinaire" potentielle qui dépend de la densité racinaire relative de la couche par rapport à la densité racinaire totale.

La seconde modélise le flux de transpiration (flux de sève) par un modèle résistif (analogie loi d'Ohm). On dit alors que le flux est sous la dépendance d'une différence de potentiels et d'une résistance :

$$TR = \frac{(\Psi_f - \Psi_s)}{R_{sa}} \quad \text{Equ.}[4.9]$$

avec Ψ_f le potentiel foliaire, Ψ_s le potentiel de l'eau dans le sol et R_{sa} la résistance globale aux transferts d'eau du sol vers l'atmosphère. On peut appliquer là encore cette équation à différentes couches de sol en fixant le potentiel foliaire et en adaptant la résistance R_{sa} à la densité de racines de la couche (Rambal et Cornet, 1982) :

$$\sum_0^{z_{max}} TR(z) = \sum_0^{z_{max}} \frac{\Psi_f - \Psi_s(z)}{R_{sr}(z)} \quad \text{Equ.}[4.10]$$

où z est la profondeur, z_{max} représente la profondeur maximale atteinte par les racines et $R_{sr}(z)$ la résistance aux transferts d'eau du sol vers les racines, caractéristique de la couche de sol étudiée :

$$R_{sr}(z) = \frac{\text{masse totale de racines } (0 - z_{max})}{\text{masse de racines de la couche } z} \quad \text{Equ.}[4.11]$$

L'équation [4.9] peut aussi être divisée en une somme de flux dont chacun est régulé par une résistance et entraîné par une différence de potentiels : un flux du sol aux racines, un flux des racines à la base des rameaux, un flux de la base des rameaux aux feuilles, un flux des feuilles vers l'atmosphère. La connaissance des résistances impliquées n'est pas complète et les auteurs sont en désaccord sur leur importance relative (voir Schultz et Matthews, 1988).

b) Modèles à bases énergétiques

La modélisation énergétique de la transpiration suit le schéma de la figure 4-2. Comme les autres modules d'un modèle énergétique, les flux sont gouvernés par des résistances aux transferts d'eau (résistance aérodynamiques et résistance de surface).

La résistance aérodynamique à la transpiration s'exprime à partir du taux de couverture végétale et d'une résistance de la couche limite. Celle-ci est une résistance que Shuttleworth et Wallace (1985) prennent comme constante même s'ils signalent qu'elle est très dépendante de la vitesse du vent à l'intérieur du couvert végétal (voir par exemple Massman, 1992). Kustas (1990) utilise pour sa part une équation proposée par Jones (1983) qui relie directement la résistance de couche limite à la vitesse du vent et à la largeur des feuilles de la culture. Dans tous les cas, il est nécessaire que la vitesse du vent à l'intérieur du couvert soit estimée. Ceci

est la plupart du temps réalisé à partir de la mesure de la vitesse du vent au dessus du couvert avec reconstitution d'un profil de vent logarithmique entre cette hauteur et le sol.

La résistance de surface est une résistance qui dépend du degré d'ouverture des stomates (résistance stomatique) et de la surface foliaire (Shuttleworth et Wallace, 1985).

Toutes ces résistances sont difficiles à estimer ou mesurer. Chacun pose donc ses simplifications pour y accéder à moindre coût. Par exemple, Kustas (1990) utilise le rapport de Bowen ($H/L.E$) appliqué au sol comme une constante à partir de laquelle le calcul du flux de chaleur latente parcellaire est facilité. En effet, l'équation produite ne requiert plus que l'estimation de deux résistances elles-mêmes évaluées à partir de mesures réalisées habituellement en micro-météorologie (vitesse du vent, hauteur de rugosité du couvert,...).

Dans le cas d'une vigne, différents auteurs ont fait part des difficultés expérimentales rencontrées à l'estimation des résistances propres au sol et à la plante (Hicks, 1973 ; Riou *et al.*, 1987 ; Sene, 1994). Elles résident dans la discontinuité du couvert et dans l'influence du vent sur les paramètres conditionnant ces résistances (rugosité de couvert, température de surface). Comme il a été dit au paragraphe précédent, Sene (1994) est parvenu à calibrer le modèle de Shuttleworth et Wallace (1985) pour une vigne en conditions semi-arides (Espagne).

4.2.4. Conclusion : modéliser évaporation et transpiration dans une vigne

Lorsque la modélisation requise doit s'adapter à différentes conformations de parcelles et à des cépages divers, il est préférable d'opter pour une séparation des flux d'évaporation et de transpiration.

La modélisation de l'évaporation du sol nu pose le principal problème de la distribution spatiale de l'évaporation au sein de la parcelle. Cette difficulté survient à double titre : d'une part, il faut pouvoir déterminer par modélisation l'énergie disponible pour l'évaporation (évaporation potentielle). En second lieu, il est nécessaire de déterminer si cette énergie disponible se distribue uniformément au sein de la parcelle et si elle influence notablement le niveau d'évaporation. La première difficulté semble pouvoir être levée par l'utilisation du modèle de Riou *et al.* (1989) alors que la seconde est plus complexe et mêle des problèmes d'ordres expérimental et de modélisation.

La transpiration de la plante est un problème plus important. En effet, de nombreux modèles de la transpiration ont besoin de la connaissance de la densité racinaire. Selon Gardner et Ehlig (1962), ce serait même une condition indispensable à la modélisation des transferts

d'eau. D'autres peuvent s'en abstenir en recherchant des relations globales entre le flux de transpiration et l'état hydrique du sol par exemple. Les fonctions de régulation et les limites de fonctionnement optimal sont alors à déterminer pour la vigne.

4.3. Modèles existants pour la vigne

Ce paragraphe regroupe un ensemble de travaux publiés sur la recherche de relations formelles entre la consommation en eau de la vigne et son environnement (sol et/ou atmosphère). Les différentes voies mentionnées aux paragraphes ci-dessus se retrouvent, à des échelles d'étude (temps et espace) très diverses.

4.3.1. Modèles à bases hydrologiques

a) *Modèle de Riou (1994)*

Un modèle de bilan hydrique a été établi par Riou (1994) dans le but d'estimer le stock en eau d'une vigne à l'échelle de la saison de mesure pour un zonage agro-climatique de la qualité des raisins. Ce modèle fonctionne en estimant que la vigne transpire à son maximum (TP=fonction de l'ETP et du coefficient d'interception du rayonnement par les vignes) tant que le stock en eau du sol est supérieur à une valeur fixée. La transpiration diminue ensuite linéairement en fonction de l'état d'humidité du sol. L'évaporation est calculée en fonction du nombre de jours de pluie et de l'ETP. Le bilan s'écrit :

$$S_m = S_{m-1} + P_m - k \cdot ETP_m - (1 - k) \cdot ETP_m \cdot \frac{JP_m}{N_m} \quad \text{Equ. [4.12]}$$

avec l'indice m qui se rapporte au mois, S étant le stock en eau du sol, k la proportion de rayonnement interceptée par les vignes donnée par approximation à partir du modèle de Riou *et al.* (1989), ETP l'évapotranspiration potentielle (Penman), JP le nombre de jours de pluie du mois et N le nombre de jours du mois. Le rapport JP/N exprime, par approximation, que l'évaporation n'est notable qu'un jour après la pluie. De plus, Riou considère que l'on accède automatiquement à JP à partir de la quantité de pluie mensuelle totale divisée par 5, en estimant à partir d'études statistiques, que la pluie se distribue en averses quotidiennes de 5 mm.

Ce modèle est une approche globale, utilisable à petite échelle. Il a d'ailleurs été conçu pour un zonage européen de la teneur potentielle en sucre du moût de raisin. Son application à des échelles de temps et d'espace plus fines nécessiterait d'adapter le paramètre k à la

configuration parcellaire et aux conditions climatiques. Elle n'est donc pas envisageable pour la problématique de notre étude.

b) Modèle de Riou et al. (1994)

Riou *et al.* (1994) ont établi un modèle donnant la transpiration de la vigne en conditions hydriques non limitantes à partir du modèle d'interception du rayonnement conçu par Riou *et al.* (1989). Nous ne reprendrons pas ici les détails du modèle qui ont été donnés au paragraphe 4.2.1. Ses conditions d'application (pas de restriction d'humidité) sont très limitatives et très éloignées des contraintes climatiques imposées par les conditions naturelles de culture de la vigne.

4.3.2. Modèle à bases énergétiques

Sene (1994) a calibré un modèle résistif similaire à celui de Shuttleworth et Wallace (1985) pour des vignes en gobelets. Il est parvenu à d'excellents résultats à partir de mesures simples (aérodynamique du couvert) et plus complexes (profils de vent dans le couvert). Cependant, son travail est la première étape du développement d'un modèle plus complet puisque la paramétrisation établie ne fonctionne qu'en périodes de sol sec, c'est-à-dire en négligeant l'évaporation du sol nu.

4.3.3. Modèles à bases physiologiques

Cherchant à comprendre les mécanismes physiologiques de résistance de la vigne à la sécheresse, Winkel et Rambal (1990) ont élaboré un modèle de fonctionnement stomatique. Ce modèle relie la conductance stomatique au DPVS, au potentiel foliaire, à la température de l'air et au rayonnement nécessaire pour effectuer la photosynthèse. Il a permis aux auteurs de conclure que l'adaptation de la vigne à la sécheresse devait être spécifique au cépage d'une part et agir à une double échelle de temps (instantanée et saisonnière) d'autre part.

Partant de ces conclusions, les mêmes auteurs ont étudié la transpiration de la vigne par l'application d'un modèle résistif global (équ.[4.9] ; Winkel et Rambal, 1993). Ils ont montré que la conductance globale Sol-Atmosphère ($=1/R_{sa}$) était variable au cours de la saison de végétation. Ils ont cependant estimé qu'elle pouvait être prise comme constante en cas d'alimentation en eau satisfaisante. Cette conductance intègre de nombreuses adaptations puisque, selon les cépages, elle est réduite par une augmentation de la résistance stomatique ou par une diminution de la surface foliaire (Winkel et Rambal, 1993).

4.3.4. Conclusion

Cette synthèse met en évidence le peu de travaux existant sur la modélisation des transferts d'eau en milieu viticole. Les échelles de temps et d'espace sont généralement choisies de façon à limiter les difficultés inhérentes aux conformations de la culture (couvert discontinu, enracinement profond) :

- le modèle de Riou (1994) travaille selon des hypothèses simplificatrices inadaptées à nos préoccupations,
- le modèle de Riou *et al.* (1994) ne fonctionne qu'en conditions hydriques non limitantes.
- le modèle de Sene (1994) requiert une paramétrisation difficile et spécifique à la parcelle étudiée,
- le modèle de fonctionnement stomatique de Winkel et Rambal (1990) nécessiterait une procédure de changement d'échelle de mesure (de la feuille à la parcelle) *a priori* difficile à construire. Il nécessite de surcroît la calibration de 4 paramètres dépendant du cépage (dont deux dépendent aussi des conditions édaphiques).
- le modèle de Winkel et Rambal (1993) est une application à la vigne d'un modèle classique de transpiration. Il serait utilisable sous réserve de pouvoir estimer la conductance globale du couvert de vigne et de posséder des mesures répétées de potentiels foliaires (de base et minimal). Cette dernière condition en fait un modèle difficile à élaborer sur plusieurs saisons de mesures.

Ainsi, en l'état actuel des travaux publiés, il n'existe pas de modèle d'estimation de l'ETR d'une vigne fonctionnant dans des situations pédoclimatiques variées.

5. CONCLUSION GENERALE

L'analyse bibliographique qui précède permet de dégager des voies d'investigations pour quantifier et comprendre les circulations d'eau dans le système sol-plante-atmosphère à l'échelle de la parcelle de vigne.

Les options expérimentales d'étude seront examinées en premier lieu. Dans un second temps, les choix de modélisation retenus seront argumentés pour répondre aux exigences de l'étude hydrologique globale.

5.1. Évaluation et analyse des flux d'eau à l'échelle de la parcelle de vigne

L'estimation de l'évapotranspiration d'une parcelle de vigne est rendue complexe par la conformation de la culture et par les caractéristiques morphologiques de cette plante.

Les études à notre disposition quant à la consommation en eau de la vigne restent assez sommaires : les études par méthodes hydriques sur le sol portent sur un échantillonnage spatial restreint et non représentatif d'un comportement parcellaire ; les études par bilan d'énergie concernent des périodes très courtes et aucun effort n'est mis sur les mécanismes d'adaptation de la vigne à la sécheresse ; les études par mesures séparées de l'évaporation et de la transpiration commencent à se développer mais aucun travail n'a encore été publié sur une saison de mesure complète en conditions sèches.

En ce qui concerne la régulation des flux hydriques à l'échelle de la parcelle de vigne, les auteurs s'accordent à penser que la vigne est un végétal résistant à la sécheresse grâce à un système racinaire étendu en profondeur. Cependant, la participation des racines profondes à l'alimentation des vignes en période de sécheresse n'a pas été montrée d'une part à cause des difficultés expérimentales que cela ajoutait, d'autre part car ce n'était pas la finalité poursuivie par les auteurs concernés.

De la même manière, la plupart des travaux réalisés ne permettent que des conjectures quant à la variabilité spatio-temporelle des prélèvements hydriques dans une parcelle de vigne. Pour ce qui est de la variabilité horizontale, il est possible de soupçonner qu'une structure de prélèvements parallèle à la structure du couvert existe mais elle n'a pas été montrée clairement. L'analyse de la variabilité des prélèvements au sein d'un profil de sol n'est pas possible au seul examen de la bibliographie puisque toutes les études publiées éludent les problèmes de redistribution d'eau au sein du sol.

Les connaissances à présent acquises sont que la vigne consomme peu d'eau et que, par voie de conséquence, l'évaporation du sol peut devenir une part importante de l'ETR lorsque le feuillage est peu développé ou après une pluie.

Les relations entre la vigne et son environnement ne sont pas encore formalisées. On sait que la vigne réagit au manque d'eau par une réduction de transpiration. Les limites provoquant cette réduction ne sont pas déterminées. Il est néanmoins connu que les conditions atmosphériques peuvent induire une diminution de transpiration au même titre que la sécheresse du sol.

Il apparaît finalement que la méthodologie d'estimation de l'ETR d'une parcelle de vigne reste à établir. Les mécanismes de régulation des flux hydriques à l'échelle de la saison de végétation ne sont pas connus non plus et doivent être évalués dans le cadre d'une étude généralisable à des situations pédoclimatiques contrastées. Le travail présenté s'est donc fixé pour objectifs de quantifier et comprendre la variabilité des flux d'eau à l'échelle de la parcelle de vigne et sur une saison de végétation. Le principe expérimental adopté est une confrontation de plusieurs techniques d'estimation de l'ETR parcellaire au sein d'une même parcelle expérimentale. Trois voies seront poursuivies :

- **un bilan hydrique**, répété en plusieurs points dans la parcelle permettra de visualiser et de quantifier la participation des différentes zones du sol à l'alimentation en eau de la vigne ;
- **un bilan d'énergie**, plus intégrateur des phénomènes parcellaires, sera un moyen de contrôler que l'échantillonnage spatial utilisé pour mesurer l'humidité du sol est adéquat,
- **la mesure séparée des flux d'évaporation et de transpiration** offrira l'opportunité de contrôler la part relative de chacun dans l'ETR parcellaire et leur évolution au cours du temps.

Ainsi, l'ensemble des flux parcellaires sera quantifié. Les grandeurs permettant d'évaluer la variabilité spatio-temporelle (et notamment les valeurs d'humidité du sol) seront mesurées conjointement afin de mettre en évidence des relations de fonctionnement hydrique parcellaire transposables à d'autres parcelles.

5.2. Modélisation de l'ETR d'une parcelle de vigne

La modélisation recherchée de l'évapotranspiration réelle d'une parcelle de vigne doit satisfaire aux exigences d'échelle spatio-temporelle d'exécution d'un modèle hydrologique global. Elle requiert une paramétrisation simple pour pouvoir être transposée à l'échelle du bassin versant à moindre coût. Les échelles de temps et d'espace fixées pour une étude de ce type sont la journée (jusqu'à la semaine) et la parcelle, pour des raisons déjà décrites en introduction.

Dans notre étude, les modélisations séparées de l'évaporation et de la transpiration seront envisagées afin d'offrir la possibilité d'adapter les relations déterminées à plusieurs conformations de parcelles. Chacun des modèles proposés sera plutôt vu sous une approche empirique toujours pour simplifier la paramétrisation. Une approche plus mécaniste permettrait une extrapolation des résultats plus aisée mais elle nécessiterait la connaissance de paramètres fastidieux à déterminer (courbes de conductivité hydraulique pour chaque sol par exemple).

Des relations seront recherchées entre humidité du sol et évaporation et transpiration. Le fonctionnement transpiratoire de la vigne pourra ainsi être mis en regard avec les conditions hydriques du milieu.

La séparation des énergies disponibles entre le sol et la plante ne semble pouvoir être faite simplement que par l'utilisation du modèle d'interception du rayonnement de Riou *et al.* (1989, 1994). Bien que les modes de conduite couramment pratiqués en Languedoc-Roussillon ne respectent pas rigoureusement ses conditions théoriques d'application (vigne en rangs parallélépipédiques), ce modèle reste une référence en ce qui concerne la simplicité d'utilisation.

La modélisation de l'évaporation du sol sous vigne devra prendre en compte les conditions climatiques particulières du milieu méditerranéen. Les orages estivaux méditerranéens sont caractéristiques dans le sens où ils sont intenses et où ils sont suivis de périodes de chaleur induisant un fort pouvoir évaporant de l'atmosphère.

La modélisation de la transpiration de la vigne paraît contrainte par la méconnaissance du système racinaire. Celle-ci imposerait une modélisation globale des transferts du sol vers l'atmosphère. Dans cette alternative, il semble difficile de modéliser l'extraction racinaire de la vigne au sein du profil de sol.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Après avoir présenté le cadre expérimental de l'étude, qui fixe les contraintes de protocole, ce chapitre présentera les méthodes utilisées telles qu'elles ont été mises en œuvre sur le terrain.

1. LE SITE EXPÉRIMENTAL

Le bassin versant où se situe l'expérimentation a été choisi en raison de sa représentativité des bassins versants de la région du point de vue des sols et de la topographie. La parcelle expérimentale y a été isolée en fonction de critères sélectifs liés à l'expérimentation.

1.1. Le bassin versant de Roujan

1.1.1. Présentation générale

Le bassin versant (BV) expérimental étudié (figure 1-1) est situé sur la commune de Roujan, à 40 km au nord-est de Béziers et à 10 km à l'ouest de Pézenas dans le département de l'Hérault (France). Il occupe une superficie de 0,90 km². Ce bassin versant est celui d'un affluent de la Peyne, rivière elle-même affluent de l'Hérault. Il est principalement occupé par la vigne (78 % de la surface totale en Février 1994 ; Voltz et Andrieux, 1995). La politique agricole communautaire, par la prime à l'arrachage, a tendance à induire une diminution des surfaces plantées en vignes au profit d'autres cultures (asperges, céréales) ou de friches.

Quatre ensembles géomorphologiques ont été identifiés au sein du BV (Andrieux *et al.*, 1993):

- un plateau, dans les parties hautes du BV (sud et ouest), aux sols caillouteux (acides ou calcaires) à matrice fine (sablo-argileuse à limono-argileuse). Il est marqué par la présence de nappes superficielles temporaires,
- des terrassettes, caractérisées par des fortes pentes (10-20 %) et un parcellaire très morcelé, inaccessible pour les engins de travail. Leur sol est peu épais, calcaire, reposant sur un substratum sablo-gréseux,
- un glacis où les pentes sont douces (2-7 %). Les formations pédologiques sont épaisses (d'origine colluviale), à texture fine, faiblement caillouteuses et non calcaires.
- une dépression, en position basse, plane, caractérisée par la présence d'une nappe à moins d'un mètre de profondeur en hiver. Les sols, d'origine alluviale, y sont limoneux à argileux, calcaires et caillouteux.

1.1.2. Équipement hydrologique du BV

L'exutoire du bassin est équipé d'un canal jaugeur pour mesurer les débits. Sur le BV de Roujan, cette mesure est facilitée par la forte anthropisation du milieu qui a mené à la création de nombreux fossés d'évacuation des eaux. Le canal est placé dans l'un d'eux.

La pluviométrie est mesurée en 13 points distribués sur l'ensemble du bassin. Les nappes sont également suivies en une douzaine de sites piézométriques.

Les teneurs en eau du sol sont suivies par méthode neutronique sur 8 parcelles. Le ruissellement parcellaire est étudié sur 2 de ces parcelles, l'une travaillée, l'autre non.

L'ensemble de ces dispositifs est reproduit figure 1-2. Le détail du matériel est décrit par Voltz et Andrieux (1995).

Figure 1-1 : Bassin versant de Roujan : carte des sols, localisation de la parcelle expérimentale et des fosses pédologiques (A, B, C, D)

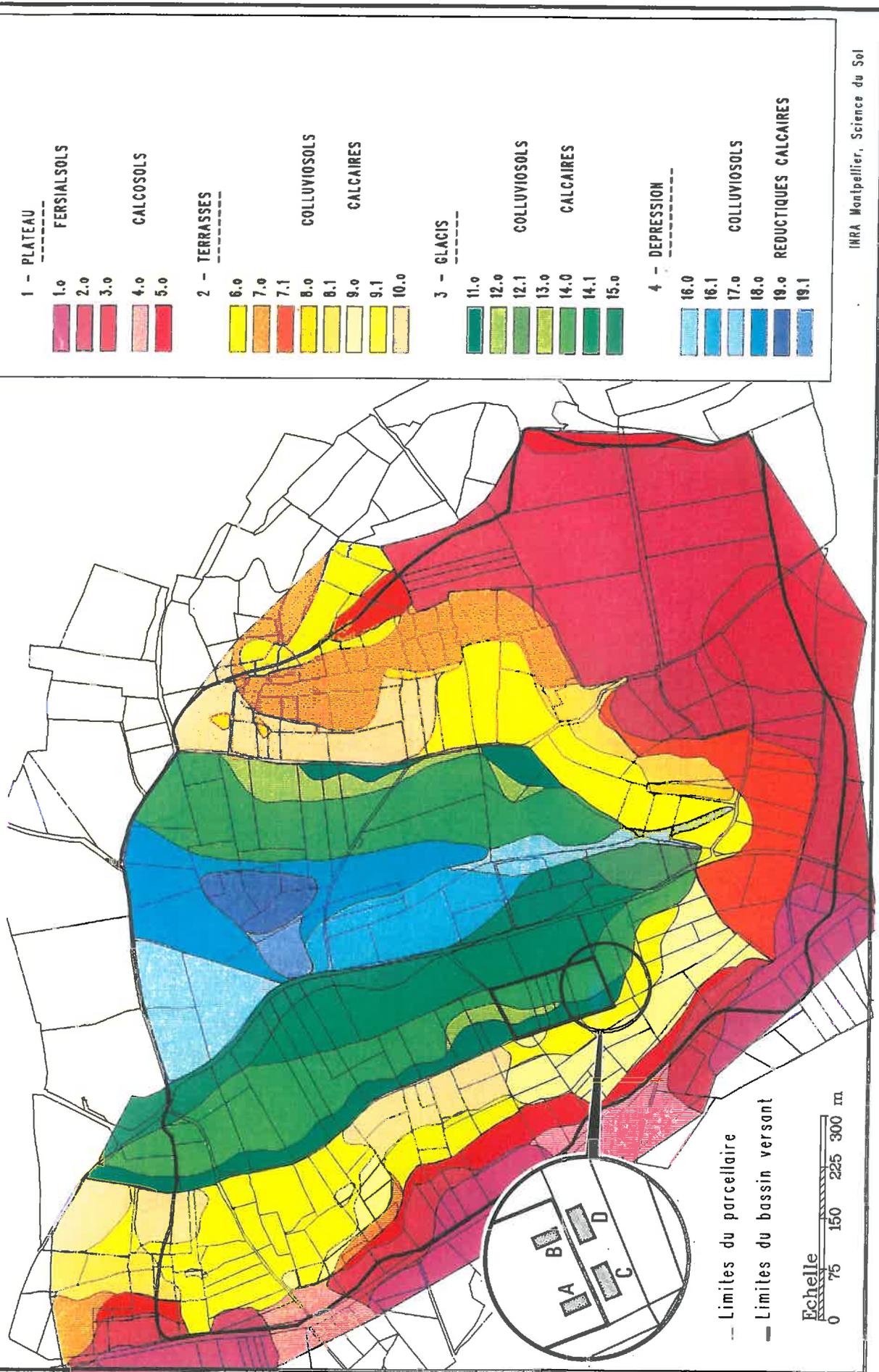




Figure 1-2 : Sites de mesures de la pluviométrie et de l'humidité du sol au sein du bassin versant de Roujan (d'après Voltz et Andrieux, 1994)

1.2. La parcelle expérimentale

1.2.1. Choix

La parcelle sur laquelle l'expérimentation a été dressée a été choisie en fonction de :

- **l'absence avérée de nappe** pour éviter des prélèvements d'eau par la vigne incontrôlables,
- **une superficie importante** au regard de la surface moyenne des parcelles du bassin versant pour que les conditions aérodynamiques («couche limite» développée) soient les plus favorables possible pour l'application des méthodes micro-météorologiques,
- **l'implantation en Syrah**, cépage référence de qualité. Ceci permettait d'intégrer la parcelle dans un réseau de parcelles expérimentales suivies notamment par le laboratoire de viticulture de l'INRA de Montpellier. Cette intégration dans le réseau expérimental nous a permis de bénéficier de la contribution des équipes de viticulture aux suivis viticoles (physiologie et croissance végétative) de la parcelle.
- la volonté de coopérer d'un viticulteur du bassin versant

1.2.2. Présentation générale

La parcelle retenue est située sur le glacis ouest du bassin versant (fig.1-1). Elle a une superficie de 1 ha environ et un dénivelé maximal de 8 mètres.

Elle a été plantée en 1983 en Syrah greffée sur porte-greffe SO4. Ayant plus de 10 ans, on peut considérer que la vigne est à l'état «adulte» c'est-à-dire que l'on estime que sa **colonisation racinaire est maximale** (Branas, 1974).

La vigne est conduite en rangs écartés de 2,50 m pour un espacement sur le rang de 1,20 m. Elle est fertilisée en début de saison. Elle est conduite depuis 1992 en désherbage chimique total. Auparavant, elle était cultivée (labour superficiel) 5 rangs sur 6 avec désherbage chimique du cavaillon (espace sous les ceps) quatre à cinq fois par saison. Les ceps sont formés en Guyot double sur un palissage de 1,50 m de hauteur. Les sarments sont maintenus dans un plan vertical par un palissage à 3 fils (type téléphone). Ils sont rognés verticalement deux ou trois fois dans la saison selon leur développement végétatif pour faciliter le passage des engins de traitement et favoriser la maturation des grappes. La hauteur du feuillage atteint 1,70 m en pleine végétation.

1.2.3. Le sol

Le sol de la parcelle a été observé sur fosses pédologiques à deux reprises : à l'hiver 93-94 et à l'hiver 94-95 (voir localisation figure 1-1):

- les premières (fosses A et B) ont été réalisées en bordure de la parcelle sur 2,70 m de profondeur et ont permis un dénombrement racinaire et une caractérisation hydrodynamique sommaire,
- les secondes (fosses C et D) ont été creusées dans la parcelle voisine où la vigne avait été arrachée depuis deux mois. Elles ont été faites sur 4,50 m de profondeur et ont permis une description racinaire détaillée et une caractérisation hydrodynamique complète par des mesures *in situ* et le prélèvement d'échantillons pour traitement en laboratoire (voir paragraphe 3).

Deux fosses ont chaque fois été réalisées sur les côtés ouest et est de la parcelle pour rendre compte d'une source probable d'hétérogénéité le long de la pente.

a) Description

Le sol est un limon argileux sableux peu calcaire reposant sur un sable limoneux parfois induré (jusqu'à du grès discontinu dans la partie est) à partir de 80 cm de profondeur (figure 1-3). Les hétérogénéités sont très marquées à l'échelle du mètre. On observe çà et là des poches limono-argileuses qui descendent de 80 cm à 220 cm de profondeur.

Les deux profils sont globalement similaires. La structure des sables du profil est s'est révélée plus litée que celle du profil ouest. Cependant, à une échelle fine, quel que soit le profil, les sables ne sont pas homogènes : on relève des parties indurées, impénétrables à la tarière, et des parties plus meubles. Les unes côtoient les autres selon des taches qui ne semblent pas organisées.

Les analyses granulométriques sont données figure 1-4a-b. L'apparente différence entre les deux profils représentés ne peut être expliquée simplement. Il est possible qu'elle soit imputable à un effet de bordure : le sol ouest serait issu de formations plus continentales que le sol est mais ceci reste une hypothèse non vérifiée (Bouzigues, comm.pers.).

b) Localisation des racines

Les racines sont concentrées dans les parties les moins indurées (figure 1-5). On les trouve donc principalement dans la couche de surface à partir de 15-20 cm de profondeur mais également dans les poches limono-argileuses qui s'enfoncent dans les formations sableuses.

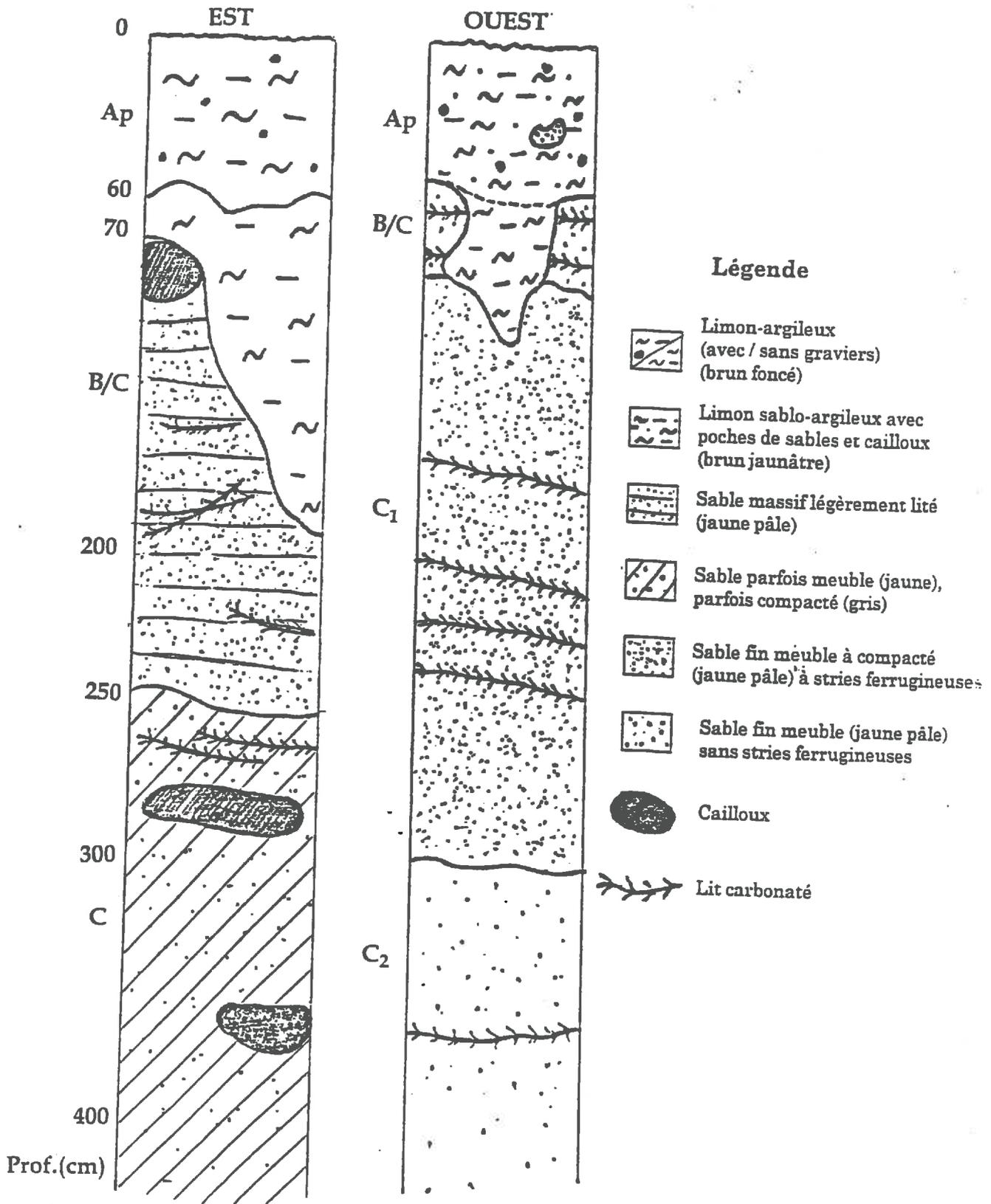


Figure 1-3 : Profils pédologiques observés sur les fosses C (ouest) et D (est)

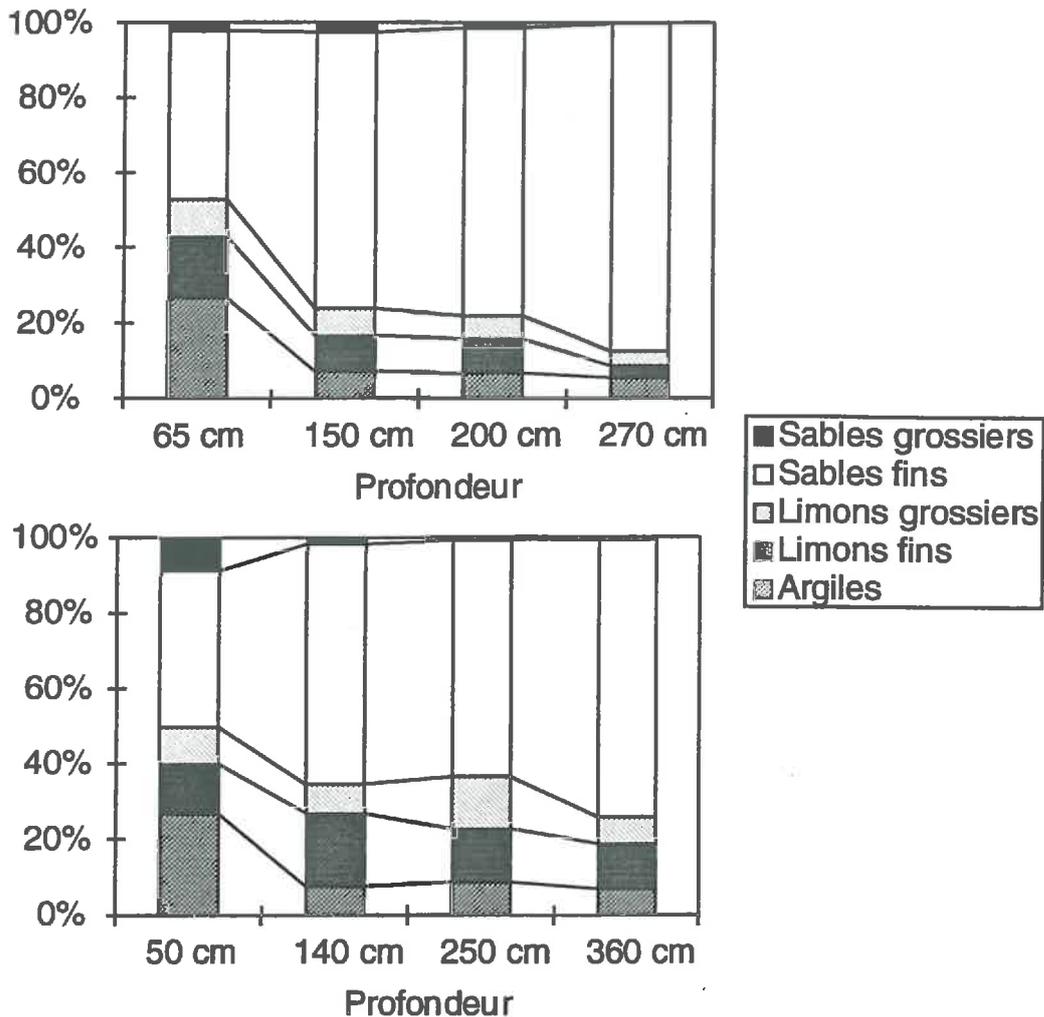


Figure 1-4a-b: Granulométrie des profils ouest (a - profil C) et est (b - profil D)

Le chevelu racinaire (partie apicale ramifiée de la racine) est très dense en bordure des poches limono-argileuses et dans les lits carbonatés. Les racines ne se ramifient pas dans les sables et n'y sont généralement présentes que sous la forme de racines verticales épaisses (au moins 2 mm de diamètre). On a également noté la présence de rares racines à 4 m de profondeur.

La densité racinaire observée est conforme aux valeurs trouvées dans la bibliographie. La zone de colonisation maximale semble être localisée entre 30 et 50 cm de profondeur, ce qui reste de l'ordre de grandeur des observations réunies par Champagnol (1984). Cependant, la distribution des racines est sous l'influence majeure du sol ce qui induit des hétérogénéités marquées au sein de la parcelle.

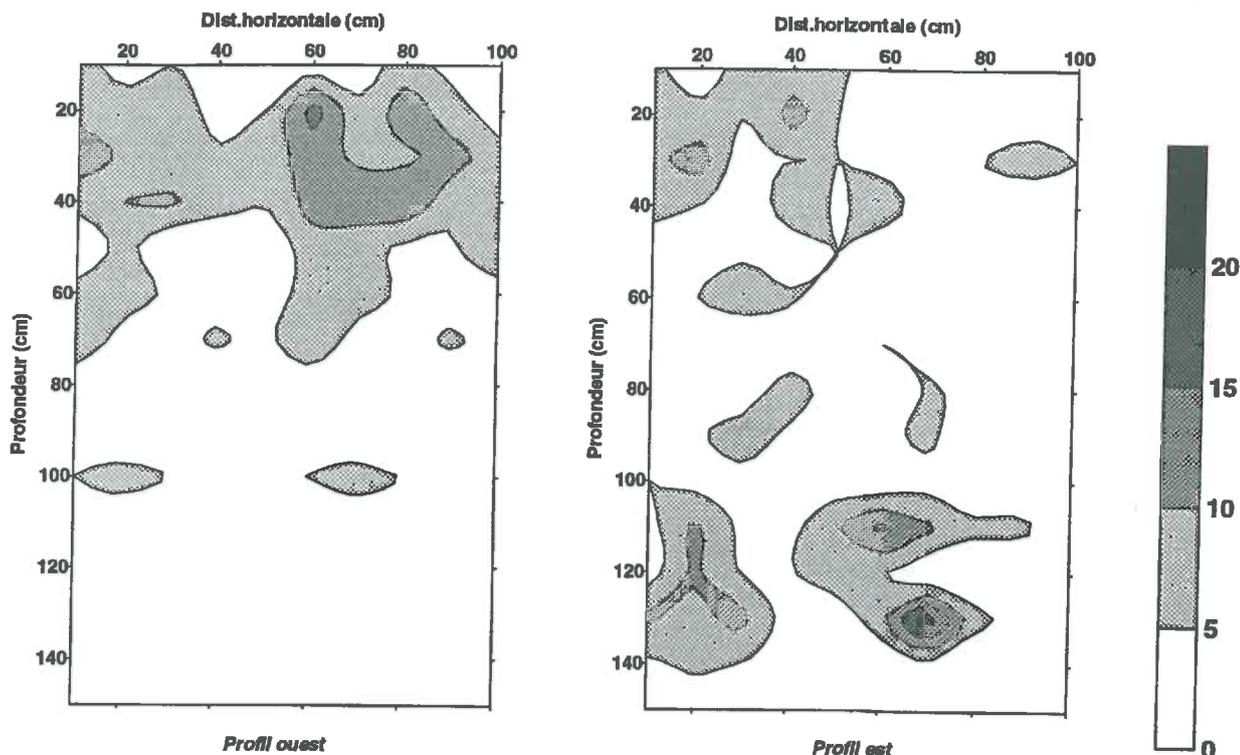


Figure 1-5 : Cartes d'impacts racinaires réalisées en 1993 sur les fosses pédologiques A et B, à 20 cm du rang. Les comptages sont exprimés en nombre d'impacts sur 10 cm²

2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

L'expérimentation a porté sur trois saisons de végétation (1993, 1994 et 1995). Les deux premières années ont fait l'objet d'un protocole de mesure complet. En 1995, seules l'humidité du sol hebdomadaire et le flux de sève étaient suivis.

L'objectif de l'expérimentation est de parvenir à une quantification objective des pertes en eau parcelles avec, si possible, l'étude de la variabilité spatio-temporelle des flux concernés. Ainsi, trois méthodes de mesures ont été utilisées pour estimer l'ETR parcelle :

- un bilan hydrique du sol qui permet de comprendre les relations entre la plante et le sol du point de vue de l'alimentation hydrique
- des mesures micro-météorologiques afin d'avoir une estimation parcelle intégrée,
- une mesure séparée des flux d'évaporation et de transpiration.

Pour rendre compte des hétérogénéités parcelles, la parcelle a été divisée en cinq placettes (figure 2-1). Chacune d'entre elles est le siège de mesures d'humidité du sol sous le

rang et sous l'inter-rang et de suivis des potentiels hydriques du sol. Deux ceps par placette sont équipés d'un dispositif de mesure du flux de sève. Trois mini-lysimètres sont installés sur un demi-inter-rang dans chaque placette. La placette centrale (placette 3) est occupée de plus par un dispositif de mesure de l'ETR par méthodes micro-météorologiques.

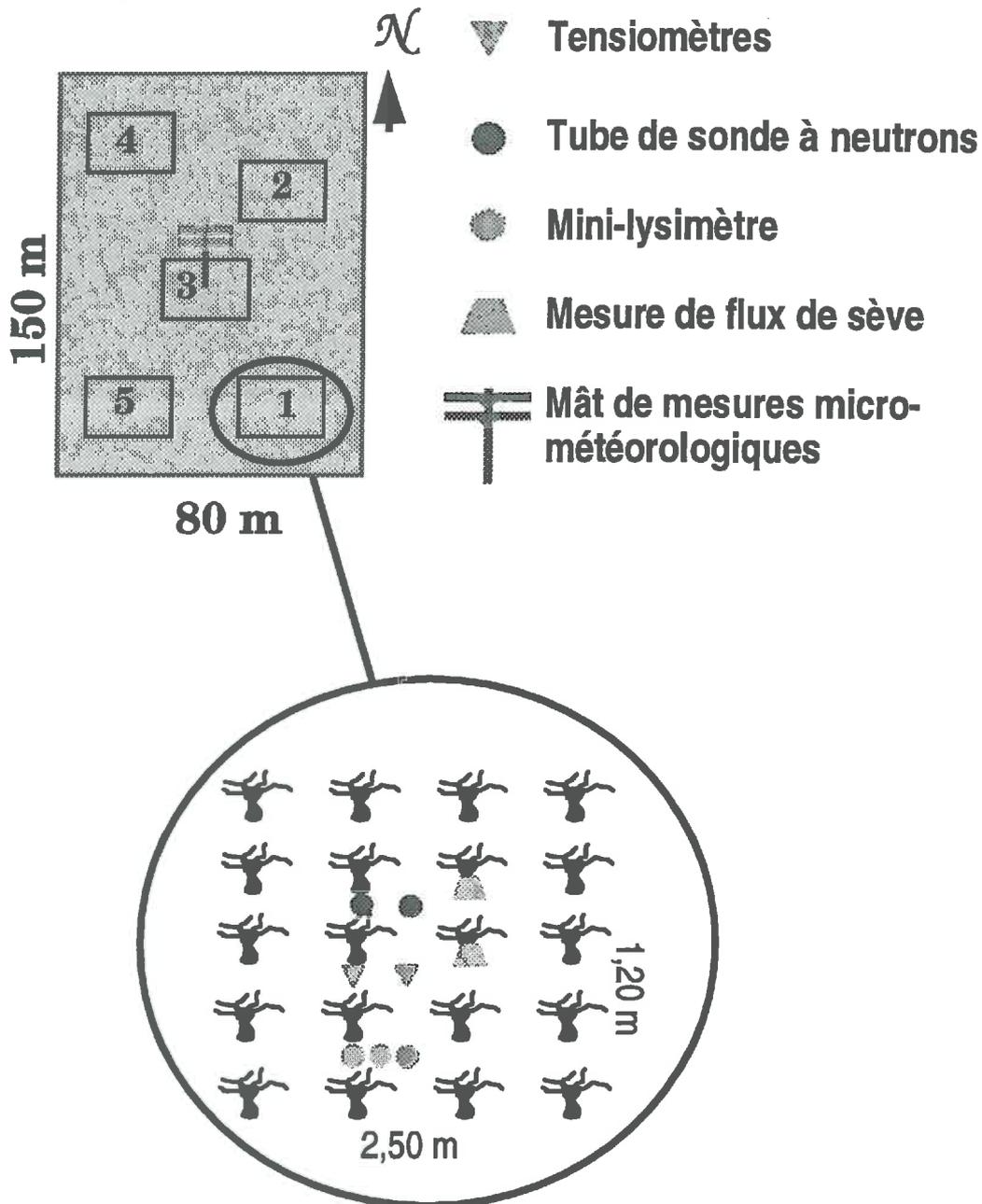


Figure 2-1 : Parcelle expérimentale et dispositif de mesure

Les données météorologiques utilisées pour le traitement des mesures acquises sur la parcelle sont issues pour partie de la station météorologique placée à l'exutoire du bassin

versant pour le rayonnement global et l'ETP Penman et pour partie de la station pluviométrique d'une parcelle voisine (n° cadastral AW54) pour la pluie.

2.1. Mesures d'humidité et de potentiel hydrique du sol

2.1.1. Matériel

a) Humidité du sol

L'humidité du sol a été suivie par méthode neutronique (Daudet et Vachaud, 1977) à partir de 20 cm de profondeur. L'humidité de la couche de surface a été mesurée par prélèvements gravimétriques à la tarière.

L'humidité du sol a été suivie du 27 juin au 8 septembre 1993 et du 25 mai au 1^{er} septembre 1994.

- Humidité du sol à partir de 20 cm de profondeur

Les tubes d'accès à la sonde à neutrons sont en aluminium (\varnothing 43-45 mm). Ils ont été enfoncés en force dans un pré-trou (\varnothing 47 mm) réalisé par forage pneumatique.

Les profondeurs maximales concernées par les mesures d'humidité ont été de 2,30 m en 1993 et 4,10 m en 1994. La première profondeur avait été choisie en fonction des travaux menés par deux étudiants à l'été 1992 (Fiori, 1992 ; Galais, 1992) qui avaient observé des variations de stock minimales voire nulles à 2 mètres de profondeur sur des sols similaires. La pluviosité du début de l'été 92 avait probablement limité le dessèchement des couches inférieures (par exploitation directe ou remontées capillaires). L'été 93 a été beaucoup plus sec si bien que de fortes variations de stock ont parfois été enregistrées à 2,30 m de profondeur. C'est la raison pour laquelle la profondeur d'investigation a été poussée à 4,10 m en 1994. Un tube (placette 4 - inter-rang) n'a pu être installé à plus de 3,30 m de profondeur en raison d'un sol trop pulvérulent pour permettre le forage pneumatique. Pour ce tube, le stock hydrique de 0 à 4,10 m a été reconstitué par corrélation linéaire entre les stocks à 3,30 m et les stocks à 4,10 m sur l'ensemble des autres tubes ($r^2 = 0,92^{***}$; $P < 0,001$; erreur sur l'estimation = 25 mm \approx 2,5-3 % sur le stock).

Les mesures ont été faites la première année tous les 10 cm de profondeur à partir de 20 cm, la deuxième année tous les 10 cm de 20 à 250 cm de profondeur puis tous les 20 cm

jusqu'au fond du tube. Le pas de temps de mesure adopté est de 40 secondes par profondeur. Les mesures ont été effectuées deux fois par semaine.

La sonde utilisée (modèle Nardeux SOLO 40) a été étalonnée par **étalonnage gravimétrique** avec mesure de la densité apparente effectuée par une sonde gammamétrique (modèle Nardeux SOLO 40) étalonnée elle-même par comparaison avec une sonde gammamétrique Campbell. Les mesures pour l'étalonnage ont eu lieu en août 1993 pour les faibles humidités et en janvier 1994 pour les fortes humidités du sol. Il n'a pas été renouvelé lors de l'installation des nouveaux tubes. Une seule relation est utilisée pour la parcelle et pour tous les horizons (figure 2-2) car la forte dispersion des points autour de la droite n'a pu être palliée par un regroupement des horizons par texture. L'erreur commise sur l'humidité volumique par l'étalonnage est de $0,035 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

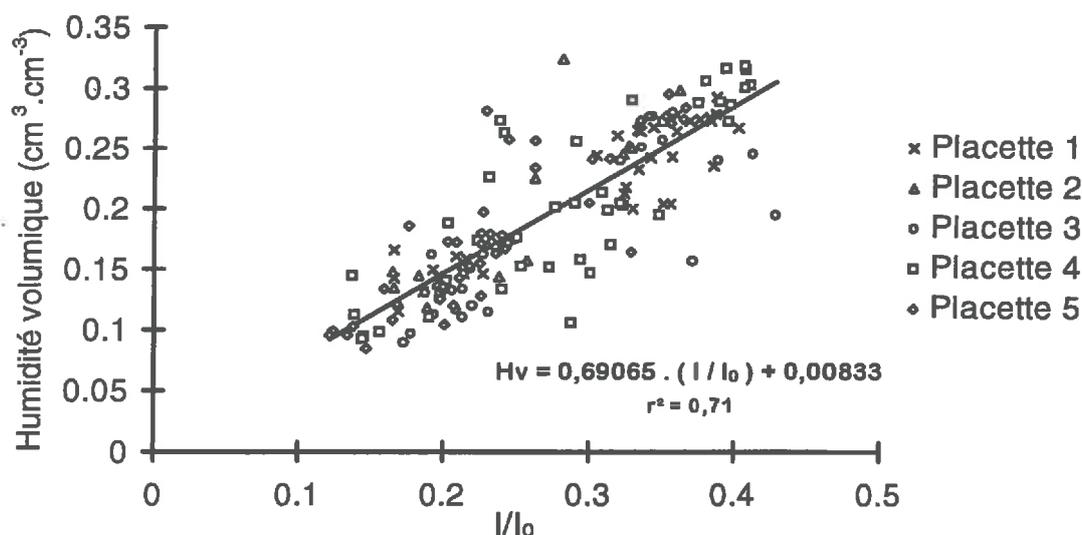


Figure 2-2 : Étalonnage gravimétrique de la sonde à neutrons

• Humidité des 20 premiers centimètres

L'humidité gravimétrique de la couche de surface est mesurée à partir de prélèvements à la tarière sur 15 cm de profondeur. L'humidité volumique est alors calculée à partir de la densité apparente de la couche de surface.

Les prélèvements sont effectués au voisinage des placettes de mesure en deux ou trois positions par site (sous le rang, sous l'inter-rang et, en 1993, en position intermédiaire entre les deux).

b) Potentiels hydriques

Ils ont été suivis du 27 juin au 8 juillet 1993 et du 25 mai au 25 août 1994.

