

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE MONTPELLIER SUPAGRO

Discipline : Agronomie
Formation Doctorale : Science du Sol
Ecole Doctorale : BSIAE

***Dynamique des fonctionnements
hydrique et azoté dans une vigne
enherbée sous le climat méditerranéen***

*présentée et soutenue publiquement
par*

Florian CELETTE

Le 23 Mars 2007



JURY

M. Justes, Rapporteur
M. Van Leeuwen, Rapporteur
M. Gary, Directeur de Thèse
M. Coulon, Examineur
M. Durand, Examineur
M. Jaillard, Examineur

Une dose de sagesse avant de débiter la lecture de cette thèse...

La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique : Rien ne fonctionne... et personne ne sait pourquoi !

A. Einstein.

*[...] C'est pas une vie d'être chercheur
Tout a déjà été trouvé
Les capuches, les ordinateurs
Les téléphones, les canoës
C'est pas une vie d'être chercheur
Tout a déjà été trouvé
Si je dégotais le bonheur
On me dirait : ça existait !
[...]*

Bénabar et L. Chedid

Pour faire la colle à cœur brisé – Le soldat rose

Rentrant fort tard de la maison de thé, Nasr Eddin laisse tomber, devant le seuil de chez lui, l'anneau qu'il porte au doigt.
Aussitôt, l'ami qui l'accompagne s'accroupit pour chercher à tâtons. Nasr Eddin, lui, retourne au milieu de la rue, qu'éclaire un splendide clair de lune.
_ Que vas-tu faire là-bas, Nasr Eddin ? C'est ici que ta bague est tombée !
_ Fais à ta guise, réponds le Hodja. Moi, je préfère chercher là où il y a de la lumière...

Sublimes paroles et idioties de Nasr Eddin Hodja.

I took a speed reading course and read 'War and Peace' in twenty minutes. It involves Russia.

W. Allen

Avant Propos

Ce projet de thèse a été réalisé au sein de l'UMR SYSTEM à l'INRA de Montpellier sous l'encadrement de Christian Gary. Elle a été financée conjointement par la région Languedoc-Roussillon et le Département Environnement et Agronomie de l'INRA.

Le travail expérimental a notamment été réalisé sur un dispositif commun avec celui d'une autre thèse : celle de Héctor Valdés. Certaines données étant utiles aux deux thèses, les chapitres III et IV de ce document sont communs aux deux manuscrits de thèse et donneront lieu à deux publications conjointes.

D'ores et déjà, ce travail a fait l'objet de différentes communications et publications scientifiques au cours des 3 années de son déroulement :

Publication dans des revues à comité de lecture

Celette F, Wery J, Chantelot E, Celette J and Gary C (2005) Belowground interactions in a vine (*Vitis vinifera* L.)-tall fescue (*Festuca arundinacea* Shreb.) intercropping system: water relations and growth. *Plant and Soil*: 276(1-2), 205-217.

Publication dans des revues sans comité de lecture

Chantelot E, **Celette F** and Wery J (2004) Concurrence pour les ressources hydriques et azotées entre vigne et enherbement en milieu méditerranéen. *COLUMA* : 19, 10 p.

Valdés H, **Celette F**, Fermaud M, Cartolaro P, Clerjeau M and Gary C (2006) Comment évaluer l'importance de la vigueur végétative dans la sensibilité de la vigne aux maladies cryptogamiques ? *Progrès agricole et viticole*: 123, 243-247.

Communications et posters dans des congrès

Brisson N, Durand J L and **Celette F** (2005) Utilisation de STICS dans le projet CEAPC sur le couplage des fonctionnements hydrique et azoté des peuplements cultivés. In Séminaire STICS, Carry-le-Rouet, 17-18 March, 2005. Ed INRA. pp 31-34. (**Poster**)

Celette F, Wery J, Chantelot E, Celette J and Gary C (2004) Water interactions in a vine (*Vitis vinifera* L.)-tall fescue (*Festuca arundinacea*) intercropping system. In VIII European Society for Agronomy Congress : European Agriculture in a Global Context, Copenhagen - Denmark, 11-15 July, 2004. pp 591-592. (**Communication Orale**)

Celette F and Gary C (2006) Cover cropping as a way to manage water and nitrogen deficits in relation with grapevine (*Vitis vinifera* L.) vegetative growth and yield. In IX Congress of the ESA, Warsaw – Poland. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica*: 11(2), pp 515-516. (**Communication Orale**)

Celette F, Valdés H, Gary C, García de Cortázar I, Ortega-Farías S and Acevedo Opazo C (2006) Evaluation of the STICS model for simulating vineyard water balance under two different water management policies. 5th International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, Mildura – Australia, 28 August-2 September, 2006. 8 p. *Acta Horticulturae* (In Press). (**Poster**)

Chantelot E, **Celette F** and Wery J (2004) Concurrence pour les ressources hydriques et azotées entre vigne et enherbement en milieu méditerranéen. In Qualitätsmanagement im Obst- und Weinbau - International symposium on Quality management in viticulture and enology, Stuttgart - Germany, 10-11 May, 2004. Eds H R Schultz and A Achilles. pp 171-184. (**Communication Orale**)

Durand J L, Gary C, Bariac T, Doussan C, Picon-Cochard C, Gonzalez Dugo V, **Celette F** and Vauclin M (2005) Couplage de l'eau et de l'azote dans les peuplements cultivés. In Séminaire STICS, Carry-le-Rouet, 17-18 March, 2005. Ed INRA. pp 35-37. (**Poster**)

Gary C, Wery J, **Celette F** and Lelièvre F (2005) Pourquoi et comment introduire l'enherbement dans les systèmes de culture viticoles méditerranéens. In Territoires et Enjeux du Développement Régional, Lyon - France, 9-11 March, 2005. Ed INRA. (**Communication Orale**)

- Gary C, Cinna J-P and **Celette F** (2006) Multiple criteria design of cover crop management plans in vineyards. In IX Congress of the ESA, Warsaw – Poland. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica*: 11(2), pp 529-530. **(Poster)**
- Gary C, Cinna J-P, **Celette F** and Ripoche A. (2007) How to design cover crop management plans in vineyards that satisfy both production and environment objectives ? In XV International GESCO Symposium, Porec – Croatia. 20-23 June 2007, pp 358-363. **(Communication orale)**
- Valdés H, **Celette F**, Fermaud M, Cartolaro P, Clerjeau M and Gary C (2005) How to evaluate the influence of vegetative vigour in vine sensitivity to cryptogamic diseases? In XIV International GESCO Viticulture Congress, Geisenheim – Germany, 23-27 August, 2005, Geisenheim - Germany, 2005. Ed H R Schultz. pp 832-838. **(Poster)**

Table des matières

AVANT PROPOS	I
TABLE DES MATIÈRES	III
MERCI, MERCI ! QU'AURAIS-JE FAIT SANS VOUS ?	VIII
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES TABLES	XVI
SYMBOLES ET ABREVIATIONS	XVII
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I - LA VIGNE ENHERBEE : UNE ASSOCIATION CULTURALE UN PEU PARTICULIERE – SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1. POUR MIEUX COMPRENDRE LES ASSOCIATIONS CULTURALES	3
1.1. UNE CONCURRENCE AERIENNE POUR LA LUMIERE.....	3
1.2. LA FACE CACHEE DU SYSTEME : LES INTERACTIONS POUR LES RESSOURCES DU SOL.....	5
1.2.1. L'eau ou la principale ressource du sol.....	5
1.2.1.1. Les termes du bilan hydrique	5
1.2.1.2. L'eau : une ressource vitale	7
1.2.2. Les ressources azotées du sol.....	10
1.2.2.1. Les termes du bilan azoté	10
1.2.2.2. L'azote : première ressource minérale du sol	13
2. POUR UNE APPROCHE SYSTEMIQUE DE LA VIGNE ENHERBEE.....	15
2.1. PETIT POINT SUR L'ENHERBEMENT DU VIGNOBLE.....	15
2.1.1. L'enherbement : qu'est ce que c'est ?.....	15
2.1.2. Quelle histoire !.....	16
2.2. LE CAS PARTICULIER DE LA VIGNE ENHERBEE	17
2.2.1. La vigne enherbée : croissance et production viticole.....	17
2.2.1.1. Développement et phénologie de la vigne	18
2.2.1.2. Croissance de la vigne et vigueur végétative.....	18
2.2.1.3. Elaboration du rendement, développement et maturation des baies de raisin	19
2.2.1.4. Enherbement du vignoble et production de raisin de cuve de qualité.....	21
2.2.2. La vigne enherbée et l'eau	22
2.2.2.1. La vigne : une culture bien adaptée à la sécheresse.....	22
2.2.2.2. Ce que change la présence de l'enherbement au fonctionnement hydrique du système.....	24
2.2.2.3. Quels indicateurs pour évaluer le niveau de contrainte hydrique subie par la vigne ?	25
2.2.3. La vigne enherbée et l'azote.....	26
2.2.3.1. Alimentation azotée de la vigne	26
2.2.3.2. Modification du fonctionnement azoté du système par la présence d'un enherbement.....	28
2.2.3.3. Quels indicateurs pour évaluer la statut azoté de la plante ?.....	29
3. DEFINITION DE LA PROBLEMATIQUE ET DES QUESTIONS DE RECHERCHE	30
CHAPITRE II - MATERIEL ET METHODES.....	32
1. LA ZONE VITICOLE LANGUEDOCIENNE COMME CONTEXTE	32

1.1. LE CLIMAT MEDITERRANEEN.....	32
2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	33
2.1. LA PARCELLE DU LARZAT (VILLENEUVE-LES-MAGUELONE)	33
2.1.1. <i>Description générale de la parcelle</i>	33
2.1.2. <i>Des années climatiques très contrastées</i>	33
2.1.3. <i>Un sol profond et homogène</i>	35
2.1.4. <i>Description générale du dispositif expérimental</i>	35
2.2. OBSERVATION DE LA PHENOLOGIE, DE LA CROISSANCE ET DE LA PRODUCTION DE LA VIGNE A L'ECHELLE DE LA PARCELLE	36
2.3. LE DISPOSITIF D'ETUDE DU SYSTEME EN PLACETTE	37
CHAPITRE III - ENHERBEMENT DES VIGNOBLES EN REGION MEDITERRANEENNE : I- CONCURRENCE POUR LES RESSOURCES ET EFFETS SUR L'EXPRESSION VEGETATIVE ET LA VIGUEUR DE LA VIGNE	38
1. MOTS CLES	38
2. INTRODUCTION	38
3. MATERIEL ET METHODES	40
3.1. CONDITIONS GENERALES DE L'EXPERIMENTATION.....	40
3.2. CROISSANCE DE LA CULTURE INTERCALAIRE.....	40
3.3. VIGNE ET INDICATEURS DE CONTRAINTE	40
3.4. DEVELOPPEMENT VEGETATIF DE LA VIGNE.....	41
4. RESULTATS.....	42
4.1. CROISSANCE DES CULTURES INTERCALAIRES	42
4.2. ENHERBEMENT ET CONTRAINTES HYDRIQUES ET AZOTEES	43
4.2.1. <i>Quelle contrainte hydrique pour la vigne ?</i>	43
4.2.2. <i>Quelle contrainte azotée pour la vigne ?</i>	45
4.3. CROISSANCE ET DEVELOPPEMENT VEGETATIF DE LA VIGNE.....	48
4.3.1. <i>Un développement végétatif fortement et précocement diminué par la présence d'un enherbement</i>	48
4.3.2. <i>Une canopée moins dense dans les vignes enherbées</i>	49
4.3.3. <i>Production de biomasse aérienne</i>	50
4.3.4. <i>Réserves des bois</i>	52
5. DISCUSSION GENERALE-CONCLUSION.....	53
CHAPITRE IV - ENHERBEMENT DES VIGNOBLES EN REGION MEDITERRANEENNE : II- IMPACT SUR L'ELABORATION DU RENDEMENT ET LA QUALITE DES MOUTS	57
1. MOTS CLES	57
2. INTRODUCTION	57
3. MATERIEL ET METHODES	59
3.1. CONDITIONS GENERALES DE L'EXPERIMENTATION.....	59
3.2. INDICATEURS DE CONTRAINTE SUBIE PAR LA VIGNE.....	59
3.3. VIGNE ET ELABORATION DU RENDEMENT	59
3.4. QUALITE DES MOUTS DE RAISIN PRODUITS.....	59
3.5. INDICATEURS COMPOSITES DE FONCTIONNEMENT DU VIGNOBLE.....	59
4. RESULTATS.....	60

1.1. LE CLIMAT MEDITERRANEEN.....	32
2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	33
2.1. LA PARCELLE DU LARZAT (VILLENEUVE-LES-MAGUELONE)	33
2.1.1. <i>Description générale de la parcelle</i>	33
2.1.2. <i>Des années climatiques très contrastées</i>	33
2.1.3. <i>Un sol profond et homogène</i>	35
2.1.4. <i>Description générale du dispositif expérimental</i>	35
2.2. OBSERVATION DE LA PHENOLOGIE, DE LA CROISSANCE ET DE LA PRODUCTION DE LA VIGNE A L'ECHELLE DE LA PARCELLE	36
2.3. LE DISPOSITIF D'ETUDE DU SYSTEME EN PLACETTE	37
CHAPITRE III - ENHERBEMENT DES VIGNOBLES EN REGION MEDITERRANEENNE : I- CONCURRENCE POUR LES RESSOURCES ET EFFETS SUR L'EXPRESSION VEGETATIVE ET LA VIGUEUR DE LA VIGNE	38
1. MOTS CLES	38
2. INTRODUCTION	38
3. MATERIEL ET METHODES	40
3.1. CONDITIONS GENERALES DE L'EXPERIMENTATION.....	40
3.2. CROISSANCE DE LA CULTURE INTERCALAIRE.....	40
3.3. VIGNE ET INDICATEURS DE CONTRAINTE	40
3.4. DEVELOPPEMENT VEGETATIF DE LA VIGNE.....	41
4. RESULTATS.....	42
4.1. CROISSANCE DES CULTURES INTERCALAIRES	42
4.2. ENHERBEMENT ET CONTRAINTES HYDRIQUES ET AZOTEES	43
4.2.1. <i>Quelle contrainte hydrique pour la vigne ?</i>	43
4.2.2. <i>Quelle contrainte azotée pour la vigne ?</i>	45
4.3. CROISSANCE ET DEVELOPPEMENT VEGETATIF DE LA VIGNE.....	48
4.3.1. <i>Un développement végétatif fortement et précocement diminué par la présence d'un enherbement</i>	48
4.3.2. <i>Une canopée moins dense dans les vignes enherbées</i>	49
4.3.3. <i>Production de biomasse aérienne</i>	50
4.3.4. <i>Réserves des bois</i>	52
5. DISCUSSION GENERALE-CONCLUSION.....	53
CHAPITRE IV - ENHERBEMENT DES VIGNOBLES EN REGION MEDITERRANEENNE : II- IMPACT SUR L'ELABORATION DU RENDEMENT ET LA QUALITE DES MOUTS	57
1. MOTS CLES	57
2. INTRODUCTION	57
3. MATERIEL ET METHODES	59
3.1. CONDITIONS GENERALES DE L'EXPERIMENTATION.....	59
3.2. INDICATEURS DE CONTRAINTE SUBIE PAR LA VIGNE.....	59
3.3. VIGNE ET ELABORATION DU RENDEMENT	59
3.4. QUALITE DES MOUTS DE RAISIN PRODUITS.....	59
3.5. INDICATEURS COMPOSITES DE FONCTIONNEMENT DU VIGNOBLE.....	59
4. RESULTATS.....	60

4.1. ENHERBEMENT ET CONTRAINTES HYDRIQUE ET AZOTEE SUBIES PAR LA VIGNE.....	60
4.2. VIGNE ET ELABORATION DU RENDEMENT	61
4.3. EQUILIBRE VEGETATIF ET REPRODUCTIF DU VIGNOBLE.....	63
4.4. QUELLE QUALITE DES MOULTS SELON LES ANNEES ET LES MODALITES D'ENTRETIEN DU SOL ?	65
4.5. RELATION ENTRE NIVEAUX DE CONTRAINTE, ELABORATION DU RENDEMENT ET COMPOSANTES DE QUALITE.....	68
4.6. ANALYSE DE L'EFFET DE LA MODALITE ET DU MILLESIME SUR LA PRODUCTION DE RAISIN	70
5. DISCUSSION GENERALE-CONCLUSION.....	72

CHAPITRE V - INCIDENCE DE L'IMPLANTATION D'UN ENHERBEMENT SUR LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS UN VIGNOBLE MEDITERRANEEN..... 75

1. MOTS CLES.....	75
2. INTRODUCTION	75
3. MATERIEL ET METHODES	76
3.1. SITE EXPERIMENTAL.....	76
3.2. MESURES EXPERIMENTALES.....	77
3.2.1. <i>Les termes du bilan hydrique</i>	77
3.2.2. <i>Distribution des systèmes racinaires et évaluation des stocks d'eau exploités par les systèmes étudiés</i>	79
4. RESULTATS.....	80
4.1. UNE DYNAMIQUE DE CROISSANCE DECALEE ENTRE VIGNE ET CULTURE INTERCALAIRE	80
4.2. ENHERBEMENT ET DISTRIBUTION DES SYSTEMES RACINAIRES	81
4.2.1. <i>Observation des systèmes racinaires de chacune des espèces</i>	81
4.2.2. <i>Présence de l'enherbement et redistribution du système racinaire de la vigne</i>	82
4.3. DETERMINATION DES STOCKS D'EAU DISPONIBLES POUR CHACUN DES SYSTEMES ETUDIES	83
4.3.1. <i>Zones d'absorption racinaire globales de chacun des systèmes</i>	83
4.3.2. <i>TTSW de chacun des enherbement</i>	84
4.4. MODALITE D'ENTRETIEN DU SOL ET CONSOMMATION DE L'EAU.....	84
4.5. MODALITES D'ENTRETIEN DU SOL ET RUISSELLEMENT.....	88
4.6. EVALUATION DU DRAINAGE ET DES REMONTEES CAPILLAIRES AU COURS DE L'ANNEE.....	89
4.7. SUIVI DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE PHREATIQUE	90
5. DISCUSSION	91
5.1. L'ENHERBEMENT DE L'INTER-RANG PERMET UNE MEILLEURE RECHARGE HIVERNALE DU PROFIL	91
5.2. PLASTICITE RACINAIRE DE LA VIGNE ET EVITEMENT D'UNE CONCURRENCE FRONTALE AVEC L'ENHERBEMENT	92
5.3. DYNAMIQUE DE PARTAGE DES RESSOURCES AU SEIN DU SYSTEME ASSOCIE.....	92
6. CONCLUSION : QUELLE COMPARTIMENTATION POUR MIEUX REPRESENTER LE SYSTEME ?.....	94