Les potentiels du sol ont été mesurés par **tensiomètres à mercure** (marques Nardeux et SDEC) placés en batteries. Les profondeurs d'implantation varient selon les placettes en raison des difficultés de pénétration de la tarière dans le sol. Elles s'étalent entre 40 et 140 cm en six tensiomètres en 93 et 94. Ce dispositif est répété sous les ceps et dans l'inter-rang. En 1994, chaque placette a été équipée de deux tensiomètres supplémentaires en profondeur (autour de 2,50 m) pour contrôler les flux profonds. Ceux-ci ont été installés grâce à la réalisation d'un pré-trou à la foreuse pneumatique (\varnothing 45 mm) complété par un trou à la tarière manuelle à tensiomètres (\varnothing 20 mm) sur 20 cm environ.

2.1.2. Difficultés et traitements

L'erreur commise sur la mesure de variation de stock est calculée par un algorithme créé par Galais et Voltz (Galais, 1992). La variance totale est décomposée en plusieurs erreurs (Haverkamp *et al.*, 1984 ; Vauclin *et al.*, 1984 ; Vandervaere *et al.*, 1994a-b):

- **la composante d'intégration** qui traduit l'erreur commise en interpolant les mesures entre deux points (sites de mesures ou profondeurs). Elle dépend donc du nombre de sites de mesures et du pas d'intégration utilisé entre deux mesures.
- **la composante spatiale** exprime l'erreur d'estimation de la variation de stock à partir de la moyenne d'observations ponctuelles. Elle est sous la dépendance directe du nombre de sites de mesures.
- **la composante d'étalonnage** est une erreur liée à la variation de comptages neutroniques entre deux mesures. Elle est négligeable sur de courtes périodes mais devient prépondérante sur des périodes plus longues (plusieurs semaines).
- **la composante instrumentale** est en relation avec l'appareillage, le nombre de sites de mesures et le temps de comptage. C'est une part relativement faible de la variance totale et, qui plus est, relativement constante (Galais, 1992).

Afin de minimiser l'erreur liée à la mesure, les résultats seront présentés à l'échelle de la semaine. En effet, nous avons vu au chapitre précédent que l'erreur sur la mesure pouvait atteindre 200 % pour une estimation de la variation de stock sur 3 jours (Galais, 1992). Sur

une semaine, l'erreur descend aux alentours de 15-20 %. Cette échelle de temps est compatible avec une bonne observation des phénomènes et de leur évolution au cours de la saison.

2.2. Méthodes micro-météorologiques

Les méthodes d'estimation de l'ETR parcellaire par micro-météorologie sont de trois types :

- directe par l'application de la méthode des **fluctuations** en vapeur d'eau (Perrier et Seguin, 1970),
- indirecte par la méthode du **rapport de Bowen** (Tanner, 1960),
- indirecte par mesure des autres termes du **bilan d'énergie**.

La première et la dernière de ces méthodes ont été testées en 1993. La méthode du rapport de Bowen n'a pu être mise en place pour des raisons matérielles. La méthode des fluctuations impose de tenir compte de l'orientation du vent pour la position des appareils de mesure les uns par rapport aux autres (Chanzy, comm.pers.). Cette contrainte expérimentale a remis en question la validité de la méthode telle que nous l'avions employée (matériel en position fixe) si bien que la technique n'a pas été installée à nouveau en 1994.

2.2.1. Principes

a) Méthode du bilan d'énergie (Perrier, 1975)

Le bilan d'énergie d'une parcelle s'écrit :

$$R_n = G + H + L.E \quad \text{Equ.}[2.1]$$

- avec :
- R_n le rayonnement net,
 - G le flux de chaleur conduit dans le sol
 - H le flux de chaleur sensible, correspondant aux échanges thermiques entre le sol et l'atmosphère
 - $L.E$ le flux de chaleur latente, équivalent énergétique de l'ETR

Tous ces termes s'expriment en densité de flux : $W.m^{-2}$

R_n est mesuré directement par pyrromètre différentiel. G est estimé par mesure directe par plaques de flux de conductivité thermique connue ou par la méthode dite du stock thermique (de Vries, 1963), H est mesuré par la méthode des fluctuations (voir paragraphe

suivant), par méthodes aérodynamiques ou par le rapport de Bowen, L.E est déduit du bilan ou mesuré par la méthode des fluctuations.

b) Méthode des fluctuations (Bruckler, 1983)

Une grandeur q instantanée transférée dans l'atmosphère peut s'écrire comme la somme de sa moyenne avec une fluctuation q' :

$$q = \bar{q} + q' \quad \text{Equ.}[2.2]$$

Les échanges sont essentiellement convectifs. On calcule le flux vertical (ϕ) instantané comme le produit de la grandeur étudiée avec la vitesse verticale du vent (w) :

$$\phi = q \cdot w \quad \text{Equ.}[2.3]$$

En posant que la vitesse verticale du vent obéit à l'équation [2.2], que sa moyenne est nulle à une échelle de temps suffisamment longue et que les moyennes des fluctuations sont également nulles, on calcule le flux moyen :

$$\bar{\phi} = \overline{q' \cdot w'} \quad \text{Equ.}[2.4]$$

On calcule ensuite le flux de chaleur latente ($q = \theta =$ concentration en vapeur d'eau) et le flux de chaleur sensible ($q = T =$ température) à partir de ses fluctuations et de celles de la vitesse verticale du vent :

$$\begin{aligned} \overline{L \cdot E} &= L \cdot \rho_a \cdot \overline{\theta' \cdot w'} \\ \overline{H} &= \rho_a \cdot C_p \cdot \overline{T' \cdot w'} \end{aligned} \quad \text{Equ.}[2.5a-b]$$

avec ρ_a la masse volumique de l'air et C_p sa chaleur spécifique à pression constante, considérées comme constantes. Ainsi, une mesure des fluctuations instantanées de la vitesse verticale du vent et de la grandeur étudiée permet de calculer les flux.

2.2.2. Matériel

Le matériel de mesures micro-météorologiques a été installé au **centre de la parcelle**, sur la placette 3. Sa mise en place, le protocole d'acquisition de données et la gestion des résultats ont été assurés par l'équipe du laboratoire de Science du sol de l'INRA d'Avignon. Le matériel a été prêté par les laboratoires de Science du sol et de Bioclimatologie de l'INRA d'Avignon. Les mesures disponibles consistent en 16 jours entre le 5 juillet et le 11 août 1993 et 21 jours entre le 1^{er} juillet et le 17 août 1994.

Le dispositif de mesures se compose d'un mât de mesures situé dans un rang de vigne. Ce mât porte l'appareillage suivant :

- un **pyrradiomètre différentiel** (ou bilanmètre) au sud du mât, en position médiane entre le rang et l'inter-rang, à 3 m au dessus du sol. Cet appareil mesure le rayonnement net (R_n)
- un **anémomètre sonique** nécessaire à la mesure du flux de chaleur sensible (H) par la méthode des fluctuations (mesure des fluctuations de la vitesse verticale du vent et de la température), placé à la même hauteur que le pyrradiomètre
- un **hygromètre à krypton** (KH₂O) en 1993 pour la mesure de L.E par la méthode des fluctuations, à 3 m de haut également

Le flux de conduction dans le sol a été mesuré par des **plaques de flux** disposées environ 1 cm sous la surface du sol. Le stock thermique de la couche sus-jacente est négligé. Six plaques de flux ont été disposées le long de deux demi-inter-rangs (est et ouest) pour intégrer les hétérogénéités induites par l'ombrage épisodique du sol par les ceps. La méthode du stock thermique a été écartée du protocole en raison de la lourdeur expérimentale qu'elle aurait ajoutée (mesures précises de l'humidité du sol sur 1 mètre de profondeur plusieurs fois par semaine). Il lui a été préféré une méthode totalement automatisable même si elle est reconnue ne pas être la plus fiable (Riou, comm.pers.). De plus, il est admis que G peut être considéré comme nul à l'échelle de la journée. Ce fait a été vérifié dans notre expérimentation.

Les mesures étaient acquises toutes les 10 secondes. La moyenne de ces données, réalisée tous les quarts d'heure, était enregistrée par une centrale d'acquisition de données (Campbell 21X). Les données de la centrale sont sauvegardées une fois par semaine.

2.2.3. Difficultés et traitements

L'emploi des méthodes micro-météorologiques dans une région comme celle du bassin versant de Roujan pose quelques problèmes généraux :

- le **vent** est très fréquent en Languedoc-Roussillon. Il peut être à l'origine de perturbations aérodynamiques relatées par Riou *et al.* (1987). Le vent, dans une vigne en rangs, peut occasionner des circulations d'air laminaires qui perturbent l'application de ces méthodes.

- le **parcellaire très morcelé** et les conditions aérodynamiques chaotiques (talus nombreux, arbres isolés, vignes arrachées) rendent aléatoire la mise en place d'une «couche limite». Celle-ci se définit comme la couche d'air au dessus de la parcelle au sein de laquelle les flux énergétiques ne sont variables que verticalement (composante horizontale du flux nulle).
- la **position du pyrromètre par rapport au rang peut également poser un problème**. En effet, cet appareil fait un bilan du rayonnement global incident et du rayonnement renvoyé par la parcelle. Oliver et Sene (1992) ont mesuré une différence de R_n selon la position du bilanmètre seulement lorsqu'ils plaçaient celui-ci à quelques centimètres du feuillage. Ceci peut être expliqué par les valeurs d'albédo proches pour un sol brun et un couvert végétal (autour de 0,20). Un sol plus blanc induirait sans doute une discrimination plus marquée par le bilanmètre.
- l'**anémomètre sonique** est un appareil très sensible aux conditions atmosphériques (thermocouple très fin et fragile et micros sensibles à l'humidité). Il requiert de ce fait une surveillance accrue par une personne compétente. Les expérimentations sur le bassin versant de Roujan ont montré que le thermocouple ne pouvait pas résister très longtemps sans céder, même en l'absence de pluie. La présence de nombreuses cigales dans la vigne, heurtant les appareils, est probablement à l'origine de ces ruptures à répétition. En conséquence, nous ne possédons pas de suivi continu de l'ETR parcellaire par micro-météorologie sur une longue période.

Le pyrromètre a été étalonné par comparaison avec deux autres appareils. Les capteurs de température ont également été étalonnés en bain thermostaté.

2.3. Mesures de transpiration

Dans notre étude, le flux de sève mesuré dans le tronc est assimilé à la transpiration et celle-ci est considérée comme égale à l'extraction racinaire. En définitive, nous négligeons le d'eau stocké dans les parties végétatives.

La transpiration a été suivie du 8 juillet au 25 août 1994 et du 6 juillet au 28 août 1995.

2.3.1. Principes des mesures

Deux méthodes thermiques d'estimation de la transpiration des ceps en place ont été utilisées au cours de la thèse :

- en 1993 et 1994, la méthode dite des **aiguilles chauffantes** («méthode de Granier», Granier, 1985) dont les principes théoriques sont simples et la mise en œuvre rapide,
- en 1994 et 1995, la méthode du **bilan de chaleur** par manchons thermiques (Sakuratani, 1981) qui requiert une technologie plus complexe.

L'utilisation de ces deux techniques et de leurs limitations sur des arbustes de savanes font l'objet d'un article méthodologique comparatif (Valancogne et Granier, 1991). Un article de synthèse fait l'analyse des différentes méthodes thermiques existant ou ayant existé (Swanson, 1994).

La méthode des aiguilles ne sera pas développée ici car elle n'a pas donné de résultats exploitables (valeurs au tiers des valeurs attendues). Les causes sont demeurées inexpliquées. Il est possible, en dépit des précautions prises, que des gradients thermiques aient perturbé la mesure. De plus, la mesure par la méthode des aiguilles étant très locale dans le tronc, se pose le problème de la représentativité de la zone de mesure par rapport à la section conductrice, d'autant plus important qu'il peut exister des hétérogénéités locales de conduction de la sève au sein du bois induisant certains faisceaux à être plus conducteurs que d'autres (Branas, 1974 ; Champagnol, comm.pers.).

En conséquence, la méthode des aiguilles chauffantes ne semble pas adaptée à la mesure sur vigne. Les résultats de flux de sève à notre disposition portent donc sur la seule année 1994.

Méthode du bilan de chaleur

La méthode utilisée est adaptée de Sakuratani (1981). Elle réalise le bilan thermique d'un volume de bois chauffé à puissance constante. Le bilan assimile les pertes thermiques à la conduction par la sève.

Le dispositif de mesure est un **manchon souple** comportant un fil chauffant et une double plaque de thermocouples, enroulé autour du tronc. Des thermocouples sont disposés en amont et aval de ce manchon pour mesurer les différents gradients de température nécessaires au bilan thermique (figure 2-3).

On écrit :

$$Q_{\text{sève}} = P - (Q_{\text{aval}} - Q_{\text{amont}}) - Q_{\text{lat}} - Q_{\text{sto}} \quad \text{Equ. [2.6]}$$

Ces flux sont des flux de chaleur exprimés de ce fait en Watts (W).

où : $Q_{\text{sève}}$ est le flux de chaleur véhiculé par la sève,
 P est la puissance fournie par le ruban chauffant,
 Q_{amont} et Q_{aval} sont les flux de chaleur conduits vers l'amont et l'aval le long de la tige,
 Q_{lat} est le flux radial à travers le manchon thermique,
 Q_{sto} est la part de chaleur stockée ou relarguée par le segment de tige étudié.

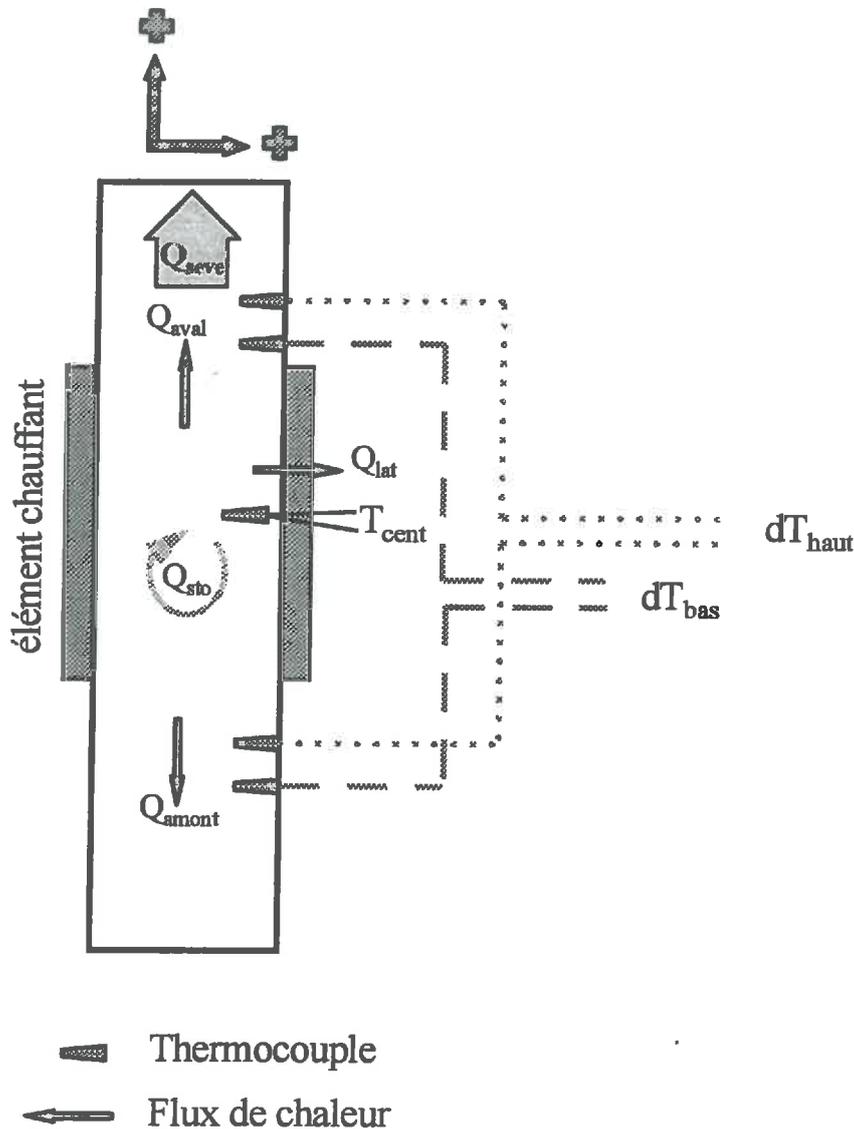


Figure 2-3 : Manchon de mesure du flux de sève par bilan thermique (d'après Dayau, 1993)

Chacun de ces flux de chaleur est calculé à partir d'une différence de températures mesurée et d'une conductivité thermique connue ou déterminée expérimentalement :

- Q_{amont} et Q_{aval} nécessitent la connaissance des **surfaces de section de tige** aux niveaux de mesure de la température et la conductivité thermique du bois mouillé ($0,4-0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$)
- Q_{sto} est obtenu par mesure de **l'échauffement du volume de tige** (dT/dt)
- Q_{lat} est calculé à partir de l'écart de température **entre le bois et l'extérieur du manchon** et de la conductivité thermique K_{lat} du manchon. Celle-ci est déterminée expérimentalement en estimant que le flux de transpiration est nul la nuit et en inversant le bilan. Cette opération, assimilable à un étalonnage, doit être répétée plusieurs fois dans la saison de mesure pour garantir la nullité du flux de transpiration nocturne.

On calcule enfin la transpiration du cep par :

$$TR = \frac{Q_{\text{sève}}}{C_w \cdot dT_{\text{aval-amont}}} \quad \text{Equ.}[2.7]$$

où C_w est la capacité calorifique de l'eau ($4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$) et $dT_{\text{aval-amont}}$ la différence de température entre le haut et le bas du manchon (échauffement moyen du segment de tige).

L'erreur sur la mesure ne peut être calculée au champ de façon précise. Les nombreux auteurs ayant travaillé sur la validation de la méthode ont suivi les pertes en eau d'une plante en pot par pesées et contrôlé ainsi les cinétiques données par les manchons de mesure. Ces auteurs assurent que cette méthode permet une estimation à une précision meilleure que 10 % sur la valeur journalière (Sakuratani, 1981 ; Baker et Van Bavel, 1987).

2.3.2. Matériel

La méthode du bilan thermique a été mise en place en 1994 selon un dispositif élaboré par Dayau et Valancogne (Dayau, 1993).

Les manchons de mesures et les thermocouples ont été créés sous le contrôle de Sylvia Dayau et de Charles Valancogne du laboratoire de Bioclimatologie de l'INRA de Bordeaux. Les manchons sont construits en **silicone souple** ce qui permet une bonne adaptation aux surfaces irrégulières comme peuvent l'être celles des troncs de vigne. Ils rivalisent en cela avec des manchons commercialisés (Dynagage, Steinberg, 1988) rigides, conçus tout d'abord pour des expérimentations sur cultures annuelles (Sakuratani, 1981 ; Baker et Van Bavel, 1987 ; Steinberg *et al.*, 1989). Ces derniers ont pourtant été employés dans des expérimentations récentes sur des petits arbres (Heilman et Ham, 1990) voire des vignes (Lascano *et al.*, 1992 ; Heilman *et al.*, 1994).

Les manchons sont installés sur le tronc dégarni de son écorce à environ 30 cm de la surface du sol. Les thermocouples, de type Cuivre-Constantan sont implantés radialement à 0,5 cm de profondeur dans le bois. Les paires amont et aval sont décentrées par rapport au manchon pour éviter d'avoir un gradient de température ($dT_{\text{aval-amont}}$) nul en l'absence de flux de sève. Le tout est isolé des perturbations thermiques induites par le rayonnement à l'aide d'une épaisse couche d'isolant mousse recouverte de feuille d'aluminium. La couche isolante recouvre 10 cm de tronc au dessus du manchon et 10 cm en dessous.

Les données sont acquises toutes les 20 secondes et leur moyenne est enregistrée tous les quarts d'heure. L'acquisition et le stockage sont réalisés par une centrale Campbell CR7. L'autonomie énergétique est assurée par 2 batteries de 176 A.h remplacées tous les 10 jours.

Les données brutes sont traitées par un ensemble de programmes créés par Charles Valancogne. Ceux-ci fournissent les résultats de transpiration instantanée.

Les ceps équipés de manchons de flux de sève ont été choisis à partir du bois de taille comme approximativement moyens par rapport à l'ensemble des pieds de la parcelle.

2.3.3. Difficultés et traitements

La méthode du bilan de chaleur, à présent acceptée comme méthode fiable, a fait l'objet d'articles récents sur les perturbations provoquées par une mauvaise isolation thermique du manchon. En définitive, il ressort que les effets les plus marquants viennent d'un gradient de température ($dT_{\text{aval-amont}}$) faussé par ces apports énergétiques externes (Shackel *et al.*, 1992 ; Gutiérrez *et al.*, 1994). Ce phénomène a été constaté lors de nos expérimentations. Lorsque la lumière solaire était incidente sur la base des pieds de vigne (entre 9 et 10 heures du matin), $dT_{\text{aval-amont}}$ diminuait beaucoup jusqu'à devenir négatif. Ceci avait pour conséquence des pics de flux de sève vers les fortes valeurs et vers des valeurs négatives (figure 2-4). Les valeurs ont été corrigées selon deux voies :

- C.Valancogne, qui a déjà été confronté au problème, préconise une **interpolation visuelle** des valeurs au niveau des pics aberrants,
- En raison de la lourdeur de cette opération, dans une volonté d'automatisation, les flux aberrants ont été corrigés en postulant que $dT_{\text{aval-amont}}$ ne pouvait être inférieure à une valeur (dT_{lim}) en l'absence d'apports thermiques externes. dT_{lim} était alors déterminée graphiquement pour chaque capteur et les $dT_{\text{aval-amont}}$ aberrantes recalculées **automatiquement par interpolation** entre les valeurs correctes. On recalculait ensuite les flux de sève à partir de ces nouvelles valeurs.

Ces deux méthodes de correction donnent des valeurs de transpiration quotidienne égales à 0,1 mm.j⁻¹ près, soit entre 1 et 5 % d'écart. La cinétique obtenue est conforme à celle attendue et elle sera validée chapitre 3. Certains travaux laissent penser que de tels phénomènes s'expliquent par la mauvaise estimation du flux de chaleur stocké dans la tige (Grime *et al.*, 1995a). Pourtant, il a été vérifié que la seule correction du flux stocké ne suffit pas à rétablir des valeurs de transpiration instantanée d'un ordre de grandeur acceptable. Il a donc fallu admettre que des arrivées d'énergie incontrôlées perturbaient les mesures.

Certaines courtes périodes (jours isolés ou périodes de trois jours) ont été marquées par l'absence de données de flux de sève pour certains pieds. Lorsque c'était possible, les valeurs manquantes ont été reconstituées par **corrélation linéaire** entre les valeurs du capteur défectueux et celles d'un ou plusieurs autres capteurs. Le coefficient de détermination est toujours supérieur à 0,90 et l'erreur sur la valeur reconstituée ne dépasse jamais 0,15 mm (environ 8 % de la transpiration quotidienne).

2.4. Évaporation du sol nu

L'évaporation du sol sous couvert est difficile à estimer. Depuis quelques années, l'emploi de mini ou micro-lysimètres s'est généralisé. Leur simplicité d'installation et d'utilisation en font des outils robustes même si le principe théorique qu'ils sous-tendent est discutable.

2.4.1. Principes

Les mini-lysimètres et micro-lysimètres sont des cylindres de PVC ou de métal remplis de sol **non perturbé**. Ils peuvent être scellés par leur fond ou non, réutilisables en l'état ou recyclés périodiquement.

Le principe de la mesure de l'évaporation par ces appareils est simple : en l'absence de pluies, les variations de poids du lysimètre sont uniquement dues à une perte en eau par **évaporation**. On écrit :

$$ER = P - \frac{\Delta M}{S} \quad \text{Equ.}[2.8]$$

où P est la pluie, ΔM est la variation de masse du lysimètre et S sa surface évaporante

Ces conditions sont évidemment limitatives puisque le lysimètre est isolé des couches inférieures. Ainsi, lorsque le lysimètre est scellé, les eaux de pluies se concentrent dans le lysimètre qui présente de ce fait une évaporation plus forte que le sol alentour juste après la pluie. À l'inverse, lorsque le lysimètre est drainant, l'eau de pluie s'évacue rapidement mais le sol du lysimètre, une fois sec, n'est pas rechargé par remontées capillaires comme c'est le cas

pour la surface du sol en place. L'évaporation est donc plus faible en sol sec. Certains travaux mentionnent néanmoins que l'extraction racinaire dans la couche de surface peut induire des perturbations dans l'estimation de l'évaporation en diminuant l'humidité de la couche de surface du sol alors que les lysimètres demeurent plus humides (Klocke *et al.*, 1990 ; Yunusa *et al.*, 1993a-b). Cette situation n'est cependant pas préoccupante sous vigne étant donné que peu de racines sont présentes dans la couche 0-20 cm, concernée par la mesure de l'évaporation par mini-lysimètres (Champagnol, 1984 ; Stevens et Nicholas, 1994).

Les articles publiés sur la mesure ont principalement porté sur la connaissance des dimensions «idéales» des lysimètres et du protocole à suivre pour rester proche des phénomènes réels (Boast et Robertson, 1982 ; Shawcroft et Gardner, 1983 ; Klocke *et al.*, 1990 ; Daamen *et al.*, 1993 ; Evett *et al.*, 1995). La lecture de ces différentes publications révèle que les lysimètres donnent généralement de bons résultats quant à l'évaporation réelle. Les lysimètres utilisés ont le plus souvent une longueur de 10 à 30 cm et un diamètre de 5 à 20 cm, mais il apparaît que le diamètre utilisé n'a pas d'influence sur la qualité de la mesure, pas plus que la longueur (Daamen *et al.*, 1993).

Les plus petits de ces appareils, appelés micro-lysimètres, sont généralement remplis et mis en place chaque jour et relevés en fin de journée. Les autres, appelés mini-lysimètres peuvent rester en place sur le terrain (Shawcroft et Gardner, 1983), même si certains auteurs préconisent de les renouveler tous les 3 jours pour que l'humidité du lysimètre reste proche de celle du sol alentour (Boast et Robertson, 1982 ; Lascano et Van Bavel, 1986 ; Daamen *et al.*, 1993).

Dans tous les cas, les micro- et mini-lysimètres ne peuvent fonctionner en période pluvieuse. Ceci est dû aux problèmes de quantité d'eau de pluie réellement reçue par le lysimètre. D'une part, on ne contrôle pas la quantité de pluie parvenant à la surface du lysimètre à cause des problèmes de ruissellement et d'interception par le feuillage notamment. D'autre part, selon la construction du lysimètre (drainant ou non), toute l'eau qui s'infiltrera stagnera ou au contraire s'évacuera par le fond.

2.4.2. Matériel

Les lysimètres utilisés (fig.2-5) ont été fabriqués en PVC de 15 cm de diamètre intérieur. Leur longueur égale 25 cm. Le PVC a été préféré au métal en raison de sa plus grande souplesse d'utilisation. Ce choix se trouve conforté par Evett *et al.* (1995) qui montrent l'intérêt d'opter pour le matériau qui a la plus faible conductivité thermique.

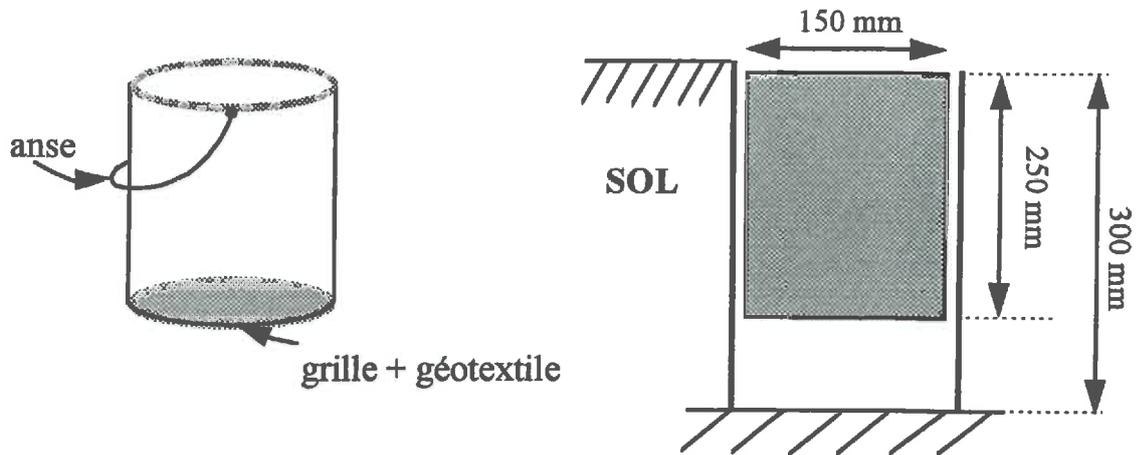


Figure 2-4 : Présentation et installation des mini-lysimètres

Les lysimètres ainsi créés ont été installés dans la parcelle en plusieurs étapes :

- humidification préalable du sol dans une zone éloignée des placettes de mesures
- enfoncement des lysimètres (biseautés) à la massette dans ce sol humide
- arrachage des lysimètres après ouverture du sol alentour
- fermeture des lysimètres par une grille et un géotextile (non imperméable)
- ressuyage hors sol des lysimètres
- installation en place dans des pré-trous prévus aux dimensions des lysimètres et renforcés par une chemise en PVC de diamètre juste supérieur (18 cm)

Cette installation permet un relevé rapide des masses et une remise en place aisée.

Les lysimètres ont été laissés en place toute la saison de mesure. Un renouvellement n'aurait pu être envisagé en raison du sol sec et croûté en surface en plein été. Les pesées étaient effectuées au même rythme que les relevés d'humidité du sol : **deux fois par semaine à une heure fixe**. En cas de pluie, certains relevés ont été rapprochés (relevés quotidiens) mais sans que ç'ait été systématique. Les pesées étaient faites sur une balance de portée maximale de 16 kg à la précision de 1 g, soit **0,06 mm** (environ 10 % de l'évaporation lorsque le sol est sec).

En fin de saison, les lysimètres sont apportés au laboratoire puis séchés à l'étuve (110°C pendant 48 h) afin de déterminer leur densité apparente et leur humidité pondérale.

2.4.3. Difficultés et traitements

Les difficultés expérimentales de la technique sont réduites du fait de la simplicité de la mesure.

Les principaux problèmes sont liés aux pluies et au ruissellement. En cas de forte pluie, une partie de l'eau parvenant au sol ne s'infiltré pas mais ruisselle. La quantité d'eau réellement infiltrée n'est pas connue. De plus, le ruissellement peut apporter des sédiments sur les lysimètres de l'inter-rang (le phénomène est inexistant sur les lysimètres du rang grâce à une position surélevée et une structure moins compacte). **La mesure en période de forte pluie est donc systématiquement éliminée** (sauf si l'on est sûr de l'absence de ruissellement). Lorsqu'il y a eu sédimentation sur le lysimètre, celui-ci est débarrassé de la couche excédentaire puis réutilisé tel quel.

2.5. Mesures sur le végétal

Elles peuvent être classées en deux grandes catégories : des mesures **descriptives** de l'appareil végétatif (feuilles, sarments) et des mesures de **fonctionnement physiologique**. Les premières ont été suivies régulièrement alors que les secondes, plus lourdes à mettre en œuvre, sont effectuées ponctuellement.

L'ensemble des mesures descriptives était assuré en grande partie par les techniciens du laboratoire de Viticulture de l'INRA de Montpellier. Les mesures physiologiques étaient réalisées par nos soins.

2.5.1. Mesures descriptives

Elles ont pour but d'appréhender d'une part la **cinétique de croissance** de la vigne au cours de la saison, d'autre part d'établir une relation entre le **développement végétatif total** et la **consommation en eau** des ceps. C'est pourquoi elles ont pour la plupart été menées sur les ceps dont la transpiration était suivie.

Les parties étudiées sont :

- **les rameaux** : 3 ou 4 rameaux par cep équipé d'un dispositif de mesure de la transpiration étaient **palissés** verticalement (1993) ou horizontalement (1994) (38 rameaux au total). Leur **allongement** a été suivi de façon hebdomadaire de mai à août 1993. Deux mesures ont été faites en 1994 (floraison et véraison). Le **poids de bois de**

taille (P_{BT}) était également relevé par sarment et par pied après chacune des expérimentations (décembre 93 et 94). Il était échantillonné sur les 20 pieds de chaque placette (1993 et 1994) plus sur 40 pieds répartis en 2 placettes et 41 distribués sur la totalité d'un rang (1994).

- **les feuilles** : leur surface a été suivie par une **méthode non destructive** mise au point par Carbonneau (1976a,b) sur les rameaux palissés. Cette méthode relie la surface foliaire (SF) à la somme des longueurs des nervures médianes (SL). La relation a été établie par échantillonnage destructif et planimétrie des feuilles recueillies :

$$SF = 0,101 SL^2 + 5,245 SL$$

$$r^2 = 0,97$$

Le fort développement végétatif de la Syrah rend les mesures extrêmement lourdes si bien qu'elles n'ont pu être répétées que trois ou quatre fois pendant l'été. En 1994, une seule mesure de surface foliaire, **par méthode destructive** (prélèvement le 25 août, planimétrie et pesée) a permis de connaître la surface foliaire maximale atteinte en fin de croissance (en négligeant la sénescence) par chacun des pieds de vigne portant un capteur de flux de sève.

- la **hauteur du rang de vigne** et sa **largeur** ont été mesurées trois fois en 1994 par photographies ; la **porosité du feuillage** a également été estimée à deux reprises par photographie perpendiculairement au rang et analyse d'images. Ces mesures morphologiques avaient pour but la calibration du modèle d'interception du rayonnement de Riou *et al.* (1989) (Chapitre 1 - § 2.1.3.)

La cinétique de croissance tracée à l'aide du suivi des longueurs de rameaux en 1993 a été appliquée à la modification des paramètres morphologiques du rang de vigne (croissance en hauteur et largeur et décroissance de la porosité) jusqu'à atteindre les valeurs finales mesurées. Ne possédant pas de mesures d'allongement des rameaux en 1994, la croissance a été supposée similaire à celle de 1993 compte tenu des conditions climatiques de la période de croissance proches entre les deux années.

2.5.2. Mesures de l'état hydrique de la plante

Ce furent exclusivement des mesures de potentiel foliaire. Elles ont été réalisées à la bombe de Scholander sur quelques journées ensoleillées (2 jours en 1993 ; 3 jours en 1994). Six feuilles par cep, exposées à la lumière solaire directe, étaient prélevées l'une après l'autre. Elles étaient ensuite portées au poste fixe de mesure dans un sachet plastique pour éviter leur dessiccation (maximum 80 m de distance).

Le protocole minimal consistait à mesurer le **potentiel foliaire de base** (avant l'aube) et le **potentiel foliaire maximal** (vers midi solaire). Le suivi des potentiels sur des journées entières a permis d'observer sa cinétique quotidienne.

Des mesures de conductance stomatique auraient dû être menées en parallèle mais des problèmes logistiques (matériel de mesure et personnel technique) nous ont contraints à les abandonner.

3. CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE DU SOL

3.1. Objectifs

Pour réaliser le bilan hydrique d'une culture à partir de mesures d'humidité du sol, il est nécessaire d'appréhender le sens des flux d'eau au sein du profil de sol (Daudet et Vachaud, 1977). Si l'on souhaite en plus caractériser les zones exploitées par les plantes pour leur alimentation en eau, il est utile de pouvoir quantifier ces flux.

L'objet de la caractérisation hydrodynamique du sol est d'accéder aux paramètres permettant de calculer les flux à l'intérieur du profil de mesure. Elle consiste donc en la recherche des relations entre potentiel matriciel de l'eau du sol (h) et humidité ($h(\theta)$) et entre potentiel matriciel et conductivité hydraulique ($K(h)$). La première relation permet de calculer un potentiel à partir de l'humidité lorsque, par exemple, on se situe en dehors de la gamme de potentiels pouvant être mesurés par les tensiomètres. La seconde est indispensable à l'utilisation de la loi de Darcy sur les transferts d'eau en milieu non saturé.

À partir de la connaissance des matériaux du sol et de leurs caractéristiques hydrodynamiques, on peut envisager de synthétiser les résultats obtenus sur échantillons locaux à l'ensemble d'une parcelle.

3.2. Méthodes et échantillonnage

Dans l'expérimentation réalisée, la caractérisation a été réalisée de trois façons différentes. Deux méthodes de laboratoire permettent, à partir d'un échantillonnage limité, de rattacher un matériau à des courbes caractéristiques ($h(\theta)$ et $K(h)$). Une méthode de terrain fournit les moyens d'étendre les résultats obtenus localement à l'échelle de la parcelle grâce à un échantillonnage distribué spatialement.

La gamme de potentiels mesurables par les tensiomètres est limitée de quelque dizaines de millibars à environ -800 mbars. Les méthodes de laboratoire permettent d'étendre la caractérisation vers les faibles potentiels. Une des grandes difficultés des caractérisations hydrodynamiques est d'accéder aux relations recherchées dans les zones de forts potentiels (proche de la saturation). Ainsi, pour compléter la caractérisation hydrodynamique de la parcelle expérimentale étudiée, les conductivités hydrauliques à saturation et à -10 mbars de potentiel ont été déterminées *in situ*, ainsi qu'une détermination approximative de la conductivité à des potentiels supérieurs à -100 mbars.

3.2.1. Caractérisation en laboratoire par la méthode des presses à plaques

a) Méthode

La méthode des presses à plaques consiste à déterminer la teneur en eau d'un agrégat à un potentiel déterminé. Elle permet donc d'établir une relation $h(w)$ entre l'humidité pondérale (w) et le potentiel. Pour avoir des détails sur la mise en œuvre de la méthode, on peut se référer à l'ouvrage de Smith et Mullins (1991 ; pp.128-130).

Le mode opératoire revient à placer des petits échantillons (2-3 cm environ) de sol non remaniés et saturés préalablement sur une plaque poreuse. Le tout est mis dans une enceinte hermétiquement close. Une pression fixe est appliquée dans la «chambre» où sont placés les échantillons. L'eau est recueillie sous la plaque poreuse. On arrête l'expérimentation à l'équilibre des potentiels, c'est-à-dire lorsque la quantité d'eau récupérée n'augmente plus. L'humidité des agrégats est alors déterminée.

Cette technique permet d'accéder à des potentiels très faibles (-15 bars) ou assez élevés (-30 mbars), ce qui est difficile voire impossible par tensiomètres. Cependant, portant sur des agrégats de petite taille, il est nécessaire d'effectuer de nombreuses répétitions pour une bonne représentativité de la mesure.

Pour les besoins de l'étude, nous avons choisi de déterminer les humidités pondérales à 6 potentiels dans la gamme des potentiels auxquels les plantes peuvent théoriquement extraire de l'eau du sol : -30 ; -100 ; -300 ; -1000 ; -3000 ; -15000 mbars.

b) Échantillonnage

Trois profondeurs sont échantillonnées par profil pédologique (65, 135 et 255 cm sur le profil ouest et 50, 150 et 250 sur le profil est). Elles sont équivalentes à un prélèvement

dans la couche Ap et deux dans la couche C par profil. À chacune de ces profondeurs, 2 mottes de 30 cm chacune sont recueillies intactes et rapportées au laboratoire. Elles sont portées à saturation progressivement (1 à 2 semaines) par humidification par ascension. Plusieurs agrégats sont ensuite prélevés dans la motte et mis en enceinte à l'un des potentiels de la gamme étudiée.

L'expérience a été répétée sur 7 à 12 agrégats par motte et par potentiel pour avoir une valeur représentative de la motte.

3.2.2. Caractérisation au laboratoire par la méthode de Wind

a) Méthode

La méthode de Wind (1968, cité par Tamari, 1992) permet de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques d'un échantillon de sol considéré comme homogène en tout point.

Le mode opératoire consiste à suivre l'évolution du profil tensiométrique et de la teneur en eau moyenne d'un cylindre de sol au cours de son dessèchement. Une courbe de rétention est ajustée aux valeurs de potentiels mesurées de façon itérative de façon à ce que l'humidité moyenne calculée soit la plus proche possible de l'humidité moyenne mesurée. L'ajustement se fait par la paramétrisation du modèle de Van Genuchten (1980, cité par Tamari, 1992) :

$$h = \frac{1}{\alpha} \cdot \left[\left(\frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{\theta_{mes} - \theta_{res}} \right)^{\frac{n}{n-1}} - 1 \right]^{1/n} \quad \text{Equ.}[3.1]$$

où h est le potentiel matriciel (mètres d'eau),

θ_{sat} , θ_{res} et θ_{mes} sont respectivement les humidités volumiques à saturation, résiduelle et mesurée (expérimentale) ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) déterminées par optimisation du modèle,

n et α sont les paramètres du modèle.

Ainsi, une valeur d'humidité est associée à une valeur de potentiel mesurée. L'évolution des profils d'humidité et de potentiels au sein de l'échantillon permettent de calculer la conductivité hydraulique (K) par la méthode «du profil instantané» (Watson, 1966, cité par Tamari, 1992). Le modèle théorique de Mualem (1976, cité par Tamari, 1992) modifié par Van Genuchten (1980, cité par Tamari, 1992) est alors ajusté aux couples $\{K ; h\}$ pour une détermination hydrodynamique complète :

$$\Theta(h) = (1 + (\alpha \cdot h)^n)^{-m} \quad \text{Equ.}[3.2a]$$

et
$$K(h) = K_{sat} \cdot \Theta^{0,5} \cdot \left(1 - \left(1 - \Theta^{1/m}\right)^m\right)^2 \quad \text{Equ.}[3.2b]$$

n dépendant de m :
$$n = \frac{1}{1 - m}$$

la valeur de K_{sat} déterminée sur le terrain est entrée comme constante du modèle ; α et m sont les constantes de l'ajustement.

Les détails de la discrétisation de l'échantillon et des procédures itératives employées sont donnés par Tamari (1992) et Mohrath *et al.* (1994).

La méthode impose de travailler sur des échantillons homogènes pour que les circulations d'eau calculées par mesures locales dans le cylindre soient représentatives de l'ensemble du cylindre. Pour des raisons similaires, toute discontinuité accidentelle comme des racines ou des fentes de retrait sont préjudiciables à la qualité de la manipulation.

En début de dessèchement, les gradients tensiométriques ne sont pas suffisants pour être mesurés. De plus, l'expérimentation utilise des tensiomètres pour l'estimation des potentiels au sein du cylindre. Par conséquent, l'ajustement du modèle de Mualem-Van Genuchten se fait sur un nuage de points distribué dans une gamme de potentiels réduite (de -100 à -700 mbars).

Pour les matériaux sableux, la zone sensible de l'ajustement se situe entre des potentiels compris entre la saturation et -100 mbars car c'est dans cette gamme que la variation de conductivité est la plus forte. Pour élargir la gamme tensiométrique d'ajustement du modèle de Van Genuchten en dehors de la gamme de mesure de disponible par la méthode de Wind, les conductivités hydrauliques entre la saturation et -100 mbars déterminées *in situ* (voir § 3.2.4, 3.2.5 et 3.2.6) sont imposées au modèle. Ceci s'est révélé particulièrement nécessaire pour les matériaux sableux dans lesquels les variations de conductivités sont très fortes aux forts potentiels.

b) Échantillonnage

Environ 4 cylindres sont prélevés par profondeur, aux mêmes cotes que les mottes pour presses à plaques. Une série de prélèvements plus profonds a également été réalisée pour compléter l'échantillonnage. Elle a concerné le profil est à 380 cm de profondeur.

Le prélèvement est effectué par enfoncement du cylindre (biseauté) à la masse puis extraction après ouverture du sol autour.

Les cylindres sont portés à saturation par ascension capillaire pour éviter au maximum le piégeage d'air. Étant donné la dureté du matériau et son caractère parfois lité, peu

d'échantillons prélevés satisfont aux exigences d'homogénéité du sol dans le cylindre. D'autres inconvénients sont à signaler :

- le mode de prélèvement utilisé provoque de fréquentes cassures internes de l'échantillon si bien que les gradients sont impossibles à suivre ;
- les tensiomètres cassent fréquemment à l'enfoncement dans le cylindre en raison de la dureté des échantillons ;
- les échantillons sableux présentent des gradients de potentiels trop forts pour être mesurés avec précision.

En définitive, compte tenu de ces problèmes, peu de répétitions ont été disponibles. Les répétitions figurent dans le tableau 3-1. Pour la détermination des courbes de rétention ($h(\theta)$), il n'est pas nécessaire que des gradients de potentiels apparaissent, ce qui explique un plus grand nombre d'échantillons exploitables que dans le cas de la relation $K(h)$.

Horizon	Relation	Profil ouest	Profil est
Ap/B	$h(\theta)$	1	1
	$K(h)$	1	1
C	$h(\theta)$	2	5
	$K(h)$	2	3

Tableau 3-1 : Nombre de répétitions disponibles pour la détermination des courbes hydriques caractéristiques du sol

3.2.3. Caractérisation *in situ* de la relation $h(\theta)$

a) Méthode

Elle consiste à rapprocher les mesures d'humidité obtenues par sonde à neutrons des mesures de potentiels fournies par les tensiomètres. Elle permet donc l'obtention de relations $h(\theta)$.

Elle a été réalisée pour chaque tensiomètre du protocole décrit précédemment. Comme il n'y avait qu'un point de mesure du potentiel autour de 250 cm de profondeur, le potentiel mesuré en ce point est relié à l'humidité moyenne de la placette (moyenne des deux tubes de mesure) à cette profondeur.

b) Échantillonnage

L'échantillonnage effectué porte sur les mesures de 1994 car les potentiels étaient hors de la gamme de mesure des tensiomètres pendant toute l'expérimentation 1993. Il consiste en 49 séries temporelles de couples potentiel/humidité pour les tensiomètres «de surface» (entre 40 et

160 cm) et 11 séries pour les tensiomètres profonds. Ces séries sont distribuées dans les cinq placettes.

Le rapprochement de ces couples de mesures avec les courbes théoriques obtenues en laboratoire fournit un élément de caractérisation hydrique spatialisée dans la parcelle.

3.2.4. Détermination *in situ* de la conductivité hydraulique sous 10 mbars de succion par infiltrométrie à disques

a) Méthode

La conductivité sous 10 mbars de dépression a été mesurée par infiltrométrie à disques.

Le protocole consiste à suivre l'humectation du sol sous un disque au dessus duquel est imposée une dépression (de 0 à 20 mbars) fixée par un vase de Mariotte. L'expérimentation cesse lorsque le débit d'écoulement est stabilisé. Une loi simplifiée d'écoulement à débit constant à travers un disque a été énoncée par Philip (1986, cité par Thony *et al.*, 1991) :

$$q_{-10 \text{ mbars}} = K_{-10 \text{ mbars}} + \frac{4 \cdot \phi}{\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad \text{Equ. [3.3]}$$

où q est le débit écoulé, K , la conductivité hydraulique du sol, ϕ le potentiel matriciel d'écoulement et r le rayon du disque d'application.

Étant donnée la difficulté d'estimation de ϕ , l'expérimentation est réalisée avec deux disques de rayons différents, ce qui permet de contourner le problème. La conductivité est alors calculée par :

$$K_{-10 \text{ mbars}} = \frac{q_1 \cdot r_1 - q_2 \cdot r_2}{r_1 - r_2} \quad \text{Equ. [3.4]}$$

Les rayons utilisés étaient de 8 et 30 cm.

b) Échantillonnage

Selon Thony *et al.* (1991), 6 répétitions minimum sont nécessaires pour s'abstraire de la forte variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques du sol.

En fonction de l'espace disponible pour répéter les essais, 2 à 6 manipulations fournissent des résultats exploitables. Les échantillons sont classés par type de matériau et par horizon. La synthèse des échantillons disponibles est reportée tableau 3-2.

Profil	Profondeur (cm) et horizon	Matériau	Nombre de répétitions grand disque / petit disque
OUEST	65 - Ap/B	limon argilo-sableux	4 / 3
	135 - C	sable non induré	6 / 3
	260 - C	sable induré	4 / 4
EST	50 - Ap/B	limon argilo-sableux	5 / 5
	150 - C	sable non induré	5 / 6
	255 - C	sable non induré	4 / 4
	380 - C	sable non induré	2 / 2
	380 - C	sable induré	3 / 3

Tableau 3-2 : Nombre de répétitions disponibles pour la détermination de la conductivité hydraulique à -10 mbars.

3.2.5. Détermination *in situ* de la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat})

a) Méthode

La conductivité hydraulique à saturation a été mesurée par la méthode des anneaux de Müntz.

Deux anneaux concentriques de taille différente sont implantés dans le sol. Le petit, en position centrale, est le siège de la mesure. L'anneau extérieur garantit que les flux d'eau restent verticaux et que les «fuites» latérales sont minimales. Le sol est saturé dans l'anneau central préalablement à toute expérimentation. La détermination de la conductivité à saturation est réalisée par le suivi de la vitesse d'infiltration d'eau sous une faible pression (1 cm) jusqu'à stabilisation du flux.

b) Échantillonnage

Comme pour les prélèvements d'échantillons pour le laboratoire, la conductivité à saturation a été déterminée en 3 ou 4 profondeurs par profil (mêmes cotes que les prélèvements de cylindres pour la méthode de Wind). Pour les mesures en surface (horizon Ap), il a été possible de répéter l'expérience 4 fois sur chaque profil. En revanche, la répétition des mesures plus profondes (horizons C) était soumise à une contrainte de place : seulement deux à trois répétitions ont pu être réalisées sur chaque horizon.

3.2.6. Conductivité aux potentiels supérieurs à -100 mbars

Elle a été calculée à partir des mesures d'humidité et de potentiel hydrique du sol en début de saison de mesure. Nous avons estimé que les variations de stock mesurées jusqu'au mois d'avril étaient principalement imputables à l'évaporation directe du sol et au drainage. Nous négligeons donc l'extraction racinaire à cette période.

Ainsi, à partir des mesures de gradients de potentiels en profondeur (autour de 260 cm) et des variations de stock entre 0 et 260 cm amputées de l'évaporation, il est possible de calculer la conductivité hydraulique par la loi de Darcy :

$$K(h) = \frac{-(\Delta S - ER)}{\frac{\partial H}{\partial z}} \quad \text{Equ.}[3.5]$$

Le calcul a été possible sur quatre placettes sur cinq (n° 1, 2, 3, 5), la placette 3 fournissant deux points de mesures (=deux périodes de 15 jours), les autres une seule. Au total, 6 points ont donc été rajoutés et utilisés pour les ajustements d'une courbe de conductivité. Le classement des matériaux de chaque placette a montré que 3 points se rattachent aux matériaux «non indurés» (placettes 1 et 2) et 3 aux matériaux «indurés» (placettes 3 et 5). Compte tenu de la similitude des potentiels en profondeur en début de saison sur les placettes 4 et 5, la placette 4 sera également rattachée aux matériaux «indurés».

3.3. Résultats

3.3.1. Pré-traitements

a) Relations humidité/potentiel

Toutes les courbes de rétention mesurées à partir des cylindres ont été conservées. Elles ont été traduites en relations $h(w)$ (entre le potentiel et l'humidité pondérale) pour pouvoir être rapprochées des couples de mesures tensio-neutroniques sans les problèmes de densité apparente du sol. Dans le souci de conserver un ajustement proche des données expérimentales, il a été choisi de ne pas imposer de valeurs d'humidité résiduelle et à saturation pour l'ajustement ce qui peut expliquer certaines valeurs élevées de θ_{res} . Les valeurs des ajustements ne sont pas utilisées pour reconstituer les données. Les courbes de rétention ne servent qu'à effectuer des rapprochements entre les mesures tensio-neutroniques et les courbes de conductivité potentielle.

b) Relations conductivité/potentiel

Les relations entre la conductivité et le potentiel matriciel ont été ajustées sur des réunions d'échantillons similaires traités par la méthode de Wind associées aux mesures de conductivité hydraulique à saturation et à -10 mbars obtenues *in situ*. De cette manière, nous avons ajusté deux courbes de conductivité selon l'équation de Van Genuchten pour les horizons limono-argilo-sableux (une pour chaque profil).

Les résultats qui suivent montrent que les mesures tensio-neutroniques réalisées en matériaux sableux (horizons C) ne peuvent être rapprochées des courbes théoriques obtenues par le modèle de Van Genuchten. La cause est que les mesures tensiométriques de la méthode de Wind ne fournissent pas de valeurs de gradients pour des potentiels entre 0 et -100 mbars, entraînant l'imprécision de l'ajustement théorique dans cette gamme de potentiels. Ainsi, les relations $K(h)$ pour les horizons sableux ont été ajustées par tronçons en fonction de la gamme de potentiels parcourue. Les relations décrites relient le logarithme de la conductivité à une fonction du potentiel :

- entre la saturation et -10 mbars (mesure à l'infiltromètre à disques), un segment de droite sert d'ajustement.
- entre -10 mbars et le potentiel des premières mesures disponibles par la méthode de Wind (h_{lim}), une relation logarithmique est utilisée car elle est la plus proche de l'évolution attendue entre la conductivité et le potentiel.
- au-delà de ce potentiel limite, les points obtenus par la méthode de Wind sont reliés par une demi-droite.

La deuxième gamme de potentiels représente la partie sensible de la caractérisation puisque c'est celle pour laquelle la variation de conductivité est la plus forte pour une faible variation de potentiel. Pour améliorer la qualité de la régression logarithmique réalisée, les estimations de la conductivité obtenues à partir des relevés tensio-neutroniques ont été ajoutées aux points préexistants (voir §3.2.6.).

En définitive, deux types de matériaux sableux ont été identifiés : un matériau induré caractéristique de la partie ouest de la parcelle aux fortes profondeurs (placettes 3, 4, 5 ; voir § 3.3.3) et un matériau moins induré rattaché plutôt aux horizons sableux de la partie est de la parcelle (placettes 1 et 2).

3.3.2. Caractérisation par horizon (par matériau)

a) Horizons Ap et B

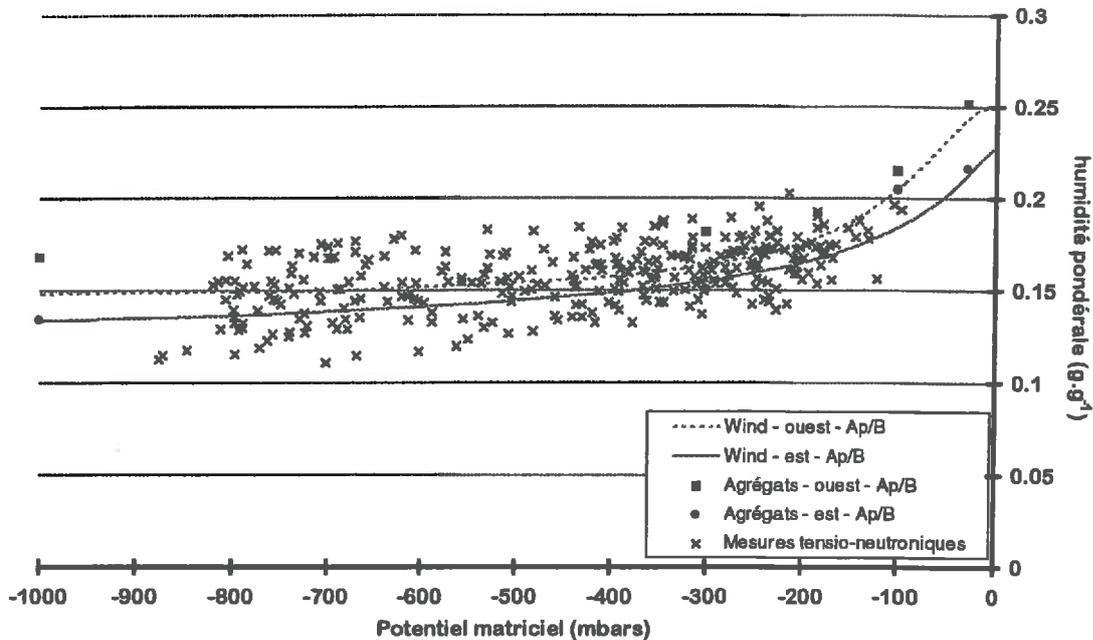


Figure 3-1a : Courbes de rétention des couches limono-argilo-sableuses

Matériau	Profil	Profondeur (cm)	α	θ_{sat} ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	θ_{res} ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	n
Limon argilo-sableux	Ouest	65	1,302	0,385	0,216	2,144
	Est	50	1,974	0,350	0,163	1,500

Tableau 3-3a : Paramètres des relations $h(\theta)$ déterminées par la méthode de Wind pour la résolution de l'équation [3.1] pour les horizons Ap et B.

Ces deux couches ont été traitées conjointement en raison de leur similitude de matériau (limon argilo-sableux) menant, comme nous allons le voir, à une similitude de comportement hydrique.

La mise en regard des courbes de rétention obtenues par les différentes techniques (tableau 3-3a et figure 3-1a) montre la bonne homogénéité des résultats. Les mesures tensio-neutroniques sont placées entre les courbes ajustées par la méthode de Wind et en accord avec les mesures sur agrégats. Les profondeurs concernées par cette caractérisation sont variables selon les placettes (voir §3.3.3).

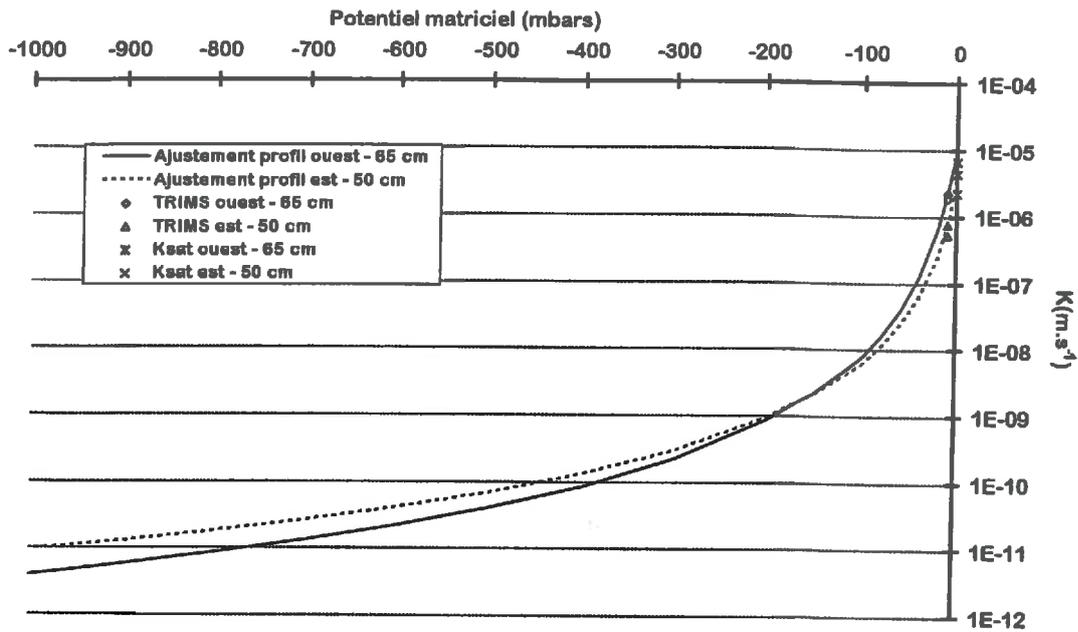


Figure 3-1b : Courbes de conductivité hydraulique des horizons limono-argilo-sableux (Ap/B)

Matériau	Profil	Prof. (cm)	K_{nat} (m.s ⁻¹)	α	m
Limon argilo-sableux	Ouest	65	$1,61 \cdot 10^{-5}$	5,0011	0,3501
	Est	50	$8,45 \cdot 10^{-6}$	4,5081	0,2634

Tableau 3-3b : Paramètres des équations [3.2a-b] pour le calcul de la conductivité hydraulique des horizons de texture limono-argilo-sableuse (horizons Ap et B).

Les courbes de conductivité dressées pour chacun des profils sont similaires (tableau 3-3b et figure 3-1b), attestant l'homogénéité de matériau des horizons limono-argileux sur les profils ouest et est.

b) Horizons C

Comme il a été dit lors de la description du sol, les horizons C, sableux, sont très hétérogènes. On peut observer cette hétérogénéité sur les courbes de rétention et les points de conductivité hydraulique.

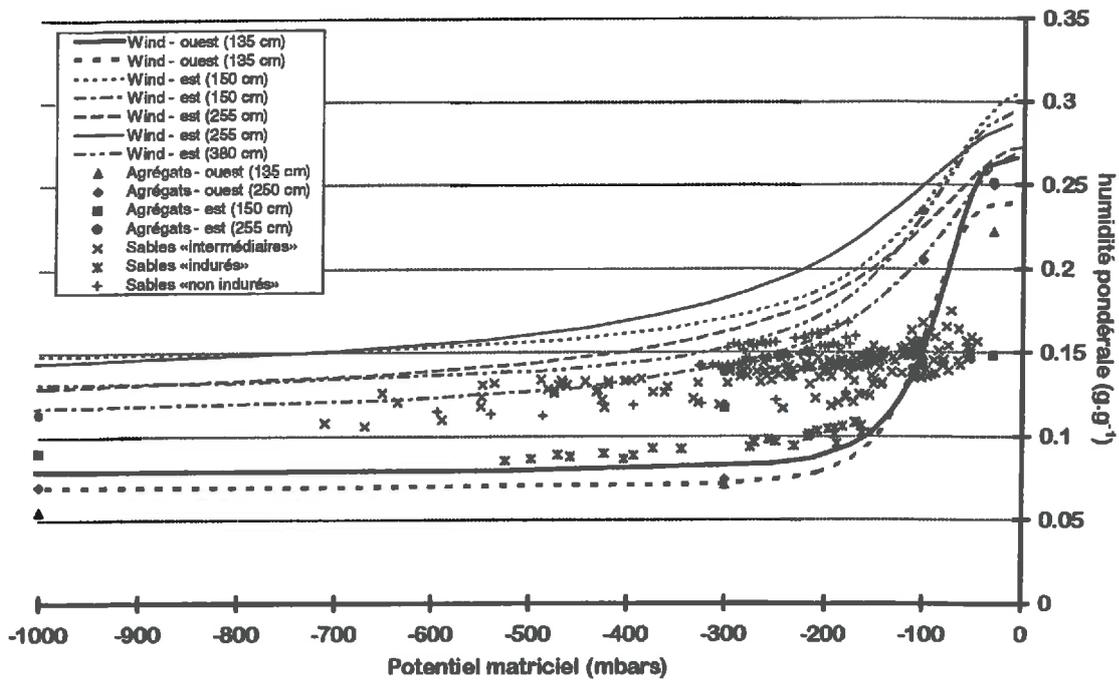


Figure 3-2a : Courbes de rétention des horizons sableux (C)

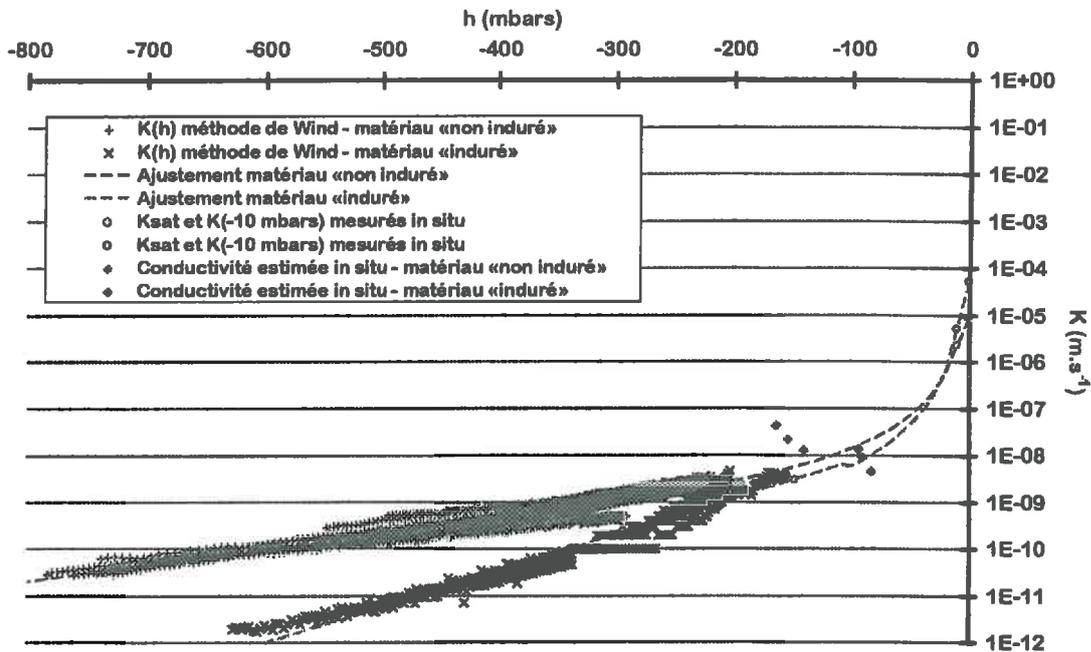


Figure 3-2b : Ajustements des relations entre conductivité hydraulique et potentiel matriciel pour les horizons sableux (C) en fonction de leur «induration»

Potentiel (h, mbars)	Équation ajustée (K en m.s ⁻¹)
-10 < h < 0	$\log(K(h)) = A \cdot h + B$
$h_{lim} < h < -10$	$\log(K(h)) = A \cdot \log(-h) + B$
-1000 < h < h_{lim}	$\log(K(h)) = A \cdot h + B$

Tableau 3-4 : Équations des ajustements utilisés pour l'estimation de la conductivité des horizons sableux en fonction de la gamme de potentiels. Les paramètres A, B et h_{lim} sont donnés par le tableau 3-5b

Matériau	Profil	Profondeur (cm)	α	θ_{sat} (cm ³ .cm ⁻³)	θ_{res} (cm ³ .cm ⁻³)	n
Sable limoneux (sables «indurés»)	Ouest	135	1,244	0,367	0,108	4,178
			1,061	0,336	0,097	4,673
Limon sableux (sables «non indurés»)	Est	150	1,196	0,426	0,196	2,315
			1,149	0,376	0,152	2,247
	Est	255	1,007	0,380	0,160	2,048
			0,820	0,400	0,181	2,139
Est	380	1,042	0,401	0,172	2,615	

Tableau 3-5a : Paramètres des relations h(θ) déterminées par la méthode de Wind (ajustement de Van Genuchten) pour les horizons C (équation [3.1]).

Matériau	Potentiel	A	B
«induré» $K_{sat} = 2,05 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$	[0;-10]	$5,82 \cdot 10^{-2}$	-5,063
	[-10;-100]	-2,920	-2,379
	[-100;-1000]	$7,74 \cdot 10^{-3}$	-7,357
«non induré» $K_{sat} = 8,64 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$	[0;-10]	$9,94 \cdot 10^{-2}$	-4,286
	[-10;-200]	-2,315	-3,216
	[-200;-1000]	$3,44 \cdot 10^{-3}$	-7,941

Tableau 3-5b : Paramètres de l'ajustement utilisé pour le calcul de la conductivité hydraulique des horizons C (tableau 3-4).

Les courbes caractéristiques des matériaux de l'horizon C se divisent en deux groupes. On peut visualiser les caractéristiques propres à chacun sur les courbes de rétention (figure 3-2a ; paramètres tableau 3-5a). Les courbes groupées de la figure 3-2a correspondent à un sol «non induré», à forte teneur en limons (limon sableux) ; elles se superposent d'ailleurs avec les courbes de rétention calculées sur les échantillons de surface aux faibles potentiels. Les autres courbes caractérisent un matériau plus sableux, souvent induré (sable limoneux, appelé par la suite matériau «induré»).

En raison de la discordance entre la répartition des points de mesures *in situ* et les courbes théoriques, les ajustements sur la conductivité ont été estimés comme expliqué au paragraphe précédent. Les équations ajustées dont données dans le tableau 3-4. Leurs paramètres figurent dans le tableau 3-5b.

Les mesures tensio-neutroniques pouvant être rapprochées du matériau «induré» sont nettement identifiables. Cependant, la majorité des mesures est située en position intermédiaire entre les deux types de courbes. Cette situation trouve deux explications complémentaires :

- la méthode de Wind travaille sur une gamme de potentiels réduite comme cela a été dit auparavant. La zone de validité des équations déterminées commence aux environs de -100 mbars pour s'achever vers -800 mbars. Ainsi, dans la zone des potentiels comprise entre 0 et -100 mbars, les courbes sont des extrapolations des relations ajustées sur les mesures.
- compte tenu des problèmes rencontrés pour le traitement des échantillons prélevés par la méthode de Wind, il est possible que les cylindres exploitables contiennent des matériaux particuliers, c'est-à-dire moins sensibles à la fissuration que le matériau dans lequel sont faites les mesures tensio-neutroniques. Cette hypothèse est appuyée par le fait que la caractérisation sur agrégats du profil est à 150 cm de profondeur suit la distribution des mesures tensio-neutroniques.

3.3.3. Synthèse des résultats : caractérisation à l'échelle de la parcelle

La répartition des matériaux le long des profils par position est représentée figure 3-3.

La logique de distribution des matériaux le long des profils est respectée : on trouve les limons argilo-sableux en surface jusqu'à une profondeur variant de 90 à plus de 140 cm. Cette distribution est conforme à la description des profils pédologiques réalisée qui montre de grandes poches limoneuses pouvant descendre à plus de 200 cm de profondeur en certains endroits.

On trouve le sable «induré» sur les placettes 3, 4 et 5, situées plutôt à l'ouest de la parcelle. Ainsi, il y aurait effectivement localisation préférentielle de ce matériau dans la partie ouest (haute) du terrain. Les mesures sur agrégats sont en accord avec cette constatation.

Les sables «non indurés» et «intermédiaires» sont distribués sur toute la parcelle de façon peu organisée. Cette hétérogénéité de distribution des sables ne correspond pas à une logique sédimentaire ou pédogénétique, comme nous l'avons signalé lors de la description du sol.

Les mesures en profondeur ont été rapprochées d'une courbe de conductivité en fonction des mesures de drainage à 260 cm (voir §3.2.6.) si bien que le calcul du flux à cette profondeur a toujours été possible.

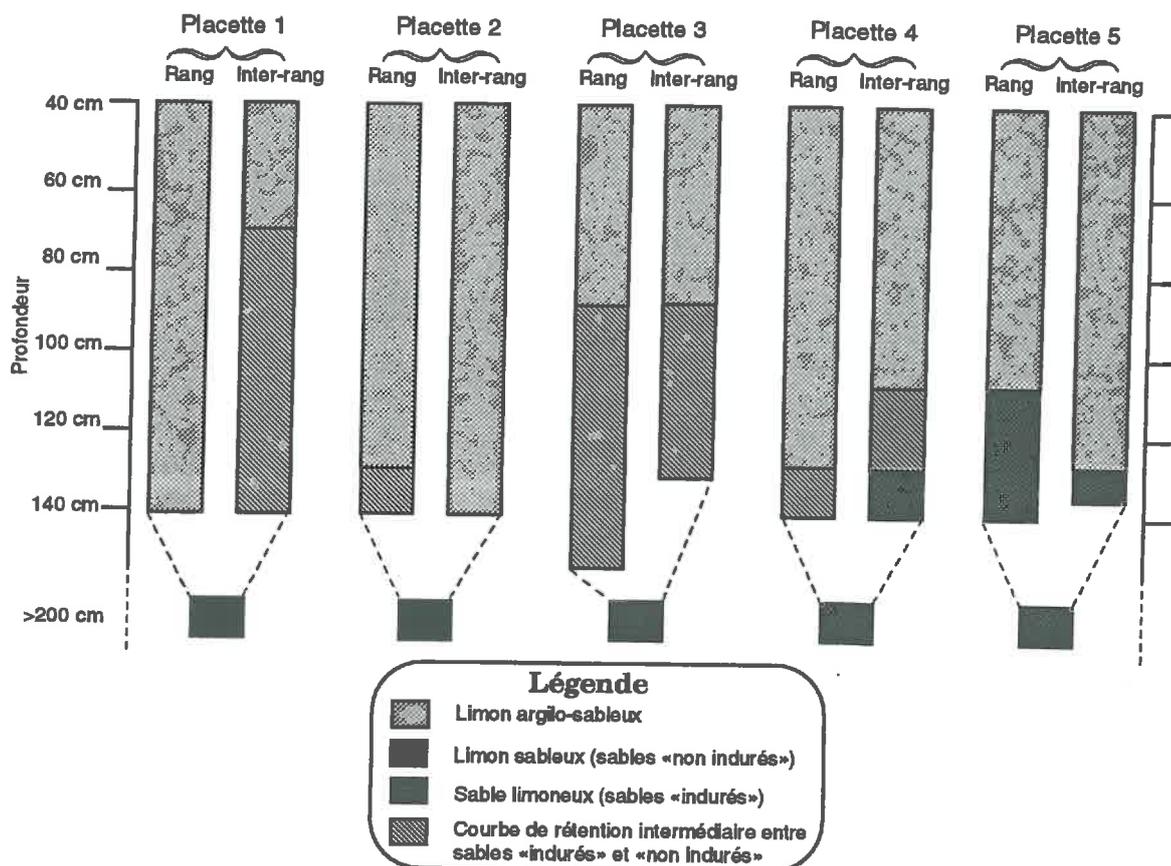


Figure 3-3 : Distribution des matériaux le long des profils de mesure. L'attribution a été réalisée en fonction des rapprochements entre les mesures tensio-neutroniques et les courbes de rétention obtenues en laboratoire par la méthode de Wind.

4. CONCLUSION SUR L'ENSEMBLE DES MESURES

Les efforts expérimentaux visent à la qualité de l'estimation de l'ETR de la parcelle de vigne. Étant données les difficultés à l'application des méthodes classiques, le choix de protocole a été fait d'estimer l'ETR de trois façons différentes de manière à recouper les valeurs. Ces trois méthodes (bilan hydrique, bilan d'énergie et séparation des flux d'évaporation et de transpiration) sont complémentaires et fournissent chacune un élément d'information différent :

- le bilan hydrique renseigne sur les zones du sol concernées par l'extraction racinaire et sur leur variabilité spatio-temporelle,
- le bilan d'énergie intègre les hétérogénéités locales liées au sol ou à la plante et fournit, de ce fait, une mesure d'ETR intégrative à la parcelle,
- les mesures séparées de l'évaporation et de la transpiration permettent de faire la part de chacun de ces flux dans la perte en eau totale de la parcelle et de leur évolution temporelle.

Par-delà ce souci d'estimation rigoureuse de l'ETR parcellaire, la distribution du matériel dans la parcelle permet d'appréhender la variabilité spatiale des différents flux à l'échelle de la parcelle et à celle de la structure en rangs du couvert, aussi bien pour l'alimentation en eau des ceps que pour l'évaporation du sol sous couvert.

L'analyse de la régulation des flux d'eau est rendue possible par les mesures couplées d'humidité du sol et de flux de sève.

Les modifications intervenues dans le protocole entre 93 et 94 sont consignées tableau 4-1. Les calendriers des mesures effectuées sont présentés en annexes.

Le chapitre suivant présente les premiers résultats et leurs interprétations expérimentales. Les détails des fonctionnements hydriques du sol et de la plante seront fournis par les chapitres ultérieurs.

ETR	Mesure	Méthode	Échantillonnage		
			1993	1994	1995
Bilan hydrique	Humidité du sol	Sonde à neutrons	10 tubes à 230 cm	10 tubes à 410 cm	Idem 1994
	Potentiel de l'eau du sol	Tensiomètres à mercure	Par placette : 6 tensiomètres de 40 à 140 cm sur rang et inter-rang	Par placette : Idem 1993 + 2 autour de 250 cm environ	-
	Humidité de surface	Gravimétrique	15 prélèvements	10 prélèvements	Idem 1994
Méthodes micro-météo	Bilan d'énergie				
	Rn	Bilanmètre	h = 3 m	Même dispositif	
	H	Fluctuations	h = 3 m	qu'en 1993	-
	G	Plaques de flux	2 x 3 sur 1 inter-rang		
TR + ER	Fluctuations				
	L.E	Anémomètre sonique + Hygromètre à krypton	h = 3 m	-	-
	TR	Manchons thermiques	-	2 ceps par placette	Idem 1994
	ER	Mini-lysimètres	3 par placette	Idem 1993	-
	Mesures sur la plante	Longueur des rameaux	Rameaux palissés	11 mesures du 18 mai au 27 juillet	2 mesures (mai et juillet)
Surface foliaire		Échantillonnage	fin juin et fin juillet	-	8 mesures du 13 juin au 31 août
		Destructive	-	25 août	31 août
Potentiel foliaire		Chambre à pression	13 et 30 juillet	6 juin, 6 et 25 juillet	8 mesures du 24 juin au 24 août
Poids de taille		Pesée	décembre 1993	décembre 1994	décembre 1995
Morphologie du rang	Photos	-	fin mai et mi juillet	-	

Tableau 4-1 : Résumé des mesures effectuées lors des deux années d'expérimentation

CHAPITRE 3

ANALYSE DE COHÉRENCE DES MESURES INDIVIDUELLES ET CONFRONTATION DE PLUSIEURS MÉTHODES D'ESTIMATION DE L'ETR D'UNE PARCELLE DE VIGNE

Ce paragraphe vise à présenter une première synthèse des résultats expérimentaux acquis. Il reste exclusivement métrologique dans une première partie, avec la validation individuelle des mesures mises en œuvre. Dans une seconde partie, l'ensemble du protocole sera validé par confrontation des données d'ETR obtenues par les différentes voies choisies.

Au préalable de l'examen des mesures, il est nécessaire de situer le climat des années d'expérimentation par rapport au climat moyen de la région de Roujan.

1. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Les conditions météorologiques des deux années expérimentales sont caractérisées par une sécheresse marquée du printemps à la fin de l'été. Celle-ci était accompagnée de fortes températures et d'ETP proches des valeurs moyennes (moyennes sur 24 ans : voir tableau 1-1).

	An	Jvr	Fvr	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Total
P	93	2,5	60,0	78,5	83,5	39,5	9,0	14,5	36,0	95,0	253,0	243,0	19,5	934,0
	94	9,0	84,5	1,5	24,0	25,0	17,0	29,5	45,0	233,0	239,0	74,0	20,0	801,5
	M	60,1	74,2	46,8	45,0	48,2	29,0	14,9	30,9	37,6	101,9	59,0	50,5	602,8
ETP	93	17,3	41,6	69,9	80,9	120,3	155,6	162,7	137,0	77,0	40,9	15,7	20,0	938,9
	94	27,8	26,7	78,0	98,4	120,8	170,1	178,9	141,4	83,6	36,8	26,8	20,5	1009,8
	M	27,8	35,9	71,7	101,5	130,4	163,1	188,2	158,9	100,5	55,3	31,2	29,9	1094,4

Tableau 1-1 : Pluviométrie et ETP Penman (en mm) en 93 et 94 sur le BV de Roujan. Comparaison à la pluviométrie moyenne (M) de Servian (commune voisine) de 1961 à 1990 et à l'ETP moyenne (M) de Montpellier-Fréjorgues de 1966 à 1990.

La pluviosité de l'année est supérieure aux valeurs moyennes (tableau 1-1), mais sa répartition est très différente de la répartition moyenne. Une année moyenne en climat méditerranéen se traduit par des **précipitations concentrées en deux périodes** : le printemps et l'automne. En effet, entre 25 et 30 % des précipitations annuelles moyennes dans la région de Pézenas tombent sur les seuls mois de février et octobre. Les précipitations ont été rares en hiver 1993 et au printemps 1994. De ce fait, **les réserves hydriques du sol étaient déjà entamées** lorsque la vigne a débourré (fin avril pour la Syrah) lors des deux années. La majeure partie des pluies annuelles est tombée en automne en 93 comme en 94.

Pendant l'été, le stock disponible pour l'alimentation hydrique des vignes n'est pas reconstitué, les pluies d'orage étant généralement rapidement évaporées sans alimenter les couches inférieures à 30 cm. Ainsi, les vignes ont connu des périodes de fortes sécheresses estivales. Ceci s'est traduit par un développement végétatif rapide et un arrêt précoce de la croissance (mi-juillet). Dans la lignée de ces avances physiologiques, les vendanges ont également été précoces, surtout en 1994 (9 septembre 1993 et 30 août 1994).

Les conditions climatiques ont donc été optimales pour une étude du régime hydrique d'une vigne en climat méditerranéen.

2. COHÉRENCE DES MESURES INDIVIDUELLES

2.1. Mesures d'humidité du sol

2.1.1. Évolution du stock hydrique

L'évolution du stock hydrique en 1993 et 1994 est montrée par les figures 2-1a et b. Le stock est mesuré sur 230 cm en 1993 et 260 cm en 1994. Les fortes pluies estivales font remonter le stock hydrique mais, comme nous l'avons expliqué précédemment, le phénomène ne touche que les 30 premiers centimètres du sol. Ces pluies ont donc *a priori* peu d'influence sur l'alimentation en eau des vignes.

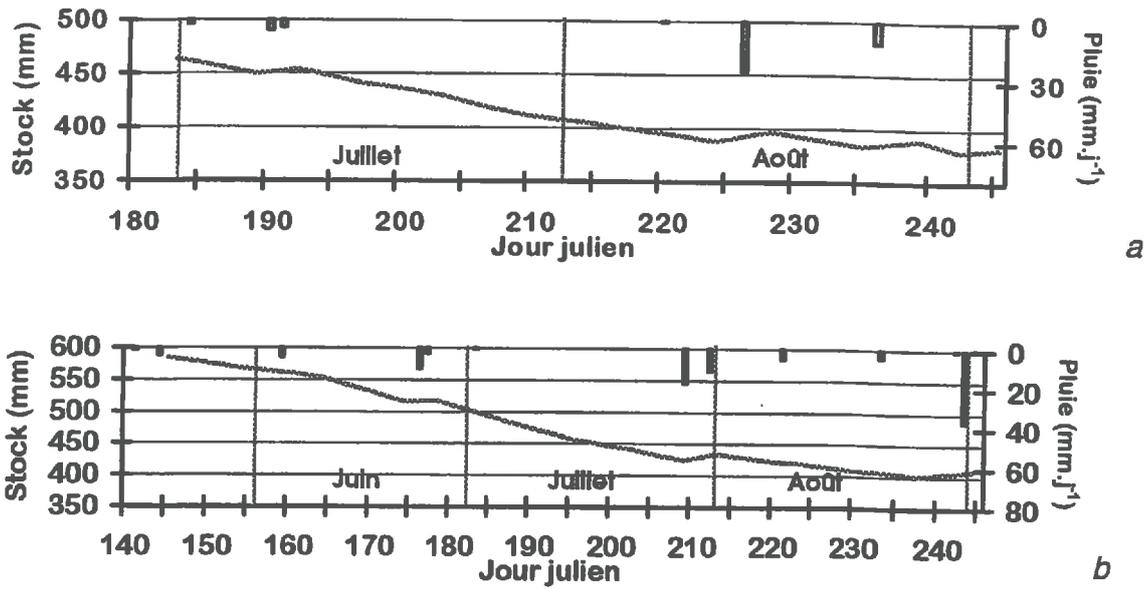


Figure 2-1 : Évolution du stock hydrique sur : (a) 230 cm en 1993 et (b) 260 cm en 1994

2.1.2. Évolution des profils d'humidité

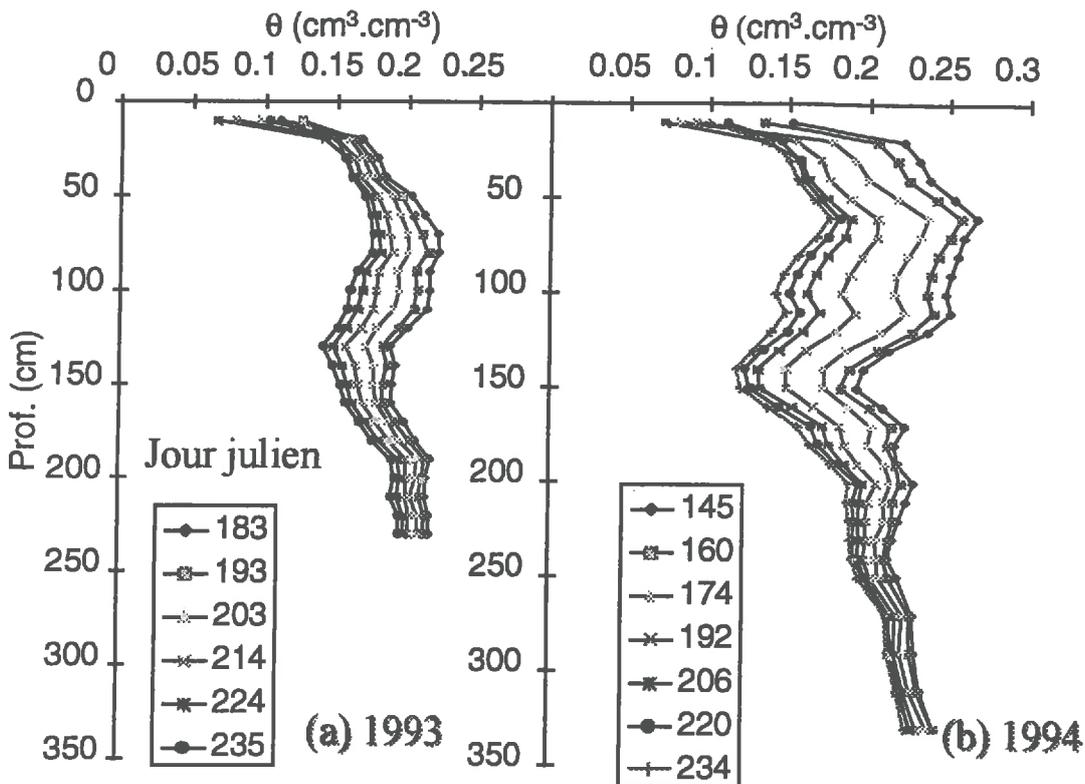


Figure 2-2 : Évolution des profils d'humidités moyens en 1993 et 1994

Les figures 2-2a et b montrent l'évolution des profils d'humidité au cours des étés 1993 et 1994. On remarque la diminution régulière de l'humidité au cours des deux années, en toute profondeur, avec néanmoins une exploitation plus marquée des couches supérieures à 200 cm.

2.2. Mesures des potentiels hydriques du sol

En 1993, l'installation des tensiomètres n'a pu être achevée que fin juin. Les plus profonds de ces tensiomètres étaient installés à 140 cm de profondeur. Tous ont cessé d'être opérationnels dès le 7 juillet (potentiels inférieurs à -800 mbars).

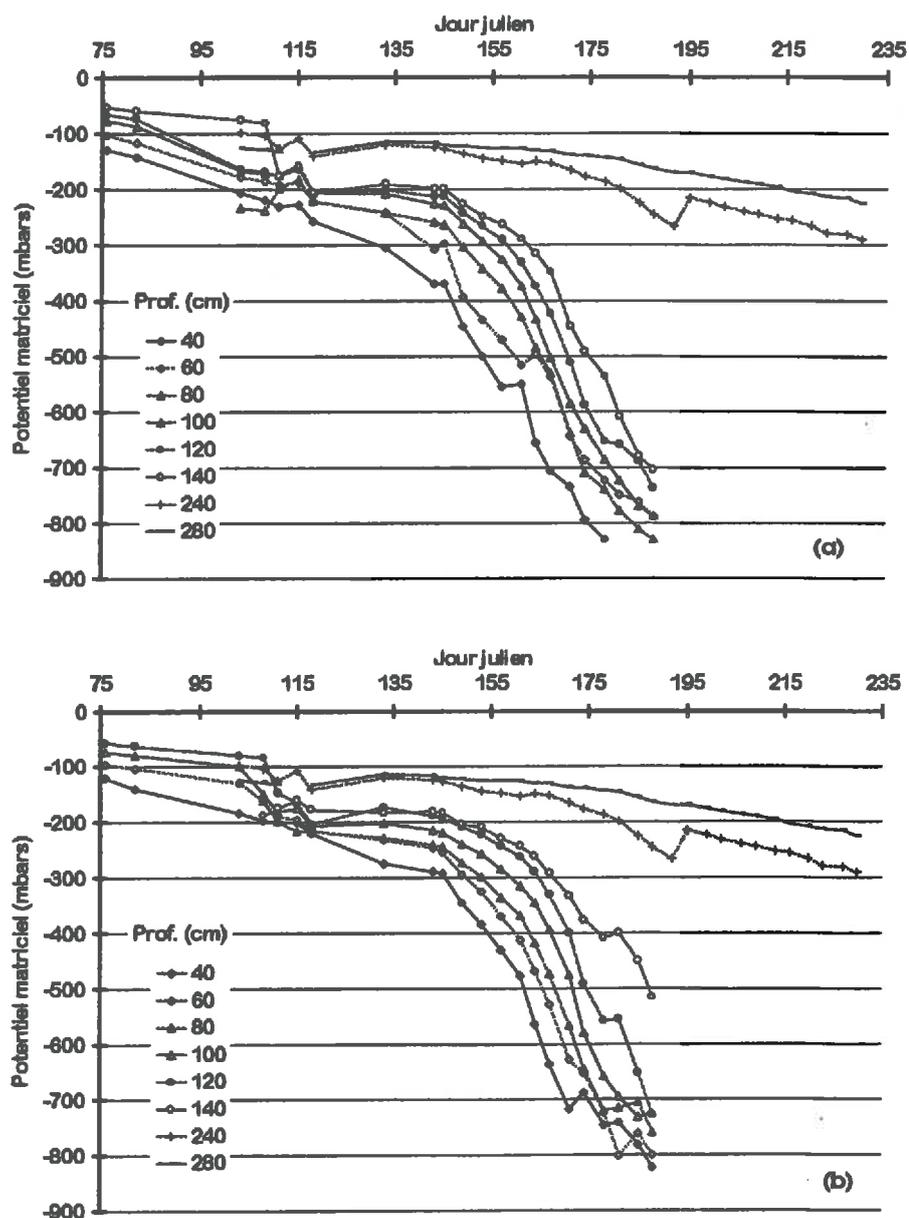


Figure 2-3 : Évolution de la moyenne parcellaire des potentiels au cours de la saison 1994. (a) sous le rang ; (b) sous l'inter-rang

En 1994, le même phénomène s'est reproduit pour les tensiomètres "de surface" (jusqu'à 140 cm) comme on peut le voir sur les figures 2-3a-b dans les positions rang et inter-rang. En revanche, les tensiomètres installés autour de 250 cm de profondeur ont fonctionné tout l'été, sauf un (placette 3), ce qui explique le décrochement observé au jour 192 dans la cinétique des figures 2-3. Les potentiels du rang diminuent plus vite que ceux de l'inter-rang. Leurs dates d'arrêt de fonctionnement coïncident toutefois à deux ou trois jours près. Les tensiomètres cessent de fonctionner dans l'ordre croissant de leur profondeur mais, là encore, les écarts de date sont faibles.

Les tensiomètres profonds restent à de forts potentiels pendant tout l'été. Seul le potentiel mesuré par le tensiomètre le plus superficiel évolue de façon notable. Le second reste dans une gamme de potentiels réduite (100 mbars) pendant tout l'été.

Le sol présente une cinétique de dessiccation très rapide et relativement homogène au moins sur 140 cm de profondeur.

2.3. Le bilan d'énergie

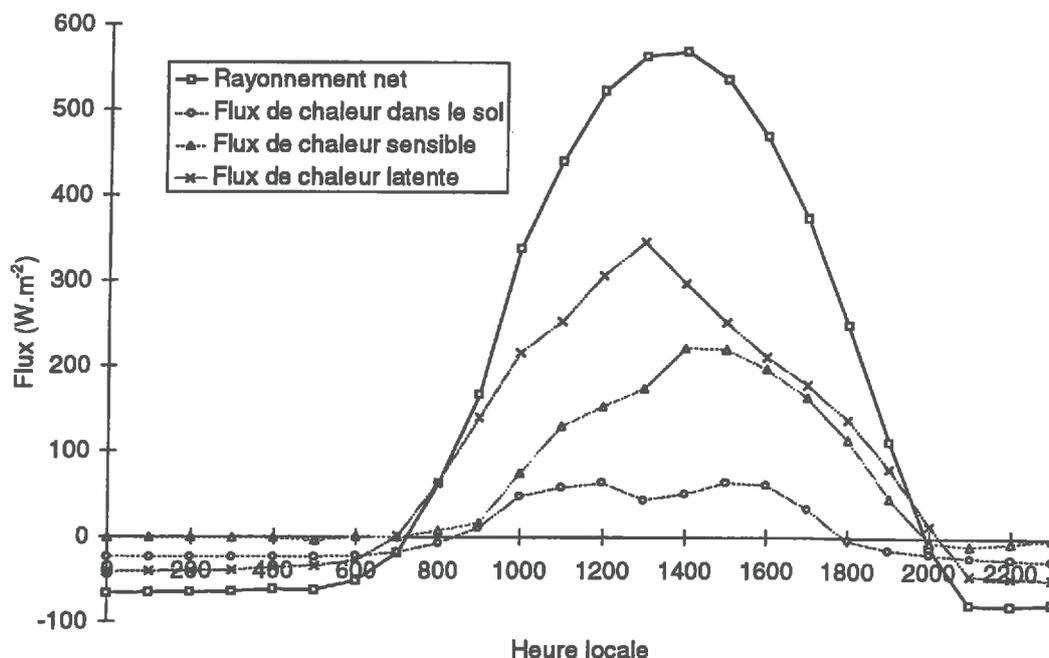


Figure 2-4 : Cinétique journalière des flux d'énergie mesurée au cours d'une journée ensoleillée (3 août 1994)

La cinétique journalière mesurée est reproduite figure 2-4 pour une journée d'été ensoleillée du mois d'août 1994. Les proportions des flux sont en accord avec les valeurs

relevées dans la bibliographie pour des cultures discontinues. On observe une dissymétrie dans le flux de chaleur latente. Il augmente rapidement dès le lever du soleil pour atteindre son maximum à 13 heures. Il diminue ensuite rapidement, ce qui peut s'expliquer par le déficit de pression de vapeur saturante, plus fort l'après-midi, qui inhibe de ce fait la transpiration (Daudet et Katerji, 1987). Le flux de chaleur sensible "bénéficie" de cette énergie non utilisée et présente ainsi un maximum journalier entre 14 et 15 heures. Le flux de conduction dans le sol présente une cinétique "en dos d'âne" exprimant la cinétique d'ombrage du sol par les rangs de vigne.

En conclusion, bien que les conditions d'utilisation de la méthode soient discutables, les flux et leur répartition les uns par rapport aux autres sont satisfaisants.

2.4. La transpiration et l'évaporation

2.4.1. La transpiration

Les validations ici présentées ne portent que sur les mesures de l'année 1994, le protocole de 1993 n'ayant pas permis d'acquérir de données de flux de sève exploitables.

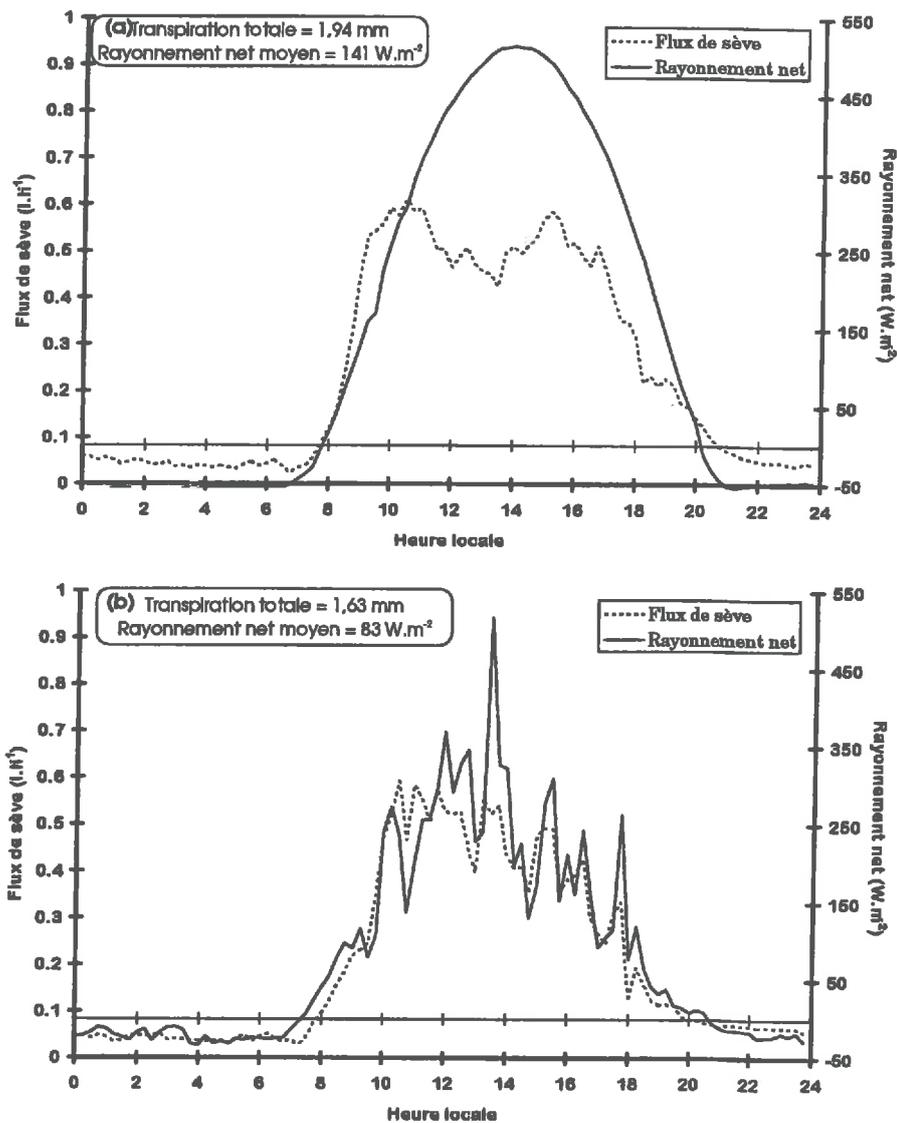
a) Correction des mesures

Les problèmes expérimentaux rencontrés ayant été levés par un algorithme de correction automatique (voir chapitre 2 §2.4.3.), il est nécessaire de confronter les mesures instantanées corrigées à une grandeur de référence. Le rayonnement net a été choisi pour ce faire. Les cinétiques journalières sont montrées par les figures 2-5a et b pour un jour ensoleillé et un jour nuageux. Les courbes sont **parfaitement synchrones**. Le flux de sève du jour ensoleillé montre un creusement (ou quelquefois un plateau) qui traduit la fermeture stomatique induite par la sécheresse de l'air et du sol.

b) Influence du flux de chaleur stocké

Le stock thermique est parfois négligé pour le calcul du flux de sève (Sakuratani, 1981 ; Valancogne et Nasr, 1989). Cette hypothèse peut être valable dans la cas de mesures sur **végétaux herbacés** (maïs, soja). Dans le cas de la vigne, même pour de faibles diamètres (3 à 5 cm), le terme de stockage ne doit pas être écarté du calcul. Conformément à ce qu'ont montré Valancogne et Nasr (1993) pour du Kiwi, nous avons observé que le flux de chaleur stocké ou relargué par le volume de tige étudié (Q_{sto}) était **loin d'être négligeable**, surtout en matinée

(fig.2-6) puisqu'il peut atteindre 70 % de la puissance fournie. Des observations du même ordre de grandeur ont été publiées par Grime *et al.* (1995a-b).



Figures 2-5a-b : Évolutions comparées des flux de sève instantanés et des rayonnements nets mesurés lors d'une journée ensoleillée (12 août 94 ; figure a) et nuageuse (9 août 94 ; figure b)

c) Conclusions

- La méthode du bilan thermique permet une connaissance des flux de sève au pas du quart d'heure. Cette technique est fiable si l'on prend garde de ne pas négliger le flux de stockage de chaleur lorsqu'on travaille sur des parties ligneuses, même lorsque les diamètres sont petits.

- Les perturbations thermiques d'origine inconnue peuvent être contournées, lorsqu'elles sont bien identifiées, par un **algorithme simple**. Celui-ci consiste à interpoler linéairement les valeurs de $dT_{\text{aval-amont}}$ aberrantes (c'est-à-dire inférieures à une **valeur unique**) entre deux valeurs cohérentes.