CHAPITRE VI - MODELISER SIMPLEMENT UNE DYNAMIQUE COMPLEXE DE PARTAGE DES RESSOURCES HYDRIQUES AU SEIN D'UNE VIGNE ENHERBEE

1. MOTS CLES.....	96
2. INTRODUCTION	96

3. MATERIEL ET METHODES	97
3.1. LE MODELE DE BILAN HYDRIQUE	97
3.1.1. Bilan hydrique d'une parcelle viticole sans enherbement.....	97
3.1.2. Adaptation du modèle à une vigne enherbée.....	98
3.1.3. Paramétrage du modèle	99
3.1.4. Croissance végétative de la vigne	101
3.1.5. Indicateurs de contraintes hydriques	101
3.2. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES ET INDICATEURS D'EVALUATION DE LA QUALITE DU MODELE	101
4. RESULTATS.....	102
4.1.1. Dynamique des stocks d'eau du sol disponibles pour la vigne (ASW _v).....	102
4.1.2. ASW du compartiment sous l'inter-rang enherbé (ASW _h).....	103
4.1.3. Dynamique de contrainte hydrique (FTSW).....	104
4.1.4. Les termes du bilan hydrique modélisés.....	105
5. DISCUSSION	107
5.1. UNE REPRESENTATION DU FONCTIONNEMENT DYNAMIQUE DU SYSTEME SATISFAISANTE MALGRE QUELQUES LIMITES	107
5.2. MIEUX COMPRENDRE LA DYNAMIQUE DE FONCTIONNEMENT HYDRIQUE D'UN SYSTEME COMPLEXE	109
6. CONCLUSION - PEUT-ON AMELIORER LE MODELE ET CONSERVER SA SIMPLICITE ?	111
 CHAPITRE VII - ASSOCIATION DE CULTURES ET DYNAMIQUE DE PARTAGE DE L'AZOTE AU SEIN D'UN MILIEU NATURELLEMENT PAUVRE : EXEMPLE D'UNE VIGNE ENHERBEE EN ZONE MEDITERRANEENNE.....	 113
1. MOTS CLES.....	113
2. INTRODUCTION	113
3. MATERIEL ET METHODES	115
3.1. SITE EXPERIMENTAL	115
3.2. EXPERIMENTATION DE TERRAIN.....	115
3.2.1. Croissance végétative et élaboration du rendement de la vigne.....	115
3.2.2. Croissance de la culture intercalaire et consommation d'azote	116
3.2.3. Les termes du bilan hydrique	116
3.2.4. Caractérisation du fonctionnement azoté.....	116
3.2.5. Indicateurs de contrainte hydrique	117
3.2.6. Indicateurs de contrainte azotée	118
3.3. DETERMINATION DE LA VITESSE DE MINERALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE DU SOL.....	118
4. RESULTATS.....	119
4.1. DYNAMIQUE DES STOCKS D'AZOTE MINERAL DANS LE SOL.....	119
4.1.1. Evolution du stock d'azote minéral du sol	119
4.1.2. Dynamique spatiale des teneurs en azote minéral du sol.....	119
4.2. CROISSANCE DES CULTURES INTERCALAIRES ET CONSOMMATION D'AZOTE	121
4.3. CROISSANCE DE LA VIGNE ET CONSOMMATION D'AZOTE	121
4.4. IMPACT DE L'ENHERBEMENT SUR LA MINERALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE.....	123
4.4.1. Conséquences sur la matière organique	123
4.4.2. Impact sur la température du sol	124
4.4.3. Impact sur l'humidité de la couche de minéralisation	124
4.4.4. Une minéralisation de l'azote du sol affectée par la présence d'un enherbement.....	125

4.5. IMPACT DE L'ENHERBEMENT SUR LES STOCKS PERENNES D'AZOTE DANS LA CULTURE.....	127
5. DISCUSSION	128
5.1. IMPLANTATION D'UN ENHERBEMENT ET MODIFICATION DE LA DISPONIBILITE DE L'AZOTE POUR LA VIGNE	128
5.2. QUELLE COMPARTIMENTATION POUR UNE MODELISATION SIMPLE ?	132
6. CONCLUSION	133
 CHAPITRE VIII - INTERACTIONS ENTRE LES FONCTIONNEMENTS HYDRIQUE ET AZOTE AU SEIN D'UNE CULTURE ASSOCIEE. CAS D'UNE VIGNE ENHERBEE EN ZONE MEDITERRANEENNE	
1. MOTS CLES.....	134
2. INTRODUCTION	134
3. MATERIEL ET METHODES	136
3.1. SITE EXPERIMENTAL	136
3.2. EXPERIMENTATION DE TERRAIN.....	136
3.2.1. <i>Croissance végétative et élaboration du rendement de la vigne</i>	136
3.2.2. <i>Croissance de la culture intercalaire</i>	137
3.2.3. <i>Indicateurs de contraintes hydriques subies par les espèces associées</i>	137
3.2.4. <i>Indicateurs de contraintes azotées</i>	137
4. RESULTATS.....	138
4.1. PERIODE ET INTENSITE DES CONTRAINTES HYDRIQUES SUBIES PAR CHACUNE DES ESPECES ASSOCIEES	138
4.2. QUELLE CONTRAINTE AZOTEE POUR LA VIGNE ET L'HERBE ?.....	139
4.2.1. <i>Statut azoté des enherbements</i>	139
4.2.2. <i>Statut azoté de la vigne</i>	140
4.2.2.1. <i>Elaboration d'une courbe de teneur en azote critique pour la vigne</i>	140
4.2.2.2. <i>Entretien du sol et évolution de l'état de nutrition azotée de la vigne</i>	141
4.3. DYNAMIQUE ET INTENSITE DE LA CONCURRENCE POUR LES RESSOURCES DU SOL ENTRE VIGNE ET ENHERBEMENT	143
5. DISCUSSION	145
5.1. L'INN EST-IL UN INDICATEUR PERTINENT POUR EVALUER LA CONTRAINTE AZOTEE SUBIE PAR LA VIGNE ?.....	145
5.2. EAU ET/OU AZOTE ? QUELLE CONCURRENCE ENTRE LA VIGNE ET LA CULTURE INTERCALAIRE ?	146
5.3. INTERACTIONS EAU/AZOTE : UNE CONTRAINTE AZOTEE DEPENDANTE DE LA CONTRAINTE HYDRIQUE EN ZONE MEDITERRANEENNE ?	147
6. CONCLUSION	150
 CHAPITRE IX - POUR ALLER PLUS LOIN.....	
1. UN FONCTIONNEMENT HYDRIQUE ET AZOTE MIEUX COMPRIS MAIS QUELLE EST LA GENERICITE DE CE TRAVAIL ?	151
2. PEUT-ON DEFINIR DES IDEOTYPES D'ENHERBEMENT ADAPTES AUX CONDITIONS MEDITERRANEENNES ?	154
3. MODELISER ET EVALUER DES STRATEGIES D'ENHERBEMENT	154
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	157

Merci, merci ! Qu'aurais-je fait sans vous ?

Tout est dit dans le titre : qu'aurais-je fait sans Vous ? Vous tous qui m'avez aidé au cours de ces 5 années qui m'ont mené, plus ou moins sur le même projet, du diplôme d'ingénieur à celui de docteur en agronomie ? Probablement bien moins de choses et surtout bien moins bien.

La rédaction des remerciements est une phase bien périlleuse du travail de thèse car elle survient à un moment où le thésard fourbu sent venir l'odeur de l'écurie. Pressé d'en finir, soulagé, il ne prend pas suffisamment garde aux nombreux pièges qui peuvent encore se présenter sur sa route. Le drame est si vite arrivé... Malgré une liste à la Prévert de tous les gens qui lui passent par la tête, le thésard dans sa naïveté, usée par trois années difficiles mais encore bien fraîche, oublie immanquablement quelqu'un. Pourtant, il n'y a évidemment pas de volonté de nuire ou de déconsidérer la contribution de chacun dans ce travail (Si, si je vous l'assure !).

Enfin... Puisqu'il faut y aller et parce que je vexerais encore plus de monde si je n'essayais pas de rédiger ces quelques lignes (pages ?)... Je me lance ! Sans filet et sans remords !

La tradition veut que je commence par le directeur de thèse ? Je ne vais donc pas déroger à la tradition (c'est important les traditions... ça donne des repères tout ça... et le thésard fatigué les apprécie) car il me semble que pour le coup, c'est une tradition et un ordre de préséance bien mérité. Donc merci Christian Gary pour votre écoute, vos conseils, votre rôle de guide dans ce travail de longue haleine qu'aura été cette thèse et un peu de ce qui l'a précédée. Votre contribution dans ce parcours qui mène le tout jeune diplômé encore pimpant vers une maturation du chercheur qui sommeille en lui, aura été plus qu'appréciable car vous aurez évité le piège d'être trop directif tout en restant présent aux moments opportuns. Je crois que nous aurons réussi à avancer ensemble sur un sujet que nous avons découvert peu à peu. Et j'espère maintenant que le résultat en valait la chandelle même s'il n'est qu'un commencement.