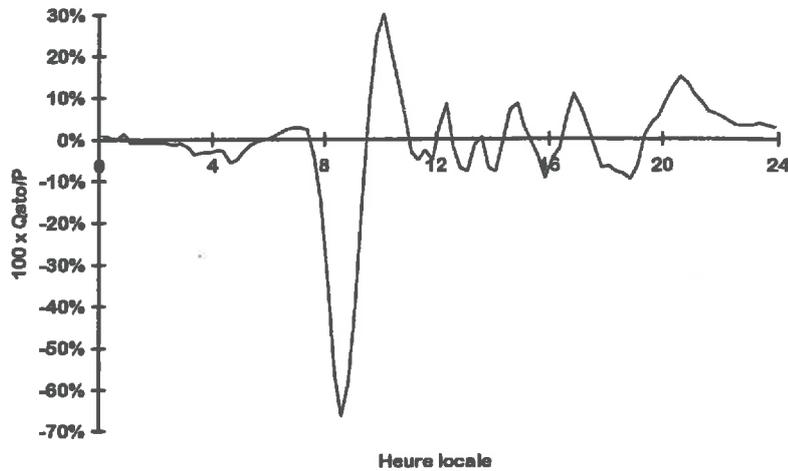


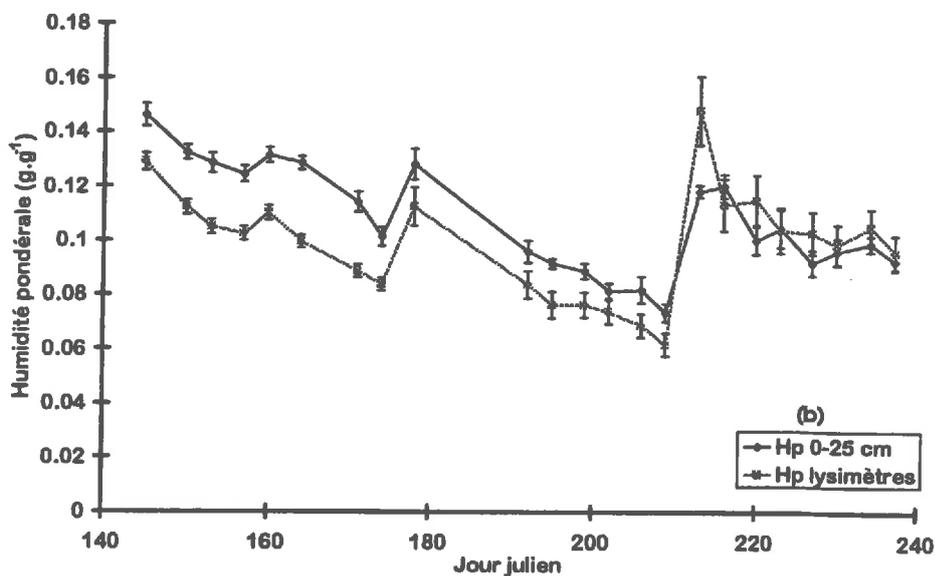
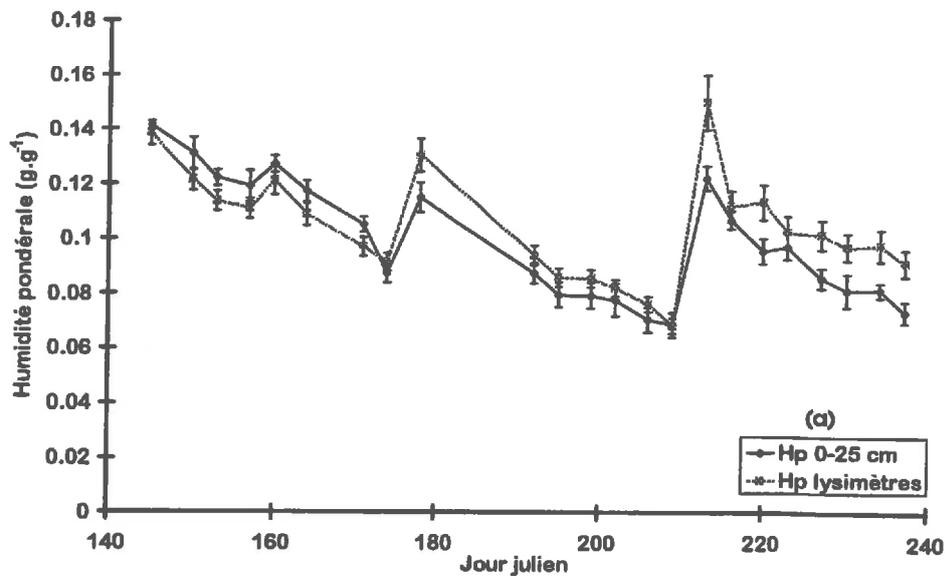
Figure 2-6 : Rapport de la quantité de chaleur stockée dans le volume de tige où est réalisée la mesure du flux de sève sur la puissance de chauffage (constante). Évolution lors d'une journée ensoleillée (3 août 1994)

2.4.2. L'évaporation du sol

La procédure d'estimation de l'évaporation du sol sous couvert est difficile à valider. Il faudrait pour cela avoir une mesure de référence mais celle-ci n'existe pas. Il est toutefois possible d'examiner le comportement des lysimètres par rapport à celui de l'humidité de surface obtenue à partir des prélèvements à la tarière (l'été 1994 est illustré par les figures 2-7a et b). Les évolutions sont parallèles ce qui montre que nos mesures de l'évaporation par lysimètres sont proches des estimations obtenues à partir de la variation de stock de la couche de surface. L'examen de la figure 2-7 montre que l'humidité des lysimètres du rang reste plus proche de celle du sol pendant toute la saison. Ceux de l'inter-rang en sont plus éloignés au début de l'été qu'à la fin. Ceci s'explique par le fait que, lors des pluies, les lysimètres de l'inter-rang sont soumis à une sédimentation plus fréquente que ceux du rang. L'humidité pondérale étant calculée à partir du poids sec obtenu en fin de saison, elle intègre le dernier apport de sédiments de la saison. Ainsi, l'humidité des lysimètres en début de saison est-elle éloignée de celle du sol alentour.

Les mesures d'évaporation par mini-lysimètres ont déjà été souvent éprouvées. Le protocole simplifié utilisé ici (les lysimètres sont créés une fois pour toutes en début de saison)

donne aussi de bons résultats. Ce protocole ne peut être utilisé en régions pluvieuses pour des problèmes de ruissellement et de réinitialisation de la mesure. Il est adapté à la plupart des cas dans l'étude du cycle de l'eau d'une parcelle de vigne en milieu méditerranéen.



Figures 2-7a-b : Évolution des humidités pondérales des mini-lysimètres et du sol alentour au cours de l'été 1994 sous le rang de vigne (a) et dans l'inter-rang (b)

2.4.3. Parts relatives de la transpiration et de l'évaporation à l'échelle de la saison

La transpiration représente le flux majoritaire dans l'ETR lors des deux années (fig.2-8 et tableau 2-1). Sa contribution dans l'ETR augmente légèrement entre juin et juillet, grâce au développement du feuillage, puis diminue entre juillet et août avec l'assèchement du sol.

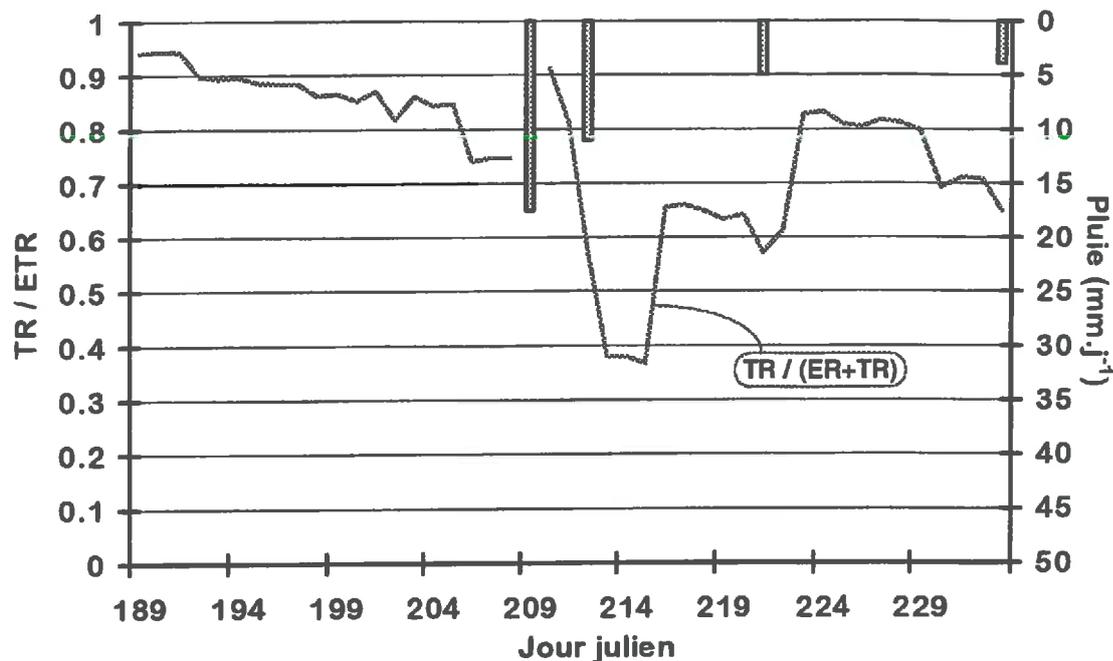


Figure 2-8 : Évolution de la part de la transpiration réelle dans l'ETR au cours de l'été 1994

Le régime des pluies est très influent dans la part relative de l'évaporation et de la transpiration dans l'ETR : le 10 août 1993, un fort orage a favorisé l'évaporation du sol, provoquant une baisse de la part de la transpiration dans l'ETR ($TR \approx 0,20$ ETR pendant 7 jours). L'orage de la fin du mois de juillet 1994 (jours 209 et 212) a provoqué une forte diminution de la contribution des plantes à l'ETR mais l'effet est resté ponctuel dans le temps.

	1993	1994
Juin	-	77,7 (56,4 - 87,9)
Juillet	72,5 (49,0 - 92,2)	79,3 (40,5 - 94,2)
Août	51,2 (32,0 - 80,6)	62,3 (51,7 - 69,5)
Total (Jul-Aoû)	- (63,8)	75,9 (71,4)

Tableau 2-1 : Part de la transpiration dans l'ETR (en pourcentage). Les valeurs de 1993 et de juin 1994 calculent la transpiration par $TR = ETR_{BH} / ER_{lyst}$. Les valeurs entre parenthèses sont les extrêmes mensuelles.

L'évaporation du sol après une pluie devient une partie importante de l'ETR, surtout en cours d'été. Ces observations appuient les chiffres publiés par les différents auteurs qui ont

mesuré le flux de sève d'une vigne (Lascano *et al.*, 1992 ; Heilman *et al.*, 1994 ; Riou *et al.*, 1994 ; Cf. chapitre 1 § 3.2.2.). Les valeurs obtenues en sec sont à rapprocher de celles obtenues par modélisation par Sene (1994) sur vigne aride en large écartement (Espagne, gobelets 2,50 x 2,50 m). Il a déterminé que, sur l'ensemble de la saison végétative, l'évaporation réelle représente environ 35 % de l'ETR parcellaire. En fait, il montre que l'évaporation de la saison égale pratiquement le total des précipitations de la saison. Ceci est également valable dans notre expérimentation (tab.2-2), ce qui confirme l'importance du régime pluviométrique sur l'évaporation par le sol en climat sec.

	1993	1994
P	46,5	51,5
ER	53,4	58,3

Tableau 2-2 : Évaporation lors de la saison de végétation (juillet-août 93 et juin-août 94) comparée au total des précipitations efficaces (infiltrées) dans la même période. Chiffres en millimètres. L'orage de fin août 1994 a été exclu puisqu'il n'a pas eu d'effet sur les flux de la période considérée.

2.5. Mesures sur la plante

2.5.1. Mesures de croissance

La figure 2-9 montre la cinétique de croissance depuis le 18 mai 93 jusqu'au 30 juillet 93. La longueur des rameaux suit une croissance sigmoïde conformément aux courbes de croissance relevées dans la bibliographie. L'arrêt de la croissance a été précoce (autour du 10 juillet), sans doute à cause de la sécheresse et des fortes températures du début de l'été cette année-là.

La surface foliaire est théoriquement reliée à la longueur des rameaux par une relation linéaire (Mériaux *et al.*, 1979). Cependant, la Syrah est un cépage à fort développement végétatif des entrecoeurs (rameaux secondaires). Or, seule la mesure de la longueur des rameaux principaux a été suivie. On s'est aperçu que cette grandeur ne peut être reliée à la surface foliaire totale du cep notamment car une grande partie de la surface foliaire totale est portée par les entrecoeurs (jusqu'à 79 % d'après les mesures que nous avons menées en 1993).

Ainsi, les corrélations n'ont pu être dressées entre longueur des rameaux principaux et surface foliaire. En revanche, la relation établie entre surface foliaire et poids de bois de taille

(P_{BT}) est très bonne (figure 2-10). Comme il est admis que le poids de bois de taille est représentatif de la longueur des rameaux (Mériaux *et al.*, 1981), on estimera par la suite que tous les paramètres morphologiques de la vigne ont une croissance parallèle à celle des rameaux.

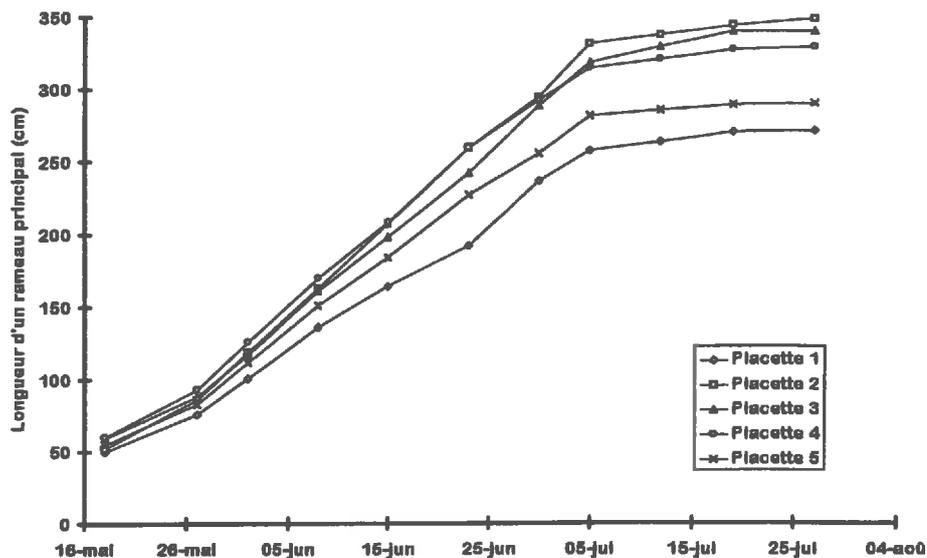


Figure 2-9 : Suivi de la croissance des rameaux de la vigne en 1993. Rameaux palissés verticalement

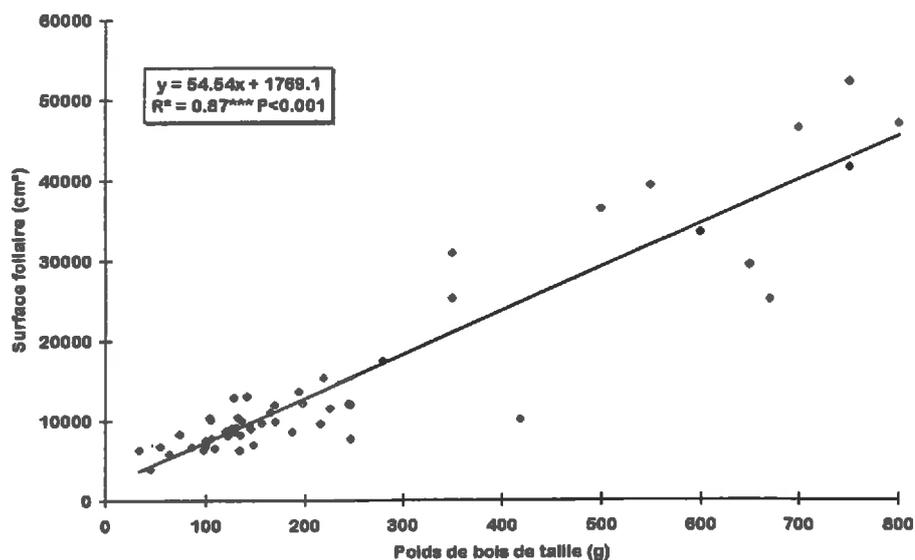


Figure 2-10 : Comparaison du poids de bois de taille avec la surface foliaire. Les valeurs de 1993 (◆) portent sur des mesures sur rameaux individuels palissés verticalement, les valeurs de 1994 (◈) sont des relevés par cep

2.5.2. Mesures de fonctionnement physiologique

Par le suivi simultané des potentiels et du flux de sève, il a été possible de regarder les potentiels foliaires critiques auxquels diminuait la transpiration. À titre d'exemple, les résultats sont montrés figure 2-11 pour un cep. Les mesures ont été effectuées le 25 juillet 94. La journée était ensoleillée avec un passage nuageux entre 16 et 17 heures (heure locale équivalente en fractions de journées, à entre 206,66 et 206,70). Le potentiel critique est relevé à partir du moment où la transpiration ne croît plus alors que le rayonnement augmente encore. Les valeurs obtenues pour les différents ceps s'étagent de -11,0 à -14,2 bars. Elles sont en accord avec les valeurs publiées dans la bibliographie, quoiqu'un peu fortes. Elles ne sont toutefois qu'approximatives étant donné que la maille temporelle d'acquisition des potentiels foliaires ne peut être aussi précise que celle des capteurs de flux de sève.

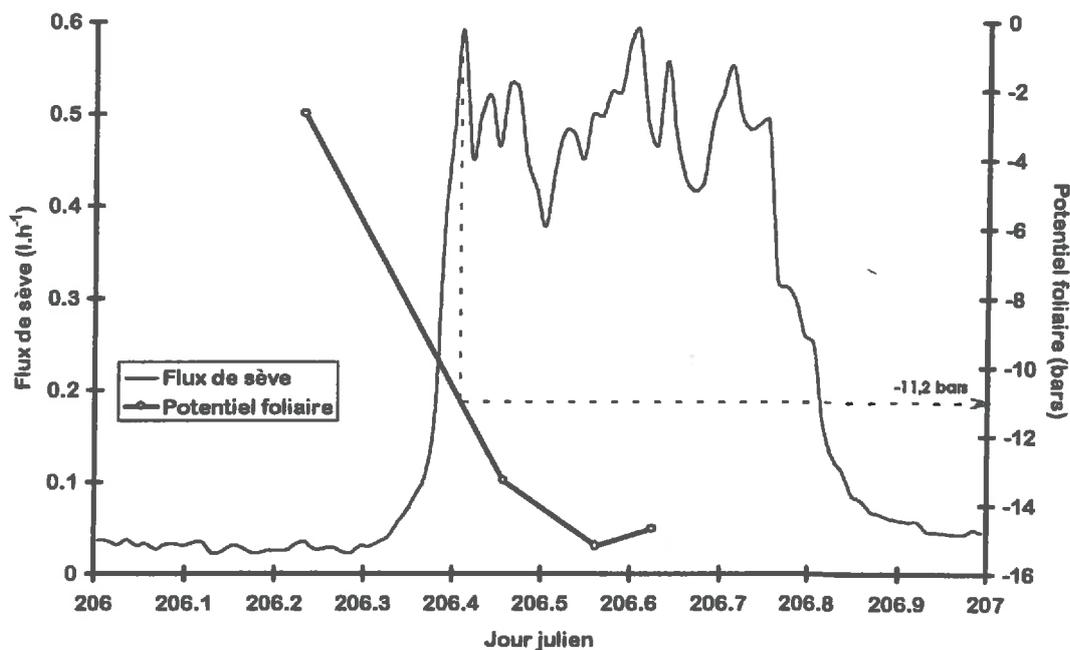


Figure 2-11 : Mise en évidence du potentiel foliaire "critique". 25 juillet 1994

3. MESURE DE L'ETR PARCELLAIRE

Le protocole utilisé permet d'accéder à l'ETR par trois méthodes différentes : un bilan hydrique du sol, un bilan d'énergie au dessus de la parcelle et un accès séparé aux flux d'évaporation du sol et de transpiration ($ETR=ER+TR$).

Le principe de chacune de ces méthodes sera rappelé dans une première partie. Chacune d'elles comportant une part d'imprécision pour l'estimation de l'ETR d'une parcelle de vigne, les valeurs fournies seront comparées dans une seconde partie.

3.1. Principes des calculs d'ETR

3.1.1. Le bilan hydrique du sol

a) Principe

Le bilan hydrique est réalisé par la mesure des différents termes de l'équation [1.1a] du chapitre 1. On calcule l'ETR comme résidu du bilan :

$$ETR = P - \Delta S_{0-z} - D_z \pm R \quad \text{Equ.}[3.1]$$

Les termes du bilan s'expriment en hauteur d'eau (mm).

P est mesuré par le pluviographe de la parcelle AW54 voisine,

ΔS_{0-z} est mesurée par la **méthode neutronique** (Daudet et Vachaud, 1977),

D_z est calculé par la **loi de Darcy**,

R est soit **négligé en cas de faibles pluies**, soit **estimé à partir de mesures de ruissellement** réalisées sur une parcelle non cultivée du bassin versant (parcelle AW6), de structure de surface équivalente à celle de notre parcelle expérimentale mais un peu plus pentue. Les coefficients de ruissellement utilisés (= lame d'eau ruisselée/lame d'eau précipitée) sont reportés dans le tableau 3-1.

Date	Coefficient de ruissellement (%)
14/08/93	16,4
24/08/93	14,4
28/07/94	4,9
31/07/94	14,1
31/08/94	46,1

Tableau 3-1 : Coefficients de ruissellement utilisés pour le calcul du bilan hydrique en 1993 et 1994

En 1994, possédant des mesures de potentiel en profondeur (entre 240 et 280 cm en moyenne), nous pouvons calculer l'ETR par bilan hydrique complet sur 260 cm :

$$ETR_{260} = P - \Delta S_{0-260} - D_{260} \pm R \quad \text{Equ.}[3.2]$$

L'ETR parcellaire est la moyenne arithmétique des ETR calculées individuellement sur chaque tube de mesure. Le flux à 260 cm de profondeur est calculé pour chaque placette en fonction des attributions de conductivités réalisées au chapitre précédent. Lorsque des potentiels manquaient pour le calcul des flux d'une placette, leur valeur a été estimée à partir d'un ajustement polynomial entre le potentiel matriciel et l'humidité volumique. Les relations obtenues ont toujours donné d'excellents ajustements (coefficient de détermination toujours supérieur à 0,90). Elles ont été préférées aux relations théoriques acquises par la méthode de Wind en raison des problèmes soulevés dans le chapitre précédent (§ 3.3.1.a.). Quoi qu'il en soit les points de mesures concernés par cette correction sont peu nombreux : ils concernent un tensiomètre (235 cm) de la placette 3 à partir du jour 192, un tensiomètre (270 cm) de la placette 5 à partir du jour 185 et les deux tensiomètres de la placette 4 du jour 145 au jour 157. La cohérence des flux obtenus a été vérifiée antérieurement à toute exploitation numérique.

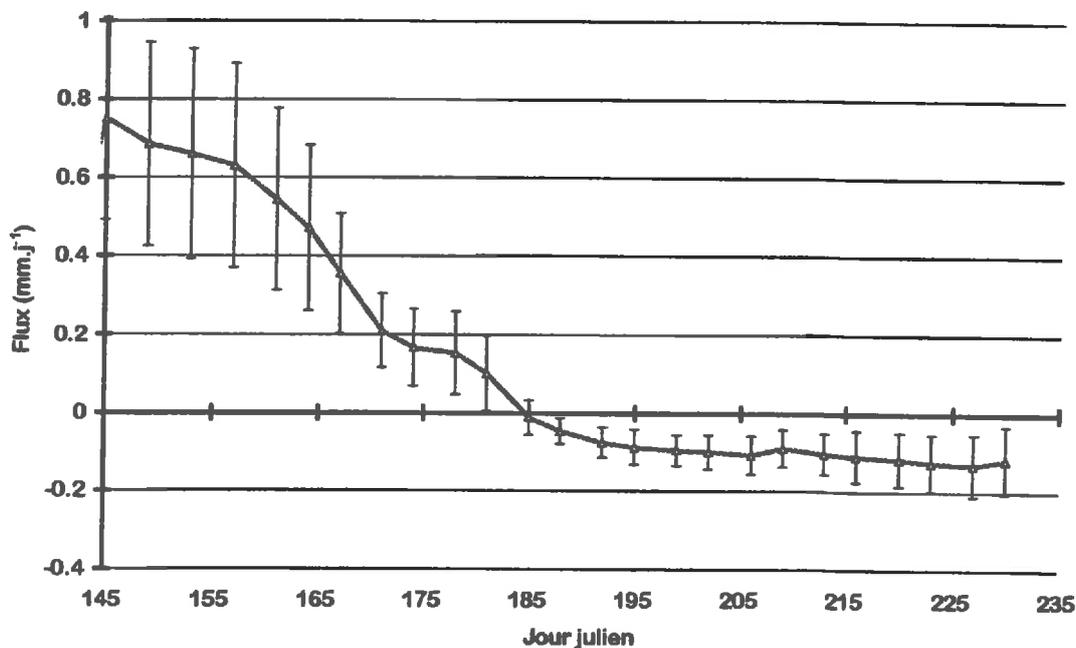


Figure 3-1 : Évolution du flux moyen à 260 cm (la moyenne est fonction de l'association d'une courbe de rétention pour le matériau de fond de profil pour chaque placette : figure 3-3, chapitre précédent)

La figure 3-1 montre l'évolution du flux moyen à 260 cm : il y a drainage de la fin du mois de mai jusqu'à début juillet environ, puis des remontées capillaires qui atteignent entre 0,1 et 0,2 mm.j⁻¹.

b) Erreurs

Les erreurs sur les variations de stock sont calculées par le programme de Galais (1992) suivant le principe expliqué chapitre 2 § 2.1.2.. Elles sont une erreur de mesure qui intègre les erreurs d'étalonnage, d'interpolation et d'appareillage de la sonde à neutrons.

Les erreurs sur le gradient peuvent être obtenues à partir de l'écart-type des mesures. L'erreur sur la conductivité intègre la dispersion des valeurs calculées selon les placettes mais aussi, et surtout, les erreurs faites à l'ajustement des relations conductivité/potentiel. Elle est donc impossible à calculer. Pour cette raison, l'erreur commise sur le calcul du flux en profondeur minimise l'incertitude réelle.

L'erreur sur l'ETR doit également comporter l'incertitude sur la pluviométrie. Celle-ci a été estimée par l'écart-type de la mesure de pluie moyenne sur le bassin versant pour chaque événement pluvieux.

L'erreur totale est calculée comme la somme des erreurs de variables indépendantes :

$$\sigma_{\text{ETR}}^2 = \sigma_p^2 + \sigma_{\Delta s}^2 + \sigma_{K(h), \partial H / \partial z}^2 \quad \text{Equ. [3.3]}$$

3.1.2. Le bilan d'énergie

Son principe a déjà été expliqué chapitre 2 §2.2.1. Il n'est pas facile de déterminer une erreur expérimentale sur les mesures.

3.1.3. Séparation des flux ER et TR

L'échantillonnage choisi lors de l'implantation des mini-lysimètres permet d'intégrer des éventuelles hétérogénéités parcellaires. L'évaporation moyenne de la parcelle sera donc fournie par la moyenne des 15 mini-lysimètres utilisés.

Les dix ceps échantillonnés pour la mesure de la transpiration ont été choisis en fonction du poids de bois de taille de l'année précédente. Ont donc été sélectionnés, dans chaque placette, les deux ceps les plus proches de l'individu "moyen" de la parcelle. La transpiration parcellaire a été calculée par moyenne arithmétique entre les mesures réalisées. Une moyenne de transpiration pondérée par le poids de bois de taille, semblable à celle préconisée par Heilman *et al.* (1994), n'améliore pas les résultats.

L'écart-type sur la somme ER+TR est calculé à partir de l'erreur sur la transpiration et de l'erreur sur la variation de masse des mini-lysimètres (ΔM) en considérant que les erreurs sur

ces variables sont statistiquement indépendantes. S'y ajoute la variabilité de la pluviométrie puisque celle-ci entre dans le calcul d'évaporation :

$$\sigma_{T+E}^2 = \frac{\sigma_T^2}{10} + \frac{\sigma_{AM}^2}{15} + \sigma_P^2 \quad \text{Equ.}[3.4]$$

où σ_X^2 est la variance de la variable X, 10 et 15 sont respectivement les nombres de manchons de chaleur et de lysimètres sur la parcelle.

3.2. Estimation de l'ETR parcellaire

La confrontation des méthodes d'estimation de l'ETR n'a été possible de façon complète qu'en 1994 en raison :

- du peu de mesures micro-météorologiques en 1993 associé à un début de campagne tardif (5 points de comparaison) et à une profondeur d'étude du bilan hydrique trop faible,
- de l'absence de mesures de transpiration en 1993.

3.2.1. Cinétiques

a) Les données de 1993

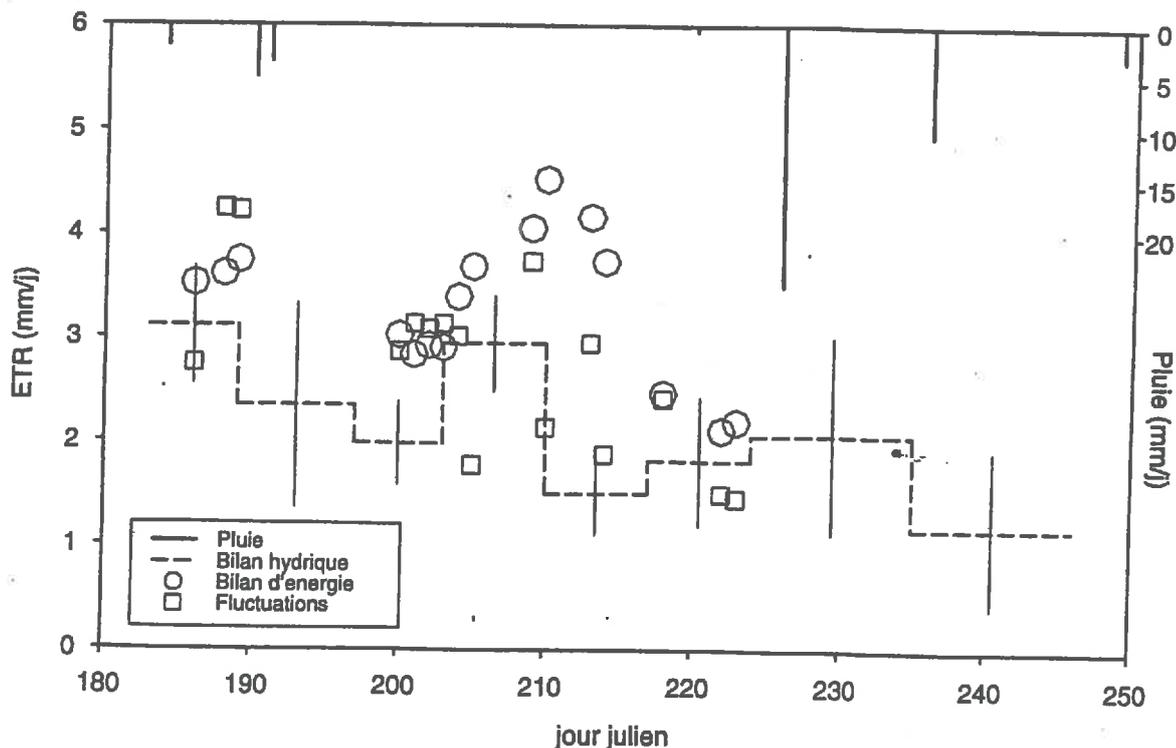


Figure 3-2 : Évolution de l'ETR calculée par trois méthodes différentes. Été 1993.

La figure 3-2 est une cinétique sur la saison de mesure 1993. Le graphique montre le peu d'accord entre les différentes méthodes utilisées. La seule conclusion pouvant être tirée de ce jeu de données est que le bilan hydrique mesuré par variations de stock de 0 à 230 cm doit légèrement sous-estimer l'ETR.

b) Les données de 1994

Elles sont plus complètes à la fois dans le temps et dans les techniques utilisées. La cinétique de l'ETR parcellaire obtenue par les différentes méthodes mises en œuvre est représentée figure 3-3 pour l'ensemble de la saison. On y voit :

- la pluie totale précipitée,
- l'ETR_{BH} (Equ.[3.2]) et l'intervalle de confiance à 95 % sur la moyenne,
- l'ETR par bilan d'énergie (ETR_{BE}) figurée par des points isolés. La sensibilité des appareils n'a que rarement permis un suivi continu sur plus d'une semaine.
- l'ETR par séparation des flux (ETR_{T+E}). Les valeurs manquantes sont dues soit à des problèmes techniques sur les mesures de transpiration (jours 200 à 203 et jour 209), soit à des problèmes liés à la pluie pour les mini-lysimètres (jours 210 à 216). Les traits pointillés qui bordent la courbe représentent l'intervalle de confiance sur la moyenne à 95 %.

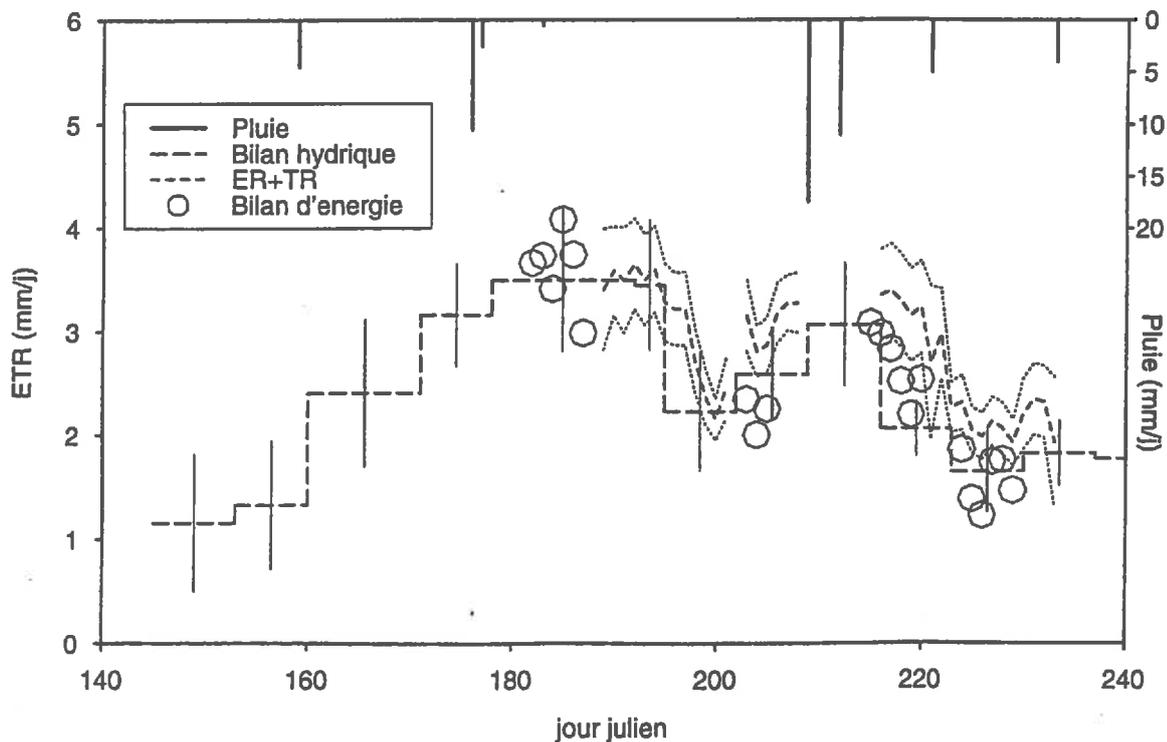


Figure 3-3 : Évolution de l'ETR calculée par trois méthodes différentes. Été 1994

La cinétique générale montre une augmentation de l'ETR au cours du mois de juin, entachée d'une forte incertitude liée au flux de drainage. Cette augmentation atteint un palier en juillet puis décroît au mois d'août en raison de l'assèchement du sol.

Compte tenu des fortes incertitudes liées notamment à l'estimation du flux de fond de profil, on peut affirmer que toutes les méthodes d'estimation de l'ETR évoluent conjointement au cours de la saison. Le bilan d'énergie voit ses points intégrés dans les gammes d'erreur des courbes présentées.

On en déduit que les mesures de variations de stock entre 0 et 260 cm de profondeur permettent de quantifier l'ensemble des prélèvements racinaires de la vigne pour peu que l'on estime le flux en fond de profil.

3.2.3. Valeurs

a) ETR

Les valeurs d'ETR obtenues par l'équation [3.2] en 1994 ou par son équivalent simplifié (sans mesure du drainage) sur 230 cm de profondeur en 1993 ont donné des résultats cohérents avec ceux de la bibliographie (tableau 3-1b chapitre 1). Les extrêmes journaliers donnés dans le tableau 3-2 sont en fait des moyennes hebdomadaires puisque le bilan hydrique ne peut être calculé au pas de la journée.

Période	ETR		ETR/ETP	
	1993	1994	1993	1994
Juin	-	67 (1,15-3,16)	-	39,4 %
Juillet	70 (1,40-2,66)	93 (2,22-3,49)	42,9 %	51,7 %
Août	59 (1,17-2,06)	60 (1,65-3,06)	43,1 %	42,0 %
Total juillet-août (+juin)	128 -	153 (220)	42,7 %	47,5 % (44,6 %)

Tableau 3-2 : Évapotranspiration réelle calculée mensuellement (mm). Entre parenthèses : extrêmes journaliers en mm.j⁻¹ - Satisfaction de la demande atmosphérique correspondante (ETR/ETP)

En 1994, on relève une forte augmentation de l'ETR entre juin et juillet puis une diminution entre juillet et août. Ceci s'explique par un développement foliaire inachevé en juin pour une réserve hydrique encore peu entamée. En juillet, la surface foliaire atteint son maximum et le sol toujours humide permet une alimentation hydrique encore satisfaisante. En revanche, le mois d'août est marqué par une forte diminution des réserves en eau du sol provoquant une baisse de l'alimentation hydrique de la vigne. Cette évolution s'observe moins

nettement sur les deux mois de mesure en 1993. Les valeurs d'ETR saisonnière sont de l'ordre de grandeur de celles publiées quoique parmi les plus faibles rencontrées, ce qui induit un rapport ETR/ETP relativement peu élevé (cf. les valeurs du tableau 3-2*b*, chapitre 1). Ceci est dû soit à une forme de couvert qui ne permet pas une bonne interception de rayonnement, soit à une mauvaise disponibilité en eau du sol.

La comparaison des valeurs du rapport ETR/ETP en 1993 et 1994 montre que :

- au mois de juillet, le flux de fond de profil (drainage ou remontées capillaires) et les prélèvements dans la couche 230-260 cm ont une influence sensible sur l'alimentation en eau des ceps,
- au mois d'août, il n'existe pas de différence significative du rapport ETR/ETP, ce qui traduit que la conductivité hydraulique du sol réduite est limitante en profondeur comme dans le reste du profil.

b) ER+TR

Période	ER	TR	ETR	
			ER+TR	BH
190-197	1,9-2,7	16,2-27,9	18,1-30,6	16,5-27,0
203-208	3,3-4,3	11,4-18,1	14,7-22,4	9,8-16,0
216-233	8,0-15,8	23,5-38,3	31,5-54,1	26,7-36,3

Tableau 3-3 : Intervalles de confiance à 95 % sur les valeurs des flux lors des trois périodes où toutes les mesures sont disponibles simultanément. Valeurs en millimètres

Le tableau 3-3 fait la synthèse des mesures séparées de l'évaporation et de la transpiration en 1994 sur les périodes où tout le dispositif a fonctionné simultanément. Les fourchettes mentionnées sont les intervalles de confiance à 95 % sur les valeurs.

La variabilité de la transpiration est très importante au regard de la variabilité des deux autres flux. On postule arbitrairement que cette variabilité traduit bien les hétérogénéités de comportements entre individus au sein de la parcelle. Cependant, on peut s'attendre à une variabilité sans doute encore plus étendue compte tenu que les ceps échantillonnés n'ont pas été pris au hasard. Ils ont été choisis, rappelons-le, comme pieds "moyens" par rapport à l'ensemble de la parcelle à partir de la mesure du poids de bois de taille. Rappelons que le coefficient de variation du poids de bois de taille de ces 10 ceps vaut 0,22 alors que, sur l'ensemble de la parcelle, il égale 0,40. Ainsi, on est en droit de s'attendre à des marges de valeurs sans doute plus étendues sur la mesure de la transpiration que celles qui figurent dans le tableau 3-3.

Malgré ça, le tableau 3-3 montre la bonne similitude entre les valeurs d'ETR obtenues par les différentes méthodes. Ceci permet de conclure que les conditions d'expérimentation sont adéquates à une estimation de l'ETR par chacune des méthodes mises en œuvre.

3.3. Conclusions

Le protocole mis en place sur une parcelle du bassin versant de Roujan avait pour premier but de parvenir à donner une estimation fiable de l'ETR parcellaire. Le principe était de mesurer l'ETR par différentes voies, directes ou indirectes, portant sur le sol, le végétal et l'atmosphère. Deux méthodes donnent des résultats globaux : le bilan hydrique et le bilan d'énergie. Une méthode sépare les flux d'évaporation et de transpiration. Le recoupement des trois méthodes n'a été possible qu'en 1994.

Les expérimentations se sont déroulées dans des conditions climatiques idéales pour comprendre l'alimentation hydrique d'une vigne en plein champ : les deux été furent chauds et précédés d'un printemps et/ou un hiver relativement secs.

Les mesures mises en place ont été validées individuellement, soit par comparaison avec une grandeur de référence acquise indépendamment (par exemple manchons de flux de sève et R_n), soit par mise en regard avec une grandeur équivalente (par exemple mini-lysimètres et humidité du sol alentour).

La mesure d'ETR parcellaire a été validée ensuite par recoupement des mesures indépendantes pendant un été.

Forts de la qualité de ces données, nous sommes en mesure de regarder séparément les phénomènes d'évaporation du sol sous couvert et d'extraction racinaire. Ces deux variables seront regardées dans le but de leur modélisation, c'est-à-dire en envisageant leur variabilité spatio-temporelle et son origine.

CHAPITRE 4

VARIABILITÉ ET MODÉLISATION DE L'ÉVAPORATION DU SOL SOUS VIGNE

L'évaporation du sol sous couvert est un phénomène complexe à étudier. Cette complexité provient à la fois du caractère local des mesures et de l'hétérogénéité du couvert. Celle-ci peut avoir une incidence sur la partition du rayonnement et donc sur la disponibilité de l'énergie pour l'évaporation.

Dans ce chapitre, nous caractérisons la variabilité spatio-temporelle de l'évaporation sous vigne en liaison avec la structure en rangs du couvert. Ensuite, nous testons différentes options de modélisation à l'échelle de la parcelle de vigne.

1. VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DE L'ÉVAPORATION DU SOL SOUS COUVERT DE VIGNE

Nous avons vu au chapitre 1 que certains auteurs ont mesuré des évaporations sous couvert très variables selon la position du lysimètre par rapport au rang de vigne (Al-Khafaf *et al.*, 1978 ; Walker, 1984). Cette variabilité serait explicable par la quantité d'énergie parvenant en chaque portion de sol. Cependant, d'autres auteurs (Ham *et al.*, 1991 ; Ham et Kluitenberg, 1993) ont montré que des redistributions latérales d'énergie pouvaient se produire à la surface du sol et perturber les règles élémentaires du bilan d'énergie mises en avant par les chercheurs cités précédemment.

Dans le cas de la parcelle expérimentale que nous étudions, nous avons examiné si l'organisation en rangs a une influence sur l'évaporation ou si l'évaporation peut être vue comme homogène à l'échelle de la structure rang/inter-rang.

1.1. Rappels expérimentaux et procédures de traitements utilisés

1.1.1. Contexte expérimental

La parcelle expérimentale est divisée en cinq placettes, chacune comportant 3 mini-lysimètres situés sous le rang, sous l'inter-rang et en position intermédiaire, à 50 cm du rang.

Le sol de la parcelle n'est pas travaillé. Lorsqu'il est sec, il est croûté sur l'inter-rang (densité apparente $D_a = 1,59 \pm 0,07$). Le cavaillon a une structure plus aérée et plus caillouteuse ($D_a = 1,37 \pm 0,08$). La position intermédiaire affiche une densité apparente proche de celle de l'inter-rang ($D_a = 1,57 \pm 0,07$).

1.1.2. Traitements de données

Les valeurs d'évaporation sont comparées selon leur position dans l'inter-rang. L'évolution de l'évaporation au cours de la saison est analysée sur chaque année (1993 et 1994) séparément.

Afin de mettre en évidence une hétérogénéité d'évaporation en liaison avec la structure du couvert, une analyse de variance a été réalisée sur les moyennes parcellaires des évaporations **par position de mesure et par période de mesure** (3 à 7 jours). Les moyennes ont ensuite été comparées deux à deux par un test de Newman et Keuls au seuil de risque de 0,05 afin d'établir un éventuel classement des évaporations par position pour chaque période de mesure.

1.2. Résultats

1.2.1. Observations

Les figures 1-1a et b montrent les cinétiques d'évaporation du sol pour les trois positions (chacune est la moyenne de 5 lysimètres) pendant les deux étés de mesure. Les barres d'erreurs représentées intègrent la dispersion des mesures d'évaporation (chapitre 2, equ.[2.8]) associée à l'erreur faite sur la pluviométrie (dispersion des mesures à l'échelle du bassin versant), ce qui explique de fortes dispersion au moment des précipitations.

Les deux années, on observe une évolution de l'évaporation conforme aux évolutions attendues : l'évaporation connaît une forte remontée après une pluie, suivie d'une décroissance très rapide (diminution de 2/3 en une semaine) puis lente.

La variabilité spatiale de l'évaporation augmente lors d'un épisode pluvieux ou juste après. En revanche, elle est très faible moins d'une semaine après la pluie.

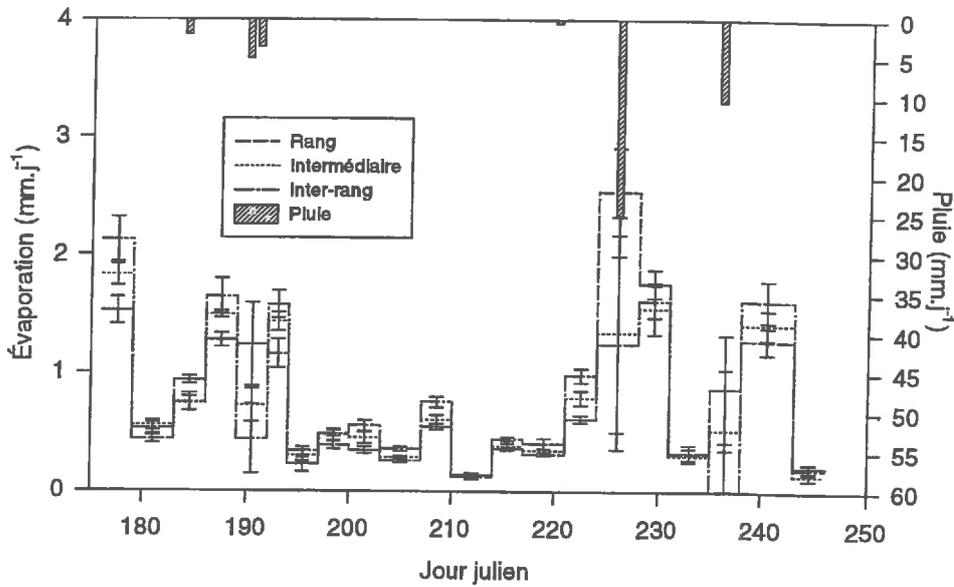


Figure 1-1a : Suivi de l'évaporation du sol mesurée par mini-lysimètres selon leur position dans l'inter-rang - Été 1993

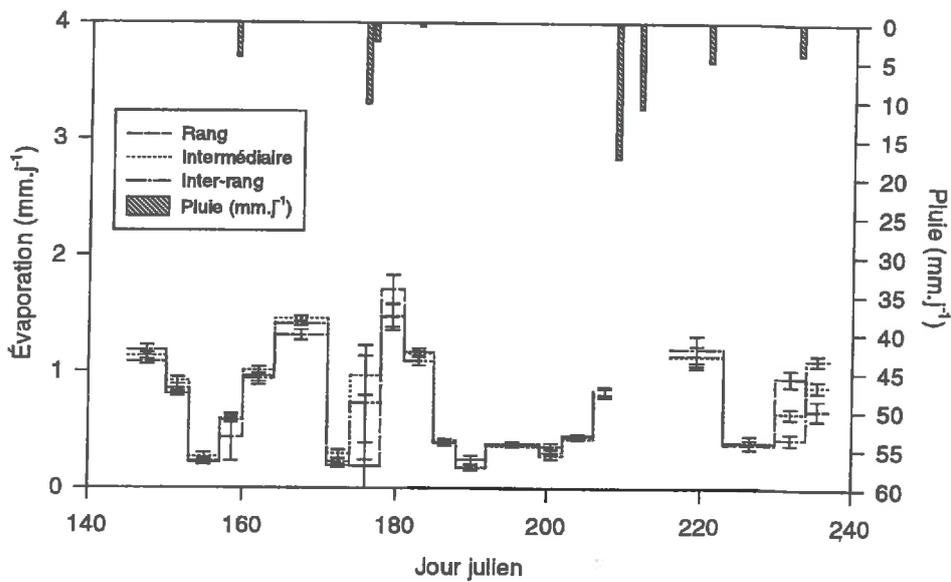


Figure 1-1b : Suivi de l'évaporation du sol mesurée par mini-lysimètres selon leur position dans l'inter-rang - Été 1994

1.2.2. Analyse

a) Variabilité au cours de la saison

Les tests statistiques portent sur 42 périodes : 22 sont des périodes sans pluie et ne suivant pas une période de pluie (elles sont appelées “hors pluie”), 10 sont des périodes pendant lesquelles une pluie est survenue (“pluie”) et 10 sont les périodes qui ont succédé les périodes de pluies mais au cours desquelles aucune pluie n’est survenue (“post-pluies”).

Les analyses de variance montrent que, sur la plupart des périodes étudiées (pluvieuses ou sèches), les évaporations ne sont pas significativement différentes selon leur position. Comme le montre le tableau 1-1, l’analyse de variance selon le test de Fisher rejette rarement l’hypothèse d’égalité des évaporations à un risque de première espèce inférieur à 5 %.

Lorsque des différences significatives existent, le test de Newman-Keuls permet généralement de classer les évaporations dans un ordre croissant du rang vers l’inter-rang, la position intermédiaire n’étant souvent pas significativement différente soit du rang, soit de l’inter-rang.

“hors pluie”	“pluie”	“post-pluie”	Total
32 %	40 %	10 %	29 %

Tableau 1-1 : Pourcentage de périodes de mesures pour lesquelles on rejetterait l’hypothèse nulle (H_0 = pas d’effet de la position) au risque de première espèce de 5 %.

Les différences significatives constatées entre les positions de mesure pendant les périodes “hors pluie” sont comprises entre 0,09 et 0,21 mm.j⁻¹ pour 5 périodes sur 7 et valent 0,42 et 0,60 mm.j⁻¹ (soit respectivement 30 et 33 % de l’évaporation moyenne de ces périodes) sur les deux périodes restantes. **De fait, les différences d’évaporation qui existent entre deux rangs de vigne en périodes “hors pluie” ont une importance quantitative suffisamment faible pour être considérées comme négligeables.**

En périodes de “pluies”, des différences significatives existent pour 4 périodes de mesures sur 10 (tableau 1-2). L’origine de ces différences peut être double :

- L’apport énergétique diffère selon la position du lysimètre par rapport au rang.
- Or, en période de pluie, la conductivité hydrique du sol n’est pas limitante si bien

que la distribution de l'énergie est probablement la principale source d'hétérogénéité de répartition de l'évaporation.

- La pluie n'arrive vraisemblablement pas au sol de façon homogène puisqu'une proportion est interceptée par le feuillage puis est évaporée directement et une autre partie ruisselle le long des troncs favorisant une concentration d'humidité sous les rangs. Ainsi, les différences d'évaporation constatées peuvent être liées à des différences de pluviométrie incidente. Celles-ci pourraient être évaluées par un modèle d'interception des précipitations, ce qui n'a pas été testé.

Classement	Valeur mini (mm)	Valeur maxi (mm)	Différence (mm)	Diff. relative (%)
Rg >> IR	1,71	3,82	2,11	124
IR > Rg	1,83	2,94	1,11	60
IR > Rg	3,83	4,94	1,11	29
IR > Rg	1,07	1,32	0,25	23

Tableau 1-2 : Importance quantitative des différences d'évaporation observées entre le rang (Rg) et l'inter-rang (IR) lors des périodes de pluie. La durée des périodes de mesures concernées est de 3 ou 4 jours.

Ces deux hypothèses ne sont pas incompatibles et il est probable qu'elles soient justes toutes les deux. Les mesures d'évaporation sont réalisées tous les 3 jours en moyenne et le phénomène évaporatoire est très rapide. Ainsi, les périodes de mesure sont généralement des périodes "mixtes" où événement pluvieux et périodes "post-pluies" ou "hors pluie" se succèdent. Les sources de variabilité de l'évaporation citées coexistent donc au sein d'une même période de mesure.