Merci également à Jacques Wery et à Eric Chantelot qui ont été quelque part les instigateurs de cette aventure. L'un des deux a quitté le navire en route, décidé à explorer de nouveaux horizons, et l'autre n'a pas toujours eu le temps de s'investir autant qu'il l'aurait peut être souhaité mais leur vision nous a amenés jusqu'ici. J'espère avoir répondu, avec ce travail, à certaines des questions qu'ils se posaient. Je remercie particulièrement Jacques qui avec un nombre de rencontres limité et dans un temps très court aura à chaque fois réussi à remettre à flots (c'est très marin tout ça) un travail qui, peut-être, se serait embourbé.

Cette thèse, c'est aussi, et surtout 105630413403 heures (au moins) dans les vignes dont une proportion non négligeable à des heures où les gens honnêtes dorment encore du sommeil du juste. Tout ça pour un sol transformé en gruyère, des vignes torturées, une herbe décapitée et quelles monstruosité encore que je n'ose ici coucher sur le papier ? Heureusement, j'avais des complices (c'est pas que je cherche à jouer la balance mais...). Un petit cours de délation donc.

Merci Yvan pour avoir partagé bon nombre de ces heures sous le soleil et avoir parfait ton bronzage avec moi. Avec toi, pas mal de choses devenaient plus simples et je pense qu'après quelques années de terrain en commun, nous formions une paire de perforateurs, préleveurs, découpeurs... redoutables ! Merci également pour avoir bien

contribuer à entrouvrir pour moi la porte de ce monde merveilleux qu'est celui des amateurs de vin et pour ton enseignement accéléré en viticulture.

Merci Héctor pour ta contribution à cette épreuve que nous nous sommes infligée pendant 4 ans et que d'autres appellent « protocole expérimental ». Notre entente ne se sera pas limitée à une relation cordiale de voisins de bureau, de partenaires de terrain et ou de chercheurs en formation et je te remercie donc pour l'amitié offerte. J'espère qu'elle saura perdurer malgré les quelques kilomètres qui risquent de nous séparer pour la suite.

Merci Jean-Charles, compagnon ardéchois d'infortune, embrigadé de force dans cette folie « terrainiforme » qui a emportée l'équipe vigne de l'UMR SYSTEM. Ton rôle n'aura évidemment pas été que celui d'un porteur d'eau pour des vignes goulues. Merci pour ta disponibilité, ta gentillesse, pour ton humour parfois... décalé ! (surtout à 4h du mat') et évidemment pour le sérieux coup de main donné.

Je te remercie également Lydie pour, toi aussi, avoir passé de nombreuses heures dans les vignes. Je n'oublie pas ton « immonde trahison » qui t'a conduit vers l'équipe agroforesterie (en même temps, c'est vrai qu'avec ta queue de cheval, ta place était là bas...) mais tu resteras quoi qu'il arrive ma cible de plaisanterie préférée à l'UMR SYSTEM... Merci pour ta gentillesse, merci pour ton humour et ta bonne humeur.

Merci Rémi pour votre rôle de « spécialiste ès eau » tenu avec ferveur et pour les heures passées dans la compagnie pas forcément agréable de madame sonde à neutrons. Grâce à vous, peut être aurais-je ainsi préservé une partie de mon capital spermatozoïdes... (apparemment, cela a bien marché quand même !).

Merci Alain également pour ton aide et bonne retraite.

Rien n'aurait été possible non plus sans l'aide inestimable des nombreux stagiaires passés par-là au cours de ces 4 ou 5 années d'expérimentations. La Nature est bien faite car elle permet au thésard, par définition frustré de son statut et de sa place dans la hiérarchie, de se passer les nerfs sur des stagiaires qu'il exploite sans remords ! Merci donc à vous tous pour avoir passé tout ce temps au grand air avec nous, sans jamais rechigner (certains auront eu plus de mal que d'autres quand même... Pas vrai Charles !?) malgré des horaires scandaleux et une rémunération... hum... anecdotique. Merci donc à vous tous (avec par ordre d'apparition à l'écran) : Guillaume, Pierre-Alexis, Aurélie, Charles, Jean-Pierre, Dorothee, Benoît, Audrey, Alexia, Matthieu.

Travailler dans la vigne, c'est aussi l'occasion de bonnes journées de vendanges, toujours amicales et agréables. Merci à tous ceux venus apporter leur pierre à l'édifice et que je n'ai pas encore cité : Pierre, dont l'aide aura également été précieuse pour tout ce qui touche à l'administratif et dont l'amitié restera (alors ? Fille ou garçon ?), Pascal, Edmond, Pierre, Jeff...

Toutes ces manip signifient également de nombreuses analyses à réaliser. Merci donc à l'équipe de choc du Laboratoire d'Analyses du CIRAD : Gisèle Llimous, Karine Alary, Marc Swarc, Michel Fortier et Robert Oliver. Merci également à Denis Fabre pour le prêt de matériel et quelques conseils techniques de première importance.

Travailler dans le domaine viticole donne l'occasion de rencontrer des producteurs souvent passionnés par leur travail et qui n'hésitent pas à nous faire partager leur passion. Leur rôle aura également été important et je les remercie pour ces quelques heures qu'ils ont bien voulu nous accorder et ces parcelles qu'ils ont acceptées de voir arpentées et perforées. Merci donc à MM. Alméras, Armand, Bataille, Bourret, Duby, Ducellier, Feracci et Ribes. Mes remerciements vont plus encore vers l'équipe du Domaine du Chapitre et Christophe Clipet en particulier qui auront tout accepté et se seront pliés à nos envies de chercheurs parfois peu compréhensibles sans jamais renâcler. Merci donc à vous

tous. Dans le même ordre d'idée, merci aux membres du CIVC et à Damien Le-Sueur en particulier, pour avoir bien voulu mettre en place un dispositif approchant en Champagne.

Ce travail de thèse m'aura également permis d'observer et d'accompagner la maturation d'une UMR, comprendre « Unité Mixte (garçons et filles mélangés) de Recherche », promise je l'espère, à un grand avenir. Tous ses membres m'auront permis de garder de bons souvenirs de plus de cinq ans passés parmi vous et je vous remercie donc de votre gentillesse et de votre présence amicale. Je remercie particulièrement Sandrine et Domi pour avoir toujours pris le temps de répondre à mes questions et attentes d'ordre technique ou administratif.

J'ai évidemment une pensée émue pour mes jeunes (et moins jeunes) compagnons d'infortune souvent recroisés en dehors de ce cadre professionnel. Beaucoup seront devenus des amis. Merci donc : Elodie, Anne P. (Ta thèse ? une « bible » pour moi), Fred, Jo, Nathalie, Alex, Anne B., Philippe, Rachmat, Mohamed, Anne M., Régis, Kamal, Hatem (aaah ! mon copain Hatem et la vodka polonaise !), Anne-Isabelle, Aude, Gaël, Sylvain, Zak (tous mes vœux de bonheur), Isabelle, Fagaye, Sylvestre, Eric...

Heureusement, une ambiance de travail, c'est aussi d'autres thésards extérieurs à l'UMR (pour limiter la consanguinité) : Merci donc pour votre aide (parfois) et votre amitié (toujours j'espère) : Noëlle, Nathalie, Victoria, César, Gaëtan, Thomas, Yann...

Merci également à la bande des chiliens qui m'aura bien accueilli lors de mon séjour parmi eux (« Si po ! Cachaï ! »). Merci donc à vous Samuel, Pancho, Marcos, Phanie, Rodrigo et les autres.

Si j'ai passé un certain nombre d'heures en extérieur pour le bien de notre base de données et le malheur des vignes et autres brins d'herbes martyrisés, j'ai passé pas mal (autant ?) de temps à pratiquer également de la mécanique « modèle ». J'en garde encore le visage plein de cambouis numérique mais je me dois de remercier tous ceux qui n'ont pas hésité à se salir avec moi. Merci donc à la bande des STICSophiles avignonnais qui, malgré des résultats parfois frustrants, n'auront pas hésité à passer quelques heures (ou plus) à « trifouiller » sous le capot de ce bolide qu'est STICS pour comprendre ce qui n'allait pas. Même si rien ne reste de STICS dans cette thèse, ce genre d'expérience marque quelqu'un à vie et on ne ressort pas indemne d'une plongée dans la communauté du STICS. Je remercie particulièrement Nadine, leur gourou, pour avoir su être présente lorsque j'en avais besoin malgré un emploi du temps certainement plus que bien chargé. J'ai également une pensée particulière pour notre ami Iñaki bien sûr. Nos échanges nombreux m'auront permis d'enrichir ma pensée et j'espère que cela aura fonctionné dans les deux sens. En plus, c'est encore un ami que je gagne dans l'affaire. Je remercie également Dominique et Marie pour leur disponibilité et Françoise qui m'aura permis de voir qu'il est possible de faire de la mécanique à quelques milliers de kilomètres de distance (vive Internet !).