Dans tous les cas, cependant, la plus grande différence d'évaporation observée oppose le rang et l'inter-rang. Sur les 4 périodes de pluies concernées, 3 présentent une évaporation plus forte à l'inter-rang que sous le rang (tableau 1-2). La quatrième montre une évaporation beaucoup plus forte sous le rang que sous l'inter-rang, ce qui laisse penser qu'une hétérogénéité de pluviométrie perturbe la mesure. Quantitativement, les différences observées ne sont importantes que dans le cas où l'évaporation sous le rang est supérieure à celle à l'inter-rang (0,7 mm.j⁻¹ de différence). Dans les autres cas, la différence n'excède pas 0,4 mm.j⁻¹, ce qui équivaut à environ 10 % de l'ETR de ces périodes.

Le protocole utilisé ne permet donc pas de déterminer l'origine de la variabilité d'évaporation à l'échelle de la structure en rang de la parcelle. Lorsque des différences sont mises en évidence, elles ne sont pas suffisamment fortes pour que les hétérogénéités observées intéressent ce travail.

b) Variabilité en cumulé sur la saison

Le test de Newman-Keuls réalisé sur les valeurs cumulées en fin de saison ne permet pas de différencier deux positions de mesures dans la largeur de l'inter-rang au seuil de 5 %. Ceci traduit que les différences citées précédemment à l'échelle de la période de mesure ne se cumulent pas non plus de façon à donner des différences significatives à l'échelle de la saison.

1.3. Conclusions

Les suivis expérimentaux de la variabilité de l'évaporation ont montré que :

- l'évaporation du sol immédiatement après une pluie est très forte puis décroît très rapidement pour atteindre une valeur plancher située entre 0,2 et 0,5 mm.j⁻¹,
- la variabilité spatiale à l'échelle de la structure rang/inter-rang n'est quantitativement pas suffisante pour être prise en compte à l'échelle de la parcelle. En effet, les différences mesurées entre positions de mesure égalent de 2 à 10 % de l'ETR (10 % pour 2 périodes sur 7). De plus, la quantité de pluie reçue par la surface du sol est probablement à l'origine des différences plus marquées notées pendant les périodes de pluies.

Il ressort des mesures effectuées pendant deux étés consécutifs que la distribution de l'énergie, pour hétérogène qu'elle peut être, n'induit pas de forte variabilité parallèle de l'évaporation. Ainsi, bien que des mesures n'ont pas été faites, il semble apparaître que l'énergie n'est limitante qu'en période de pluie, où le sol est suffisamment humide. Ces périodes sont le plus souvent rares pendant la saison de végétation de la vigne en milieu méditerranéen. De plus, la demande évaporatoire est généralement très élevée, même sous couvert de vigne, si bien que la conductivité du sol pour l'eau devient vite limitante.

Ainsi, dans le cadre d'une étude en milieu méditerranéen, il semble inutile de connaître la distribution de l'énergie à une échelle spatiale fine.

Les conséquences sur la modélisation vont dans le même sens:

- il faut privilégier un **pas de temps court** pour s'adapter aux cinétiques rapides de l'évaporation;
- l'évaporation n'a pas besoin d'être distribuée dans l'espace à l'échelle de la parcelle.

2. MODÉLISATION DE L'ÉVAPORATION

Les modèles choisis pour formaliser l'évaporation du sol nu doivent satisfaire à nos besoins d'une paramétrisation simple, c'est-à-dire qui peut être étendue à de nombreux types de sols à partir de mesures faciles d'accès. Rappelons que c'est la raison pour laquelle aucun modèle à bases énergétiques n'a été retenu (voir chapitre 1 § 5.2).

Deux types de modèles ont été sélectionnés, fonctionnant sur des principes différents. L'un calcule l'évaporation par une fonction empirique du temps écoulé depuis un événement pluvieux (Ritchie, 1972). L'autre estime le niveau d'évaporation à partir de l'humidité de la couche de surface (Van Keulen, 1975). Ces deux types de modèles seront d'abord examinés séparément. L'estimation des paramètres optima et les résultats de simulation seront ensuite présentés conjointement pour tous les modèles. Le modèle de Boesten et Stroosnijder (1986) a également été testé. Cependant, les résultats fournis n'étant pas meilleurs que ceux relatifs aux deux autres modèles, ils ne seront pas exposés ici.

2.1. Modèle de Ritchie (1972)

2.1.1. Principes du modèle

Le modèle de Ritchie fonctionne sur une analogie réservoir : l'évaporation est cumulée en deux phases. Pendant la première (phase I), l'énergie est limitante et l'évaporation réelle égale l'évaporation potentielle (équ.[2.1a]). Lorsqu'une somme d'évaporation U (paramètre du modèle) est atteinte, le modèle considère que l'humidité du sol devient limitante. La cinétique passe alors en phase II pendant laquelle l'évaporation décroît en fonction du temps écoulé depuis la dernière pluie (t) :

$$\Sigma ER = \Sigma EP \quad \text{si } \Sigma ER \leq U \quad \text{Equ.}[2.1a]$$

$$\Sigma ER = \alpha \cdot t^{1/2} \quad \text{si } \Sigma ER > U \quad \text{Equ.}[2.1b]$$

Le modèle requiert la détermination de deux paramètres (U et α). Ritchie (1972) a montré qu'ils sont reliés au type de sol et que leurs valeurs sont assez stables pour un même type de sol. Boesten et Stroosnijder (1986) ont néanmoins mis en évidence que ces valeurs peuvent varier avec la demande climatique (représentée par l'ETP).

Si une pluie intervient, elle est soustraite de la quantité d'évaporation cumulée afin de recalculer le temps équivalent auquel le cycle de dessèchement reprend (Equ.[2.1*b*]). Cette soustraction simple est utilisée pour toutes les pluies en phase I et les fortes pluies en seconde phase. En phase II pour les faibles pluies, Ritchie a déterminé une relation empirique qui serait, selon lui, "valable dans un grand nombre de situations". Cette relation lie la pluie précipitée et le niveau d'évaporation qu'elle permet ($ER = 0,8.P$). Cette quantité est déduite de la somme d'évaporation accumulée en phase II et l'évaporation reprend. Lorsque le sol est très sec, la pluie ne parvient pas à faire diminuer suffisamment le "réservoir" d'évaporation cumulée. De ce fait, la somme d'évaporation ne repasse jamais sous le réservoir critique U et l'évaporation reste en phase II, donc reste faible.

L'organigramme du modèle originel est donné en annexe 1.

2.1.2. Améliorations testées

Le modèle de Ritchie a été testé suivant trois procédures, dans un souci d'amélioration croissante :

- le modèle de Ritchie originel,
- modification du pas de temps d'exécution,
- modification de la prise en compte des pluies.

Nous allons examiner successivement les justifications et les procédures mises en pratiques pour chacune de ces modifications.

a) Le modèle de Ritchie originel (Modèle Rj - Ritchie journalier)

Pour l'exécution du modèle de Ritchie, les données nécessaires sont l'évaporation potentielle et les pluies.

L'évaporation potentielle (EP) est calculée au pas de temps de la journée par le modèle de Riou *et al.* (1989), selon le calcul de Riou *et al.* (1994) (voir chapitre 1 § 4.2.1 équ.[4.3] et [4.4]), à partir de l'ETP et du rayonnement global. Les données journalières de ces deux mesures sont accessibles directement.

La pluie mesurée à l'échelle de la minute par un pluviographe est cumulée à la journée.

Les données d'entrée sont donc accessibles à l'échelle de la journée.

b) Modification du pas de temps d'exécution (Modèle Rh - Ritchie horaire)

La rapidité du phénomène évaporatoire en climat méditerranéen nous a porté à reconsidérer le pas d'exécution du modèle. Nous avons souhaité savoir si la modélisation de cette cinétique pouvait être améliorée en ramenant le pas de temps de calcul initial à une heure au lieu d'une journée.

L'évaporation potentielle à l'échelle horaire a été calculée par le modèle de Riou *et al.* à partir des mesures horaires de rayonnement global et des mesures quotidiennes d'ETP. Ces dernières ont été converties en données horaires en stipulant que l'ETP suivait une cinétique journalière similaire à celle du rayonnement global. La pluie est cumulée à l'échelle horaire.

c) Modification de la prise en compte des pluies en phase II (Modèle R_{hm} - Ritchie horaire modifié)

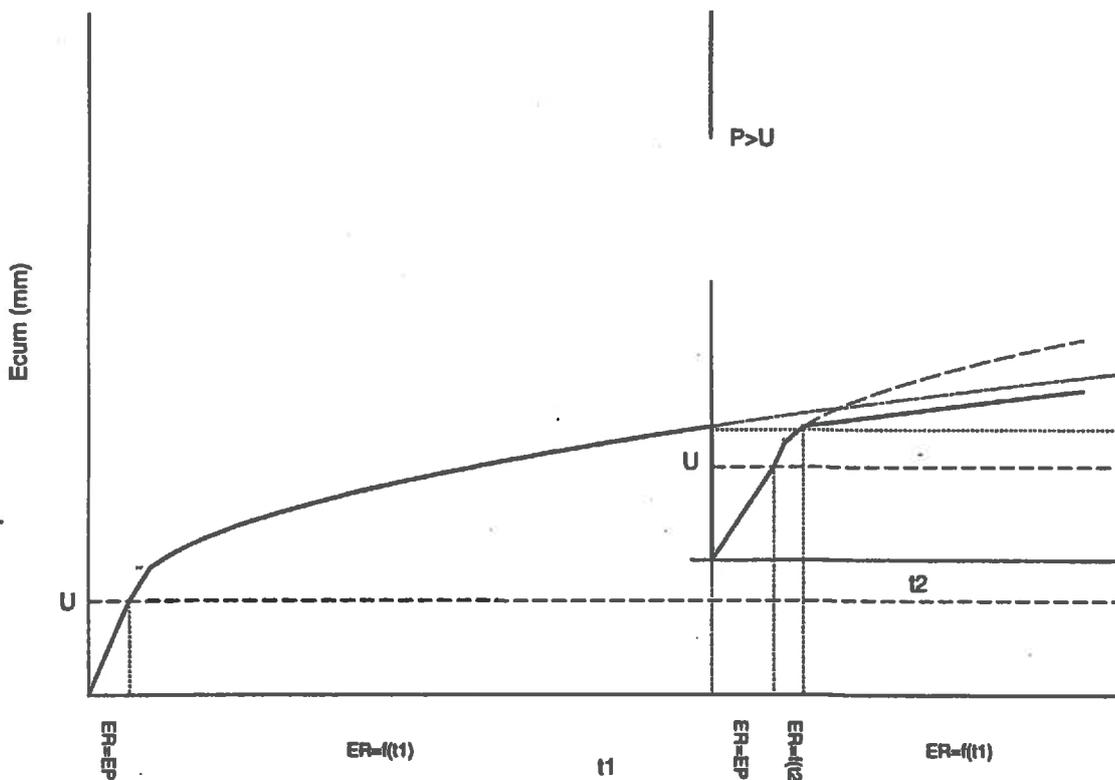


Figure 2-1 : Schéma de la modification du module de prise en compte des pluies dans le modèle R_{hm}

À la différence du modèle originel, nous avons considéré que toute pluie humectait suffisamment le sol pour que le cycle d'évaporation reprenne en début de phase I. Le cycle se poursuit alors conformément à la cinétique "normale" jusqu'à l'évaporation totale de la pluie. Lorsque la pluie est évaporée, le niveau d'évaporation reprend tel qu'il a été laissé avant la pluie (fig.2-1).

Cette réinitialisation lors des précipitations a déjà été testée par Boesten et Stroosnijder (1986) comme amélioration de leur propre modèle. Elle devrait permettre au modèle de Ritchie de mieux s'ajuster à l'évaporation mesurée par les lysimètres.

2.2. Le modèle de Van Keulen (1975)

2.2.1. Principe du modèle

Le modèle d'évaporation de Van Keulen (1975) fonctionne également de façon empirique. Il relie l'évaporation du sol à l'humidité de la couche de surface et à l'évaporation potentielle.

La relation que nous avons utilisée est de la forme (Rambal et Cornet, 1982):

$$ER_t = EP_t \cdot (a + b \cdot e^{-c/S_t^*}) \quad \text{Equ.}[2.2]$$

avec S_t^* le taux de saturation de la couche de surface, qui se calcule par :

$$S_t^* = \frac{\theta_t - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \quad \text{Equ.}[2.3]$$

où θ_t représente l'humidité volumique de la couche de surface au temps t ,

θ_{\min} et θ_{\max} se réfèrent aux humidités minimales et maximales de la couche de surface, déterminées au laboratoire.

a , b et c sont des paramètres à calibrer ou estimer. a représente le niveau minimal d'évaporation lorsque le sol est à son humidité la plus basse. Il peut donc être estimé à partir de mesures. b est la pente de la chute d'évaporation du niveau maximal au niveau minimal. c représente le délai entre le moment où l'évaporation du sol est maximale et celui où elle commence à décroître (plus c est grand, plus le délai est court).

La variable S_t^* a été préférée à la teneur en eau volumique pour un souci de transposition du modèle à plusieurs types de sol. En effet, elle représente un état hydrique calculable pour un grand nombre de sols à partir du moment où les paramètres θ_{\min} et θ_{\max} sont estimés de façon équivalente à ceux du modèle.

L'évaporation calculée par l'équation [2.2] est distribuée sur une profondeur donnée selon un profil de distribution exponentielle en fonction de l'état d'humidité du sol et d'un coefficient d'atténuation k_a :

$$ER_t = \sum ER_{z,t} = \sum (p_{t,z} \cdot ER_t) \quad \text{Equ.}[2.4]$$

$p_{t,z}$ est un rapport normalisé ($\sum p_{t,z} = 1$) servant à distribuer l'évaporation entre les différentes couches de sol créées :

$$p_{t,z} = \frac{p'_{t,z}}{\sum_z p'_{t,z}} \quad \text{Equ.}[2.5]$$

Cette proportion est calculée en fonction de l'état d'humidité de chaque couche ($p'_{t,z}$) :

$$p'_{t,z} = S_{t,z}^* \cdot (e^{-k_a \cdot z} - e^{-k_a \cdot (z+1)}) \quad \text{Equ.}[2.6]$$

z étant la profondeur de la couche considérée.

Ce système d'équations traduit que l'évaporation est atténuée de façon exponentielle dans le sol et que sa distribution est pondérée par l'humidité des couches de la tranche de sol concernée par l'évaporation.

Ce modèle requiert une estimation de la teneur en eau de surface à une échelle très fine. Afin de prendre en compte les pluies, et ne possédant pas de mesures à cette échelle, nous avons simulé l'humidité de la couche de surface par un modèle de bilan hydrique simplifié. Nous avons choisi un modèle par analogie réservoir à fonction d'infiltration simple. Les tranches de sol créées dans la couche concernée par l'évaporation sont assimilées à des réservoirs empilés entre lesquels les transferts d'eau sont considérés comme unilatéraux vers le bas. La pluie remplit la première couche de sol. Si l'humidité dépasse l'humidité maximale de cette couche, le trop-plein passe dans la couche sous-jacente et ainsi de suite. L'humidité de chaque couche est réactualisée en fonction de la quantité d'eau précipitée.

2.2.2. Mise en œuvre

La couche concernée par l'évaporation a été déterminée par l'observation des profils d'humidité mesurés. On identifie une couche de 40 cm en surface où les variations de stock

sont plus marquées. Nous considérerons donc que le phénomène évaporatoire porte sur ces 40 cm.

L'épaisseur de la couche de surface dont l'humidité limite l'évaporation se révèle influente sur la qualité de l'estimation (Chanzy et Bruckler, 1993). L'analyse réalisée par Chanzy et Bruckler (1993) montre que, lorsque le sol est sec, l'humidité d'une couche fine (1 à 3 cm) varie trop peu par rapport à la forte variation simultanée du rapport ER/EP. Ainsi, la moindre imprécision sur l'estimation de cette humidité est préjudiciable à la qualité de l'estimation de l'évaporation. En revanche, à partir d'une épaisseur de 5 cm et pour une épaisseur de 10 cm, les résultats sont satisfaisants. Dans notre cas, l'épaisseur optimale a été déterminée par simulations. Le reste du profil, où est répartie l'évaporation, est divisé en couches de 1 cm.

Pour établir les conditions hydriques initiales de la couche de surface à une échelle spatiale aussi fine, on estime que le sol est à son humidité maximale au mois de février (2 mois avant les expérimentations) selon un profil vertical. On fait alors tourner le modèle d'évaporation depuis ce jour jusqu'au début de notre expérimentation.

Le coefficient d'atténuation utilisé est celui de Van Keulen (1975) : $k_a = 0,0125 \text{ mm}^{-1}$

Le modèle de Van Keulen (modèle VK) répond à nos exigences sur l'échelle de temps de travail puisqu'il peut tourner à l'échelle de l'heure. Il ne présente pas l'inconvénient majeur du modèle de Ritchie quant à la réinitialisation après une pluie. En effet, la pluie faisant remonter l'humidité du sol, son effet sur l'évaporation est direct et plus ou moins marqué selon la quantité d'eau précipitée.

2.3. Procédure d'optimisation du calage des paramètres

La détermination des paramètres des modèles se fait de façon à ce que les valeurs simulées soient les plus proches possible des valeurs mesurées. La procédure est la même pour tous les modèles testés.

Les étapes les plus délicates à paramétrer concernent la période autour des pluies, c'est-à-dire lorsqu'il y a augmentation puis décroissance rapide de l'évaporation. Aussi, dans le souci de multiplier le nombre de périodes pour calibrer les modèles, nous avons choisi de travailler sur les deux années plutôt que de calibrer sur une année et de valider sur l'autre. Ceci porte le nombre de cycles d'humectation-dessiccation de 5 pour chaque année à 10.

Nous avons choisi la somme des carrés des écarts entre les valeurs simulées et mesurées (SCE) comme critère d'optimisation de l'ajustement :

$$SCE = \sum_t (E_t - E_t^*)^2 \quad \text{Equ.}[2.7]$$

avec t , la période de mesure étudiée (de 3 à 7 jours),
 E_t , l'évaporation totale mesurée sur cette période,
 E_t^* , l'évaporation totale simulée sur la même période

La somme des carrés des écarts représente un critère synthétique couramment utilisé qui traduit bien la cohérence globale entre modèle et mesures. L'optimisation sur ce critère ne garantit cependant pas l'absence de biais. Nous avons donc contrôlé que le biais, expression d'une tendance générale du modèle, n'était pas trop important par rapport aux valeurs mesurées. Le biais est calculé par :

$$SE = \sum_t (E_t - E_t^*) \quad \text{Equ.}[2.8]$$

2.4. Résultats

Les résultats ici présentés portent sur la détermination des paramètres, la sensibilité des modèles d'évaporation à leur estimation et enfin sur les cinétiques d'évaporation obtenues par ces modèles.

2.4.1. Estimation des paramètres

Ce paragraphe introduit dans un premier temps les paramètres obtenus pour l'optimisation de chacun des modèles étudiés ainsi que la sensibilité des modèles à leur estimation. Dans une seconde étape, les résultats des modèles optimisés seront regardés en terme de somme des carrés des écarts.

a) Paramètres calibrés et sensibilité des modèles à leur estimation

Nous avons cherché les paramètres qui minimisent SCE sur les deux années expérimentales cumulées. Les valeurs de ces paramètres et les conséquences sur les résultats de chaque année séparée sont reportées tableau 2-1.

• Modèles de type Ritchie

Le paramètre α traduit la vitesse de dessiccation du sol en seconde phase. La valeur obtenue pour le modèle journalier (R_j) est conforme aux valeurs trouvées dans la bibliographie pour ce type de sol (Ritchie, 1972 voir tableau 2-1; Tanner et Jury ; 1976 ; Yunusa *et al.*, 1993a-b). À une échelle horaire, les valeurs de α sont plus élevées, signifiant une cinétique de

dessiccation plus rapide. Cette constatation traduit le fait que les modèles journaliers sont intégrateurs de phénomènes horaires très rapides et très contrastés (forte vitesse de dessiccation qui diminue rapidement). Ceci appuie notre choix de travailler à une échelle de temps courte.

Modèle	Paramètres					1993		1994		Ensemble	
	U	α	a	b	c	SE	SCE	SE	SCE	SE	SCE
Rj	2,7 (6-12)	2,16 (3,3-5,1)	-	-	-	11,75	50	12,07	42	23,83	92
Rh	3,0	3,50	-	-	-	12,81	55	11,00	38	23,81	93
Rhm	0,5	4,40	-	-	-	11,46	61	1,21	35	12,67	96
VK	-	-	0,15 (0,075)	800 (1,2)	6,24 (0,3)	-9,42	42	-1,62	34	-11,04	76

Tableau 2-1: Valeurs des fonctions d'optimisation sur les deux années simultanément pour chaque modèle d'évaporation testé. Entre parenthèses sont données les valeurs des modèles originels (Ritchie, 1972 et Rambal et Cornet, 1982)

Les optimisations réalisées donnent des valeurs de U faibles, ce qui illustre que les propriétés hydrodynamiques du sol deviennent très rapidement limitantes vis-à-vis de l'évaporation potentielle après une pluie. Le modèle *Rhm* est même optimisé par l'utilisation d'une valeur de U de 0,5 mm, traduisant que la phase évaporatoire non réduite est quasiment inexistante.

La sensibilité des modèles de type Ritchie à l'estimation de U et α est illustrée par les isocontours de la SCE en fonction de leurs valeurs (figures 2-2a,b,c). On peut voir sur ces figures que les modèles de *Rj*, *Rh* et *Rhm* se classent dans cet ordre croissant de sensibilité vis-à-vis de l'estimation des paramètres. Le modèle *Rj* est paramétré de façon optimale sur un point précis ; le modèle *Rh* voit le minimum de SCE encadré par un isocontour un peu plus vaste alors que *Rhm* est peu sensible à l'estimation des paramètres autour du minimum de SCE. Aux alentours du point minimum, les modèles de Ritchie non modifiés (*Rj* et *Rh*) présentent des isocontours orientés plutôt parallèlement à l'axe de U. Ils sont donc peu sensibles à l'estimation de ce paramètre. En revanche, le modèle *Rhm* montre des isocontours orientés en diagonale, traduisant que les deux paramètres sont influents dans la qualité de l'estimation de l'évaporation.

Après une pluie, les modèles de Ritchie non modifiés reprennent rarement le cycle d'évaporation en phase I. Le paramètre U qui sert de transition entre les deux phases d'évaporation reste donc inusité pendant la plus grande partie de la saison si bien que son influence est minime sur l'estimation de l'évaporation. Par contre, le modèle Rhm réinitialise l'évaporation en début de phase I à chaque pluie en conséquence de quoi le réservoir critique U intervient fréquemment dans la cinétique de simulation. Sa valeur a donc une influence sensible sur l'estimation de l'évaporation.

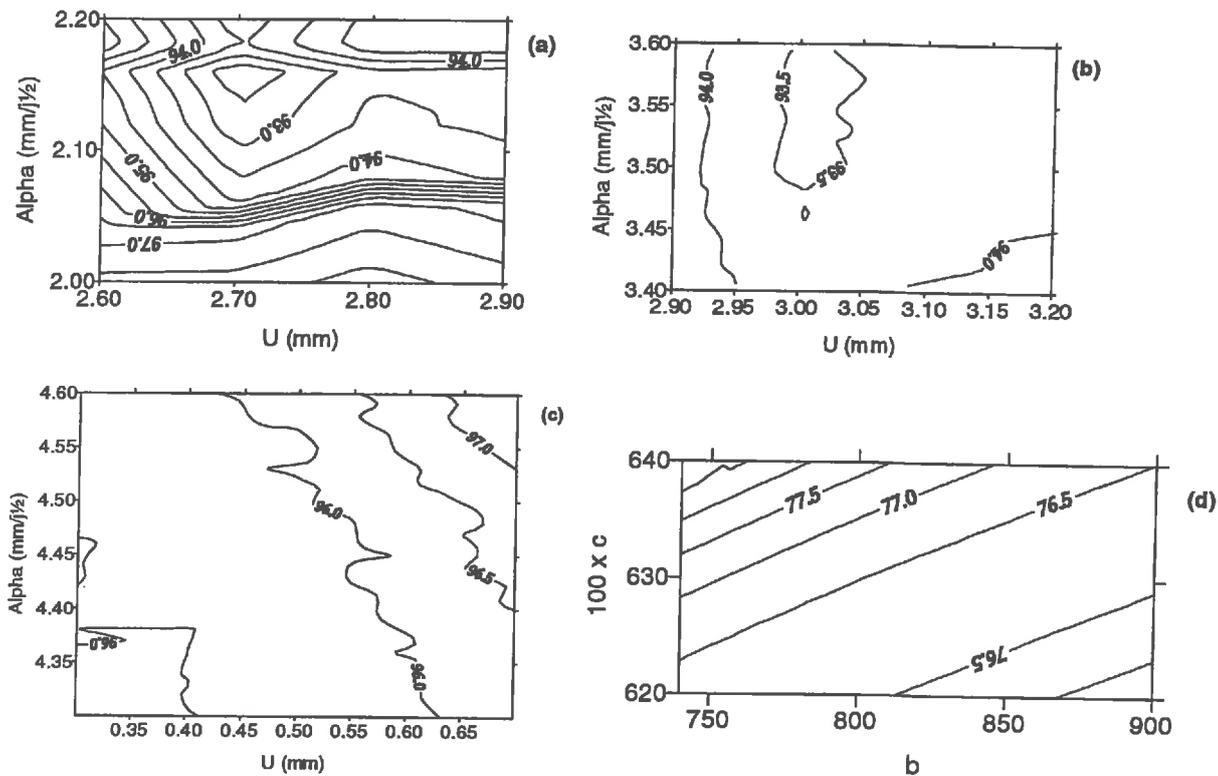


Figure 2-2 : Isocontours de la somme des carrés des écarts entre les valeurs d'évaporation mesurées et simulées par les différents modèle testés : (a) : Ritchie journalier (R_j); (b) : Ritchie horaire (R_h); (c) : Ritchie modifié (R_{hm}); (d) : Van Keulen (VK)

• Modèle de type Van Keulen

L'optimisation du modèle de Van Keulen a porté sur les paramètres b et c (Equ.[2.2]).

Afin de simplifier l'estimation des paramètres, le paramètre a , valeur du rapport d'évaporation à l'évaporation potentielle lorsque le sol est sec, est déterminé expérimentalement. Ceci a été effectué par moyenne des valeurs mesurées sur le terrain en fin de cycle de dessiccation sur les deux années et arrondi à la valeur la plus proche. Il a ainsi été

fixé à 0,15, valeur légèrement supérieure à celle de 0,10 préconisée par différents auteurs (Ritchie, 1971 et Hillel, 1974, cités par Van Keulen, 1975). Cette différence peut provenir du fait que ces auteurs travaillent sur sol nu, donc dans des conditions d'évaporation potentielle plus forte que sous couvert. Ainsi, le rapport ER/EP limite (sol sec) est-il plus faible que dans nos conditions expérimentales.

On recherche alors d'une part l'épaisseur de la couche dont l'humidité semble traduire au mieux les variations d'évaporation et d'autre part, pour cette épaisseur, le couple (b,c) optimal pour l'ajustement du modèle aux mesures.

L'épaisseur a été déterminée par recherche des paramètres optimaux sur plusieurs épaisseurs prédéfinies (2, 5, 8, 10 et 15 cm). Dans le cas de notre étude, il a été établi par simulations que 10 cm était l'épaisseur la plus adéquate à l'estimation de l'évaporation par le modèle VK, ce qui est cohérent avec les résultats de Chanzy et Bruckler (1993).

Les paramètres b et c déterminés présentent des valeurs élevées (tableau 2-1). Ces valeurs indiquent que l'évaporation diminue très fortement (valeur de b) dès le début du cycle de dessiccation du sol (valeur de c) suivie pour évoluer beaucoup plus lentement dès que le sol s'est un peu asséché. Ces paramètres sont très éloignés des paramètres utilisés par Van Keulen (1975) puisque celui-ci utilisait : $b = 1,2$ et $c = 0,3$. Les conséquences sur le cycle complet d'évaporation sont que la cinétique de dessèchement simulée par le modèle VK n'affiche pas de palier d'évaporation lorsque le sol est humide, contrairement à la cinétique originelle de Van Keulen. L'équation utilisée pour la mise en œuvre du modèle d'évaporation n'est donc peut-être pas la mieux adaptée aux cinétiques rapides comme celles que l'on observe en climat méditerranéen. Cependant, la grande souplesse du modèle de Van Keulen et son fonctionnement à partir des mesures d'humidité du sol en font un modèle privilégié dans notre cas d'étude.

La figure 2-2d montre les évolutions comparées de SCE sur les deux années de mesures individuellement en fonction des variations de b et c. Malgré l'impression rendue par l'échelle de la figure 2-2d, le modèle est beaucoup plus sensible à l'estimation de c qu'à celle de b. En effet, on constate que, pour que SCE varie de 2 ‰, il faut soit que b varie de 6 ‰, soit que c varie de 1 ‰. Dans notre cas, la baisse d'évaporation étant très forte, ce calcul de sensibilité indique qu'il vaut mieux privilégier la précision sur c (délai entre évaporation maximum et chute d'évaporation) que celle sur la pente de la décroissance. Cependant, par rapport aux modèles de type Ritchie "classiques" (R_j et R_h), le modèle VK se montre peu sensible à la précision de l'estimation des paramètres.

• Conclusions

Pour tous les modèles utilisés, l'évaporation simulée est très forte pendant une période courte, décroît de manière très intense dès le début du dessèchement du sol puis reste quasiment stable peu de temps après le début de la dessiccation du sol.

Comme il a été dit ci-dessus, cette cinétique peut s'expliquer de deux façons :

- soit les capacités hydrodynamiques du sol en surface deviennent très rapidement limitantes après une pluie ;
- soit les pluies ne sont pas suffisantes pour réhumecter le sol jusqu'à saturation dans la période de mesure. Dans ce cas, les modèles sont calibrés à partir d'un état d'humidité inférieur à l'humidité maximale envisageable.

b) Valeurs de SCE après optimisation sur les deux années réunies

Les valeurs de SCE figurent dans le tableau 2-1 pour chaque modèle testé.

Pour tous les modèles de Ritchie, les valeurs de SCE obtenues sur les deux années sont assez similaires ; le modèle de Van Keulen se distingue nettement par une SCE beaucoup plus faible (entre 16 et 20 mm² de moins). De la même manière, les biais les plus faibles sont obtenus par les modèles de Ritchie modifié (*R_{hm}*) et de Van Keulen.

Pour les modèles de type Ritchie, le changement de pas de temps de mesure n'a apporté aucune amélioration des résultats de simulation. La modification du module de prise en compte des pluies a divisé le biais de moitié mais pour une SCE moins bonne que pour les modèles de Ritchie originels. Ce résultat est issu d'une optimisation sur 1993 mauvaise associée à des très bons résultats pour 1994.

Ce déséquilibre entre les deux années est un phénomène que l'on retrouve pour tous les modèles sans distinction : toutes les optimisations retenues fournissent des résultats bien meilleurs en 1994 qu'en 1993. Cette différence est sans doute liée à la différence de régime pluviométrique des deux années expérimentales puisque la période sensible d'un modèle d'évaporation est celle qui suit une pluie : en 1993, un gros orage en milieu d'été a été intégré aux mesures pour l'estimation des paramètres des modèles. En 1994, le gros orage de la fin juillet a provoqué des problèmes de mesures par les lysimètres. Par voie de conséquence, les pluies de 1994 qui ont servi à l'optimisation n'ont été que de petites pluies.

En conclusion, le modèle de type Van Keulen se révèle bien mieux adapté que les différentes versions du modèle de Ritchie pour simuler l'évaporation du sol sous vigne dans nos conditions expérimentales.

2.4.2. Étude de sensibilité des modèles d'évaporation testés à l'estimation de l'évaporation potentielle

Les valeurs d'évaporation potentielle ont été calculées par le modèle de Riou *et al.* (1989) en fonction notamment des paramètres morphologiques du rang de vigne. Nous avons voulu déterminer dans un premier temps quelle erreur on pouvait faire sur l'estimation de EP par le modèle de Riou *et al.* et, dans un second temps, quelle conséquence cela pouvait avoir sur l'application des modèles d'évaporation proposés.

a) Sensibilité de la mesure d'évaporation potentielle dans le modèle de Riou et al. (1989)

L'erreur qui peut être commise dans l'application du modèle de Riou *et al.* porte sur la hauteur de feuillage (H), la largeur du rang (L) et l'albédo du sol (a_s). La porosité de feuillage est admise comme ayant une influence négligeable sur le calcul (Riou, comm. pers.).

Les valeurs retenues pour notre parcelle sont :

$$a_s = 0,18$$

$$H = 1,20 \text{ m}$$

$$L = 0,70 \text{ m}$$

La valeur d'albédo a été choisie parce qu'elle est représentative de l'albédo d'un sol brun sec, ce qui est le cas la plupart du temps dans notre parcelle.

Nous avons testé les effets d'une erreur d'estimation sur ces paramètres en considérant deux valeurs extrêmes et une médiane pour chacun d'eux :

$$a_s = 0,15 ; 0,20 ; 0,25$$

$$H = 1,00 \text{ m} ; 1,20 \text{ m} ; 1,50 \text{ m}$$

$$L = 0,40 \text{ m} ; 0,60 \text{ m} ; 0,80 \text{ m}$$

La simulation a porté sur deux journées : l'une en cours de croissance de la vigne (jour 155 - le 4 juin 1994) et l'autre en période de développement foliaire maximal (jour 208 - le 27 juillet 1994).

Les résultats des simulations ont été regardés en indices. L'indice 100 est fourni par la valeur correspondant à notre expérimentation ($a_s = 0,18$; $H = 1,20 \text{ m}$; $L = 70 \text{ cm}$). Les indices

sont donnés par les figures 2-3a à f. La première constatation est que les effets d'une variation de chaque paramètre sont plus forts en plein développement foliaire qu'en milieu de croissance (écart maximum de 182 %). Ceci s'explique par la faible valeur de l'évaporation potentielle lorsque la vigne est très développée (EP = 1 mm pour une ETP de 4,7 mm) alors qu'elle représente plus de 60 % de l'ETP au jour 155 (EP=3,5 mm ; ETP=5,6 mm).

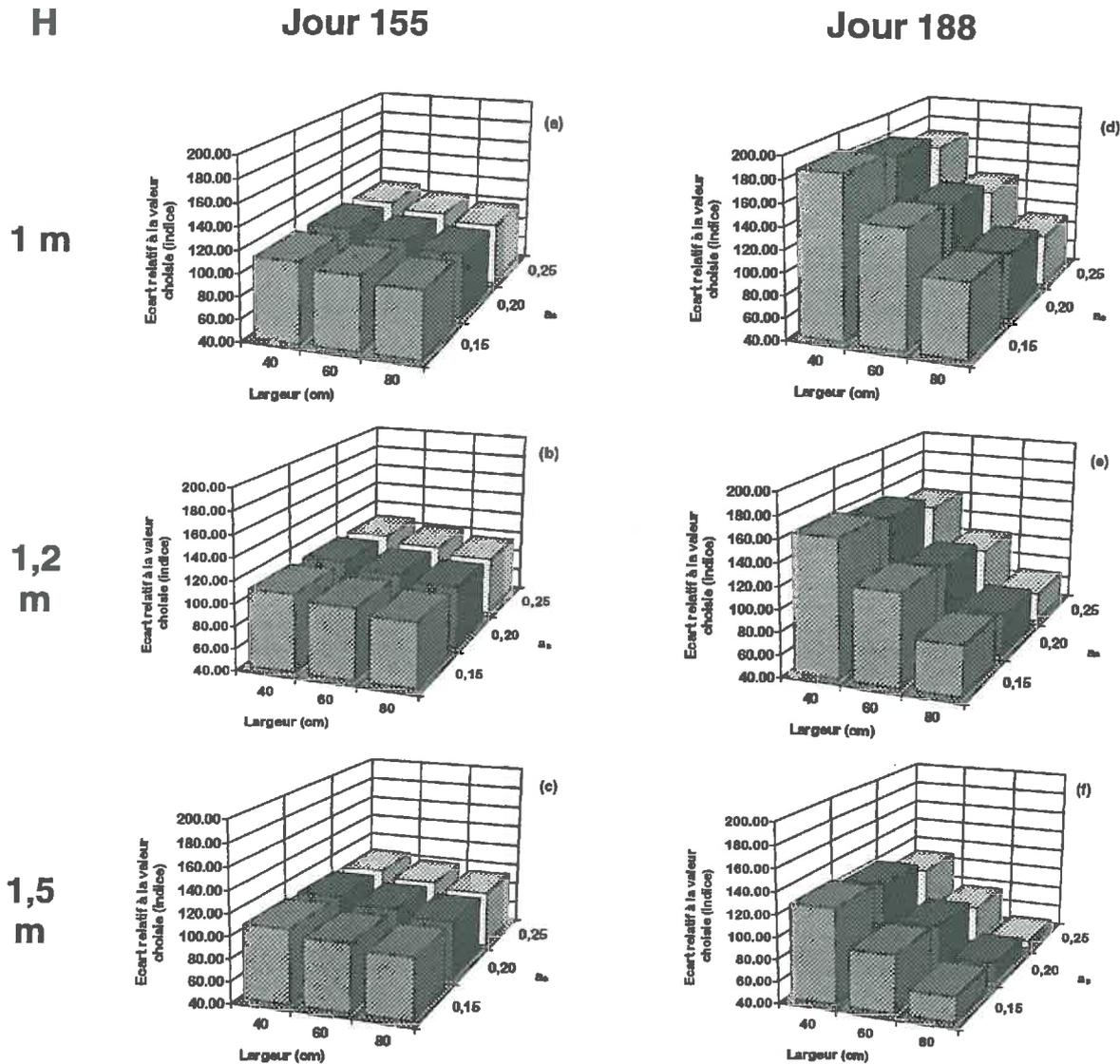


Figure 2-3 : Effets d'une modification de certains paramètres du modèle de Riou *et al.* (1989) sur l'estimation de l'évaporation potentielle qui en découle. Les valeurs sont reportées en indice par rapport à la valeur prise en référence (voir texte).

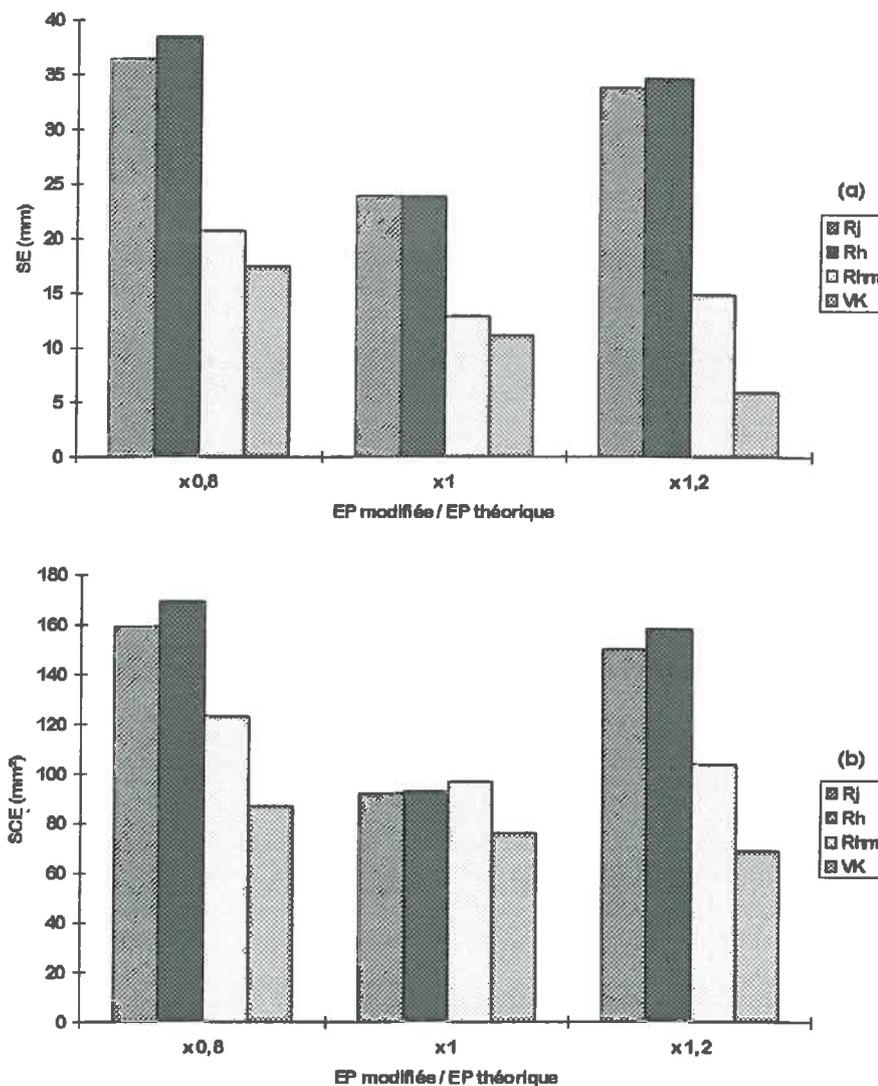
L'albédo du sol a peu d'influence sur le calcul d'évaporation potentielle par rapport aux deux autres paramètres. Parmi eux, c'est la largeur qui a le plus d'effet sur l'estimation.

Si l'on admet une erreur de 10 cm sur chacun des paramètres morphologiques et une estimation de l'albédo fiable à 0,05 près, l'erreur maximale commise sur EP est de 5 % à microcroissance et 25 % en plein développement.

b) Effet d'une erreur dans le calcul d'évaporation potentielle sur la modélisation de l'évaporation du sol

La sensibilité des modèles d'évaporation a été testée en prenant une EP de 20 % supérieure ou de 20 % inférieure à la valeur estimée initialement ($EP' = 1,2 \cdot EP$ et $EP'' = 0,8 \cdot EP$).

Les histogrammes présentés figures 2-4a et b montrent l'effet d'une erreur dans l'estimation de l'évaporation potentielle sur SCE et SE. La somme des écarts est représentée en valeur absolue (toujours positive) pour la lisibilité des histogrammes.



Figures 2-4a-b : Effets d'une variation de 20 % de l'évaporation potentielle sur les fonctions prises comme critères d'optimisation : (a) : biais du modèle ; (b) : somme des carrés des écarts. Simulations sur 2 années.

Une erreur de 20 % sur l'évaporation potentielle induit de fortes modifications des résultats d'évaporation simulée par les modèles de Ritchie non modifiés. En revanche, les effets sont beaucoup moins marqués sur les modèles *Rhm* et *VK*. Ce phénomène peut s'expliquer simplement par le fait que, dans le cas du modèle de Ritchie modifié, l'évaporation potentielle n'intervient quasiment à aucun moment de la cinétique puisque U est très faible. Pour le modèle de Van Keulen, un changement d'évaporation potentielle agit directement sur l'humidité de la couche de surface si bien que l'évaporation réelle diminue en conséquence. Autrement dit, il y a auto-compensation entre les modifications sur l'évaporation potentielle et les conséquences sur le niveau d'évaporation réelle.

Globalement, on peut conclure que l'effet d'une mauvaise estimation de l'évaporation potentielle aura peu d'effets sur l'estimation de l'évaporation par les modèles de Van Keulen et de Ritchie modifié. Ceci donne un argument supplémentaire pour retenir le modèle de Van Keulen comme le mieux adapté pour la modélisation de l'évaporation dans la parcelle expérimentale.

2.4.3. Dynamique d'évaporation

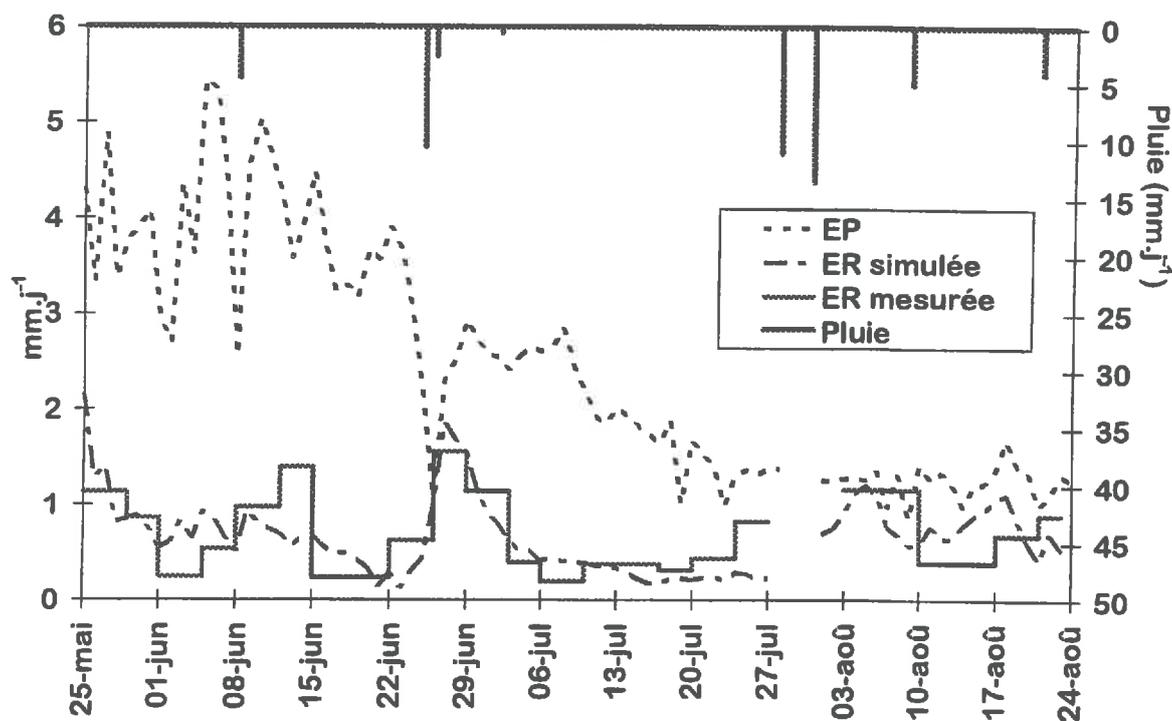


Figure 2-5 : Cinétique d'évaporation du sol sous couvert. Confrontation dynamique des valeurs mesurées et simulées par le modèle VK au cours de l'été 1994.

La cinétique d'évaporation simulée par le modèle de Van Keulen en 1994 est représentée figure 2-5. Comme le laissent percevoir les paramètres d'optimisation, les valeurs simulées s'ajustent bien aux valeurs mesurées par mini-lysimètres tout au long de l'été. La distribution de l'évaporation en plusieurs réservoirs permet d'assouplir la cinétique d'évaporation. Celle-ci montre une remontée marquée du niveau d'évaporation après une pluie et une stabilisation au niveau minimum d'évaporation environ une semaine après la pluie.

Le modèle de Van Keulen tel que mis en œuvre et calibré est donc le plus adéquat des modèles testés pour simuler l'évaporation du sol nu sous couvert de vigne.

3. CONCLUSION GÉNÉRALE : MESURE ET MODÉLISATION DE L'ÉVAPORATION DU SOL SOUS UNE VIGNE EN RANGS

Les travaux réalisés à l'échelle d'une parcelle de vigne ont permis de tirer quelques conclusions sur la variabilité spatiale de l'évaporation à l'échelle de la parcelle et notamment de l'inter-rang. Les conséquences de ces observations ont pu être intégrées dans une modélisation adaptée à la parcelle expérimentale étudiée.

L'échantillonnage mis en place a permis de déterminer que l'évaporation peut être vue comme homogène au sein d'un inter-rang.

Quatre modèles d'évaporation ont été testés : trois sont issus du modèle de Ritchie, un est inspiré du modèle de Van Keulen.

Tous les modèles de Ritchie donnent des résultats médiocres en raison des problèmes théoriques liés à la réinitialisation de l'évaporation après une pluie. De plus, les phénomènes évaporatifs sont très rapides en milieu méditerranéen, même sous couvert. Par conséquent, la division de la cinétique d'évaporation en deux phases aussi distinctes qu'elles le sont dans le modèle de Ritchie ne se justifie pas.

Le modèle de Van Keulen permet le meilleur ajustement. Son principe par analogie réservoir et la discrétisation du sol qu'il impose permettent une grande souplesse de la cinétique d'évaporation et une bonne adéquation entre les mesures et les valeurs simulées sur les deux années indépendamment. Une analyse de sensibilité a montré que ce modèle était peu sensible à la qualité de l'estimation de l'évaporation potentielle par le modèle de Riou *et al.* (1989). Ce dernier point est un avantage certain étant donné que tous les paramètres d'entrée du modèle de Riou *et al.* ne sont pas connus avec précision. Il est donc le modèle que nous retiendrons pour simuler l'évaporation du sol couvert.

CHAPITRE 5

VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE ET MODÉLISATION DE LA TRANSPIRATION ET DE L'EXTRACTION RACINAIRE DE LA VIGNE À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE

L'alimentation en eau de la vigne a été étudiée à partir de deux mesures distinctes. La mesure du flux de sève assimilable à la transpiration d'une part. D'autre part, le suivi des variations du stock hydrique du sol qui permet de localiser les zones d'alimentation en eau de la vigne au sein du sol.

1. TRANSPIRATION DE LA VIGNE

1.1. Variabilité spatiale du flux de sève

1.1.1. Variabilité intra-parcellaire des mesures

La figure 1-1 montre l'évolution des valeurs de transpiration pendant l'été 1994 avec les écarts-types correspondants. La variabilité de la mesure, illustrée par l'écart-type, diminue au mois de juillet (jours 189 à 210) pour se stabiliser en août autour de 0,2 mm. Sur vigne, des observations similaires ont été réalisées par Lascano *et al.* (1992) sur un échantillon de 5 ceps, sans que les auteurs analysent toutefois les variations de variabilité observées.

Cette évolution traduit que les différences de comportement entre individus sont plus marquées lorsque l'eau du sol est disponible pour leur alimentation que lorsque le sol est plus sec. Puisque la teneur en eau du sol n'est alors pas limitante pour l'alimentation hydrique des ceps, deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer les écarts de début de saison. Selon la première, la densité de colonisation racinaire imposée par les hétérogénéités du sol contraint l'exploitation du stock hydrique : des individus consomment beaucoup du fait d'un enracinement étendu, d'autres peu. Dans une seconde hypothèse, la distribution racinaire entre

ceps est équivalente mais la surface foliaire différente entre les individus provoque une grande hétérogénéité intra-parcellaire de transpiration.

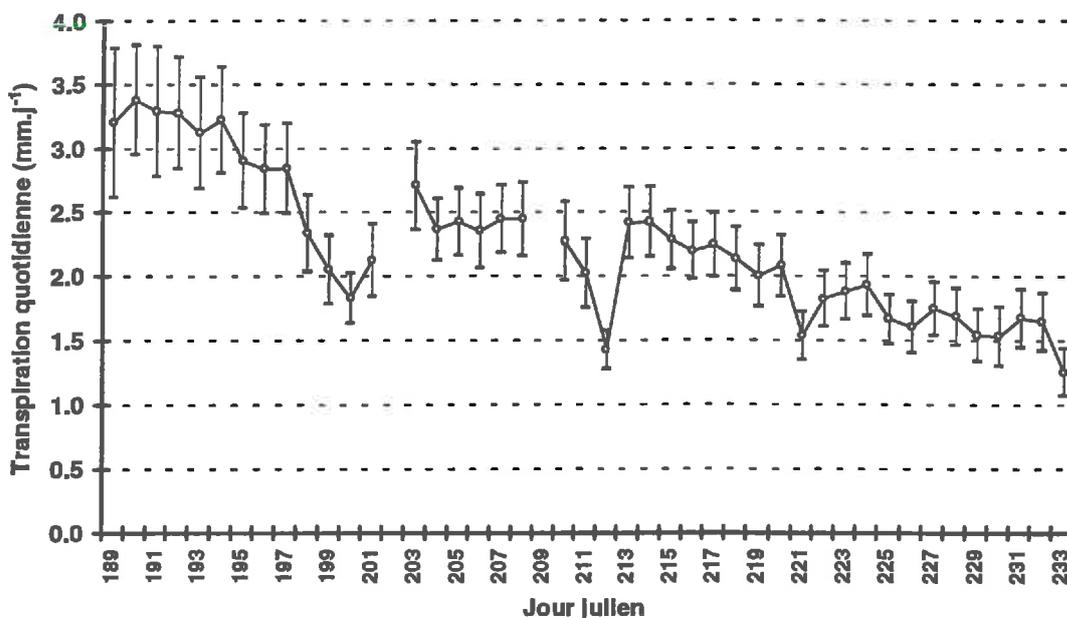


Figure 1-1 : Évolution du flux de sève parcellaire moyen (moyenne de 10 mesures) au cours de l'été 1994. Écart-type sur la moyenne.

S'il n'est pas possible de tester la validité de la première hypothèse, nous pouvons en revanche essayer d'évaluer la seconde à partir des mesures à notre disposition. Si la seconde hypothèse est justifiée, la variabilité de la transpiration devrait diminuer lorsqu'elle est rapportée à la surface foliaire. La figure 1-2 montre l'évolution du coefficient de variation de la transpiration selon qu'elle est divisée ou non par la surface foliaire. Pour les premiers jours de mesure (jours 189 à 197), le coefficient de variation est plus faible pour la transpiration lorsqu'elle est divisée par la surface foliaire que lorsqu'elle ne l'est pas. Cette différence est faible (0,08 à 0,10) et n'explique probablement pas toute la variabilité observée. En fait, la surface foliaire totale n'est sans doute pas un bon témoin de la variabilité de la transpiration entre individus. En effet, toutes les feuilles d'un cep ne participent pas avec la même intensité à sa transpiration totale. Smart (1973) a montré qu'une feuille à l'ombre peut transpirer 4 fois moins qu'une feuille bien exposée. Dans le cas d'une vigne à fort développement végétatif comme la Syrah, il peut y avoir compétition pour la lumière entre deux pieds voisins sur un rang. De ce fait, beaucoup de feuilles peuvent être à l'ombre et donc participer avec moins d'intensité au flux total de transpiration. La surface foliaire exposée serait un paramètre plus pertinent à utiliser mais son accès pour chaque cep individuellement est difficile.

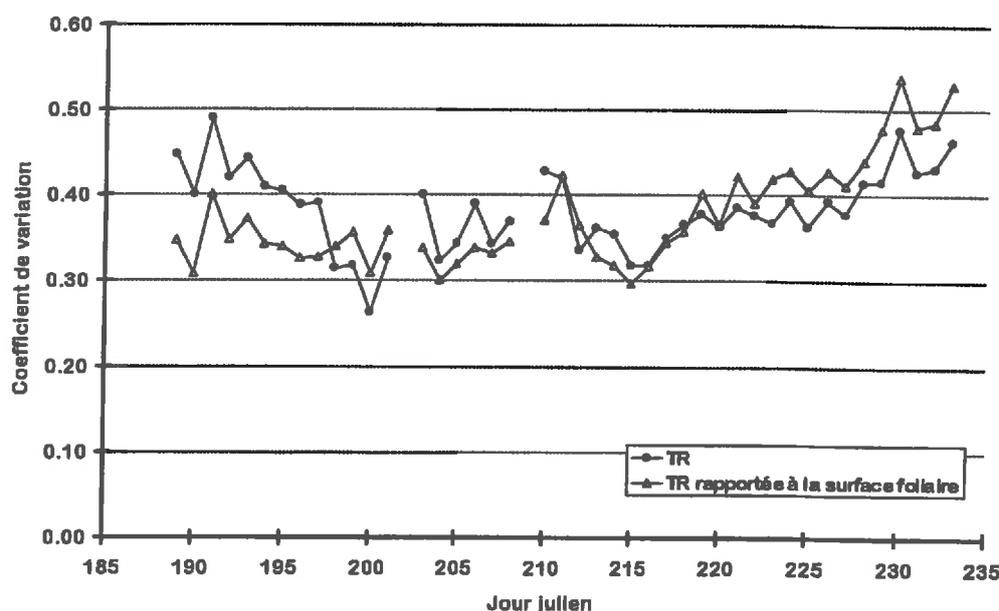


Figure 1-2 : Évolutions comparées des coefficients de variation de la transpiration moyenne parcellaire et de la transpiration rapportée à la surface foliaire.

Lorsque le sol s'assèche, la disponibilité de l'eau dans le sol devient limitante. Dans l'hypothèse d'un enracinement homogène entre les individus, le sol est quasiment à la même humidité en tout point de la parcelle. Dans l'hypothèse d'enracinements différents, le sol, plus exploité par les ceps aux racines vigoureuses, a atteint un état hydrique variable selon les endroits. Dans les deux cas, la conséquence est que la variabilité de transpiration entre individus s'amenuise jusqu'à se stabiliser.

1.1.2. Variables morphologiques corrélées à la transpiration

Afin d'accéder facilement à la variabilité intra-parcellaire de la consommation en eau d'une culture, de nombreux auteurs ont recherché des relations entre la consommation en eau des plantes et des mesures sur les parties végétatives. La plupart du temps, les relations sont recherchées avec la surface foliaire (par exemple Heilman et Ham, 1990 sur une liane; Ham *et al.*, 1991 sur coton). Ceci s'explique car les feuilles sont à la fois l'expression de la capacité de transpiration (plus la surface foliaire est grande, plus la plante peut, potentiellement, transpirer) et à la fois un organe dont la croissance est liée à la quantité d'eau absorbée (Williams et Grimes, 1988). Sur vigne, Mériaux *et al.* (1979, 1981) ont mis en évidence des relations fortes entre la transpiration annuelle de vignes en pots (cépages Grenache ou Cabernet-Sauvignon) et des paramètres comme le poids de bois de taille, la longueur des rameaux ou la surface foliaire.

Nous avons donc évalué la relation entre la transpiration et le poids de bois de taille (P_{BT}) ou l'indice foliaire. Celles-ci sont illustrées par les figures 1-3a et b. Nous avons cherché des relations linéaires bien que Mériaux et son équipe ont parfois déterminé des relations de type exponentiel (Mériaux *et al.*, 1979). Aucune relation ne semble exister entre la transpiration et le poids de bois de taille ni avec la surface foliaire. Le fait d'avoir travaillé sur des individus "moyens" limite la gamme de mesure utilisée pour établir des corrélations. L'utilisation d'un échantillonnage plus étendu (individus vigoureux et "chétifs") aurait peut-être mis à jour une relation entre les variables étudiées.

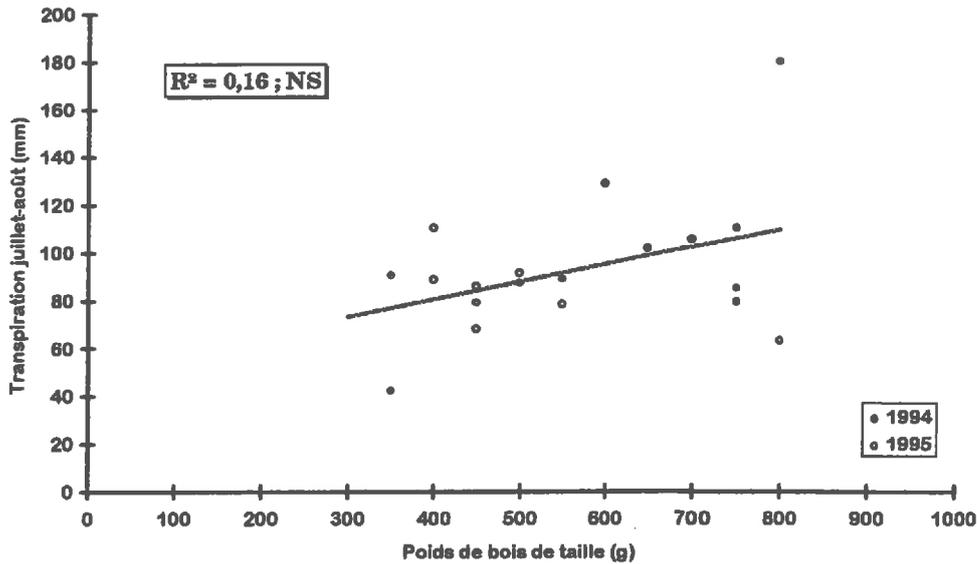


Figure 1-3a : Mise en regard de la transpiration estivale totale de chaque cep avec son poids de bois de taille

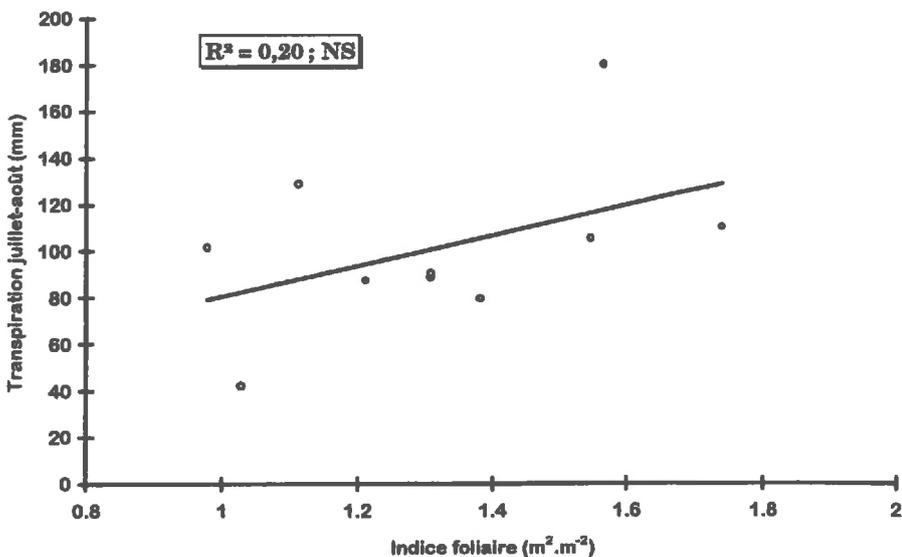


Figure 1-3b : Mise en regard de la transpiration estivale totale par cep avec l'indice foliaire mesuré par prélèvement total du feuillage

Cette recherche de facteurs morphologiques corrélés à la transpiration est généralement faite afin d'accéder à une transpiration parcellaire à partir d'un échantillonnage restreint sur la mesure de transpiration. Cette mesure est en effet coûteuse en matériel et en énergie. La mesure de la transpiration sur quelques individus extrêmes associée à une mesure morphologique facile à reproduire en de nombreux points de la parcelle permet de calculer une transpiration parcellaire moyenne pondérée par cette mesure. Dans le cas de notre étude, nous avons vu précédemment que la moyenne arithmétique fournissait une bonne estimation de la transpiration parcellaire (chapitre 3) si bien que nous accepterons cette hypothèse comme valable.

1.2. Relation entre transpiration et humidité du sol

1.2.1. Objectifs

Nous avons recherché une relation "classique" reliant la satisfaction de la demande atmosphérique par les plantes et l'état d'humidité du sol (S_t^*). Nous avons donc comparé le rapport :

$$TR/TP$$

avec l'état hydrique du sol sur 260 cm :

$$S_t^* = \frac{S_t - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}}$$

où : TR est la transpiration parcellaire quotidienne calculée par moyenne des flux de sève mesurés,

TP est la transpiration potentielle obtenue par le modèle d'interception du rayonnement (Riou *et al.*, 1989, 1994 ; voir chapitre 1 § 2.1.3. et 4.2.1.),

S_t est le stock hydrique du sol au temps t, le stock de chaque jour a été calculé par interpolation linéaire entre deux mesures afin de s'adapter à la cinétique de mesure quotidienne de transpiration. Le stock est calculé sur 260 cm de profondeur puisque la vigne puise l'essentiel de ses ressources en eau sur cette épaisseur (voir chapitre 3).

S_{\min} et S_{\max} sont des grandeurs de référence correspondant aux stocks hydriques minimal et maximal du sol. Le stock minimal choisi est le stock hydrique au point de flétrissement moyen du profil, déterminé au laboratoire. Le stock maximal est celui correspondant à la porosité moyenne du profil (stock à saturation S_{sat}). Ces deux grandeurs ont été choisies pour pouvoir être estimées en toute parcelle du

bassin versant de Roujan à partir de la connaissance de la courbe de rétention du sol de la parcelle. Un autre choix aurait pu être de travailler à partir des mesures de stock hydrique réalisées *in situ*. Or, le stock hydrique minimal mesuré correspond à une constante, au même titre que le stock au point de flétrissement. La relation déterminée à partir de l'un serait alors une transformation linéaire de l'autre, sans que la forme ni la qualité de l'ajustement en soit modifiée. L'utilisation du stock minimum mesuré aurait limité la paramétrisation aux cas des parcelles qui font l'objet d'un suivi de l'humidité.

1.2.2. Résultats

La relation entre l'état hydrique du sol et la satisfaction de la demande atmosphérique est illustrée par la figure 1-4, elle est tracée à partir des données de 1994 et de 1995.

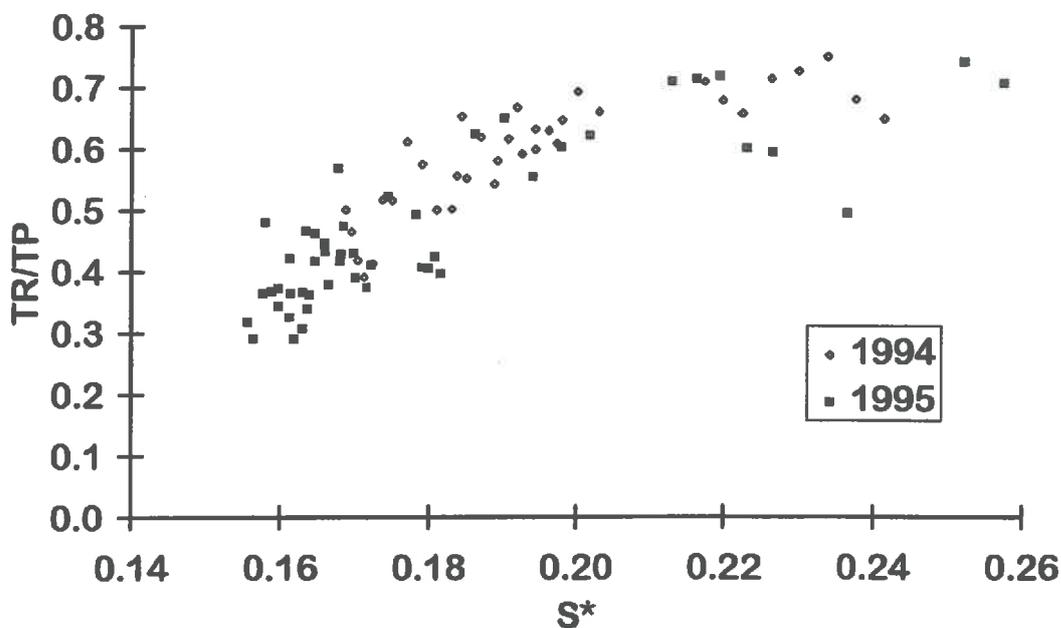


Figure 1-4 : Mise en regard de la satisfaction de la demande transpiratoire avec l'état hydrique des 260 premiers centimètres du sol pour deux années

Le nuage de points de la figure 1-4 montre une organisation structurée avec une décroissance de la transpiration lorsque le sol s'assèche : l'état hydrique du sol conditionne la capacité d'alimentation en eau de la vigne. Ceci avait déjà été observé par divers auteurs lors d'expérimentations comparatives (traitement irrigué contre traitement "stressé") (Smart, 1974 ; Liu *et al.*, 1978 ; Düring, 1987) mais aucune relation n'avait été recherchée.

Les auteurs qui ont ajusté des relations entre état hydrique du sol et satisfaction de la demande atmosphérique font souvent apparaître un palier de consommation maximale qui se maintient jusqu'à un potentiel "critique" compris entre -800 et -2000 mbars (Novák, 1987).

Nous avons ajusté ce type de relation au nuage de points de la figure 1-4. Le tableau 1-1 reprend l'équation recherchée et les paramètres ajustés.

Modèle	Équation	a	b	S_{lim}^*	T_{max}	r^2
Segments	$TR/TP = a.S^* + b$ si $S^* \leq S_{lim}^*$	7,158	-0,779	0,203	0,675	0,79
	$TR/TP = T_{max}$ si $S^* > S_{lim}^*$					

Tableau 1-1 : Équation d'ajustement recherchée entre la satisfaction de la transpiration potentielle par la vigne et l'état hydrique du sol

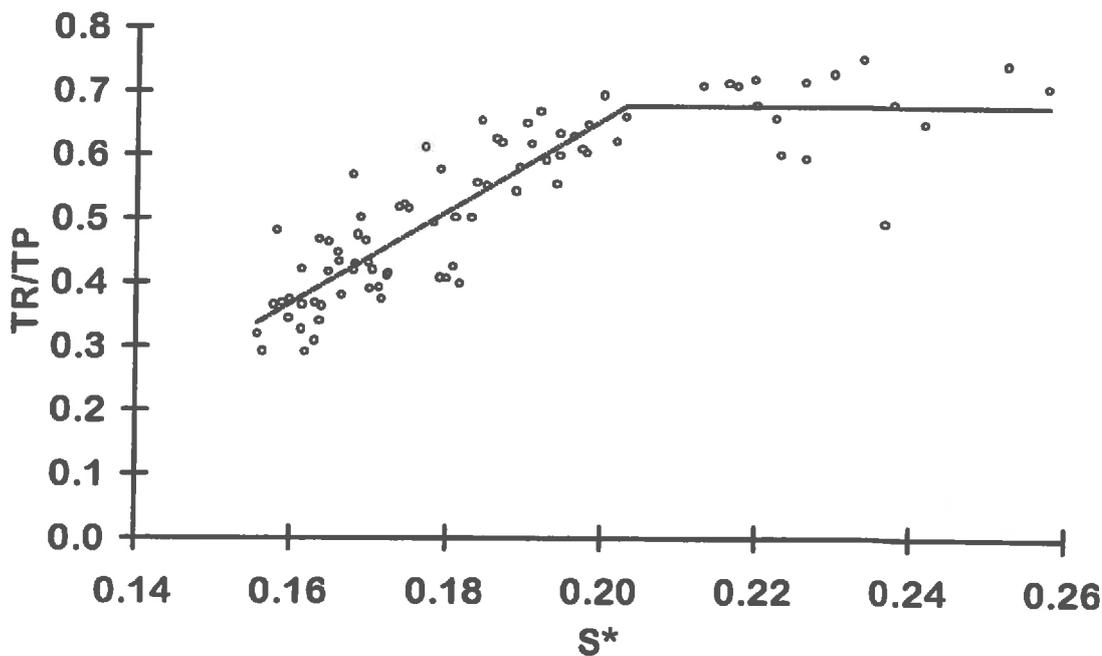


Figure 1-5 : Courbe ajustée au nuage de points de la figure 1-4

On remarque que la transpiration est inférieure à la transpiration potentielle même lorsque le sol est humide. Le palier obtenu se situe en effet à environ 68 % de la transpiration potentielle. Cette observation exprime que le modèle de Riou *et al.* (1989) n'est pas optimal pour déterminer TP. Ceci peut provenir d'une calibration trop imprécise (notamment en ce qui concerne la largeur du rang de vigne, paramètre très influent sur la transpiration potentielle). Une autre cause peut être que les hypothèses formulées et vérifiées par Riou *et al.* (1994) en région bordelaise ne sont pas valables en région Languedoc. Le vent, notamment, est fréquent en Languedoc et ajoute un terme convectif à l'énergie d'évaporation (ou de transpiration) qui n'est pas pris en compte par Riou *et al.* (1994), ce qui induit sans doute une erreur.

La relation déterminée exprime que, lorsque sol est humide, la transpiration reste maximale jusqu'à une humidité volumique moyenne de $0,17 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Cette valeur correspond à un potentiel moyen d'environ -1100 mbars en moyenne sur la parcelle (en fonction des courbes de rétention attribuées Chapitre 2, figure 3-3). Cette valeur est dans la gamme des potentiels précédemment mentionnée.

Admettons que le modèle peut être extrapolé à gauche du nuage. Par extrapolation, on calcule que la transpiration égale 0 % de la transpiration potentielle pour une humidité de $0,14 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, soit une décroissance de 68 points de satisfaction hydrique sur 3 points d'humidité ($0,03 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Ceci signifie une chute très rapide de la transpiration sur une faible gamme d'humidité probablement par baisse rapide de la conductivité hydraulique (Gardner et Ehlig, 1962 ; Gardner, 1964), comparable à celle observée par Magrisso (1987). L'humidité minimale obtenue par extrapolation est supérieure au point de flétrissement. **La baisse rapide des potentiels de l'eau du sol à proximité des racines induit probablement une discontinuité de potentiels dans le sol qui empêche la mobilisation de l'eau des zones non colonisées par les racines vers les zones à fortes densités racinaires.**

1.2.3. Discussion

Cette relation illustre l'adaptation globale de la vigne à la sécheresse du sol. Elle traduit qu'il existe une résistance aux transferts d'eau entre le sol et l'atmosphère fonction directe de l'état hydrique du sol. Cette résistance, utilisée par des modèles de type "analogie loi d'Ohm", est fonction de l'état hydrique des tissus végétaux. Winkel et Rambal (1993) mettent en évidence cette résistance et la relie au potentiel foliaire. Le peu de mesures dont nous disposons ne nous permet pas de comparer nos résultats aux leurs. Cependant, cette étude devrait être menée ultérieurement dans un souci de compréhension des mécanismes physiologiques d'adaptation des différents cépages.

La pente est l'expression de la faculté des ceps à réagir à l'humidité du sol. Elle varie probablement selon les cépages, comme le point de rupture entre le palier et la droite décroissante. Ce point de rupture doit également être lié à la force de rétention de l'eau du sol, ce qui signifie que la relation obtenue doit être réévaluée pour chaque nouvelle parcelle.

Les périodes de mesures à notre disposition couvrent la plus grande partie de l'activité transpiratoire des vignes, à une période où la consommation d'eau est à son maximum (feuillage pleinement développé). **La relation trouvée est très satisfaisante et permet d'envisager une modélisation empirique globale à l'échelle de la parcelle.**

2. EXTRACTION RACINAIRE DE LA VIGNE

Ce paragraphe se propose d'étudier l'extraction racinaire de deux façons. La première consiste en une analyse de l'assèchement du sol sur l'ensemble du profil, la seconde recherche les zones du profil exploitées préférentiellement par les racines. Dans ces deux cas, la variabilité spatio-temporelle de l'assèchement sera évaluée. En dernier lieu, sera recherchée une relation formelle d'extraction racinaire liant les prélèvements racinaires à un état hydrique du sol.

2.1. Variabilité parcellaire des variations de stock

2.1.1. Position du problème

Les variations de stock sont mesurées en 5 placettes au sein de la parcelle expérimentale. Les mesures d'humidité sont des mesures localisées puisque la "sphère d'influence" de la sonde à neutrons mesure environ 20 à 50 cm de diamètre (Smith et Mullins, 1991). Cependant, en dépit de ce caractère très localisé, il peut exister une structure parcellaire des variations de stock qui se traduirait par un "effet placette". C'est-à-dire que, quelle que soit l'année d'étude et la position des tubes au sein d'une même placette, les variations de stock totales moyennes mesurées sur chaque placette demeurent classées les unes par rapport aux autres dans une organisation stable d'une année à l'autre (Vachaud *et al.*, 1985 ; Villagra *et al.*, 1995).

Afin de mettre en évidence la représentativité de la moyenne des mesures de deux tubes par placette, nous avons testé la pérennité du classement des placettes vis-à-vis des variations de stock. Cette variabilité est envisagée dans un premier temps à l'échelle de la saison totale de mesure et, dans un second temps, au cours de la saison. La conservation du classement relatif des placettes entre elles signifierait un "effet placette" marqué puisque les tubes de mesure ont été déplacés d'environ 1-1,50 m entre les deux années d'expérimentation.

2.1.2. Variabilité parcellaire à l'échelle de la saison

L'analyse porte sur les variations de stock entre 35 et 235 cm de profondeur. La couche supérieure, affectée par l'évaporation, n'est pas jointe à l'analyse. La profondeur est limitée à 235 cm pour que les deux années expérimentales puissent être confrontées.

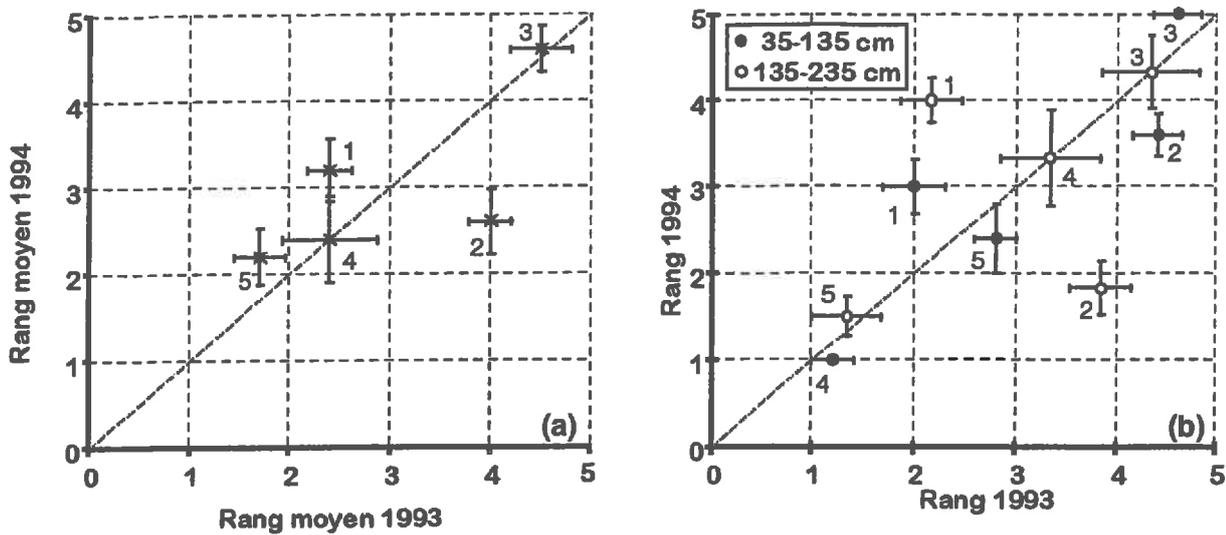


Figure 2-1a-b : Classement relatif de la variation de stock par placette entre les années 1993 et 1994. (a) : comparaison sur l'ensemble du profil ; (b) : comparaison pour deux tranches de sol

Les variations de stock ont été classées de 1 (faibles) à 5 (fortes) pour chaque placette à toutes les profondeurs en 1993 et 1994. La moyenne de ce classement est attribué comme rang moyen de la placette. Les deux années sont alors comparées. Les résultats de cette comparaison sont illustrés par la figure 2-1a.

Le classement est bien conservé pour les placettes 3, 4 et 5 alors que les placettes 1 et 2 divergent de façon assez marquée. Si l'on divise le sol en 2 tranches (35-135 cm et 135-235 cm), les différences trouvent leur origine dans les couches inférieures (figure 2-1b). En effet, en 1994, la placette 1 se caractérise par des prélèvements marqués sous le rang jusqu'à de fortes profondeurs alors que ce n'était pas le cas en 1993. Ainsi, son classement, et particulièrement son classement relatif à celui de la placette 2, s'est trouvé perturbé entre les deux années.

Une analyse plus détaillée permet de constater que cette inversion de position est facilitée par des différences relatives entre les placettes peu marquées, surtout en 1994 (voir tableau 2-1). Trois millimètres d'écart suffisent à faire permuter le classement des placettes 1 et 2 en 1994. Or, l'erreur commise sur la variation de stock moyenne sur 2 tubes à cette échelle de temps (3 mois) est comprise entre 5 et 6 mm (Galais, 1992). Ainsi, les permutations observées peuvent-elles être expliquées par l'incertitude sur la mesure moyenne de variation de stock par placette.

Pour résumer, on peut estimer que les variations de stock des placettes 1, 2, et 4 occupent un classement relatif équivalent. Partant de là, il existe un "effet placette" des variations de stock puisque les placettes 3 et 5 montrent, lors des deux années, des variations de stock extrêmes par rapport à ces valeurs moyennes. Cette variabilité spatiale structurée avait déjà été relevée auparavant sous cultures annuelles. Dans notre cas, la structure de la variabilité intra-

parcellaire des variations de stock est causée à la fois par le sol et par la plante. En effet, les hétérogénéités liées au sol se répercutent indirectement sur le facteur plante par la contrainte qu'il impose à la croissance et l'installation des racines.

Placette	1993	1994
1	64,6	176,5
2	81,4	168,8
3	122,4	232,2
4	64,3	153,7
5	59,3	162,6

Tableau 2-1 : Variations de stock moyennes par placette de mesure (moyenne des deux tubes) pour les deux années expérimentales (mm). Les valeurs de 1994 sont plus élevées que celles de 1993 car elles portent sur une période plus longue (27 juin-3 septembre 93 ; 25 mai-25 août 94)

2.2. Variabilité d'extraction racinaire sur l'ensemble du profil

2.2.1. Position du problème

La parcelle expérimentale étudiée se caractérise, rappelons-le, par un large inter-rang (2,50 m) pour un espacement sur le rang environ deux fois moindre (1,20 m). Dans ces conditions, on peut penser que la distribution racinaire est très hétérogène entre rang et inter-rang (Branas et Vergnes, 1957 ; Morlat, 1981 ; Stevens et Nicholas, 1994).

Cependant, si des études de dénombrement racinaire ont été publiées dans la bibliographie, nous avons signalé dans le chapitre 1 que peu d'études hydriques ont cherché à mettre en évidence une variabilité parallèle dans l'exploitation du stock hydrique. Les variations de stock observées lors des deux années expérimentales ont donc été analysées par position de mesure pour mettre à jour une éventuelle structure des prélèvements parallèle à l'organisation du couvert.

2.2.2. Analyse des différences de variations de stock globales

La variation de stock total par tube de mesure sur les deux étés d'expérimentation est montrée par les figures 2-2a et b. Les tubes sous les rangs affichent dans la grande majorité des cas une variation de stock supérieure à celle enregistrée sous les inter-rangs en 1993 comme en

1994. La différence observée est significativement différente de 0 au seuil de 10 % en 1994 et de 2 % en 1993.

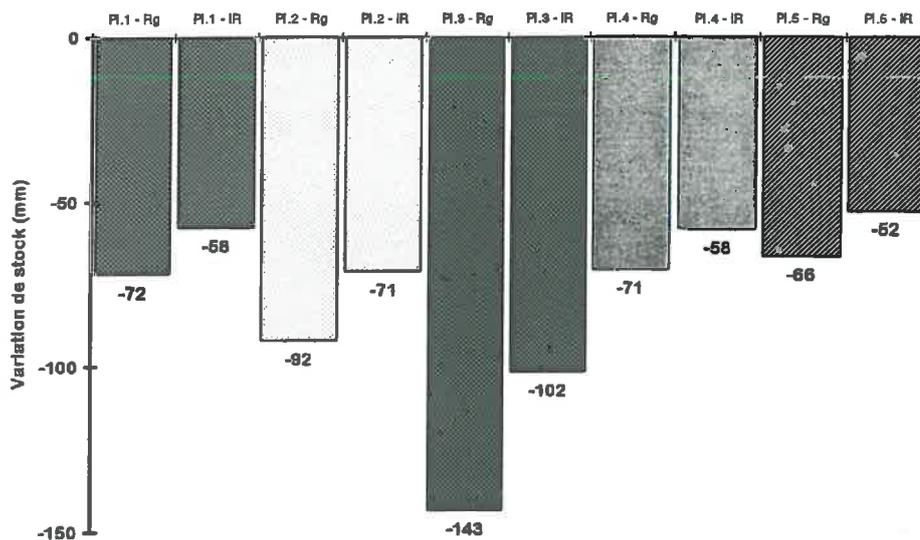


Figure 2-2a : Variation de stock totale (0-230 cm) par tube de mesure du 2 juillet au 3 septembre 1993

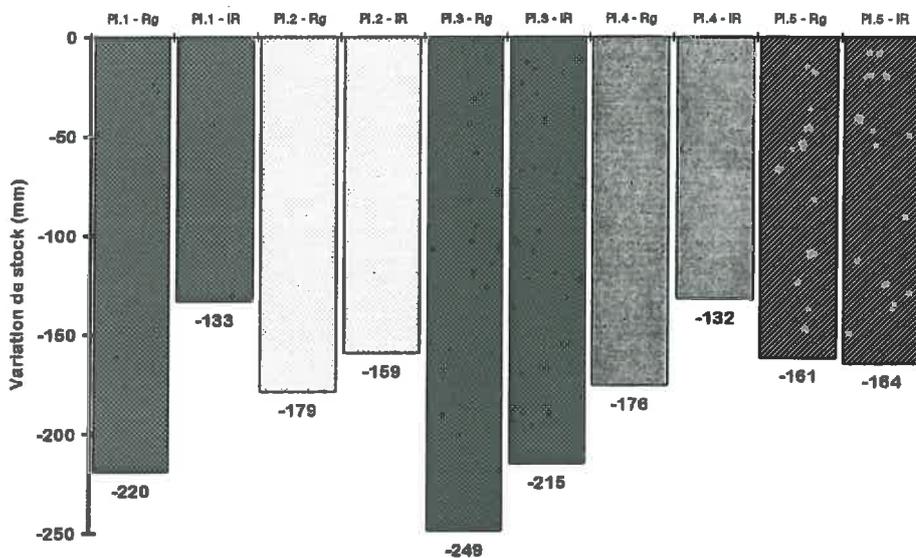


Figure 2-2b : Variation de stock totale (0-260 cm) par tube de mesure du 25 mai au 1^{er} septembre 1994

Cette différence significative intègre la forte variabilité qui existe au sein de la parcelle : les différences de variations de stock entre rang et inter-rang ne sont pas identiques sur toutes les placettes. En 1994, par exemple la placette 1 affiche un grand écart entre les variations de stock dans les deux positions. Au contraire, la placette 5, toujours en 1994, présente des variations de stock supérieures sous l'inter-rang par rapport aux variations de stock sous le rang.

Les mesures d'humidité en début de saison ne montrent pas de différence de disponibilité de l'eau pour les plantes entre le rang et l'inter-rang. Par conséquent, les différences de variations de stock totales mises en évidence entre rang et inter-rang peuvent être imputées soit à une différence de densité racinaire (Branas et Vergnes, 1957), soit à une différence de profondeur inspectée par les racines (Ionescu *et al.*, 1978), soit encore par une différence de fonctionnalité des racines vis-à-vis de l'absorption d'eau (Stevens et Nicholas, 1994). Le paragraphe qui suit analyse les différences observées globalement en recherchant la localisation des différences entre rang et inter-rang au sein du profil.

2.3. Variabilité d'extraction racinaire au sein du profil sur l'ensemble de la saison de mesure

La variabilité spatio-temporelle des flux au sein du profil a été envisagée sur l'ensemble de la saison dans un premier temps pour tenter d'expliquer la variabilité observée sur l'ensemble du profil. Pour ce faire, dans un premier temps, nous avons évalué dans quelle mesure les variations de stock sur 20 cm étaient assimilables aux prélèvements racinaires. Dans une seconde étape, nous avons porté notre analyse sur les différences entre mesures sous le rang et sous l'inter-rang pour chaque profondeur.

2.3.1. Analyse préliminaire sur les transferts d'eau entre couches de 20 cm au sein du profil

Nous verrons dans les paragraphes suivants que l'on identifie deux zones au sein du profil : une zone où l'extraction est très marquée (de 35 à 175 cm environ) et une zone inférieure où les variations de stock sont faibles, voire assimilables à des redistributions d'eau dans le sol. Ce paragraphe sera donc divisé, par anticipation, en deux parties traitant chacune d'une zone : la première partie analyse le phénomène des transferts entre couches de 20 cm, la seconde examine le problème des variations de stock observées dans la couche inférieure du sol.

a) Les variations de stock sur 20 cm sont-elles assimilables aux prélèvements racinaires ?

Les prélèvements racinaires d'une tranche de sol se calculent par (figure 2-3) :

$$PR_{z_1; z_{i+1}} = D_{z_1} - D_{z_{i+1}} - \Delta S_{z_1; z_{i+1}} \quad \text{Equ.}[2.1]$$

La couche de surface (0-35 cm) est évincée de l'analyse car elle subit l'évaporation directe du sol. Nous estimerons en outre que les horizons inférieurs ne sont pas impliqués dans l'évaporation.

Nous avons vu que les remontées capillaires peuvent représenter une part importante de l'alimentation globale de la vigne. À l'échelle d'une couche de sol, les phénomènes sont différents puisqu'il existe un flux entrant et un flux sortant de la couche. De fait, les transferts entre couches ne représentent peut-être pas une quantité d'eau importante par rapport à la variation de stock mesurée.

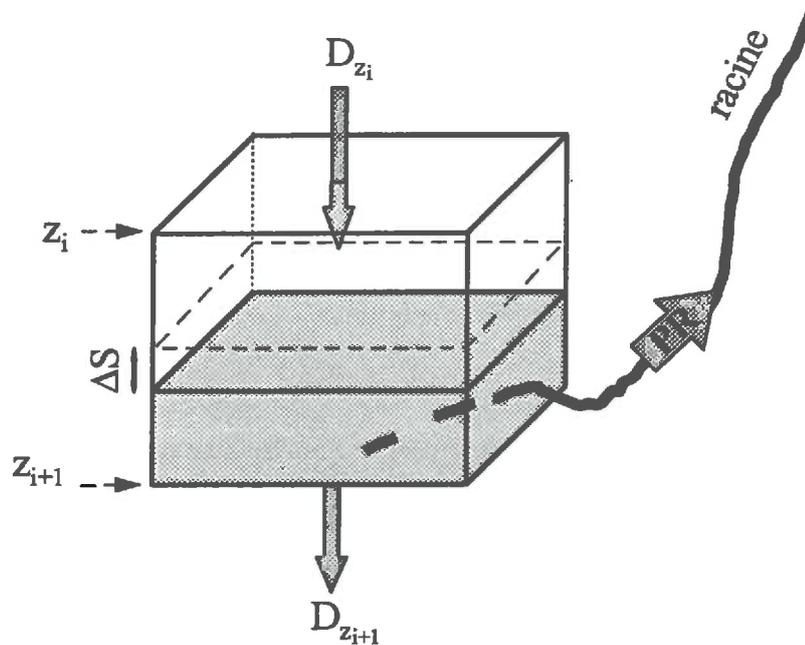


Figure 2-3 : Bilan hydrique d'une couche de sol

L'erreur commise sur l'estimation des prélèvements racinaires en négligeant les redistributions d'eau au sein du profil ne peut être étudiée que sur la période où des mesures tensiométriques sont disponibles, c'est-à-dire en juin 1994. En 1993 comme à partir de juillet 1994, le sol était trop sec pour la gamme de mesure des tensiomètres.

Nous avons donc recherché la part des circulations d'eau dans la variation de stock de couches de 20 cm en évaluant la différence des flux verticaux entrant et sortant de chacune ($\Delta D = D_{z_i} - D_{z_{i+1}}$; figure 2-3). Ces calculs sont faits par site de mesure. Ils sont restreints aux horizons limono-argilo-sableux car ce matériau est le mieux défini d'un point de vue hydrodynamique. Nous avons exploité ce calcul pour estimer l'erreur relative (E) commise en négligeant ces redistributions, c'est-à-dire en considérant toute la variation de stock comme représentative des prélèvements racinaires :

$$E(\%) = 100 \cdot \frac{|D_{z_i} - D_{z_{i+1}}|}{PR_{z_i; z_{i+1}}} \quad \text{Equ. [2.2]}$$

La figure 2-4 montre l'évolution de ΔD au cours du mois de juin 1994 pour 3 couches de 20 cm entre 50 et 110 cm de profondeur. La différence va s'amenuisant au cours de

l'assèchement du sol sous l'effet de la diminution du potentiel qui fait également diminuer la conductivité hydraulique du sol. Ainsi, les erreurs relatives du mois de juin calculées sont les erreurs relatives maximales obtenues au cours de l'été puisque ΔD devient négligeable voire nul relativement tôt dans la saison.

Les valeurs moyennes de E et leurs écarts-types correspondants sont consignés dans le tableau 2-2 pour les deux premières périodes d'analyse de l'alimentation en eau des ceps. L'erreur relative sur la mesure de variation de stock ($E_{\Delta S}$) est également reportée. E est égale voire très inférieure à $E_{\Delta S}$, ce qui la rend négligeable.

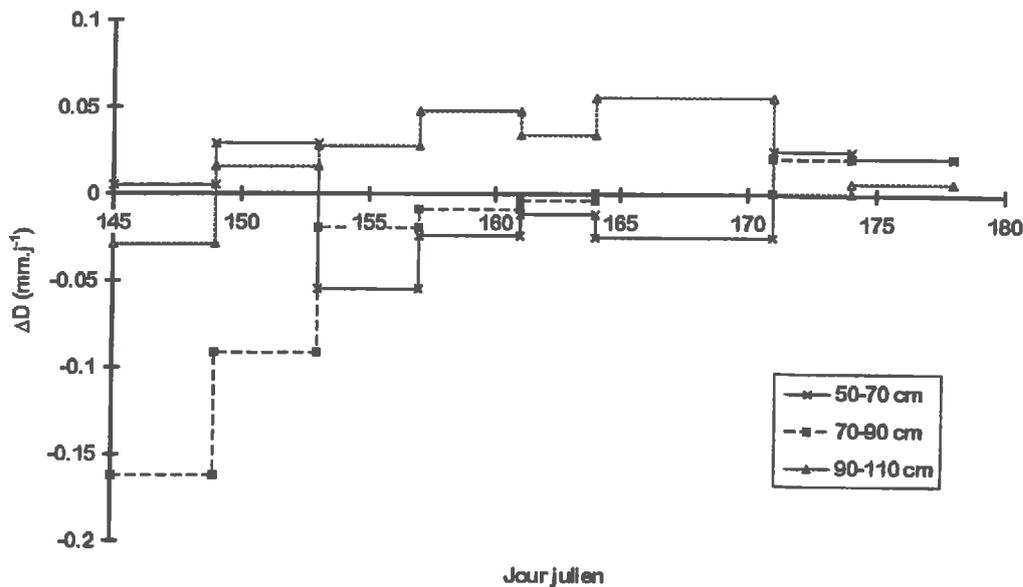


Figure 2-4 : Évolution du bilan des flux verticaux entrant et sortant de couches de 20 cm d'épaisseur au cours du mois de juin 1994. Moyenne des flux mesurés sur la parcelle.

Période (jours juliens) → Profondeur (cm) ↓	145-160			160-174		
	E(%)	$\sigma_{E(\%)}$	$E_{\Delta S}(\%)$	E(%)	$\sigma_{E(\%)}$	$E_{\Delta S}(\%)$
50-70	21	14	23	11	10	110
70-90	22	18	20	7	7	100
90-110	18	11	27	7	6	91

Tableau 2-2 : Erreur relative sur les prélèvements racinaires lorsque les flux entre couches sont négligés (E). Comparaison avec l'erreur de mesure ($E_{\Delta S}$)

Dans les horizons sableux, par le fait d'une caractérisation hydrodynamique moins aboutie, on calcule une erreur relative entachée d'une très forte variabilité (coefficient de variation compris entre 163 et 4880 % la première période et entre 91 et 1603 % la seconde). Les

moyennes ne sont donc pas significatives d'un comportement caractéristique parcellaire. Malgré ça, il y a diminution des moyennes et de la variabilité de la première période à la suivante. C'est la raison pour laquelle nous considérerons que les phénomènes observés pour les horizons limono-argilo-sableux sont transposables aux horizons sableux.

Par conséquent, dans les analyses qui suivent, nous estimerons que les transferts entre couches sont négligeables. Cette hypothèse permet d'examiner les résultats de 1993 à moindre risque d'erreur. En effet, les potentiels étaient déjà très faibles au moment des premières mesures, c'est-à-dire que la conductivité était déjà trop faible pour permettre des transferts significatifs au sein du sol.

b) Les variations de stock dans les couches les plus profondes correspondent-elles à des prélèvements racinaires ?

Comme précédemment, les prélèvements des couches les plus profondes du sol touchées *a priori* par l'extraction racinaire peuvent être estimés par bilan hydrique sur cette couche.

Les profondeurs retenues sont :

- 155 (inter-rang) et 215 cm (rang) car ce sont les profondeurs considérées comme maximales pour l'extraction racinaire (voir paragraphes suivants),
- 260 cm, profondeur apparemment concernée par toute l'alimentation hydrique de la vigne (voir chapitre 3 § 3).

Le drainage en profondeur ($D_{z_{H1}}$), c'est-à-dire à 260 cm, est connu grâce aux gradients de potentiels mesurés et à l'estimation de la conductivité hydraulique à cette cote (voir chapitre 2 § 3.3.2. et chapitre 3 § 3.1.1.). En revanche, le flux à 155-215 cm n'est pas connu. Les traitements qui suivent portent sur la moyenne parcellaire des prélèvements, c'est-à-dire que les calculs sont effectués sur des profondeurs différentes selon que l'on se trouve sous le rang ou sous l'inter-rang. Pour simplifier la lecture, le texte mentionnera la profondeur de 185 cm comme expression de la moyenne des profondeurs d'étude par position.

Nous posons l'hypothèse que les flux à 185 et 260 cm évoluent conformément à ce que montre la figure 2-6. Cette figure indique que la différence $D_{185}-D_{260}$ est toujours négative ou nulle (rappelons à ce sujet que les flux sont comptés positifs lorsqu'ils sont orientés vers le bas et négatifs s'ils sont ascendants). Ainsi, l'annulation de cette différence maximise les prélèvements racinaires dans cet horizon (équation 2-1). Autrement dit, la variation de stock représente une estimation maximisée des prélèvements racinaires. Le tableau 2-3 reporte les rapports de la variation de stock dans ces couches profondes par rapport à l'ETR à un pas de temps de 15 jours pendant l'été 1994. On relève que la contribution de cet horizon ne peut être supérieure à 6-23 % de l'ETR (en moyenne 10 % sur la saison). Autrement dit, l'erreur

commise en assimilant ces variations de stock à des circulations d'eau est de l'ordre de grandeur de l'erreur de mesure à cette échelle de temps (5-15 %). On peut donc admettre que l'extraction racinaire dans ces horizons est quantitativement faible par rapport à l'alimentation en eau totale des ceps.

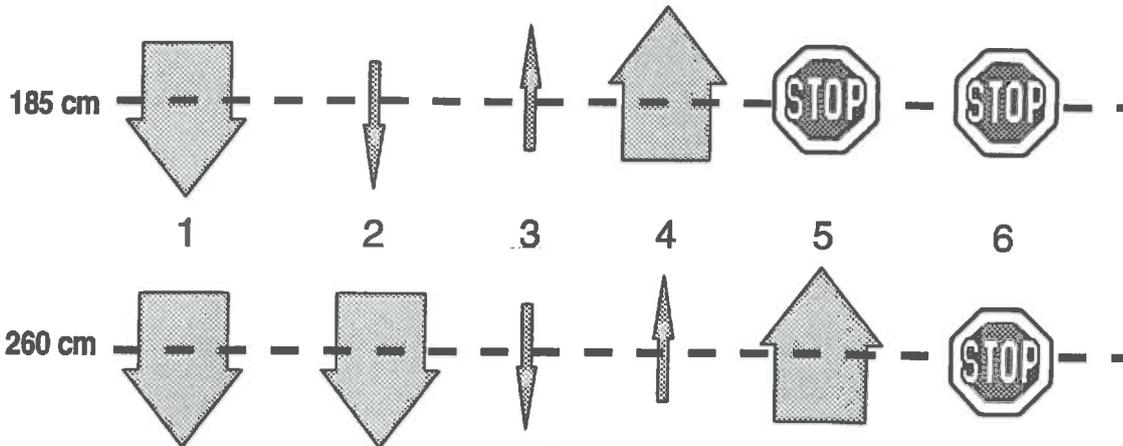


Figure 2-5 : Importance relative des flux au sommet et à la base d'une couche de sol : 1 : fort drainage généralisé ; 2 : drainage fort à la base et faible en surface ; 3 : remontées capillaires faibles au sommet et faible drainage à la base ; 4 : remontées capillaires fortes au sommet et faibles à la base ; 5 : plus de flux significatif au sommet par annulation de la conductivité hydraulique et fortes remontées capillaires à la base ; 6 : plus de flux au sein du profil

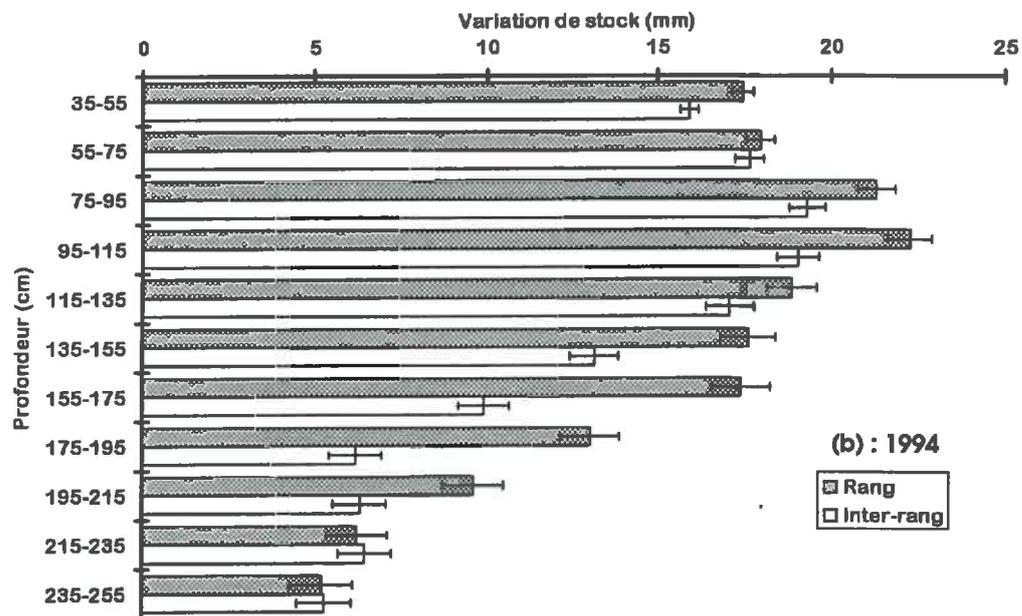
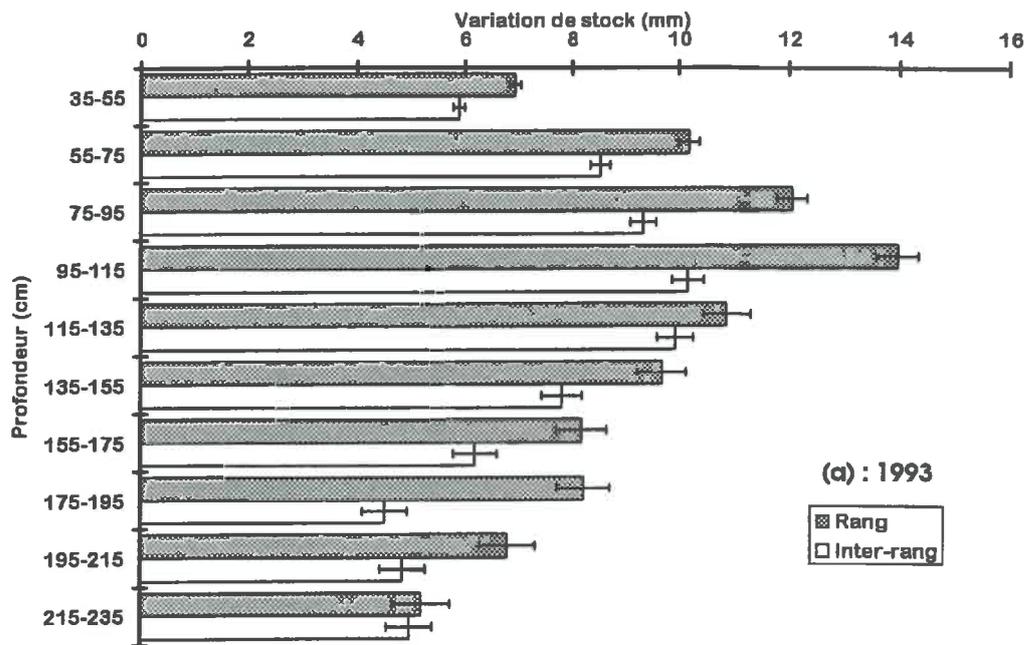
	Période (jours juliens)						Total
	145-160	160-174	174-192	192-206	206-220	220-234	
$\Delta S_{185;260}$	-3,55	-4,24	-6,70	-3,66	-2,48	-2,53	-24,81
D_{260}	10,05	5,15	0,98	-1,30	-1,45	-1,37	12,06
ETR	18,53	35,93	61,56	36,18	37,45	25,08	214,73
$-\Delta S_{185;260} / \text{ETR}$	0,19	0,12	0,11	0,10	0,07	0,10	0,11

Tableau 2-3 : Évaluation de la participation maximisée des racines de la couche 185-260 cm à l'ETR parcellaire. Les chiffres sont en millimètres.