Mes remerciements vont maintenant à l'escouade de choc formée pour m'accompagner au cours de 3 années (bon d'accord un peu plus) de thèse et que l'on appelle, de manière un peu banale : comité de thèse. Merci à vous Chantal, Antoine, Jean-Pierre, Harry, Marc et Jean-Christophe. Merci Chantal pour tes conseils pertinents sur les méthodes d'évaluation de stratégies d'enherbement et pour ta présence féminine toujours appréciable dans ce monde de la recherche encore bien masculin. Dommage que je n'aie pas pu aller au bout de la démarche entreprise sur l'outil d'évaluation de stratégies mais je ne doute pas que Aude le fera avec enthousiasme et talent ! Je te souhaite maintenant bien du bonheur avec ton petit bout qui doit maintenant être tout frais arrivé ! Merci à toi,

Antoine, pour tes conseils souvent avisés et ton accompagnement dans l'apprentissage de PASTIS (le modèle !...) qui m'auront évités une gueule de bois trop forte. Je te souhaite bien du bonheur dans la nouvelle aventure parisienne (ou presque) dans laquelle tu t'engages. Merci Jean-Pierre pour ta connaissance poussée de la vigne, de sa physiologie, de son fonctionnement et les réponses données à mes nombreuses questions sur « une vigne : comment ça marche ?!! ». J'espère que tu profiteras pleinement maintenant d'une retraite bien méritée pleine de voyages et d'orchidées (entre autre). Merci Harry pour être venu de Guadeloupe toujours plein de bonnes idées (les cubes racinaires notamment... L'équipe vigne de l'UMR en garde de tellement bons souvenirs...;o)), de conseils avertis et de bonne humeur. J'espère également que tes déplacements en valaient la chandelle. Merci Marc pour la connaissance du sol et les critiques constructives apportées sur ce travail. Merci Jean-Christophe pour avoir su prendre le train en route (alors qu'il était déjà bien lancé) pour remplacer au pied levé Eric dans ce travail d'accompagnement. Ta connaissance de la vigne, tes coups de main et ta sympathie m'auront bien aidé. Merci donc à vous tous.

Je remercie également les quelques personnes venues ponctuellement assister à ces « brainstorming » qui m'ont permis d'adopter un cap en rapport avec les objectifs de départ (autant que possible). Merci donc à Christian Dupraz pour ses conseils, sa connaissance des systèmes associés et du monde souterrain des racines notamment. Merci à Florence et François dont la connaissance pointue des espèces herbacées en zone méditerranéenne m'aura bien aidé.

Merci également à William Trambouze pour ses conseils, pour sa thèse qui est devenue au fil du temps l'une de mes bibles (je ne suis pas trop branché exclusivité dans ce domaine là). Merci surtout pour les délires fréquents sur Internet et les discussions souvent drôles qui permettent de voir que quelqu'un nous comprend ! Merci donc et j'espère que tu te remettras rapidement maintenant de ton épilation du maillot (?!?! ;o)) et que tu pourras assister à ma soutenance de thèse. Je ne peux parler de toi, William, sans avoir immédiatement une pensée (émue n'en doutez pas) pour l'autre membre de la plus célèbre des paires de choc après Starsky & Hutch, Laurel & Hardy, Bonnie & Clyde, Céline Dion et René ou Simon & Garfunkel ! Merci donc Nathalie pour ces franches parties de rigolade et tes jolis dessins sur la feuille de notation lorsque j'étais au fond du trou (enfin de la fosse mais c'est pareil), pour m'avoir accompagné dans nos dégustations de vins teutons (et tu as dégusté c'est sûr ! hum...) et pour toutes ces rencontres qui font aimer le travail.

Je remercie également tous les gens croisés qui m'auront aidé, à un moment ou à un autre, à sauter certaines barrières qui se présentaient en travers de mon chemin : Jean-Pierre Soyer, Jean-Pascal Goutouly, Philippe Pieri, Charles Valancogne, Claude Varlet-Grancher, Gilles Lemaire, René Morlat, Bernard Seguin, Michel Gaudu, Olivier Jacquet, Bruno Tisseyre, Eric Lebon, Jean-Louis Chopart, Eric Gozé. J'en oublie probablement donc merci à tous ceux qui peuvent se reconnaître dans ce travail.

“Last but not least” comme disent nos amis anglophones, je remercie chaleureusement tous les membres du jury (Thierry Coulon, Jean-Louis Durand, Benoit Jaillard, Eric Justes et Cornelis Van Leeuwen) qui, sans qu'on les paye ou les menace, ont accepté de passer un peu de temps avec moi pour essayer de faire avancer encore un peu plus loin ce travail. Je remercie tout particulièrement Eric Justes et Cornelis Van Leeuwen qui, en tant que rapporteurs, ont passé ce que j'imagine être de longues heures à essayer de déchiffrer chaque idée et suivre un raisonnement que j'espère finalement pas trop fumeux.

Je remercie mes amis et ma famille d'avoir su me soutenir dans une épreuve que bien peu de gens comprend totalement (moi y compris).

Et puisque je garde toujours le meilleur pour la fin (ça doit être dans mon tempérament) : Merci à toi ma Juju pour ta présence, tes conseils, les jours passés ensemble et ceux qui viendront et surtout le magnifique cadeau que tu nous offres à tous les deux qui me fait relativiser (le mot est faible) l'importance de ce bébé d'encre et de papier. 38 mois plus ou moins difficiles pour à peine un peu plus d'1 kg de... quoi au juste ? d'un côté et à peine 9 mois de l'autre pour quelques kg de vie et de bonheur... De quel côté penche la balance à votre avis ?

A l'heure où je rédige ces lignes, Emilie et Lucille ne sont pas encore parmi nous (qu'elles prennent leur temps !) mais je les remercie déjà pour les nombreuses heures de sommeil dont elles vont nous priver, les cheveux qu'elles vont nous faire arracher (il y a pourtant un patrimoine en danger là !), les biberons à donner, les couches à changer et les cernes procurées... Merci donc les filles mais surtout merci pour tout le bonheur que vous apportez avec vous et bienvenues dans ce monde que je souhaite avec un peu plus d'enherbement dans les vignes et un peu moins d'emmerdements ailleurs (si ça c'est pas un programme présidentiel !?).

Il me reste à vous souhaiter bon courage, à vous amis lecteurs, car vous n'imaginez pas dans quelle épreuve vous vous engagez en passant à la page suivante, et à la suivante, et à la suivante, et à la suivante...

Liste des figures

Figure 1.1 – Transformations biologiques et non biologiques affectant le devenir de l'azote dans les sols.	-10-
Figure 1.2 – Cycle de développement de la vigne.	-18-
Figure 1.3 – Evolution selon une double sigmoïde de la taille de la baie au cours du temps.	-19-
Figure 1.4 – Cycle de développement végétatif et reproductif de la vigne.	-22-
Figure 1.5 – Système racinaire de la vigne schématisé par Ionescu et al (1978).	-22-
Figure 1.6a – Représentation artistique des systèmes racinaires de différents types d'espèces herbacées : de type herbe haute, herbe courte, à rhizome et légumineuse de saison chaude.	-23-
Figure 1.6b – Représentation du système racinaire de la fétuque élevée et du ray-grass d'Italie.	-23-
Figure 1.7 – Concentration de la feuille en chlorophylle a et b en fonction de la concentration en azote de la feuille (a) et propriétés optiques de la feuille pour un rayonnement dans la région du PAR (Photosynthetic Active Radiation) en fonction de la concentration en Chlorophylle a (b) .	-29-
Figure 1.8 – Régression et intervalle de confiance ($p=0,01$) entre l'indice NTester de deux étages foliaires et la teneur en azote des feuilles (zones des grappes) à la véraison. Ensemble des mesures sur Chasselas en 1998.	-29-
Figure 2.1 – Climat moyen de la ville de Montpellier au cours des dernières décennies (1971-2000).	-32-
Figure 2.2 – Dispositif expérimental établi sur la parcelle expérimentale du Domaine du Chapitre (Villeneuve-lès-Maguelone).	-33-
Figure 2.3 – Evolution des conditions climatiques de la parcelle expérimentale de Villeneuve-lès-Maguelone pour la période 2003-2006.	-34-
Figure 2.4 – Composition texturale de la terre fine des deux premiers mètres de sol de la parcelle d'étude pour les différentes modalités.	-35-
Figure 2.4b – Densité apparente sèche du sol des placettes des modalités MF et MD mesurées par gammamétrie.	-35-

1^{ère} Partie : Enherbement des vignobles en région méditerranéenne et impacts sur la croissance, l'élaboration du rendement et la qualité de la production de la vigne.

Figure 3.1 – Evolution des biomasses aériennes cumulées produites par les enherbements permanent et semi-permanent et des taux de couverture de la surface enherbée par chaque enherbement.	-42-
Figure 3.2 – Conductance stomatique (gs), potentiels hydriques foliaires de base (ψ_b) et précipitations (en mm) mesurés sous enherbement permanent (MF), temporaire (MR), sol nu (MD) et avec irrigation (MT).	-44-
Figure 3.3 – Teneur en azote surfacique des feuilles et indices chlorophyllien mesuré à l'aide d'un chlorophylle-mètre en fonction du traitement.	-46-
Figure 3.4 – Evolution des surfaces foliaires (LAI) produites par la vigne en fonction du traitement.	-48-
Figure 3.5 – Evolution du nombre de feuilles de ramifications primaires (FRI) et secondaires (FRII) produites par rameau de vigne en fonction du traitement.	-49-

- Figure 3.6** – Evolution des matières sèches totales (MST) et des fruits (MSG) produites par la vigne en fonction du traitement. -50-
- Figure 4.1** – Composantes de l'élaboration du rendement mesurées à la vendange pour chacune des stations étudiées. -61-
- Figure 4.2** – Composantes de la qualité des moûts prélevés à la vendange pour chacune des stations étudiées. -65-
- Figure 4.3** – Analyse en Composantes Principales (ACP) des indicateurs de croissance végétative, de composantes du rendement, de variables de qualité et des indicateurs de contrainte hydrique et azotée. -70-

2^e Partie : Enherbement des vignobles en région méditerranéenne et dynamique de partage des ressources en eau

- Figure 5.1** – Répartition des densités de longueur racinaire observées pour les 3 espèces étudiées entre rang et inter-rang en fonction de la modalité étudiée. -81-
- Figure 5.2** – Rapport entre les DLR de vigne sous l'inter-rang et celles sous le rang en fonction des DLR de fétuque sous l'inter-rang dans la modalité MF. -82-
- Figure 5.3** – W_{\min} et W_{\max} en fonction de la profondeur pour les 3 modalités étudiées
- Figure 5.3b** – W_{\min} et W_{\max} en fonction de la profondeur pour les périodes 2003-2004 et 2005-2006. -83-
- Figure 5.4** – W_{\min} et W_{\max} du compartiment exploité par l'enherbement pour chacune des placettes enherbées MF1 et MF2 et pour MR. -84-
- Figure 5.5** – Evolution des teneurs en eau volumiques moyennes ($m^3.m^{-3}$) pour les compartiments de sol définis dans le modèle conceptuel de fonctionnement hydrique. -85-
- Figure 5.6** – Variations de stocks des différents compartiments définis en fonction de la modalité étudiée pour les 4 années de l'étude. -86-
- Figure 5.7** – Coefficient de ruissellement et quantité d'eau ruisselée (mm) mesuré au pas de temps journalier en fonction des précipitations de la journée sur la parcelle expérimentale du Larzat. -88-
- Figure 5.8** – Evolution de la profondeur de la nappe de la parcelle au cours de la période d'étude. -90-
- Figure 6.1** – Schéma conceptuel du modèle de bilan hydrique établi pour une vigne enherbée. -98-
- Figure 6.2** – Evolution des ASW dans le compartiment de sol exploré par la vigne. -102-
- Figure 6.2b** – Evolution des ASW dans le compartiment de sol exploré par l'herbe pour chacun des traitements considérés. -102-
- Figure 6.3** – Corrélation entre les valeurs de FTSW simulées et observées dans le compartiment de sol occupé par la vigne et dans celui occupé par l'enherbement. -103-
- Figure 6.4** – Relation entre Potentiel hydrique foliaire de base (PHFB) et FTSW pour différentes localisations et cépages. -110-

3^e Partie : Interactions entre les fonctionnements hydrique et azoté au sein d'une vigne enherbée en climat méditerranéen

- Figure 7.1** – Evolution des stocks d'azote minéral pour l'horizon de sol 0-0.6m en fonction du traitement considéré. -117-

Figure 7.2 – Evolution des profils du stock d'azote minéral en fonction du traitement étudié. Rang et inter-rang sont différenciés.	-118-
Figure 7.3 – Quantité d'azote accumulé dans les parties aériennes des enherbements pour les trois années étudiées.	-119-
Figure 7.4 – Quantité d'azote accumulée dans les parties aériennes de l'année de la vigne en fonction de la modalité étudiée.	-120-
Figure 7.5 – Corrélation entre facteurs température calculés pour les traitements MD et MF.	-122-
Figure 7.6 – Corrélation pour les $f(\theta)$ entre MD et MF et entre MD et MR.	-122-
Figure 7.7 – Evolution de la vitesse de minéralisation journalière (V_m) de l'azote organique du sol en fonction de la modalité d'entretien étudiée.	-124-
Figure 7.8 – Compartimentation pour représenter le partage des ressources azotées au sein d'une vigne enherbée.	-130-
Figure 8.1 – FTSW de l'enherbement déterminée par la méthode neutronique pour chacune des modalités enherbées étudiées.	-136-
Figure 8.2 – FTSW de la vigne déterminée par la méthode neutronique pour chacune des modalités étudiées.	-137-
Figure 8.3 – Evolution des indices de nutrition azotée des enherbements (INN _h) en fonction de la modalité d'entretien du sol.	-138-
Figure 8.4 – Relation entre teneur en azote et matière sèche aérienne produite.	-139-
Figure 8.5 – Evolution des indices de nutrition azotée de la vigne (INN _v) en fonction de la modalité d'entretien du sol.	-139-
Figure 8.6 – Trajectoire des niveaux de nutrition azotée (INN) en fonction du niveau de contrainte hydrique (FTSW) de la vigne et de la modalité d'entretien du sol.	-141-
Figure 8.7 – Niveau de nutrition azotée de la vigne (INN) en fonction de la teneur en eau de l'horizon de surface du sol (HR).	-147-

Liste des tables

Tableau 1.1 – Influence de divers facteurs sur l'organogénèse et le grandissement du rameau de vigne. -18-

Tableau 2.1 – Échantillonnage et fréquence des différentes mesures réalisées sur la parcelle d'étude. -37-

1^{ère} Partie : Enherbement des vignobles en région méditerranéenne et impacts sur la croissance, l'élaboration du rendement et la qualité de la production de la vigne.

Tableau 3.1 – Rapport isotopique $\Delta^{13}\text{C}$ mesuré sur des échantillons de raisin prélevés à la récolte en fonction de la modalité étudiée et de l'année. -44-

Tableau 3.2 – Teneurs en azote assimilable des moûts (mg.L^{-1}) pour les différentes modalités étudiées. -47-

Tableau 3.3 – Nombre de couches de feuilles (NCF) du couvert dans la zone des grappes mesurés par la méthode du point quadrat à trois stades phénologiques clés de la vigne. -50-

Tableau 3.4 – Nombre de rameaux par souche et poids de bois de taille (PBT) mesurés au moment de la taille, en fonction de la modalité d'entretien considérée. -51-

Tableau 3.5 – Teneurs en amidon, glucides solubles et azote total dosées au moment de la taille en fonction de la modalité étudiée. -52-

Tableau 4.1 – Évaluation de l'équilibre végétatif et reproductif du vignoble. -63-

Tableau 4.2 – Matrice des corrélations entre les indicateurs de contraintes et les variables de croissance végétative et reproductrice et de qualité du moût. -68-

2^e Partie : Enherbement des vignobles en région méditerranéenne et dynamique de partage des ressources en eau

Tableau 6.1 – Paramètres mesurés au champ pour le calcul du coefficient maximum d'interception du rayonnement par la vigne (K_{max}). -99-

Tableau 6.2 – Indicateurs de qualité du modèle pour les différentes situations simulées. -101-

Tableau 6.3 – Flux du bilan hydrique simulés par le modèle de bilan hydrique. -104-

3^e Partie : Interactions entre les fonctionnements hydrique et azoté au sein d'une vigne enherbée en climat méditerranéen

Tableau 7.1 – Caractéristiques de la matière organique du sol en fonction de la modalité étudiée et de l'horizon considérée. -121-

Symboles et abréviations

$\Delta^{13}\text{C}$:	Rapport isotopique du carbone $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ des produits primaires de la photosynthèse
Ψ_{b} :	Potentiel hydrique foliaire de base
Ψ_{f} :	Potentiel hydrique foliaire
Ψ_{m} :	Potentiel hydrique foliaire minimum ou au midi solaire
Ψ_{sol} :	Potentiel hydrique du sol
Ψ_{tige} :	Potentiel hydrique de tige
ABA :	Acide Abscisique
An :	Assimilation nette de carbone
ANOVA :	ANalysis Of VAriance – Analyse de Variance
Ani :	Facteur d'anisotropie racinaire
ASW_j :	Available Soil Water – Eau du sol disponible au jour j pour la transpiration de la plante
C/N :	Rapport Carbone/Azote
CO₂ :	Dioxyde de Carbone
Couv :	taux de couverture de la surface enherbée
CWSI :	Crop Water Stress Index – Indice de contrainte hydrique de la culture
da :	Densité apparente du sol
DLR :	Densité de Longueur Racinaire
EF :	Efficiencence du modèle
Es :	Evaporation du sol nu
ETP :	Evapotranspiration Potentielle
ETR :	Evapotranspiration Réelle
FR_p :	Feuilles du rameau principal
FR_I :	Feuilles des ramifications primaires
FR_{II} :	Feuilles des ramifications secondaires
FTSW :	Fraction of Transpirable Soil Water – Fraction d'eau transpirable par la plante
gc :	Conductance stomatique pour le dioxyde de carbone
gs :	Conductance stomatique pour la vapeur d'eau
HCC :	Humidité à la capacité au champ
HPFP :	Humidité au point de flétrissement permanent
HR :	Humidité Relative
INN :	Indice de Nutrition azotée
INN_h :	Indice de Nutrition Azotée de l'enherbement
INN_v :	Indice de Nutrition Azotée de la vigne
ITV :	Centre technique interprofessionnel de la vigne et du vin
k_c :	Coefficient cultural
k_h :	Coefficient cultural de l'enherbement
k_m :	Coefficient d'interception maximal de la lumière
k_{sh} :	Coefficient de contrainte hydrique de l'herbe
k_{sv} :	Coefficient de contrainte hydrique de la vigne
l :	Paramètre de connectivité des pores (empirique)
LER :	Land Equivalent Ratio
MD :	Modalité dés herbée (dés herbage chimique total)
MF :	Modalité Fétuque (Enherbement permanent)
ModC :	Modèle de Culture
MR :	Modalité Rotation ou Retournée (Enherbement semi-permanent)
MPa :	Méga Pascals