2.3.2. Analyse de la différence rang/inter-rang par profondeur

On examine ici les variations de stock entre rang et inter-rang par couches de 20 cm pour la parcelle moyenne dans un premier temps et pour chaque placette de mesure dans une seconde étape. Comme précédemment, le pas de temps de l'analyse est de 15 jours pour minimiser l'erreur commise sur la mesure.

a) Comportement parcellaire moyen



Figures 2-6a-b : Variations de stock le long du profil de sol concerné par l'alimentation en eau de la vigne. Comparaison des variations mesurées sous le rang et sous l'inter-rang en 1993 (a) et 1994 (b)

Les profils de variations de stock ont été comparés sur l'ensemble de la saison (2 juillet-3 septembre 1993 et 25 mai-25 août 1994) par tranche de 20 cm. Les résultats des moyennes à l'échelle de la parcelle sont montrés par les figures 2-6a et b. Les barres représentent l'écart-type d'erreur sur la moyenne de variation de stock. La couche 0-35 cm est toujours écartée des calculs car affectée par l'évaporation du sol. Les prélèvements apparaissent plus faibles en

1993 qu'en 1994 pour deux raisons : d'une part, les périodes de mesures ne sont pas identiques (voir au début du paragraphe a), d'autre part car le sol était plus sec en 1993 qu'en 1994 à la même date, induisant une plus faible disponibilité de l'eau pour les plantes.

Les différences entre les variations de stock sous le rang et sous l'inter-rang ne paraissent pas réparties de la même manière en 1993 et 1994. Nous avons testé l'hypothèse H_0 selon laquelle la moyenne des différences de variations de stock entre rang et inter-rang est nulle (Snedecor et Cochran, 1957 ; p.104). **Pour la plupart des profondeurs, la moyenne des différences n'est pas significativement différente de 0 (tableau 2-4).**

	1993			1994		
	Diff.moy.	s_d	Sig.	Diff.moy.	s_d	Sig.
35-55	1,041	0,455	NS	1,546	0,629	*
55-75	1,666	0,456	*	0,305	1,183	NS
75-95	2,721	1,523	**	2,020	1,959	NS
95-115	3,790	2,523	NS	3,244	2,318	NS
115-135	0,958	1,401	NS	1,753	3,326	NS
135-155	1,874	1,179	NS	4,492	2,574	NS
155-175	1,985	0,970	NS	7,545	2,382	**
175-195	3,693	0,483	***	6,867	2,504	*
195-215	1,930	2,285	NS	3,274	1,153	**
215-235	0,222	0,854	NS	-0,230	1,111	NS
235-255	-	-	-	-0,065	0,466	NS

Tableau 2-4 : Résultats des tests statistiques relatifs aux différences de variations de stock mesurées sous le rang et sous l'inter-rang de vigne. Chiffres en millimètres. Chaque test porte sur 5 individus (= 5 placettes). Diff.moy. = $\Delta S_{Rg} - \Delta S_{IR}$; Les résultats des tests sont : NS : non significatif ; * : $P < 10\%$; ** : $P < 5\%$; * : $P < 1\%$**

Ce résultat peut paraître en contradiction avec celui du paragraphe 2.2.2 puisqu'il signifierait que l'extraction sous le rang n'est jamais significativement supérieure à celle sous l'inter-rang. Ceci est dû à une erreur de mesure sur la variation de stock relativement plus importante pour une couche de 20 cm que pour un profil de sol entier. Il existe en effet des compensations d'erreur par intégration des mesures au sein du profil qui font que l'erreur relative est moins élevée.

On peut néanmoins distinguer, dans le tableau 2-4, qu'une zone comprise entre 135-195 cm (1993) et 155-215 cm (1994) de profondeur selon les années montre des variations de stock significativement différentes entre rang et inter-rang (des différences sont également observées en 1995, résultats en cours d'exploitation). La forte variabilité intra-parcellaire (et

notamment celle liée à la position du tube, déjà constatée précédemment) ne permet pas d'avoir des résultats qui se répètent clairement d'une année sur l'autre. Toutefois, on peut présumer que cette zone limitée où l'on observe des différences trois années de suite est une zone "de transition" dans laquelle des prélèvements consécutifs ont toujours lieu sous le rang alors qu'ils ne sont plus quantitativement importants sous l'inter-rang. Par conséquent, nous limiterons l'étude des prélèvements à 155 cm (limite supérieure estimée de la couche "de transition") sous l'inter-rang et à 215 cm (limite inférieure) sous le rang. Cette hypothèse simplificatrice n'est pas démentie par l'étude des flux réalisée au paragraphe précédent (§2.3.1.b. tableau 2-3).

Nous ne sommes donc pas en mesure d'affirmer que les prélèvements racinaires sont plus intenses sous les rangs de vigne que sous les inter-rangs. Cependant, la différence significative de variation de stock globale observée entre les deux positions de mesure est fortement imputable à une profondeur d'extraction plus élevée sous les rangs que sous les inter-rangs.

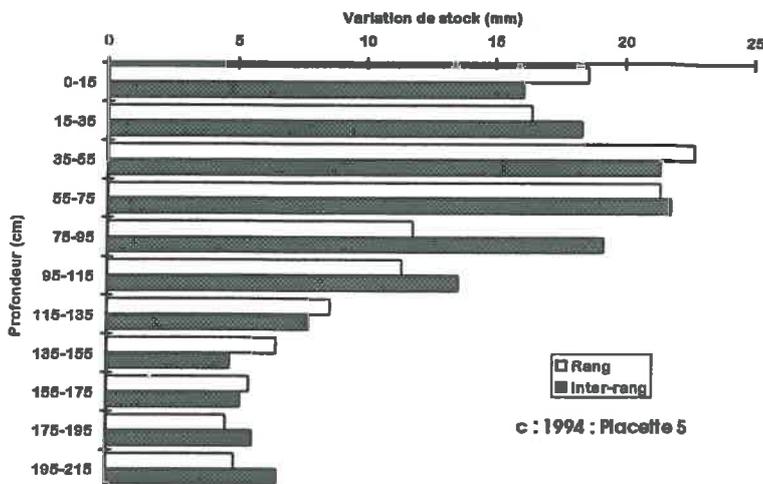
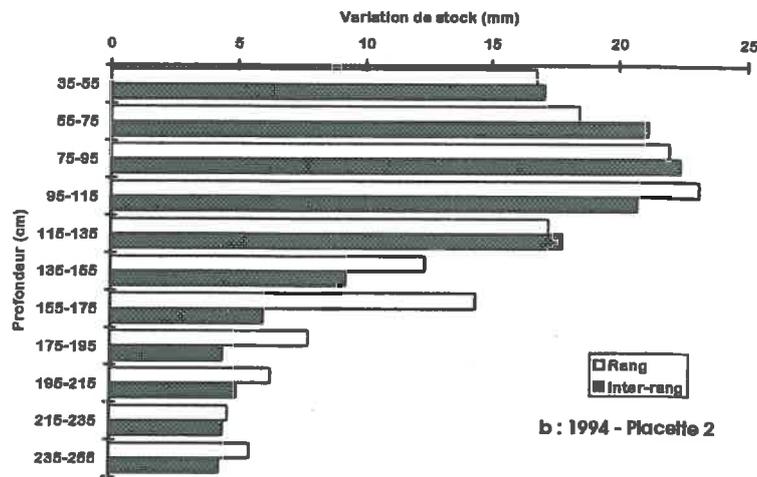
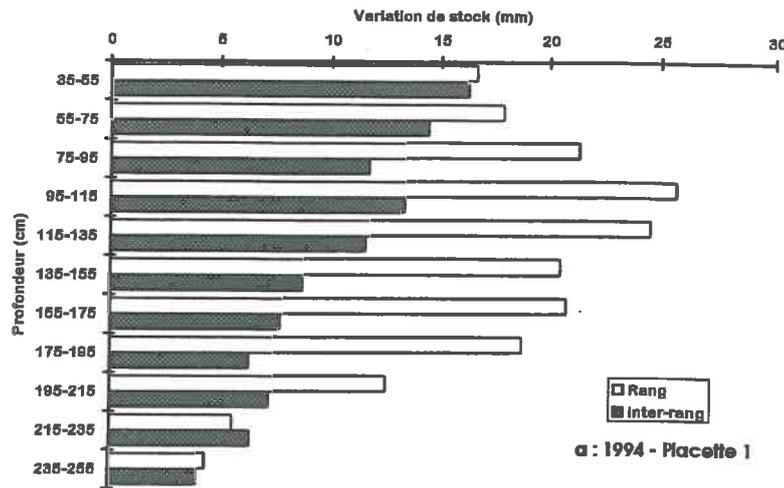
b) Évaluation des différences de variations de stock rang/inter-rang par placette de mesure

La forte variabilité intra-parcellaire des mesures ne permet pas d'observer de différences au sein du profil d'humidité moyen. Nous envisageons donc de répéter cette analyse pour chacune des placettes individuellement.

Les profils de variations de stock entre rang et inter-rang par placette font apparaître de grandes disparités, tant en intensité qu'en profondeur d'extraction. Toutes les situations peuvent se présenter. Sur les 10 profils de différences rang/inter-rang analysés (5 placettes x 2 années), on peut tenter d'organiser les observations en grandes catégories :

- certaines placettes affichent des variations de stock supérieures sous le rang par rapport à l'inter-rang sur tout le profil (placettes 2 et 4 en 1993 ; 1 et 4 en 1994). Un exemple est montré figure 2-7a.
- d'autres montrent des variations de stock équivalentes dans les deux positions de mesure jusqu'à une certaine profondeur (placettes 2 et 3 en 1994) au-delà de laquelle les variations sont plus fortes sous le rang que sous l'inter-rang. C'est le cas qui se rapproche le mieux de la distribution théorique du système racinaire montrée par Ionescu *et al.* (1978). Exemple figure 2-7b.
- d'autres enfin semblent présenter des variations de stock plus fonction de la nature du sol autour du tube que de sa position par rapport au rang. En effet, les variations de stock ne semblent pas organisées le long du profil en

fonction de la position du tube de mesure (placettes 1, 3 et 5 1993 ; 5 en 1994). Exemple figure 2-7c.



Figures 2-7a-c : Différents types de répartition relative des variations de stock entre rang et inter-rang le long du profil de mesure

Ainsi, la différence de variation de stock constatée entre rang et inter-rang à l'échelle de la saison sur tout le profil est la résultante de phénomènes très variables d'une placette à l'autre. Rappelons que l'enracinement des ceps dans la parcelle est concentré dans des poches limono-argilo-sableuses (voir chapitre 2). Ceci rend la mesure d'humidité hautement dépendante de la position du tube par rapport à ces poches. En définitive, l'éloignement du cep est probablement moins influent que l'hétérogénéité spatiale du sol (conditionnant l'enracinement des ceps) dans la variabilité spatiale des variations de stock constatées.

2.4. Évolution des zones d'extraction au cours de la saison

2.4.1. Position du problème

De nombreux auteurs qui ont travaillé sur l'alimentation en eau de la vigne ont conclu à l'importance du système racinaire profond pour subvenir aux besoins en eau lors de périodes de sécheresse. Il y aurait un "déplacement" de la zone d'alimentation des zones superficielles vers des zones plus profondes, où l'eau est plus disponible (Seguin, 1969).

L'absence de mesures de gradients d'humidité en profondeur dans ces travaux ne permet pas de conclure de façon appuyée sur le rôle du système racinaire profond. Nous avons montré que la zone principale d'alimentation dans la parcelle étudiée paraît être localisée dans les 185 premiers centimètres du sol. Les variations de stock observées en dessous sont assimilables à des circulations d'eau par rééquilibrage des potentiels hydriques du sol.

La variabilité verticale des zones d'alimentation préférentielle à l'intérieur de cette zone d'alimentation principale est évaluée ci-dessous par l'observation de l'évolution des profils de variations moyennes de stock par mois.

2.4.2. Observation des zones d'alimentation et de leur évolution au sein du profil

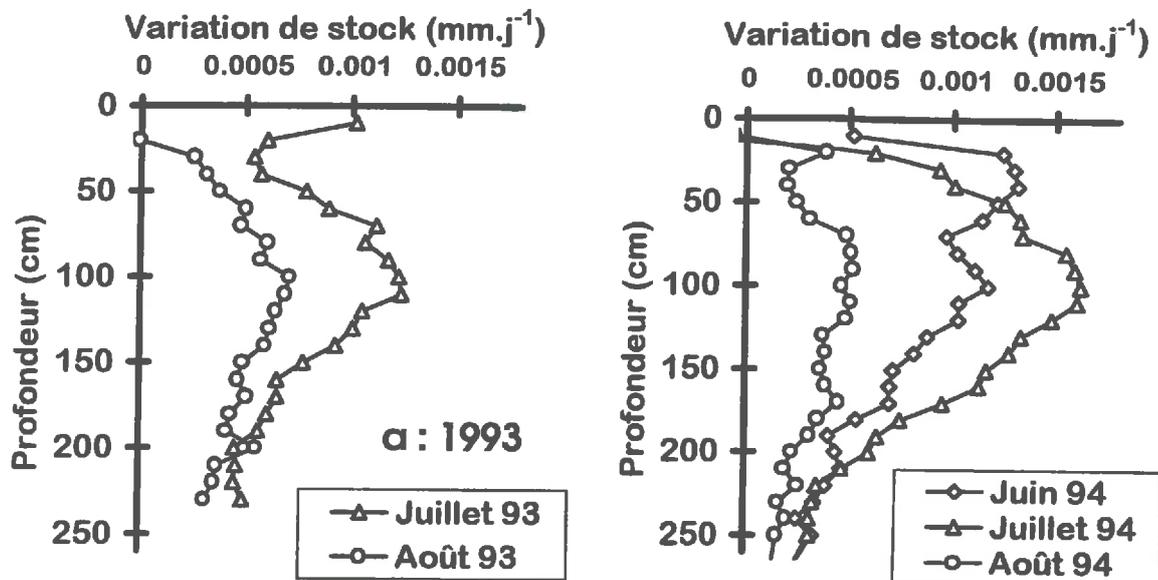
a) Zones d'alimentation

Les figures 2-8a et b illustrent les évolutions des profils d'extraction moyens au cours de l'assèchement du sol en 1993 et 1994.

- en juin (1994), la variation de stock va en diminuant de la surface vers la profondeur. L'évaporation du sol est la principale cause de cette forte

variation de stock en surface. La croissance de la vigne s'accompagne d'une augmentation de la consommation en eau.

- le profil suivant (juillet) se caractérise par l'apparition d'un ventre d'extraction entre 40 et 200 cm de profondeur. Ce profil représente le profil de variation de stock en plein développement végétatif de la vigne, alors que le sol est encore humide. La couche de surface, soumise à l'évaporation du sol, est sèche, les variations de stock y sont donc réduites.
- le dernier profil (août) affiche une réduction de l'extraction racinaire en toute profondeur. Le sol est asséché par les prélèvements racinaires, l'eau n'y est plus assez disponible pour les plantes, ce qui se traduit physiologiquement par une fermeture des stomates et une réduction de l'alimentation hydrique en tout point du profil.

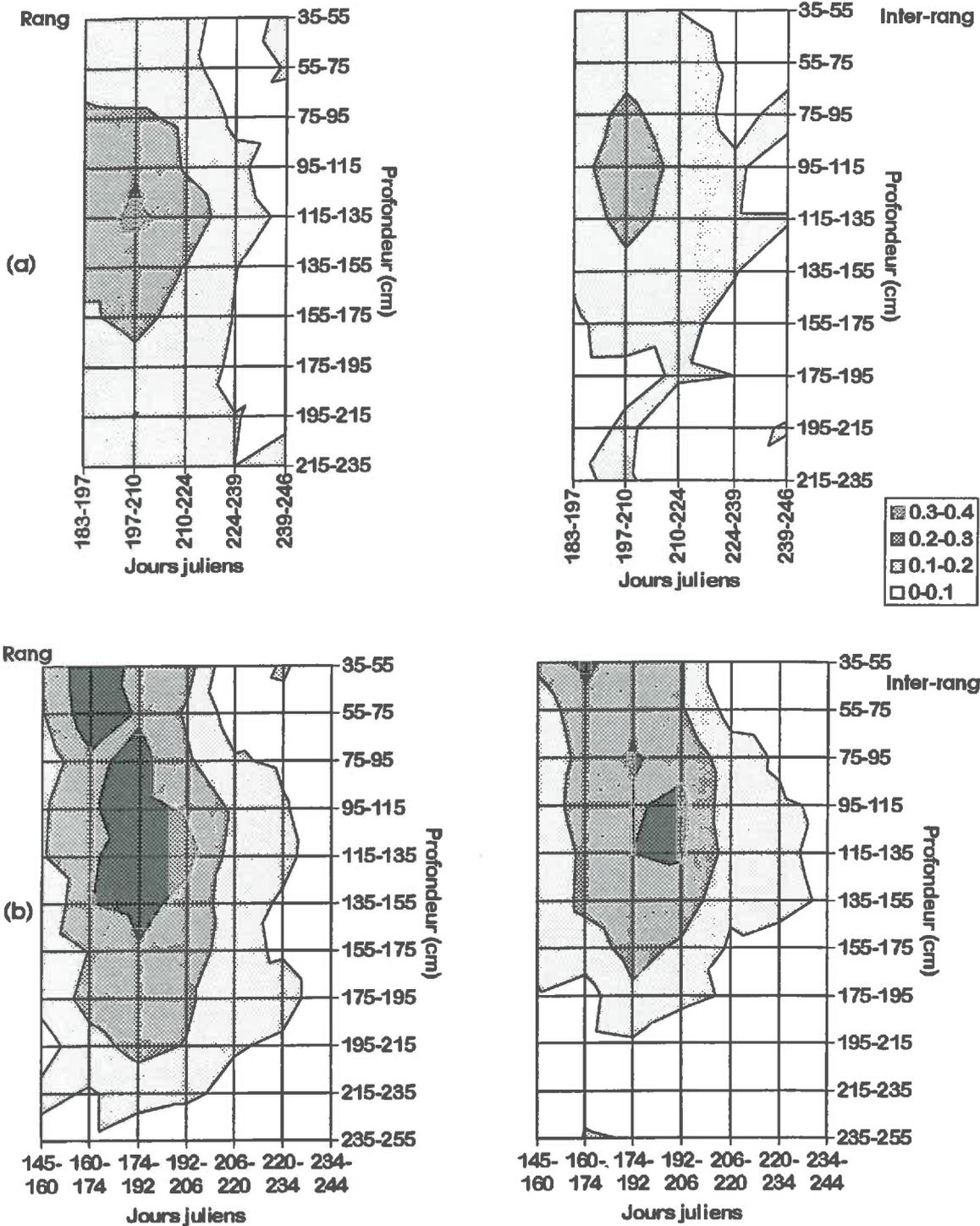


Figures 2-8a-b : Profils moyens de variations de stock mensuelles lors des deux années expérimentales

A priori, il n'y a donc pas de déplacement de la zone d'alimentation en eau au cours de l'assèchement du sol. En revanche, la zone d'alimentation principale entre 30 et 230 cm de profondeur est bien identifiée et elle paraît stable dans le temps. L'importance relative de chaque horizon à l'alimentation en eau totale des ceps reste identique en toute période de la saison, ce qui appuie les conclusions précédentes.

b) Cinétique des variations de stock en fonction de la profondeur

Les figures 2-9a,b montrent l'évolution des variations de stock par profondeur au cours de la saison en millimètres d'eau par jour et pour une tranche de sol de 20 cm.



Figures 2-9a,b : Isocontours des variations de stock mesurées le long du profil d'extraction racinaire par pas de temps de 15 jours. Visualisation des zones d'exploitation préférentielles en 1993 (a) et 1994 (b). Les chiffres de la légende sont exprimés en mm.j⁻¹ / 20 cm de sol.

Ces courbes permettent de visualiser plusieurs faits, caractéristiques de l'alimentation en eau dans la parcelle expérimentale étudiée :

- l'évolution des prélèvements est parallèle en toute profondeur jusqu'à 215 cm environ sous le rang et 175 cm sous l'inter-rang. Comme nous l'avons observé précédemment, la contribution des horizons profonds n'augmente pas avec le dessèchement du sol en surface. La zone d'alimentation préférentielle reste la même en toute période au long de l'été.
- les prélèvements sont en moyenne plus profonds sous le rang que sous l'inter-rang tout au long de la saison. L'observation faite sur la saison entière est donc la conséquence d'un phénomène constant en toute période.
- le "pic" d'alimentation se situe dans les premiers 10 jours de juillet en moyenne. Ensuite, les variations de stock diminuent notablement. C'est également à partir de cette date que les tensiomètres "superficiels" (profondeur inférieure à 140 cm) cessent de fonctionner. Les prélèvements en eau semblent donc décroître dès que les potentiels hydriques atteignent - 1 bar dans la zone de colonisation.

2.5. Relations entre extraction racinaire de la vigne et humidité du sol

Dans ce paragraphe, nous recherchons une relation entre l'extraction racinaire d'une couche de sol et son état hydrique. Les couches étudiées font 20 cm d'épaisseur et concernent les profondeurs déterminées précédemment : 155 cm sous l'inter-rang et 215 cm sous le rang.

2.5.1. Principes des relations recherchées

On cherche une relation entre la satisfaction de la demande atmosphérique par une tranche de sol :

$$\frac{[\Delta\theta_z]_t^{t+1}}{[TP]_t^{t+1}} \quad \text{Equ. [2.3]}$$

et l'état d'humidité de cette tranche :

$$S_{t,z}^* = \frac{(\theta_{t,z} - \theta_{\min,z})}{(\theta_{\max,z} - \theta_{\min,z})} \quad \text{Equ. [2.4]}$$

avec $\theta_{t,z}$ l'humidité de la tranche de sol z au début de la période t , $\theta_{\min,z}$ et $\theta_{\max,z}$ étant les humidités minimale et maximale de cette couche.

$\theta_{\max,z}$ correspond comme précédemment à l'humidité à saturation de la couche z. Deux références ont été testées pour $\theta_{\min,z}$:

- l'humidité minimale mesurée *in situ* pour chaque profondeur ;
- l'humidité au point de flétrissement déterminée par l'association des mesures tensio-neutroniques mesurées *in situ* avec les courbes de rétention déterminées en laboratoire par la méthode des presses à plaques (voir chapitre 2)

Comme précédemment, les couches de sol utilisées ont 20 cm d'épaisseur et le pas de temps égale 15 jours afin de minimiser les erreurs sur la variation de stock.

2.5.2. Résultats

a) $\theta_{\min} = \theta_{\min}$ mesuré

La relation pour les couches concernées par l'extraction racinaire est illustrée figure 2-10, avec les mesures des deux années. La régression a été obtenue de la même façon que pour la transpiration. L'erreur de mesure, très importante à cette échelle de temps et d'espace, crée une dispersion qui ne permet pas d'ajuster une meilleure relation qu'une relation linéaire simple. On observera quelques individus très au dessus du nuage de points aux fortes humidités. Ces points sont ceux de début de saison (jours 145 à 160), où la conductivité hydrique du sol permet encore quelques circulations d'eau entre couches. L'ajustement sur le nuage privé de ces points donne une régression équivalente.

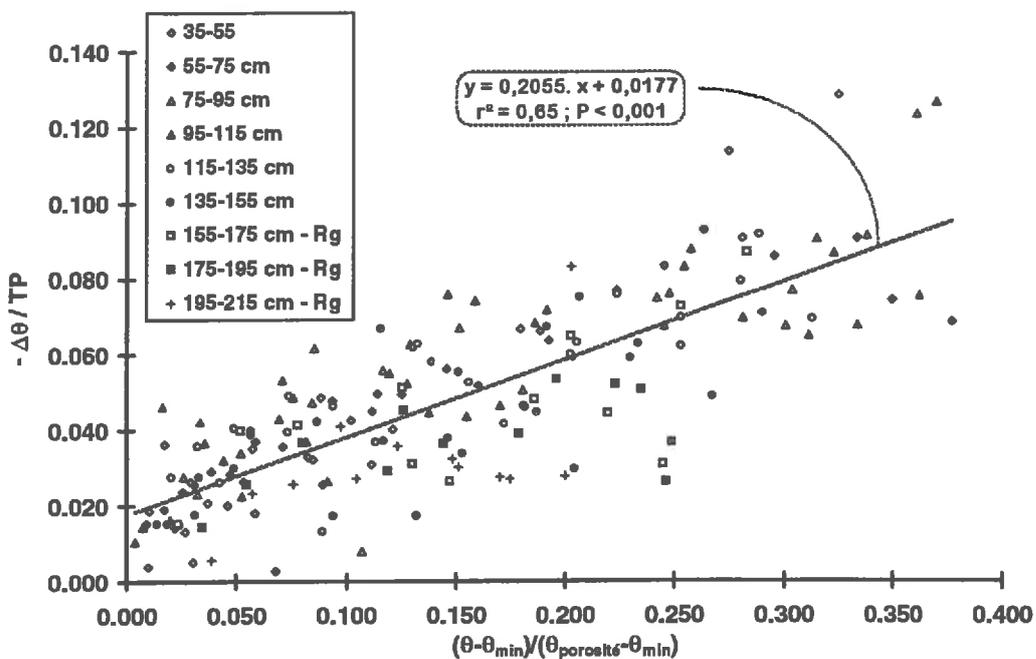


Figure 2-10 : Fonction d'extraction racinaire établie pour les horizons à forte absorption hydrique (35-215 cm sous le rang et 35-155 cm sous l'inter-rang).

La corrélation obtenue est très bonne ($r^2=0,65$; $P<0,001$). Tous les horizons sont regroupés autour d'une même relation linéaire, malgré les fortes différences de densité racinaire le long du profil et entre le rang et l'inter-rang. En fait, le stock minimum choisi pour référence de l'humidité minimale intègre l'effet de la densité racinaire. En effet, on peut penser que plus les racines sont nombreuses, plus l'extraction est forte et donc plus l'humidité minimale est faible.

La relation obtenue indique que la vigne pourrait encore prélever de l'eau puisque l'extraction s'annule pour un état hydrique inférieur à 0. L'humidité moyenne à laquelle l'extraction s'annulerait si la relation restait linéaire est égale à $0,12 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Cette humidité est semblable à celle déterminée à partir de la régression sur les mesures de transpiration. Elle est légèrement supérieure à l'humidité au point de flétrissement estimé. Ceci s'explique car la vigne possède un système racinaire très peu dense. De fait, il est possible que la zone proche des racines soit au point de flétrissement alors que le reste du volume de sol, inexploité par les racines, est à une humidité plus élevée. La conductivité hydraulique étant rapidement limitante aux transferts d'eau dans le sol, il n'y a pas rééquilibrage suffisamment rapide des potentiels hydriques du sol pour permettre un réapprovisionnement en eau dans la zone d'absorption racinaire.

$$b) \theta_{min} = \theta_{pF4.2}$$

La relation linéaire établie à partir de l'humidité au point de flétrissement est moins bonne que celle obtenue précédemment ($r^2=0,40$; $P<0,001$).

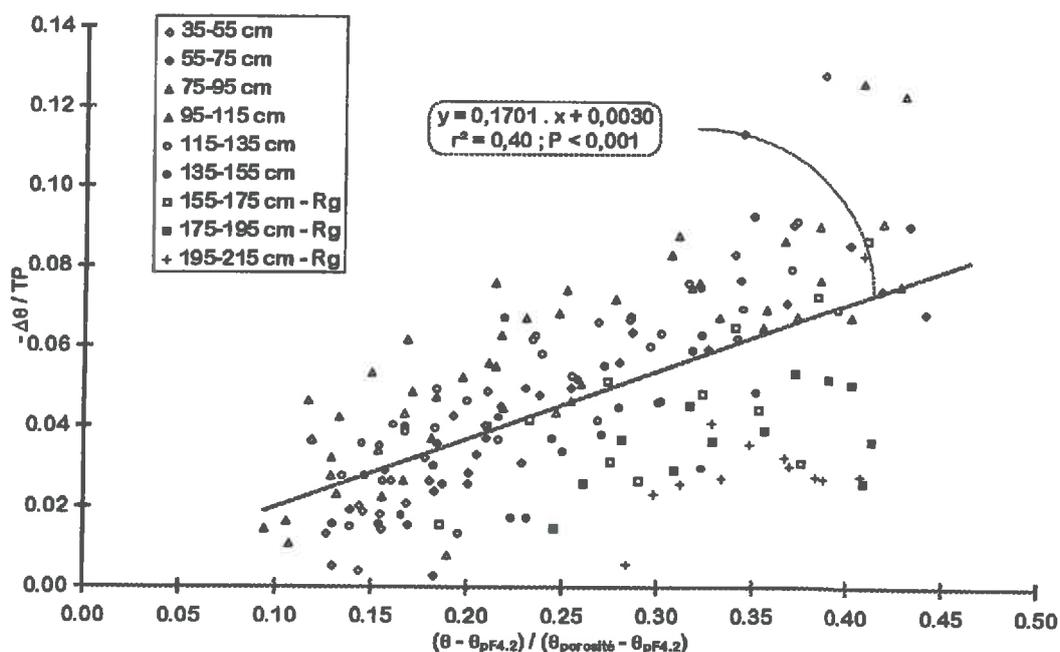


Figure 2-11 : Fonction d'extraction racinaire établie sur les couches de sol à forte exploitation racinaire à partir de mesures d'humidité rapportées au point de flétrissement.

Lorsqu'on regarde la distribution des points par profondeur (figure 2-11), il apparaît que les couches "de transition" (entre 155 et 215 cm selon la position du tube) sont regroupées sous la droite de régression. À ces profondeurs, l'enracinement est peu dense et doit, de ce fait, limiter les prélèvements malgré une bonne disponibilité de l'eau. Il apparaît donc que, pour les couches à faible enracinement, le point de flétrissement n'est pas un bon indicateur de la disponibilité en eau du sol pour les vignes.

La régression linéaire obtenue indique que l'extraction cesserait pour une humidité moyenne sur le profil de $0,09 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Cette valeur est inférieure aux valeurs déterminées précédemment car la prise en compte des horizons à faible colonisation racinaire dans la régression a une forte influence sur la pente de la droite.

2.5.3. Discussion

La confrontation des variations de stock par horizons avec l'état hydrique de ces horizons permet de dresser une relation linéaire croissante significative. La forte dispersion des points due à une erreur de mesure importante ne permet pas de rechercher une relation à segments comme pour la transpiration.

Lorsqu'on prend en compte le stock hydrique minimal mesuré sur le terrain (S_{\min}^*), on intègre la notion de capacité d'extraction de l'eau par les racines en sous-entendant que l'humidité minimale est liée à la densité racinaire. Si on détermine l'état hydrique du sol en fonction du point de flétrissement obtenu en laboratoire ($S_{pF4,2}^*$), la relation est très bonne pour les horizons où l'on peut soupçonner une colonisation racinaire homogène (c'est-à-dire constante pour tous les points de mesure). En revanche, dans les couches de sol marquées par de fortes hétérogénéités parcellaires dans les prélèvements (à partir de 135 cm de profondeur sous le rang comme sous l'inter-rang), la relation est différente.

Nous avons déterminé la régression entre $-\Delta\theta/TP$ et $S_{pF4,2}^*$ pour les couches à fortes variations de stock. La pente de la droite obtenue est statistiquement égale à la pente de la droite obtenue à partir d'un état hydrique du sol calculé avec le stock minimal mesuré pour référence (S_{\min}^*). En revanche, l'ordonnée à l'origine est significativement différente. Ceci signifie que, pour toute profondeur : $S_{pF4,2}^* = S_{\min}^* + C'$. Ainsi, la relation :

$$\frac{\Delta\theta}{TP} = a.S_{pF4,2}^* + b$$

est équivalente à la relation :

$$\frac{\Delta\theta}{TP} = a.S_{\min}^* + b.C'$$

Ceci laisse donc la possibilité de calibrer un ajustement à partir de $S_{pF4,2}^*$ pour les couches où la densité racinaire est maximale. Cet ajustement peut ensuite être assimilé à l'ajustement à partir de S_{min}^* , ce qui permet de déterminer la constante C' . En dernier lieu, il est possible de recalculer le stock minimum des horizons à faibles densité racinaire puisque ces points sont alignés avec les autres.

La valeur de la pente exprime la qualité d'adaptation de la vigne à la sécheresse du sol. Comme pour la transpiration, ce paramètre est probablement influencé par le cépage et nécessiterait d'être recalibré pour chaque nouvelle variété. Il n'est pas possible de comparer les relations d'extraction racinaire avec la relation globale de transpiration car les humidités caractéristiques (maximum et minimum) ne sont pas constantes le long du profil.

Ainsi, en résumé, une relation empirique linéaire entre humidité du sol et extraction racinaire a été déterminée. Elle est très bonne lorsqu'elle est calculée à partir de l'humidité minimale de chaque couche mesurée *in situ*. Il est finalement possible d'utiliser une relation entre la satisfaction de la demande en eau des plantes et l'état hydrique du sol déterminé à partir du point de flétrissement, sous réserve d'adaptations minimales.

3. CONCLUSIONS

Ce chapitre fait le point sur l'alimentation en eau de la vigne à l'échelle de la parcelle. Les deux méthodes mises en œuvre (mesure de flux de sève et humidité du sol) ont donné de bons résultats expérimentaux. Elles renseignent chacune sur la variabilité spatio-temporelle des prélèvements en eau par les plantes. Le recoupement des deux fournit les moyens de formaliser des relations empiriques entre consommation en eau par les plantes et état hydrique du sol.

La variabilité spatiale de l'alimentation hydrique de la vigne est probablement contrôlée par les conditions d'éclairement du feuillage lorsque les conditions hydriques du sol ne sont pas limitantes. Ensuite, le sol s'asséchant, **la vitesse de transfert de l'eau du sol aux racines devient limitante pour une alimentation hydrique optimale de la vigne**. C'est à partir de cette date (aux alentours de mi-juillet dans le cas de la parcelle expérimentale étudiée) que l'extraction racinaire commence à diminuer.

Une zone d'alimentation hydrique unique est identifiée au sein du profil de sol. Elle porte sur une profondeur différente selon la position par rapport au cep : elle est plus profonde sous le rang de vigne qu'entre deux rangs. Ceci explique que, globalement, les variations de stock totales mesurées pendant la saison soient supérieures sous les rangs que sous les inter-

rangs. Ces résultats moyens sont cependant entachés d'une forte variabilité intra-parcellaire en relation avec l'hétérogénéité du sol.

L'observation des profils hydriques révèle que l'extraction racinaire augmente avec l'apparition du feuillage puis diminue par raréfaction de l'eau du sol. **Cette cinétique est identique et simultanée en toute profondeur**, ce qui signifie qu'il n'y a pas délocalisation des zones d'extraction vers la profondeur au cours de l'assèchement des couches de surface.

La consommation en eau de la vigne semble donc hautement liée à l'humidité du sol pendant la plus grande partie de la saison. Ce résultat expérimental est synthétisé par la mise à jour de très bonnes relations empiriques entre consommation en eau de la vigne et état hydrique du sol.

Une relation "globale" linéaire relie la transpiration moyenne parcellaire à l'humidité moyenne du sol rapportée à la réserve utile. Le calcul de transpiration potentielle reste toutefois à améliorer puisque la transpiration en conditions hydriques *a priori* non limitantes n'égale pas la transpiration potentielle calculée par le modèle de Riou *et al.* (1994).

Nous avons déterminé des fonctions d'extraction racinaire entre les variations d'humidité d'une couche de 20 cm d'épaisseur et son état de saturation. **Ces relations permettent une modélisation empirique de l'alimentation en eau de la culture en s'abstrayant de la connaissance de son système racinaire.** Ceci est rendu possible par la prise en compte de l'humidité minimale mesurée *in situ* qui intègre la capacité d'extraction racinaire des plantes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté avait un double objectif : d'une part caractériser et quantifier les flux d'eau à l'échelle d'une parcelle de vigne ; d'autre part permettre de déterminer des fonctions de régulation de ces flux en fonction de paramètres du milieu d'accès facile. Ces fonctions de régulation doivent alors pouvoir être introduites dans un modèle parcellaire insérable dans une modélisation hydrologique spatialisée à l'échelle de la saison de végétation.

L'analyse bibliographique effectuée révèle le manque de connaissances sur les transferts hydriques dans le système sol-vigne-atmosphère. Les travaux publiés étaient généralement effectués en relation avec la production de raisins (quantité ou qualité). Peu de travaux ont étudié la variabilité spatio-temporelle des flux parcellaires sur vigne ; en particulier, les mécanismes de régulation de ces flux en fonction de variables simples du milieu (humidité du sol, paramètres climatiques) n'ont pas encore été déterminés à l'échelle de la saison de culture.

Notre démarche repose sur une analyse expérimentale des flux d'eau à l'échelle de la parcelle de vigne couplée à la connaissance de l'état hydrique du milieu. La méthodologie choisie consiste à quantifier de façon indépendante tous les flux du bilan hydrique du sol et du bilan énergétique de la basse atmosphère parcellaire. Ceci nous a permis d'appréhender la variabilité spatio-temporelle de chacun de ces flux.

Nous rappellerons ici les résultats obtenus dans ce travail selon quatre orientations : la mise au point méthodologique de l'estimation de l'ETR parcellaire, l'analyse de la variabilité spatiale des flux parcellaires, la compréhension du fonctionnement hydrique d'une parcelle de vigne et les options de modélisation qui en découlent.

Méthodologie de mesure de l'évapotranspiration réelle d'une parcelle de vigne

L'expérimentation mise en œuvre a permis d'évaluer l'ETR parcellaire selon trois méthodes : un bilan hydrique du sol, la mesure séparée de l'évaporation et de la transpiration et un bilan d'énergie. Les résultats méthodologiques sont les suivants :

- la méthode du bilan hydrique du sol est la méthode la plus fréquemment employée pour estimer l'ETR d'une parcelle de vigne. Cette technique repose sur des mesures locales d'humidité du sol et de gradients hydrauliques et sur l'estimation des caractéristiques hydrodynamiques des matériaux du sol. Il s'agit en général d'une méthode lourde à mettre en œuvre. Ce fait est accentué dans le cas d'une parcelle de vigne pour deux raisons : 1) l'hétérogénéité du couvert qui induit des hétérogénéités parallèles d'exploitation racinaire (voir partie suivante sur la variabilité de la mesure) ; 2) la très grande profondeur d'enracinement. De surcroît, la consommation en eau de la vigne est faible et sa valeur sur de courtes périodes est du même ordre de grandeur que l'erreur de mesure.
- l'estimation de l'ETR par mesures séparées de la transpiration et de l'évaporation a donné de bons résultats issus de mesures validées de chacun des deux flux :
 - 1- la mesure de la transpiration des ceps par bilan de chaleur permet une estimation de la consommation en eau des ceps à une échelle de temps très fine. Cette technique présente l'avantage d'être totalement automatisable mais demeure dispendieuse en énergie, ce qui peut être un inconvénient lors d'expérimentations éloignées et sans ressources énergétiques faciles d'accès (ligne électrique). Compte tenu des problèmes rencontrés lors de nos expérimentations, il serait souhaitable d'améliorer la procédure d'isolation thermique des capteurs.
 - 2- la mesure de l'évaporation du sol réalisée par mini-lysimètres est apparue satisfaisante. En effet, les évolutions des humidités de la couche de surface et des mini-lysimètres restent parallèles pendant toute la saison. Ces appareils permettent une mesure précise de l'évaporation (inférieure au dixième de millimètre). L'absence d'automatisation demeure néanmoins un gros inconvénient pour leur utilisation dans une longue expérimentation.
- l'estimation de l'ETR de la parcelle de vigne par bilan d'énergie est apparue opérationnelle malgré des conditions d'application peu propices. Bien que cette méthode permette de s'abstraire des hétérogénéités de couvert et de sol, elle demeure soumise à de nombreuses limitations expérimentales. Celles-ci cantonnent ce type de technique dans une fonction de contrôle des mesures de l'ETR parcellaire assurées par les méthodologies exposées ci dessus.

Enfin, la mesure séparée des flux de transpiration et d'évaporation se révèle particulièrement adaptée à l'étude parcellaire de l'ETR de la vigne à un pas de temps fin. En effet, contrairement au bilan hydrique, elle permet de s'abstraire de contraintes expérimentales liées au sol (zone d'enracinement, caractérisation hydrodynamique du sol, hétérogénéité et pénétrabilité du sol). Par ailleurs, ses avantages sur le bilan d'énergie sont qu'elle ne requiert pas de main d'œuvre particulière ni de suivi assidu sur le terrain.

Variabilité spatiale des flux et échantillonnage

L'analyse de la variabilité des flux à l'échelle de la parcelle s'avère essentielle. La forte hétérogénéité de certains flux oblige à un échantillonnage étendu pour une estimation précise des flux moyens. De plus, la structure spatiale de la variabilité des flux peut permettre de comprendre celle des mécanismes qui les engendrent.

- l'estimation de l'ETR par bilan hydrique du sol est sous l'influence forte de la variabilité intra-parcellaire des mesures d'humidité du sol. Lorsque le sol est très hétérogène, un échantillonnage spatial étendu est nécessaire pour avoir une erreur relative sur l'ETR acceptable (inférieure à 10 %). Cette observation est plutôt d'ordre général puisqu'elle avait déjà été faite auparavant sur couverts continus (Bertuzzi *et al.*, 1994 ; Vandervaere *et al.*, 1994b). Notre travail montre que, sous couvert de vigne, l'échantillonnage doit être structuré : il doit prendre en compte l'hétérogénéité de couvert en intégrant des mesures d'humidité du sol sous les rangs de vigne et dans les inter-rangs. Cette précaution se justifie probablement d'autant plus que l'inter-rang est plus large. En effet, nous avons montré que l'exploitation moyenne du stock est plus intense sous les rangs de vigne qu'en inter-rang du fait principalement d'une profondeur d'extraction plus marquée.
- la mesure d'évaporation du sol sous couvert a montré qu'il n'existe pas, pour ce flux, de variabilité spatiale structurée en fonction du couvert pour la plupart des périodes de mesures. Ce sont principalement les périodes sèches pendant lesquelles le coefficient de variation de la mesure par mini-lysimètres est relativement faible (7-39 %). Des phénomènes de redistribution d'énergie sont probablement à l'origine de l'homogénéisation de l'évaporation à l'échelle de la structure en rangs. La variabilité structurée existe surtout pendant les périodes comprenant une pluie. Elle s'explique sans doute par l'hétérogénéité de pluviosité sous le couvert (voir partie suivante sur la régulation des flux). Lors des périodes de pluies, le coefficient de variation de la mesure atteint 43 à 145 % du fait des hétérogénéités mentionnées. Ainsi, l'échantillonnage pour la mesure d'évaporation doit prendre en compte la structure du couvert essentiellement pour intégrer la variabilité en période pluvieuse.
- la transpiration moyenne de la parcelle est estimée convenablement par échantillonnage de ceps moyens choisis comme tels à partir des relevés de poids de bois de taille. Ce critère de sélection des ceps apparaît donc satisfaisant. À nombre de ceps étudiés équivalent, il

permet une meilleure précision sur la moyenne parcellaire qu'un échantillonnage aléatoire. En revanche, il ne permet pas d'évaluer l'erreur réalisée sur la moyenne de transpiration parcellaire. De plus, cet échantillonnage imposé ne permet pas d'évaluer la variabilité intra-parcellaire de la mesure de transpiration. En effet, le coefficient de variation de 38 % calculé sur la moyenne obtenue est probablement bien en-deçà de la variabilité de transpiration à l'échelle de la parcelle. Une autre option aurait pu être d'effectuer un échantillonnage aléatoire stratifié. Il serait basé sur la création de classes de vigueur de ceps à partir des mesures de poids de bois de taille. Un nombre d'individus serait échantillonné aléatoirement dans chaque classe en proportion de l'importance de celle-ci. Nous n'avons pas retenu cette option en raison du coût d'installation et parce que nous voulions échantillonner des ceps en des endroits précis de la parcelle (les placettes). Il faudrait néanmoins l'évaluer, notamment pour vérifier la relation entre consommation en eau et développement végétatif de la vigne, sous-entendue par le mode d'échantillonnage.

Régulation des flux parcellaires

L'ensemble de ces mesures a permis de tirer des règles du fonctionnement hydrique d'une parcelle de vigne, précisant et nuancant certains résultats déjà publiés. Voyons ici comment se distribuent les flux d'évaporation et de transpiration dans l'espace et quelle est la pérennité de cette distribution dans le temps :

- l'ETR totale est faible en toute période de la saison (entre 1 et 3 mm.j⁻¹), confirmant les données recueillies dans la bibliographie. La transpiration reste le flux majoritaire dans l'ETR tout au long de la saison. Toutefois, une étude dynamique des flux d'eau à l'échelle de la saison montre que l'évaporation du sol peut devenir ponctuellement (pendant quelques heures voire quelques jours) le flux le plus important quantitativement. Ceci s'explique à la fois par la faible consommation en eau de la vigne et par la forte évaporation potentielle subsistant même sous couvert.
- l'étude de l'évaporation sous couvert a montré que ce flux est sous le contrôle majeur de l'humidité du sol pendant la plus grande partie de la saison. En effet, la demande climatique (évaporation potentielle) étant forte pendant toute la saison, la surface du sol se dessèche très vite et les conditions de conductivité de la couche de surface deviennent vite limitantes à l'évaporation. Au moment d'une pluie, du fait de conditions initiales très sèches en période estivale, seules les couches de surface sont humidifiées. L'eau de pluie ne percole donc jamais dans les couches où l'enracinement est plus densément présent, elle ne bénéficie pas aux plantes. Par suite, à l'échelle de la saison en climat sec, le total

d'évaporation est sous l'influence du régime pluviométrique : la quantité totale évaporée par le sol est quasiment égale à la quantité de pluie tombée pendant la même période. Ce résultat a déjà été montré dans des conditions expérimentales similaires (Oliver et Sene, 1992).

- la transpiration des ceps à l'échelle de la saison est contrôlée par deux facteurs : la surface foliaire exposée et l'état hydrique du sol. On observe une augmentation de la transpiration avec la croissance foliaire suivie d'une diminution par raréfaction des réserves. Dans cette seconde phase, les transferts d'eau dans le sol et les caractéristiques de l'enracinement des ceps sont les limites à l'extraction racinaire. En fin de saison sèche, la vigne continue toutefois à transpirer à 30 % de la transpiration potentielle, ce qui indique un maintien de la capacité d'alimentation tout au long de la saison.
- l'extraction racinaire de la vigne s'effectue dans une zone de profondeur limitée, inférieure à la profondeur maximale d'enracinement. Dans cette zone, la dynamique d'exploitation est la même en toute profondeur : il n'y a pas augmentation des prélèvements par les racines profondes lorsque les horizons supérieurs sont secs. Ce résultat contredit des affirmations souvent avancées selon lesquelles la vigne puiserait l'eau nécessaire à sa survie en profondeur en période de sécheresse. En définitive, l'extraction racinaire, dans cette zone d'alimentation unique, évolue comme la transpiration : elle augmente avec la croissance végétative et se réduit par épuisement de la ressource en eau. La gamme de fonctionnement hydrique des racines montre un arrêt d'extraction racinaire pour une humidité supérieure au point de flétrissement (pF_{4,2}). Cette observation s'explique par une densité racinaire faible qui ne permet sans doute pas une exploitation totale de la réserve hydrique.

Ces résultats sont originaux et vont à l'encontre de conclusions tirées par certains auteurs à partir de l'observation de profils hydriques. Ils ne permettent pas d'affirmer que la vigne est adaptée à la sécheresse par le développement de racines profondes. Il semble plutôt que la vigne, de par sa surface foliaire exposée réduite présente des besoins en eau limités. Cette caractéristique est compatible avec les réserves hydriques disponibles en début de saison. En revanche, si la conduite de la vigne est faite différemment (augmentation de la surface foliaire exposée), un problème d'alimentation en eau pourrait potentiellement apparaître.

Éléments de modélisation de l'ETR d'une parcelle de vigne

Nous avons recherché des relations empiriques permettant de formaliser les règles de fonctionnement hydrique parcellaire observées expérimentalement. Le pas de temps de

résolution de ces premiers éléments de modélisation était fixé à la journée voire la semaine. La contrainte majeure était que les relations obtenues pussent être transposées facilement d'une parcelle à une autre, d'où la nécessité d'avoir recours à une paramétrisation simple. Pour pouvoir adapter le modèle à diverses conformations parcellaires (densité de plantation, mode de conduite), il est nécessaire d'envisager l'étude séparée de l'évaporation du sol et de la transpiration. Comme nous l'avons vu, l'humidité du sol influe fortement sur les deux flux si bien que les relations empiriques ont été recherchées entre état hydrique du sol et valeur du flux rapportée à une référence climatique (évaporation et transpiration potentielles). Ceci constituait en quelque sorte trois étapes de modélisation : la détermination des références climatiques puis la modélisation séparée de chaque flux.