MS :	Matière Sèche
MSG :	Matière Sèche des Grappes
MST :	Matière Sèche aérienne Totale
MT :	Modalité Témoin (irriguée et fertilisée)
N% :	Teneur en azote
Nc% :	Teneur en azote critique
NCF :	Nombre de Couches de Feuilles
NH₄ :	Ammonium
NI :	Nombre d'Impacts racinaires
Nm% :	Teneur en azote métabolique
NO₃ :	Nitrate
Nsurf% :	Teneur en azote surfacique des feuilles
OAD :	Outil d'Aide à la Décision
P :	Précipitations
PAR :	Photosynthetic Active Radiation
PBT :	Poids de Bois de Taille
pF4,2 :	Humidité du sol au potentiel de -16MPa défini comme le point de flétrissement permanent théorique pour la plupart des cultures.
p_{ir} :	Rapport surface couverte par la culture intercalaire sur la surface totale
ppas :	Plus Petite Amplitude Significative
P_x :	Facteur d'orientation préférentielle du système racinaire
R² :	Coefficient de détermination
Rc :	Remontées capillaires
R_{int} :	Part du rayonnement intercepté par le couvert
Rg :	Rayonnement global
RRMSE :	Relative Root Mean Square Error
Rs :	Résistance stomatique
RU :	Réserve hydrique Utile du sol
RUE :	Radiation Use Efficiency – Efficience d'utilisation du rayonnement
T :	Transpiration
T°C :	Température aérienne
TTSW :	Total Transpirable Soil Water – Réserve totale d'eau du sol transpirable par la plante
U :	Vitesse moyenne du vent
UN :	Unité d'azote
VLM :	Villeneuve lès Maguelone
W_{min} :	Stock d'eau minimal transpirable par la plante
W_{max} :	Stock d'eau maximal transpirable par la plante
WUE :	Water Use Efficiency – Efficience d'utilisation de l'eau

Introduction

La culture de la vigne a été introduite dans la région méditerranéenne française par les grecs au cours du V^e siècle avant J.C. Elle est donc très ancienne et s'est depuis étendue à l'ensemble du paysage languedocien. Avec plus de 270 000 ha de vigne recensés en 2004, la région Languedoc est en effet aujourd'hui le « plus grand vignoble » du monde. Cette surface représente le tiers de la surface viticole française, plus de 3% de la surface mondiale et une surface en production très supérieure à celle de pays producteurs comme l'Argentine, le Chili, l'Afrique du sud ou encore l'Australie ! Ces quelques chiffres montrent l'importance d'une telle production au sein de la région languedocienne.

Cette domination de la culture de la vigne s'accompagne depuis le XIX^e siècle d'une forte intensification des pratiques culturales. Dans la deuxième moitié du XX^e siècle, le développement de la chimie agricole a encore favorisé le développement de la « non-culture » et systématisé le recours à des herbicides et autres pesticides. La pression sur l'environnement a ainsi explosé et la durabilité de ce système agricole est maintenant questionnée. Aujourd'hui, les viticulteurs sont soumis à d'importantes pressions qui visent à réduire l'impact de la culture de la vigne sur l'environnement et notamment la pollution des eaux de surface et souterraines. En effet, les préoccupations vis à vis des questions environnementales liées à l'agriculture sont de plus en plus prégnantes en Europe occidentale. Le citoyen-consommateur relayé par les médias s'intéresse à ce qu'il consomme et à son environnement. Il tend à rejeter l'agriculture intensive polluant notamment les eaux ou l'air par le biais de l'emploi massif de fertilisants et de pesticides. La viticulture est donc montrée du doigt, notamment en région méditerranéenne, et elle cherche des alternatives techniques à l'emploi de ces produits polluants.

L'enherbement des vignes est une pratique susceptible de répondre à cette attente. Ainsi, après avoir quasiment disparu des vignobles du fait du développement de la chimie agricole et l'intensification de la production viticole, cette pratique se développe à nouveau depuis quelques dizaines d'années. Les pays du centre de l'Europe et les vignobles septentrionaux français ont été les premiers à la remettre au goût du jour. En premier lieu, l'objectif était de réduire l'érosion et de maintenir la fertilité du sol dans les vignobles en forte pente de ces régions. Par la suite, d'autres régions viticoles ont vu dans cette pratique la possibilité de maîtriser une vigueur végétative et des rendements excessifs, souvent associés à une qualité médiocre (Soyer et al. 1984; Morlat et al. 1993). En effet, l'implantation d'un enherbement est généralement source d'une concurrence pour les ressources entre la vigne et la culture intercalaire (Morlat et Jacquet 2003; Chantelot et al. 2004; Celette et al. 2005). La pression subie par la viticulture quant à son impact environnemental et l'interdiction de nombreuses molécules herbicides accélèrent l'adoption de cette pratique.

Celle-ci est pourtant encore freinée dans le vignoble languedocien car les viticulteurs craignent une concurrence pour l'eau excessive pour la production (Gaudel 2002). Ceci est particulièrement vrai dans la région méditerranéenne où la ressource hydrique est déjà rare au cours de la période de production viticole. De plus, les modèles climatiques prédisent que cette aridité est encore amenée à prendre de l'importance à l'avenir (Qadir et al. 2003). L'impact de l'enherbement sur l'environnement physique et biotique de la vigne est complexe et des études récentes ont montré que l'azote pouvait également être un facteur limitant (Chantelot et al. 2004). L'intérêt stratégique d'identifier précisément la nature et l'importance de ces relations de concurrence pour une gestion plus raisonnée des enherbements est donc évident.

Cette problématique s'inscrit dans celle, plus générale, de l'étude du fonctionnement des associations de culture. Les relations de compétition pour les ressources (rayonnement,

eau, minéraux) dans ces systèmes de culture ont fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux conduisant dans certains cas à la modélisation de la dynamique du partage de ces ressources. Des approches détaillées de l'interception du rayonnement par les deux couverts végétaux et des flux transpiratoires associés ont été proposées (Wallace 1995; Ozier-Lafontaine et al. 1998). De même, des représentations bi-dimensionnelles des flux de masse (d'eau en particulier) dans le sol sont possibles, tenant compte des caractéristiques des systèmes racinaires et des différents compartiments du sol (Lafolie 1995; Lafolie et al. 1999; Sillon et al. 2000).

Cependant, ces approches sont complexes et aucune n'a encore été appliquée au cas particulier des vignes enherbées. Celles-ci sont caractérisées par un fort contraste entre les modalités d'enracinement d'une espèce ligneuse pérenne et d'une espèce (ou d'un mélange d'espèces) herbacée(s) et par un mode de conduite de la vigne visant à limiter les ressources en eau et en azote pour la production de raisin de cuve. Par ailleurs, un système de culture à base de vigne enherbée doit être évalué à partir d'une combinaison originale de variables d'état ou de flux, en lien avec les objectifs et le cahier des charges du viticulteur. Une typologie des stratégies d'enherbement réalisée récemment à partir d'enquêtes permet d'identifier les objectifs majeurs qui justifient l'adoption de l'enherbement (Laffosse 2001; Celette et Celette 2002; Hofmann 2006). Il en ressort qu'il convient d'intégrer en particulier (1) les effets du couvert herbacé sur les fonctionnements hydrique et azoté du système étudié et (2) les effets des contraintes hydrique et/ou azotée sur la vigueur végétative de la vigne, l'élaboration du rendement et de la qualité du raisin.

Ce travail de thèse se propose donc de décrire les relations de partage pour les ressources hydriques et azotées entre vigne et culture intercalaire et d'apporter ainsi les éléments nécessaires à leur modélisation. Les dynamiques de ces deux ressources présentent de nombreuses interactions qui doivent également être considérées. Il vise également à évaluer leurs conséquences sur le développement végétatif et l'élaboration du rendement et de la qualité des produits de la vigne.

Ce travail est organisé comme suit :

- Dans un premier temps, nous cherchons à présenter l'état des connaissances utiles à la compréhension des associations de cultures en général et de la vigne enherbée en particulier. A partir de cet état de l'art, la problématique de ce travail est précisée et les objectifs de recherche peuvent être définis précisément.

Les résultats de ce travail sont ensuite présentés dans six chapitres :

- Dans les deux premiers, nous cherchons à caractériser l'impact d'un enherbement et de sa gestion sur l'expression végétative de la vigne, la production de raisin et sa qualité.
- Les deux suivants se penchent sur l'incidence de l'enherbement des vignes en zone méditerranéenne sur le fonctionnement hydrique du système. Une approche de modélisation simple du bilan hydrique d'une vigne enherbée est proposée et évaluée.
- Les deux derniers présentent l'impact de l'enherbement sur le fonctionnement azoté d'une vigne enherbée en région méditerranéenne et évalue les interactions existant entre le fonctionnement hydrique et azoté de ce système. La question de savoir si l'eau et/ou l'azote sont les facteurs limitants de la production et à quel moment est abordée.
- Pour finir, le dernier chapitre vise à évaluer la portée et la genericité de ce travail et propose des pistes à explorer à l'avenir.