- les références climatiques utilisées pour l'étude séparée de l'évaporation et de la transpiration ont été définies à partir du modèle d'interception de Riou *et al.* (1989). Si les résultats sont satisfaisants en l'état, l'utilisation d'un tel modèle pose toutefois quelques problèmes théoriques encore non résolus pour son utilisation généralisée. Le modèle de Riou *et al.* a été construit pour une vigne de forme strictement contrôlée. Or il s'avère que l'hypothèse sur la forme du rang est une hypothèse forte et, de ce fait, contraignante. L'utilisation du modèle pour des vignes conduites en rangs sans contrôle de la croissance et pour des vignes en gobelets (majoritaires dans la région) ne semble donc pas adéquate en l'état. Des modifications seraient souhaitables : pour les vignes en rangs, une correction sur le périmètre exposé d'après des calculs géométriques réalisés par Carbonneau (1995) est envisageable et semble donner des résultats satisfaisants. Pour les vignes en gobelets, on pourrait sans doute revenir à un modèle d'extinction de type Beer-Lambert corrigé de la surface couverte projetée (Oliver et Sene, 1992).

La modélisation de l'interception pendant la phase de croissance de la vigne est une partie sensible car c'est à cette période que l'eau du sol est la plus disponible pour les plantes. Par conséquent, la transpiration devrait égaler la transpiration potentielle pendant au moins une partie de cette période d'où l'importance de sa détermination précise. L'évolution de la forme d'un rang de vigne au cours de sa croissance n'a encore jamais été étudiée à notre connaissance. Elle serait certainement à coupler avec un modèle de croissance comme il en existe, par exemple, basé sur une relation entre la somme de températures depuis le débourrement et l'allongement des rameaux (Gutierrez *et al.*, 1985).

- la modélisation de l'évaporation du sol dans nos conditions expérimentales doit être faite à un pas de temps horaire pour s'adapter à l'évolution rapide de la demande climatique en zone méditerranéenne. En effet, les variations d'évaporation sont très rapides et intenses lors des pluies. De plus, nous avons vu que le régime d'évaporation dépend directement du régime pluviométrique. Pour simuler l'évaporation en fonction de l'évaporation

cumulée depuis un événement pluvieux (modèle de Ritchie, 1972), le problème de réinitialisation de l'évaporation après une pluie est apparu aussi important que celui du principe même du modèle. La réinitialisation que nous proposons, inspirée d'un module du modèle de Boesten et Stroosnijder (1986), améliore notablement les performances du modèle de Ritchie. L'utilisation d'un modèle de simulation de l'évaporation en fonction de l'état hydrique de la surface du sol (modèle de Van Keulen, 1975) évite ce problème de réinitialisation. En effet, la recharge en eau de l'horizon de surface au moment d'une pluie influe directement sur le niveau d'évaporation. La simplicité de ce type de modèle en fait un outil adapté à la simulation des phénomènes évaporatoires intenses (forte évaporation sur un laps de temps court).

- l'élaboration d'un module de consommation en eau de la vigne a été effectuée selon deux options : l'une est un modèle de transpiration global, l'autre détermine les zones d'extraction racinaire de la vigne au sein du profil. Ces deux modules sont basés sur des relations empiriques entre état hydrique du sol et satisfaction de la demande climatique par la vigne (transpiration dans le premier cas, extraction racinaire d'une couche de 20 cm dans le second). Les relations obtenues sont très satisfaisantes et répondent toutes deux aux besoins de paramètres simples à estimer.

Dans les deux options, il est nécessaire d'estimer l'état hydrique du sol à saturation et minimum. Selon l'option choisie, l'humidité minimale peut être l'humidité au point de flétrissement (modèle global) ou l'humidité minimale mesurée (extraction racinaire). Une relation acceptable n'a pu être trouvée entre extraction racinaire et état hydrique du sol rapporté à l'humidité au point de flétrissement. Nous pensons que ceci est dû à la variabilité de colonisation racinaire au sein du profil qui induit une variabilité parallèle de l'extraction racinaire. La prise en considération de l'humidité minimale mesurée intègre la différence de densité racinaire puisque les horizons les moins densément colonisés sont également les moins asséchés. L'humidité minimale peut être mesurée par la méthode gravimétrique sur des échantillons de sol prélevés en fin d'été. Son estimation n'est donc pas plus problématique que celle de l'humidité au point de flétrissement.

Un point sensible demeure : le modèle d'extraction racinaire utilise des profondeurs "utiles" d'extraction racinaire différentes sous les rangs de vigne et sous les inter-rangs. Nous avons déterminé ces profondeurs expérimentalement à partir des relevés réguliers d'humidité. La mesure des humidités minimale et maximale ne suffit pas pour renseigner sur les zones d'exploitation en raison des fortes variations de stock mesurées en profondeur imputable à du drainage et des remontées capillaires. Il serait donc nécessaire de calibrer ces profondeurs dans des situations pédologiques contrastées pour essayer de relier profondeur d'exploitation et caractéristiques pédologiques. Ce problème peut être transposé à l'option de modélisation globale : la profondeur du stock choisie pour

référence a été déterminée expérimentalement et mériterait d'être évaluée dans des situations diversifiées.

Finalement, l'extrapolation du modèle à d'autres parcelles suppose que l'adaptation (forme de la courbe ; pente de la droite) est identique pour des cépages différents, ce qui reste à vérifier.

Les résultats obtenus sont encourageants et laissent penser qu'il est possible de bâtir une relation extrapolable à de nombreuses parcelles avec des paramètres faciles d'accès.

Synthèse des apports de l'étude - Perspectives

Le travail présenté apporte des éléments importants de connaissance du fonctionnement hydrologique d'une parcelle de vigne. La formalisation de relations simples entre la vigne et son milieu en fait un travail transposable à d'autres situations.

Le module d'évaporation peut être utilisé tel quel dans un modèle de fonctionnement hydrique parcellaire. En ce qui concerne l'alimentation en eau de la vigne, quelques adaptations doivent être apportées aux relations empiriques déterminées pour permettre leur utilisation dans des situations pédologiques et culturales diverses. Ces adaptations concernent d'une part l'accès à des paramètres obtenus expérimentalement (profondeur de sol utilisée pour l'alimentation en eau des ceps) et d'autre part la validité des équations obtenues pour des cépages divers. En effet, nous avons signalé dans la synthèse bibliographique au début de ce mémoire que tous les cépages ne réagissent pas de façon similaire à l'assèchement du sol. Ainsi, les relations doivent être vérifiées en fonction des cépages.

Cette étude montre que l'on peut estimer la consommation en eau de parcelles de vigne à petite échelle (micro-région). La détermination de relations entre qualité du substrat pour l'alimentation en eau des vignes et quantités d'eau consommées par les ceps est une des étapes importantes qui permettent d'anticiper sur la qualité du produit agricole à partir des caractéristiques du milieu. En effet, il est à présent notoire que la qualité du raisin (et du vin qu'on en fait) est fortement reliée à la consommation en eau des ceps. L'étude ici présentée porte sur une détermination parcellaire des échanges d'eau entre sol, plante et atmosphère car c'est une échelle privilégiée pour son unité culturelle. L'extension d'une telle étude à une micro-région serait possible par une caractérisation des relations sur quelques parcelles représentatives de la région étudiée associée à une spatialisation des données en fonction de leur distribution. On établit ainsi le premier lien avec la notion de terroir viticole qui intègre, outre des notions de qualité du sol, des liens de la qualité du raisin avec le méso-climat (climat à l'échelle d'un ensemble de parcelles).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Al-Khafaf, S., Wierenga, P.J. & Williams, B.C. 1978. Evaporative flux from irrigated cotton as related to leaf area index, soil water, and evaporative demand. *Agron.J.*, **70**, 912-917
- Andrieux, P., Bouzigues, R., Joseph, C., Voltz, M., Lagacherie, P. & Bourlet, M. 1993. *Le bassin versant de Roujan - Caractéristiques générales du milieu*. Note interne I.N.R.A. - Science du sol - Montpellier, France, 35 p. + Annexes
- Archer, E. 1988. Effect of plant spacing on root distribution and some qualitative parameters of vines. In: *Proceedings of sixth Australian wine industry technical conference, Adelaide, South Australia, 14-17 juillet 1986*, 55-58
- Baker, J.M. & Van Bavel, C.H.M. 1987. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. *Plant Cell Environ.*, **10**, 777-782
- Bertuzzi, P., Bruckler, L., Bay, D. & Chanzy, A. 1994. Sampling strategies for soil water content to estimate evapotranspiration. *Irrig. Sci.*, **14**, 105-115
- Boast, C.W. & Robertson, T.M. 1982. A "micro-lysimeter" method for determining evaporation from bare soil : description and laboratory evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**, 689-696
- Boesten, J.J.T.I. & Stroosnijder, L. 1986. Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in a temperate climate. *Netherlands J. of Agric.Sci.*, **34**, 75-90
- Branas, J. 1974. *Viticulture*. Ed. ENSA - Montpellier, 989 p.
- Branas, J. & Vergnes, A. 1957. Morphologie du système racinaire. *Prog.Agric.Vitic.*, 29-209
- Bruckler, L. 1983. *Transferts de masse et d'énergie dans les basses couches de l'atmosphère*. Note interne I.N.R.A. - Science du sol - Avignon, 30 p.
- Carbonneau, A. 1976a. Analyse de la croissance des feuilles du sarment de vigne : estimation de sa surface foliaire par échantillonnage. *Conn.Vigne Vin*, **10**, 141-159
- Carbonneau, A. 1976b. Principes et méthodes de mesure de la surface foliaire. Essai de caractérisation des types de feuilles dans le genre . *Ann.Amélior.Plantes*, **26**, 327-343
- Carbonneau, A. 1980. *Recherche sur les systèmes de conduite de la vigne : essai de maîtrise du microclimat et de la plante entière pour produire économiquement du raisin de qualité*. Thèse de Docteur-Ingénieur en Œnologie-Ampélogie, Université Bordeaux II, France, 240p.
- Carbonneau, A. 1992. Photosynthèse : influences climatiques et facteurs d'adaptation. In: *Agrométéorologie de la vigne en France*, Ed. Commission des communautés européennes, Luxembourg, 45-75
- Champagnol, F. 1984. *Éléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale*. Ed.Champagnol, Saint-Gely-du-Fesc, 351 p
- Chanzy, A. & Bruckler, L. 1993. Significance of soil surface moisture with respect to daily bare soil evaporation. *Wat.Resour.Res.*, **29**, 1113-1125

- Cresswell, H.P., Painter, D.J. & Cameron, K.C. 1994. Prediction of evaporation with the CONSERVB simulation model: an experimental evaluation. *Aust. J. Soil Res.*, **32**, 45-67
- Daamen, C.C., Simmonds, L.P., Wallace, J.S., Laryea, K.B. & Sivakumar, M.V.K. 1993. Use of micro-lysimeters to measure evaporation from sandy soils. *Agric.For.Meteorol.*, **65**, 159-173
- Daudet, F.A. & Katerji, N. 1987. Quelques aspects du fonctionnement hydrique et photosynthétique d'une vigne conduite en lyre. In: *C.R.IIIe Symp.Intern.Physiologie Vigne - Bordeaux, 24-27 juin 1986*, Paris, 392-397
- Daudet, F.A. & Vachaud, G. 1977. La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique. *Ann. Agron.*, **28**, 503-519
- Dayau, S. 1993. Réalisation des capteurs pour la mesure du débit de sève dans des arbres (méthode du bilan de chaleur). *Cah.Techm.I.N.R.A.*, **31**, 3-24
- De Laroche, E. 1994. *Présentation de deux applications-pilotes pour la gestion des espaces viticoles languedociens - Contribution à la phase de prototypage du Système d'Information Géographique Languedoc-Roussillon*. Mastère Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts (Montpellier) ; Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier ; Institut National Agronomique de Paris Grignon, 51 p
- Delas, J., Casteran, P., Soyer, J.P., Giraudon, J. & Molot, C. 1986. Techniques d'entretien du sol et alimentation minérale de la vigne dans le Bordelais. In: *C.R. IIe Symp.Intern. Non culture de la Vigne*, 407-414
- De Vries, D.A. 1963. Thermal properties of soils. In: *Physics of Plant Environment*, Ed. Van Wijk, Amsterdam, 210-235
- Düring, H. 1987. Stomatal responses to alterations of soil and air humidity in grapevines. *Vitis*, **26**, 9-18
- Duteau, J. 1982. Alimentation en eau de la vigne dans le Bordelais en période estivale sèche - Exemple de l'année 1980 à Saint Emilion et Pomerol. *Bull.AFES*, **1**, 15-29
- Duteau, J. 1987. Contribution des réserves hydriques profondes du calcaire à Astéries compact à l'alimentation en eau de la vigne dans le Bordelais. *Agronomie*, **7**, 859-865
- Evelt, S.R., Warrick, A.W. & Matthias, A.D. 1995. Wall material and capping effects on micro-lysimeters temperatures and evaporation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **59**, 329-336
- Fiori, E. 1992. *Variabilité spatio-temporelle du fonctionnement hydrique des sols et croissance végétative de la vigne dans le bassin versant de Roujan*. DEA Ecosystemes des milieux arides méditerranéens et montagnard, Université Aix-Marseille I, 31 p
- Galais, J.L.O. 1992. *Variabilité du stock et des flux profonds d'eau à l'échelle de la parcelle de vigne. Analyse de la précision d'estimation des valeurs moyennes*. DAA Génie agronomique, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier (France), 39 p + Annexes
- Gardner, W.R. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci.*, **89**, 63-73
- Gardner, W.R. 1964. Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agron.J.*, **56**, 41-45
- Gardner, W.R. & Ehlig, C.F. 1962. Some observations of the movement of water to plant roots. *Agron.J.*, **54**, 453-456

- Goudriaan, J. 1989. Simulation of micrometeorology of crops, some methods and their problems, and a few results. *Agric.For.Meteorol.*, **47**, 239-258
- Granier, A. 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux brute dans le tronc des arbres. *Ann.Sci.Forestières*, **42**, 193-200
- Grime, V.L., Morison, J.I.L. & Simmonds, L.P. 1995a. Including the heat storage term in sap flow measurements with the stem heat balance method. *Agric.For.Meteorol.*, **74**, 1-25
- Grime, V.L., Morison, J.I.L. & Simmonds, L.P. 1995b. Sap flow measurements from stem heat balances : a comparison of constant with variable power methods. *Agric.For.Meteorol.*, **74**, 27-40
- Gutierrez, A.P., Williams, D.W. & Kido, H. 1985. A model of grape growth and development : the mathematical structure and biological considerations. *Crop Sci.*, **25**, 721-728
- Gutiérrez, M.V., Harrington, R.A., Meinzer, F.C. & Fownes, J.H. 1994. The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. *Tree Physiol.*, **14**, 179-190
- Ham, J.M., Heilman, J.L. & Lascano, R.J. 1991. Soil and canopy energy balances of a row crop at partial cover. *Agron.J.*, **83**, 744-753
- Ham, J.M. & Kluitenberg, G.J. 1993. Positional variation in the soil energy balance beneath a row-crop canopy. *Agric.For.Meteorol.*, **63**, 73-92
- Haverkamp, R., Vauclin, M. & Vachaud, G. 1984. Error analysis in estimating soil water content from neutron measurements : I. Local standpoint. *Soil Sci.*, **137**, 78-90
- Heilman, J.L. & Ham, J.M. 1990. Measurement of mass flow rate of sap in *Ligustrum japonicum*. *Hort. Science*, **25**, 465-467
- Heilman, J.L., McInnes, K.J., Savage, M.J., Gesch, R.W. & Lascano, R.J. 1994. Soil and canopy energy balances in a West Texas vineyard. *Agric.For.Meteorol.*, **71**, 99-114
- Hicks, B.B. 1973. Eddy fluxes over a vineyard. *Agric.Meteorol.*, **12**, 203-215
- Hidalgo, L. & Candela, M.R. 1969. *Morfología radicular de la vid. Su relación con la producción, densidad y disposición del viñedo*. Ed. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Madrid, 101 p.
- Idso, S.B., Reginato, R.J., Jackson, R.D., Kimball, B.A. & Nakayama, F.S. 1974. The three stages of drying of a field soil. *Soil Sci.Soc.Am.Proc.*, **38**, 831-837
- Ionescu, E.M., Budan, C., Calistru, G.H., Pomohaci, N., Pituc, P., Popa, V.G.H. & Vladu, C.R. 1978. Particularités du développement de l'appareil radicaire de la vigne, induites par le spécifique écologique du sol. In: *C.R. Ier Symp.Intern. Ecologie de la vigne*, 209-217
- Jourjon, F., Morlat, R. & Seguin, G. 1991. Caractérisation des terroirs viticoles de la moyenne vallée de la Loire. Parcelles expérimentales, climat, sols et alimentation en eau de la vigne. *J. Intern. Sci. Vigne Vin*, **25**, 179-202
- Katerji, N., Daudet, F. & Valancogne, C. 1984. Contribution des réserves profondes du sol au bilan hydrique des cultures. Détermination et importance. *Agronomie*, **4**, 779-787

- Klocke, N.L., Martin, D.L., Todd, R.W., DeHaan, D.L. & Polymenopoulos, A.D. 1990. Evaporation measurements and predictions from soils under crop canopies. *Trans. ASAE*, **33**, 1590-1596
- Kriedemann, P.E. & Smart, R.E. 1971. Effects of irradiance, temperature and leaf water potential on photosynthesis of vine leaves. *Photosynthetica*, **5**, 1, 22-27
- Kustas, W.P. 1990. Estimates of evapotranspiration with a one- and two-layer model of heat transfer over partial canopy cover. *J.Appl.Meteorol.*, **29**, 704-715
- Lascano, R.J., Baumhardt, R.L. & Lipe, W.N. 1992. Measurement of water flow in young grapevines using the stem heat balance method. *Amer. J. Enol. Viticult.*, **43**, 159-165
- Lascano, R.J. & Van Bavel, C.H.M. 1986. Simulation and measurement of evaporation from a bare soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **50**, 1127-1132
- Leenhardt, D. 1992. *Spatialisation du bilan hydrique - Propagation des erreurs d'estimation des caractéristiques du sol au travers des modèles de bilan hydrique - Cas du blé dur d'hiver*. Thèse École Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier - France, 129 p + Annexes
- Leenhardt, D., Voltz, M. & Rambal, S. 1994. A survey of several agroclimatic soil water balance models with reference to their spatial application. *Eur.J.Agron.*, **4**, 1-14
- Liu, W.T., Wenkert, W., Allen Jr, L.H. & Lemon, E.R. 1978. Soil-plant water relations in a New-York vineyard : resistances to water movement. *J.Amer.Soc.Hort.Sci.*, **103**, 226-230
- Magrisso, J. 1987. Les bases physiologiques de la résistance de la vigne à la sécheresse. In: *C.R. IIIe Symp.Intern. Physiologie Vigne, Bordeaux, 24-27 juin 1986*, Paris, 175-178
- Massman, W.J. 1992. A surface energy balance method for partitioning evapotranspiration data into plant and soil components for a surface with partial canopy cover. *Wat.Resour.Res.*, **28**, 1723-1732
- Mériaux, S. & Panine, M. 1986. Essai d'interprétation de la variabilité interannuelle de la production viticole dans le midi méditerranéen. L'exemple du Carignan. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **72**, 1053-1063
- Mériaux, S., Rollin, H. & Rutten, P. 1979. Effets de la sécheresse sur la vigne. I. Etudes sur Cabernet-Sauvignon. *Ann. Agron.*, **30**, 553-575
- Mériaux, S., Rollin, H. & Rutten, P. 1981. Effets de la sécheresse sur la vigne (*Vitis vinifera* L.). II. Etudes sur "Grenache". *Agronomie*, **1**, 375-382
- Mohrath, D., Bertuzzi, P. & Bruckler, L. 1994. *Méthode de Wind - Guide d'utilisation du logiciel - Version 1*. Notice interne I.N.R.A. Science du sol - Avignon (France), 97 p
- Monteith, J.L. 1993. The exchange of water and carbon by crops in a mediterranean climate. *Irrig. Sci.*, **14**, 85-91
- 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**, 887-896
- Morlat, R. 1986. Influence du mode d'entretien du sol sur l'alimentation en eau de la vigne en Anjou. Conséquences agronomiques. In: *C.R. IIe Symp.Intern. Non culture de la Vigne*, 367-376

- Morlat, R. 1989. *Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins. Application aux vignobles de moyenne vallée de la Loire*. Thèse Université de Bordeaux II, 275 p + Annexes
- Morlat, R. & Jacquet, A. 1993. The soil effects on the grapevine root system in several vineyards of the Loire valley (France). *Vitis*, **32**, 35-42
- Morlat, R., Penavayre, M., Jacquet, A., Asselin, C. & Lemaitre, C. 1992. Influence des terroirs sur le fonctionnement hydrique et la photosynthèse de la vigne en millésime exceptionnellement sec (1990). Conséquence sur la maturation du raisin. *J. Intern. Sci. Vigne Vin*, **26**, 197-220
- Morlat, R., Puissant, A., Asselin, C., Léon, H. & Remoué, M. 1981 Quelques aspects de l'influence du milieu édaphique sur l'enracinement de la vigne, conséquences sur la qualité du vin. *Science du Sol*, **2**, 125-145
- Morlat, R., Remoue, M. & Pinet, P. 1984. Influence de la densité de plantation et du mode d'entretien du sol sur l'enracinement d'un peuplement de vigne planté en sol favorable. *Agronomie*, **4**, 485-491
- Nielsen, D.R., Biggar, L.W. & Erh, K.T. 1973. Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Hilgardia*, **42**, 215-259
- Novák, V. 1987. Estimation of soil-water extraction patterns by roots. *Agric. Wat. Manage.*, **12**, 271-278
- Oliver, H.R. & Sene, K.J. 1992. Energy and water balances of developing vines. *Agric.For.Meteorol.*, **61**, 167-185
- Panine, M. & Meriaux, S. 1983. Influence de la variabilité de la pluviométrie sur la recharge des horizons profonds du sol en conditions méditerranéennes. Conséquences sur la production de quelques cultures pérennes. *Conférence sur le climat Méditerranéen et les ressources en eau. "Eau verte-Eau bleue"*. Marseille 6-8 Septembre 1983 .
- Perrier, A. 1975. Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III. Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. *Ann. Agron.*, **26**, 229-243
- Perrier, A., Archer, P. & Blanco de Pablos, A. 1974. Etude de l'évapotranspiration réelle et maximale de diverses cultures : dispositifs et mesures. *Ann. Agron.*, **25**, 697-731
- Perrier, A. & Seguin, B. 1970. Méthodes et techniques de détermination des coefficients de transfert et des flux dans l'air. In: *Technique d'étude des facteurs physiques de la biosphère*, Ed.INRA, Paris, 425-446
- Puech, J., Maertens, C. & Marty, J.R. 1969. Modalités du dessèchement du sol sous des cultures plantées en lignes espacées. *Ann. Agron.*, **20**, 597-607
- Rambal, S. & Cornet, A. 1982. Simulation de l'utilisation de l'eau et de la production végétale d'une phytocénose sahélienne du Sénégal. *Acta Oecol.Oecol.Plant.*, **3**, 381-397
- Reicosky, D.C., Millington, R.J., Klute, A. & Peters, D.B. 1972. Patterns of water uptake and root distribution of soybeans (*Glycine max*) in the presence of water table. *Agron.J.*, **64**, 292-296
- Reynolds, A.G. & Naylor, A.P. 1994. "Pinot noir" and "Riesling" grapevines respond to water stress duration and soil water-holding capacity. *Hort. Science*, **29**, 1505-1510

- Ribéreau-Gayon, J. & Peynaud, E. 1971. *Sciences et Techniques de la Vigne.*, Ed. Dunod, Paris, 725 p.
- Riou, C. 1992. Climat et Croissance. In: *Agrométéorologie de la vigne en France*, Ed. Commission des communautés européennes, Luxembourg, 33-43
- Riou, C. 1994. *Le déterminisme climatique de la maturation du raisin : application au zonage de la teneur en sucre dans la communauté européenne.*, Ed. Commission des communautés européennes, Luxembourg.
- Riou, C., Pieri, P. & Le Clech, B. 1994. Consommation d'eau de la vigne en conditions hydriques non limitantes. Formulation simplifiée de la transpiration. *Vitis*, **33**, 109-115
- Riou, C., Pieri, P. & Valancogne, C. 1987. Variation de la vitesse du vent à l'intérieur et au-dessus d'une vigne. *Agric.For.Meteorol.*, **39**, 143-154
- Riou, C., Valancogne, C. & Pieri, P. 1989. Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne - Vérification expérimentale. *Agronomie*, **9**, 441-450
- Ritchie, J.T. 1972. Model for predicting evaporation from a row-crop with incomplete cover. *Wat.Resour.Res.*, **8**, 1204-1212
- Roumbas, N., Duteau, J. & Seguin, G. 1983. Le vignoble de Chypre : parcelles expérimentales, climats, sols et alimentation en eau de la vigne. *Conn.Vigne Vin*, **1**, 1-30
- Sakuratani, T. 1981. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *J.Agr.Met.*, **37**, 9-17
- Schultz, H.R. & Matthews, M.A. 1988. Resistance to water transport in shoots of *Vitis vinifera* L. - Relations to growth at low water potential. *Plant Physiol.*, **88**, 718-724
- Seguin, G. 1969. L'alimentation en eau de la vigne dans des sols du Haut-Médoc. *Conn.Vigne Vin*, **2**, 93-141
- Seguin, G. 1971. L'alimentation en eau de la vigne et la maturation du raisin en 1970 sur quelques sols typiques du Haut-Médoc. *Conn.Vigne Vin*, **5**, 293-313
- Seguin, G. 1972. Répartition dans l'espace du système racinaire de la vigne. *C.R.Acad.Sc.Paris*, **274**, 2178-2180
- Seguin, G. 1973. Caractères particuliers de l'alimentation en eau de la vigne, en 1973, dans un sol typique du Médoc. Conséquences sur la maturation du raisin. *C.R.Acad.Sc.Paris*, **277**, 2493-2496
- Seguin, G. 1978. L'alimentation en eau de la vigne et son influence sur la composition des moûts. *Ann.Technol.Agric.*, **27**, 81-91
- Sene, K.J. 1994. Paramétrisations for energy transfers from a sparse vine crop. *Agric.For.Meteorol.*, **71**, 1-18
- Shackel, K.A., Johnson, R.S., Medawar, C.K. & Phene, C.J. 1992. Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions. *J.Amer.Soc.Hort.Sci.*, **117**, 351-356
- Shawcroft, R.W. & Gardner, H.R. 1983. Direct evaporation from soil under a row-crop canopy. *Agric.Meteorol.*, **28**, 229-238

- Shuttleworth, W.J. & Wallace, J.S. 1985. Evaporation from sparse crops - An energy combination theory. *Quart.J.R.Met.Soc.*, **111**, 839-855
- Sinoquet, H. 1989. Modélisation de l'interception des rayonnements solaires dans une culture en rangs : I. Aspects théoriques. *Agronomie*, **9**, 125-135
- Sinoquet, H., Valancogne, C., Lescure, A. & Bonhomme, R. 1992. Modélisation de l'interception des rayonnements solaires dans une culture en rangs. III : Application à une vigne traditionnelle. *Agronomie*, **12**, 307-318
- Slatyer, R.O. 1967. *Plant-Water relationships*. Academic Press, London and New York. 366 p
- Smart, R.E. 1973. Sunlight interception by vineyards. *Amer. J. Enol. Viticult.*, **24**, 141-147
- Smart, R.E. 1974. Aspects of water relations of the grapevine (*Vitis vinifera*). *Amer. J. Enol. Viticult.*, **25**, 84-91
- Smart, R.E. & Coombe, B.G. 1983. Water relation of grapevines. In: *Water deficits and plant growth*, Ed. Academic press, New York, 137-196
- Smith, K.A. & Mullins, C.E. 1991. *Soil analysis - Physical methods*. Ed. Marcel Dekker, New York, 620 p.
- Snedecor, G.W. & Cochran, W.G. 1957. *Méthodes statistiques.*, Ed. Association de coordination agricole, Paris, 649 p.
- Steinberg, S. 1988. *Dynamax trunk-flow gauge test*. Technical application report 2.
- Steinberg, S., Van Bavel, C.H.M. & Mac Farland, M.J. 1989. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants. *J.Amer.Soc.Hort.Sci.*, **114**, 466-472
- Stevens, R.M. & Nicholas, P.R. 1994. Root length and mass densities of *Vitis vinifera* L. cultivars 'Muscat Gordo Blanco' and 'Shiraz'. *New Zealand J. Crop Hort.Sci.*, **22**, 381-385
- Swanepoel, J.J. & Southey, J.M. 1989 The influence of rootstock on the rooting pattern of the grapevine. *S.Afr.J.Enol.Vitic.*, **10**, 23-28
- Swanson, R.H. 1994. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agric.For.Meteorol.*, **72**, 113-132
- Tamari, S. 1992. *Relations entre l'espace poral du sol et ses propriétés hydrodynamiques. Etude sur des massifs d'agrégats à texture limoneuse*. Thèse Institut National Agronomique - Paris Grignon, 241 p + Annexes
- Tanner, C.B. 1960. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. *Soil Sci.Soc.Am.Proc.*, **24**, 1-9
- Tanner, C.B. & Jury, W.A. 1976. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. *Agron.J.*, **68**, 239-243
- Thony, J.L., Vachaud, G., Clothier, B.E. & Angulo-Jaramillo, R. 1991. Field measurement of the hydraulic properties of soil. *Soil Technology*, **4**, 111-123
- Trocme, D. 1994. *Modélisation de la croissance racinaire et de l'absorption d'eau par les racines au sein d'un modèle régional de bilan hydrique*. DEA Écologie générale et production végétale, Université Paris XI ; Institut National Agronomique Paris Grignon ; Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes, 35 p + Annexes

- Vachaud, G., Passerat de Silans, A., Balabanis, P. & Vauclin, M. 1985. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49**, 822-828
- Valancogne, C. & Granier, A. 1991. Intérêt des méthodes thermiques de mesure du flux de sève pour l'étude du bilan hydrique des savanes. In: *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian zone (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991)*, 387-400
- Valancogne, C. & Nasr, Z. 1989. Une méthode de mesure du débit de sève brute dans de petits arbres par bilan de chaleur. *Agronomie*, **9**, 609-617
- Valancogne, C. & Nasr, Z. 1993. A heat balance method for measuring sap flow in small trees. In *Water transport in plants under climatic stress*. Ed. Borghetti, Grace et Raschi, Cambridge University Press, 166-173
- Vandervaere, J.P., Vauclin, M., Haverkamp, R. & Cuenca, R.H. 1994. Error analysis in estimating soil water balance of irrigated fields during the EFEDA experiment : 2. Spatial standpoint. *J. Hydrol.*, **156**, 371-388
- Vandervaere, J.P., Vauclin, M., Haverkamp, R. & Cuenca, R.H. 1994. Error analysis in estimating soil water balance of irrigated fields during the EFEDA experiment : 1. Local standpoint. *J. Hydrol.*, **156**, 351-370
- Van Keulen, H. 1975. *Simulation of water use and herbage growth in arid regions.*, Ed. Pudoc, Wageningen, 176 p.
- Vauclin, M., Haverkamp, R. & Vachaud, G. 1984. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements : II. Spatial standpoint. *Soil Sci.*, **137**, 141-148
- Villagra, M.M., Bacchi, O.O.S., Tuon, R.L. & Reichardt, K. 1995. Difficulties of estimating evapotranspiration from the water balance equation. *Agric.For.Meteorol.*, **72**, 317-325
- Voltz, M. & Andrieux, P. 1995. *Etude des flux d'eau et de polluants en milieu méditerranéen viticole - Le programme Allegro-Roujan. Bilan des travaux 1992-1995. Rapport final.* I.N.R.A. Science du sol, Montpellier, France, 32 p.
- Walker, G.K. 1983. Measurement of evaporation from soil beneath crop canopies. *Can.J. of Soil Sci.*, **63**, 137-141
- Walker, G.K. 1984. Evaporation from wet soil surfaces beneath plant canopies. *Agric.For.Meteorol.*, **33**, 259-264
- Wallace, J.S. 1995. Calculating evaporation : resistances to factors. *Agric.For.Meteorol.*, **73**, 353-366
- Williams, L.E. & Grimes, D.W. 1988. Modelling vine growth - Development of a data set for a water balance subroutine. In: *Proceedings of sixth australian wine industry technical conference, Adelaide, South Australia, 14-17 juillet 1986*, 169-174
- Winkel, T. & Rambal, S. 1990. Stomatal conductance of some grapevines growing in the field under a mediterranean environment. *Agric.For.Meteorol.*, **51**, 107-121
- Winkel, T. & Rambal, S. 1993. Influence of water stress on grapevines growing in the field : from leaf to whole-plant response. *Aust.J.Plant.Physiol.*, **20**, 143-157
- Yunusa, I.A.M., Sedgley, R.H., Belford, R.K. & Tennant, D. 1993a. Dynamics of water use in a dry mediterranean environment : I. Soil evaporation little affected by presence of plant canopy. *Agric. Wat. Manage.*, **24**, 205-224

Yunusa, I.A.M., Sedgley, R.H., Tennant, D. & Belford, R.K. 1993*b*. Dynamics of water use in a dry mediterranean environment : 2. A test of four evaporation models using micro-lysimetry under spring wheat. *Agric. Wat. Manage.*, **24**, 225-238

Annexe 1 : Organigramme du modèle de Ritchie (1972)

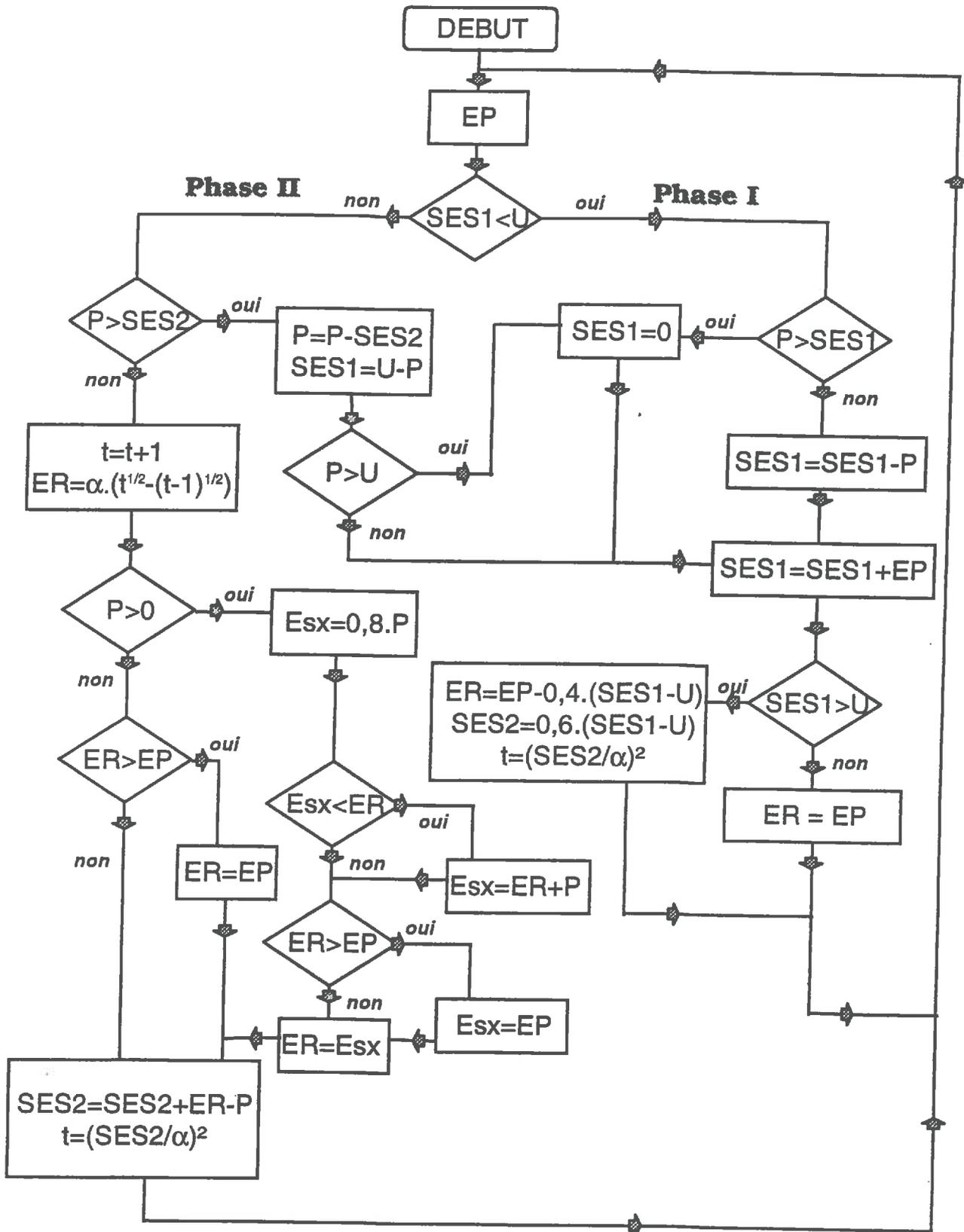


TABLE DES MATIÈRES

AVANT TOUTE CHOSE...	
SOMMAIRE	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : L'ALIMENTATION EN EAU DE LA VIGNE : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1. MORPHOLOGIE ET FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME RACINAIRE DE LA VIGNE	4
1.1. Occupation de l'espace par les racines. Étude morphologique.....	4
1.1.1. Distribution verticale de l'enracinement.....	4
1.1.2. Distribution horizontale	6
1.1.3. Densité racinaire de la vigne.....	8
1.2. Variabilité spatio-temporelle des zones d'absorption d'eau par les racines de vigne.....	10
1.2.1. Note préliminaire sur l'estimation des prélèvements racinaires	11
1.2.2. Répartition verticale des prélèvements.....	13
1.2.3. Répartition horizontale des prélèvements	15
1.3. Conclusions	16
2. INTERCEPTION DU RAYONNEMENT - DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE	17
2.1. Interception du rayonnement à l'échelle de la journée	18
2.1.1. Rayonnement intercepté par les plantes	18
2.1.2. Répartition du rayonnement arrivant au sol	20

2.1.3. Modèle d'interception du rayonnement de Riou et al. (1989).....	20
2.2. Distribution spatio-temporelle de l'énergie incidente à l'échelle de la saison	23
2.3. Conclusions	23
3. ADAPTATIONS ÉCOPHYSIOLOGIQUES DE LA PLANTE À LA SÉCHERESSE - VALEURS D'ETR	24
3.1. Fonctionnement physiologique de la vigne - Régulation de la transpiration	24
3.1.1. Fonctionnement physiologique de la vigne	25
3.1.2. Facteurs environnementaux de la régulation stomatique	27
<i>a) Conditions atmosphériques.....</i>	<i>28</i>
<i>b) Conditions d'humidité du sol.....</i>	<i>29</i>
3.1.3. Effets d'une réduction de transpiration sur le développement de la vigne.....	29
3.1.4. Conclusions	30
3.2. Estimations chiffrées de l'évapotranspiration réelle de la vigne.....	30
3.2.1. L'évapotranspiration parcellaire	31
<i>a) Méthodes.....</i>	<i>31</i>
• Bilan hydrique	31
• Méthodes micro-météorologiques.....	31
<i>b) Résultats.....</i>	<i>32</i>
• Évapotranspiration réelle	32
• Rapport ETR/ETP	32
3.2.2. Transpiration et évaporation	35
<i>a) Méthodes.....</i>	<i>35</i>
<i>b) Résultats.....</i>	<i>36</i>
• Transpiration.....	36
• Évaporation	37
3.3. Conclusions	38
4. MODÉLISATION DU BILAN HYDRIQUE D'UNE PARCELLE DE VIGNE	38
4.1. Modèles d'estimation de l'ETR de la parcelle sans séparation des flux.....	39
4.1.1. Modèles à bases hydrologiques	39
4.1.2. Modèles à bases énergétiques	40
4.1.3. Conclusion : estimer l'ETR globale d'une parcelle de vigne	41
4.2. Modèles séparant évaporation et transpiration	42

4.2.1. Flux maxima d'évaporation et de transpiration.....	42
4.2.2. L'évaporation du sol couvert.....	43
<i>a) Modèles à bases hydrologiques.....</i>	<i>43</i>
• Modèles empiriques basés sur le temps écoulé entre 2 événements pluvieux.....	44
• Modèles empiriques régulés par le niveau d'humidité du sol	45
<i>b) Modèles à bases énergétiques.....</i>	<i>45</i>
<i>c) Conclusion sur les modèles d'évaporation.....</i>	<i>47</i>
4.2.3. La transpiration.....	47
<i>a) Modèles à bases hydrologiques.....</i>	<i>48</i>
<i>b) Modèles à bases énergétiques.....</i>	<i>48</i>
4.2.4. Conclusion : modéliser évaporation et transpiration dans une vigne.....	49
4.3. Modèles existants pour la vigne	50
4.3.1. Modèles à bases hydrologiques	50
<i>a) Modèle de Riou (1994).....</i>	<i>50</i>
<i>b) Modèle de Riou et al. (1994)</i>	<i>51</i>
4.3.2. Modèle à bases énergétiques.....	51
4.3.3. Modèles à bases physiologiques.....	51
4.3.4. Conclusion.....	52
5. CONCLUSION GÉNÉRALE	53
5.1. Évaluation et analyse des flux d'eau à l'échelle de la parcelle de vigne.....	53
5.2. Modélisation de l'ETR d'une parcelle de vigne.....	55
 CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL	57
 1. LE SITE EXPÉRIMENTAL	57
1.1. Le bassin versant de Roujan.....	57
1.1.1. Présentation générale.....	57
1.1.2. Équipement hydrologique du BV.....	58
1.2. La parcelle expérimentale	61
1.2.1. Choix.....	61
1.2.2. Présentation générale.....	61

1.2.3. Le sol.....	62
<i>a) Description.....</i>	<i>62</i>
<i>b) Localisation des racines.....</i>	<i>62</i>
2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL.....	65
2.1. Mesures d'humidité et de potentiel hydrique du sol.....	67
2.1.1. Matériel.....	67
<i>a) Humidité du sol.....</i>	<i>67</i>
• Humidité du sol à partir de 20 cm de profondeur	67
• Humidité des 20 premiers centimètres	68
<i>b) Potentiels hydriques.....</i>	<i>68</i>
2.1.2. Difficultés et traitements	69
2.2. Méthodes micro-météorologiques.....	69
2.2.1. Principes	70
<i>a) Méthode du bilan d'énergie (Perrier, 1975).....</i>	<i>70</i>
<i>b) Méthode des fluctuations (Bruckler, 1983).....</i>	<i>70</i>
2.2.2. Matériel.....	71
2.2.3. Difficultés et traitements	72
2.3. Mesures de transpiration	73
2.3.1. Principes des mesures	73
2.3.2. Matériel.....	76
2.3.3. Difficultés et traitements	77
2.4. Évaporation du sol nu	78
2.4.1. Principes	78
2.4.2. Matériel.....	79
2.4.3. Difficultés et traitements	81
2.5. Mesures sur le végétal.....	81
2.5.1. Mesures descriptives	81
2.5.2. Mesures de l'état hydrique de la plante.....	82
3. CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE DU SOL.....	83
3.1. Objectifs	83

3.2. Méthodes et échantillonnage	83
3.2.1. Caractérisation en laboratoire par la méthode des presses à plaques	84
a) Méthode.....	84
b) Échantillonnage.....	84
3.2.2. Caractérisation au laboratoire par la méthode de Wind	85
a) Méthode.....	85
b) Échantillonnage.....	86
3.2.3. Caractérisation in situ de la relation $h(q)$	87
a) Méthode.....	87
b) Échantillonnage.....	87
3.2.4. Détermination in situ de la conductivité hydraulique sous 10 mbars de succion par infiltrométrie à disques.....	88
a) Méthode.....	88
b) Échantillonnage.....	88
3.2.5. Détermination in situ de la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat})	89
a) Méthode.....	89
b) Échantillonnage.....	89
3.2.6. Conductivité aux potentiels supérieurs à -100 mbars.....	89
3.3. Résultats	90
3.3.1. Pré-traitements	90
a) Relations humidité/potentiel.....	90
b) Relations conductivité/potentiel.....	91
3.3.2. Caractérisation par horizon (par matériau)	92
a) Horizons <i>A_p</i> et <i>B</i>	92
b) Horizons <i>C</i>	93
3.3.3. Synthèse des résultats : caractérisation à l'échelle de la parcelle.....	95
4. CONCLUSION SUR L'ENSEMBLE DES MESURES	97
CHAPITRE 3 : ANALYSE DE COHÉRENCE DES MESURES INDIVIDUELLES ET CONFRONTATION DE PLUSIEURS MÉTHODES D'ESTIMATION DE L'ETR D'UNE PARCELLE DE VIGNE.....	101
1. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES	101

2. COHÉRENCE DES MESURES INDIVIDUELLES.....	102
2.1. Mesures d'humidité du sol.....	102
2.1.1. Évolution du stock hydrique	102
2.1.2. Évolution des profils d'humidité.....	103
2.2. Mesures des potentiels hydriques du sol	103
2.3. Le bilan d'énergie	104
2.4. La transpiration et l'évaporation.....	104
2.4.1. La transpiration.....	104
<i>a) Correction des mesures</i>	<i>105</i>
<i>b) Influence du flux de chaleur stocké.....</i>	<i>105</i>
<i>c) Conclusions.....</i>	<i>105</i>
2.4.2. L'évaporation du sol.....	106
2.4.3. Parts relatives de la transpiration et de l'évaporation à l'échelle de la saison	107
2.5. Mesures sur la plante.....	108
2.5.1. Mesures de croissance	108
2.5.2. Mesures de fonctionnement physiologique.....	109
3. MESURE DE L'ETR PARCELLAIRE	109
3.1. Principes des calculs d'ETR.....	109
3.1.1. Le bilan hydrique du sol	110
<i>a) Principe.....</i>	<i>110</i>
<i>b) Erreurs.....</i>	<i>111</i>
3.1.2. Le bilan d'énergie.....	112
3.1.3. Séparation des flux ER et TR.....	112
3.2. Estimation de l'ETR parcellaire.....	112
3.2.1. Cinétiques	112
<i>a) Les données de 1993.....</i>	<i>113</i>
<i>b) Les données de 1994.....</i>	<i>113</i>
3.2.3. Valeurs	114
<i>a) ETR</i>	<i>114</i>
<i>b) ER+TR.....</i>	<i>115</i>
3.3. Conclusions	116

CHAPITRE 4 : VARIABILITÉ ET MODÉLISATION DE L'ÉVAPO- RATION DU SOL SOUS VIGNE.....	123
1. VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DE L'ÉVAPORATION DU SOL SOUS COUVERT DE VIGNE	123
1.1. Rappels expérimentaux et procédures de traitements utilisées	124
1.1.1. Contexte expérimental.....	124
1.1.2. Traitements de données	124
1.2. Résultats	124
1.2.1. Observations.....	124
1.2.2. Analyse	126
<i>a) Variabilité au cours de la saison.....</i>	<i>126</i>
<i>b) Variabilité en cumulé sur la saison</i>	<i>128</i>
1.3. Conclusions	128
2. MODÉLISATION DE L'ÉVAPORATION	129
2.1. Modèle de Ritchie (1972).....	129
2.1.1. Principes du modèle	129
2.1.2. Améliorations testées.....	130
<i>a) Le modèle de Ritchie originel (Modèle Rj - Ritchie journalier).....</i>	<i>130</i>
<i>b) Modification du pas de temps d'exécution (Modèle Rh - Ritchie horaire)</i>	<i>131</i>
<i>c) Modification de la prise en compte des pluies en phase II (Modèle Rhm - Ritchie horaire modifié).....</i>	<i>131</i>
2.2. Le modèle de Van Keulen (1975)	132
2.2.1. Principe du modèle.....	132
2.2.2. Mise en œuvre.....	134
2.3. Procédure d'optimisation du calage des paramètres	134
2.4. Résultats	135
2.4.1. Estimation des paramètres.....	135
<i>a) Paramètres calibrés et sensibilité des modèles à leur estimation.....</i>	<i>135</i>
• Modèles de type Ritchie	136
• Modèle de type Van Keulen.....	137

• Conclusions.....	139
<i>b) Valeurs de SCE après optimisation sur les deux années réunies.....</i>	<i>139</i>
2.4.2. Étude de sensibilité des modèles d'évaporation testés à l'estimation de l'évaporation potentielle	140
<i>a) Sensibilité de la mesure d'évaporation potentielle dans le modèle de Riou et al. (1989).....</i>	<i>140</i>
<i>b) Effet d'une erreur dans le calcul d'évaporation potentielle sur la modélisation de l'évaporation du sol.....</i>	<i>142</i>
2.4.3. Dynamique d'évaporation	142
3. CONCLUSION GÉNÉRALE : MESURE ET MODÉLISATION DE L'ÉVAPORATION DU SOL SOUS UNE VIGNE EN RANGS.....	143
 CHAPITRE 5 : VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE ET MODÉLISATION DE LA TRANSPIRATION ET DE L'EXTRACTION RACINAIRE DE LA VIGNE À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE.....	145
 1. TRANSPIRATION DE LA VIGNE	145
1.1. Variabilité spatiale du flux de sève	145
1.1.1. Variabilité intra-parcellaire des mesures	145
1.1.2. Variables morphologiques corrélées à la transpiration	146
1.2. Relation entre transpiration et humidité du sol.....	148
1.2.1. Objectifs	148
1.2.2. Résultats.....	148
1.2.3. Discussion.....	150
 2. EXTRACTION RACINAIRE DE LA VIGNE	151
2.1. Variabilité parcellaire des variations de stock	151
2.1.1. Position du problème.....	151
2.1.2. Variabilité parcellaire à l'échelle de la saison	152
2.2. Variabilité d'extraction racinaire sur l'ensemble du profil	153
2.2.1. Position du problème.....	153
2.2.2. Analyse des différences de variations de stock globales	154

2.3. Variabilité d'extraction racinaire au sein du profil sur l'ensemble de la saison de mesure	155
2.3.1. Analyse préliminaire sur les transferts d'eau entre couches de 20 cm au sein du profil.....	155
a) <i>Les variations de stock sur 20 cm sont-elles assimilables aux prélèvements racinaires ?.....</i>	<i>155</i>
b) <i>Les variations de stock dans les couches les plus profondes correspondent-elles à des prélèvements racinaires ?.....</i>	<i>157</i>
2.3.2. Analyse de la différence rang /inter-rang par profondeur	159
a) <i>Comportement parcellaire moyen.....</i>	<i>159</i>
b) <i>Évaluation des différences de variations de stock rang/inter-rang par placette de mesure.....</i>	<i>161</i>
2.4. Évolution des zones d'extraction au cours de la saison	162
2.4.1. Position du problème.....	162
2.4.2. Observation des zones d'alimentation et de leur évolution au sein du profil.....	162
a) <i>Zones d'alimentation.....</i>	<i>162</i>
b) <i>Cinétique des variations de stock en fonction de la profondeur.....</i>	<i>163</i>
2.5. Relations entre extraction racinaire de la vigne et humidité du sol.....	164
2.5.1. Principes des relations recherchées	164
2.5.2. Résultats.....	165
a) $\theta_{min} = \theta_{min\text{ mesuré}}$	<i>165</i>
b) $\theta_{min} = \theta_{pF4.2}$	<i>166</i>
2.5.3. Discussion.....	166
3. CONCLUSIONS	167

CONCLUSION GÉNÉRALE.....	175
---------------------------------	------------

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TABLE DES MATIÈRES

ANNEXE