Chapitre I - La vigne enherbée : une association culturale un peu particulière – Synthèse bibliographique

1. Pour mieux comprendre les associations culturales

L'association culturale consiste à faire pousser plusieurs cultures dans une même parcelle. Cette pratique s'est d'abord développée dans les régions tropicales avant de trouver sa place dans les climats plus tempérés. Les avantages attendus d'une telle pratique sont bien souvent une meilleure utilisation des ressources du milieu (Willey 1990; Howard et al. 1995). C'est particulièrement le cas lorsque les différentes cultures présentes au champ intéressent l'agriculteur pour leur production. Dans d'autres cas, une ou plusieurs des cultures présentes sont destinées à rendre un « service » à l'agriculteur. Les exemples les plus évidents de ces cultures « de service » sont les plantes de couverture qui visent principalement à limiter les phénomènes d'érosion et de ruissellement. D'autres jouent un rôle dans la protection des cultures, leur fertilisation, etc.

En conséquence, les associations de culture apportent potentiellement trois types de bénéfices au nouvel agroécosystème par rapport à un système monocultural : une augmentation de la productivité, de la stabilité et de la durabilité du système (Altieri 1995). La hausse de productivité, qui s'exprime par un Land Equivalent Ratio (LER) plus élevé pour les systèmes associés (Vandermeer 1989), s'explique naturellement par la meilleure utilisation des ressources du système mais aussi par une éventuelle diminution des dégâts causés par les différents ravageurs et maladies (Trenbath 1993; Desaegeer et al. 2004). Elle peut également être liée à une augmentation de la fertilité du milieu (Kang et al. 1990). La stabilité de la production du système est améliorée par la diversification de la production qui induit une moindre dépendance au rendement de chacune d'entre elles. Cette diversification signifie donc qu'en cas de mauvaise production d'une des composantes du système, la production totale en est moins affectée que s'il s'agissait d'une monoculture. Enfin, la durabilité du système, c'est-à-dire sa productivité à long terme, est accrue par la protection des ressources et leur meilleure exploitation : limitation de l'érosion, de la lixiviation de l'azote, engrais vert, utilisation de ressources autrement inaccessibles à certaines espèces du système...) (Lal 1989b; Buresh et al. 2004; Mafongoya et al. 2004).

Pour autant, si l'association de plusieurs espèces présente généralement des avantages, elle induit également une concurrence pour les ressources, qui peut être problématique si elle se fait au détriment des composantes les plus intéressantes pour le producteur. Cette concurrence aérienne ou souterraine peut, bien souvent, être atténuée, voire supprimée, par une bonne gestion du système (Rao et al. 2004).

1.1. Une concurrence aérienne pour la lumière

La lumière joue un rôle important dans la croissance globale du système et la répartition de cette croissance entre les différentes espèces. En effet, la répartition de la lumière entre les composantes de l'association culturale joue un rôle majeur dans la capacité photosynthétique et le bilan énergétique de chacune et, par conséquent, dans leur capacité de croissance et leurs consommations des ressources du sol (Tournebize et Sinoquet 1995; Tournebize et al. 1996). Ainsi diverses études ont montré une forte corrélation entre le rayonnement intercepté cumulé et la biomasse totale produite par le système (Stirling et al. 1990; McIntyre et al. 1996). Dans un système de cultures associées composé de millet cultivé au milieu d'allées de *Leucaena leucocephala*, Corlett et al.

(1992) ont observé une forte inflexion dans la relation entre la biomasse sèche accumulée et la lumière interceptée. Black et Ong (2000) considèrent que cet écart est notamment dû à une accumulation de biomasse sénescence en fin de cycle intercepte de la lumière mais ne réalise pas de photosynthèse. Ils considèrent également que l'interception de la lumière par des éléments non chlorophylliens est plus importante dans les espèces pérennes du fait de leurs éléments structuraux (tronc, branches).

En règle générale, l'association culturale est susceptible d'améliorer l'efficacité d'interception du rayonnement (RUE¹) lorsqu'elle concerne des espèces au cycle végétatif décalé, ou lorsqu'elle permet une meilleure couverture du sol. Une association concernant des espèces aux habitats différents et de différentes hauteurs (comme par exemple les associations agroforestières) a un effet similaire (Corlett et al. 1992; Lemaire 1995).

Dans une association d'espèces annuelles en rangs, la variabilité spatiale dans l'interception de la lumière reste modérée (Marshall et Willey 1983). En revanche, cette variabilité va en grandissant lorsque l'association comporte des espèces cultivées de hauteurs très contrastées et atteint un maximum dans le cas d'un système agroforestier avec une espèce formant une canopée haute et éparse (Sinoquet et Caldwell 1995; Black et Ong 2000). De nombreux auteurs s'accordent à dire que c'est d'abord la dominance verticale qui influence le partage de la lumière entre les individus (Spitters et Aerts 1983; Cudney et al. 1991). Bien souvent dans le cas d'associations culturales, le couvert se compose d'une ou plusieurs espèces dominantes et d'une ou plusieurs espèces dominées. La répartition des rôles peut varier au cours du temps. Cette concurrence peut être très pénalisante pour l'espèce dominée dans le cas où un trop fort ombrage réduit fortement son activité photosynthétique. Cet ombrage peut également avoir un effet positif en diminuant la demande climatique pour la plante dominée et en limitant donc potentiellement la contrainte hydrique qu'elle subit. Ainsi, si le rayonnement incident devait être suffisant pour satisfaire les besoins de la plante dominée, il est possible que sa photosynthèse et donc sa production de biomasse se révèlent supérieures à celles d'un individu subissant une contrainte hydrique. Ceci permet d'augmenter la RUE globale de l'association (Cruz 1997).

En fait, le partage des ressources du sol entre les diverses plantes d'un couvert dense et hétérogène est influencé par la capacité de chacune d'elles à prélever ces ressources mais aussi par la capacité de chacune à les utiliser. Cette dernière dépend de la quantité d'énergie interceptée (Lemaire 1995). C'est donc bien la compétition pour la lumière qui est le premier moteur de la concurrence entre les individus dans un couvert.

Dans le cas de la vigne enherbée, la vigne est l'espèce dominante. Cette dernière ne subit donc aucune concurrence pour la lumière. En règle générale, la vigne se caractérise par un parallélépipède bien défini (au moins dans le cas des vignes palissées de plus en plus répandues), notamment après les travaux de rognage. Le couvert d'une vigne représente le plus souvent une surface foliaire limitée. Enfin, la porosité sur les faces verticales de ce parallélépipède est souvent importante. Elle est en revanche quasiment nulle sur les faces horizontales (Riou et al. 1989). Globalement, la quantité de lumière interceptée par le couvert de vigne varie en fonction de la vigueur² de la vigne, et donc de sa surface foliaire, de la largeur de plantation et de l'orientation des rangs (Champagnol

¹ **RUE** : Radiation Use Efficiency représente l'efficacité d'utilisation du rayonnement. Elle est exprimée en g MS produite.MJ⁻¹ d'énergie interceptée.

² **Vigueur végétative** : Cette notion est souvent utilisée pour caractériser la croissance et le développement de la canopée (Dokoozlian et Kliever 1995). Selon Champagnol (1984), elle témoigne de l'activité métabolique des organes en croissance. Elle a été définie plus récemment par rapport à la vitesse d'apparition des feuilles ou d'élongation d'un rameau (Freeman et al. 1998). Les souches vigoureuses se rencontrent lorsque les conditions de milieu (fertilité du sol, climat chaud et ensoleillé, densité de plantation, taille) et internes (porte greffe, réserves, équilibre hormonal...) sont optimales.

1984). Dans le cadre des vignobles du sud de la France, généralement à faible densité et donc avec un inter-rang large, la proportion du rayonnement incident intercepté par le rang de vigne reste modérée (en général inférieure à 50%). Ainsi, la concurrence que subit la culture intercalaire pour la lumière est faible. D'autant plus que les espèces utilisées pour enherber le vignoble ont généralement un cycle végétatif décalé avec celui de la vigne. En conséquence, la surface foliaire de cette dernière est limitée pendant le cycle d'activité de l'enherbement.

1.2. La face cachée du système : les interactions pour les ressources du sol

Longtemps, la compétition pour la lumière a été mise en avant pour expliquer les diminutions de production observées sur les espèces dominées dans des associations culturales. Pour autant, Singh et al (1989) observent qu'en plaçant des barrières racinaires dans une association de *Leucaena* avec du sorgho (*Sorghum bicolor*) ou de la dolique (*Vigna unguiculata* L.), les effets de la compétition disparaissent totalement. Les auteurs concluent que les espèces associées sont en concurrence pour une ressource souterraine de ce système : l'eau en l'occurrence. Haynes (1980) arrive également à la conclusion que la compétition qu'il observe dans une association graminées-légumineuses est essentiellement liée aux ressources souterraines. Jose et al. (2004) estiment ainsi que la compétition entre deux espèces associées apparaît lorsque les deux espèces développent un système racinaire dans les mêmes horizons de sol. De telles observations ont poussé quelques auteurs à se pencher sur la question de la concurrence pour les ressources du sol dans un système de cultures associées. Pour autant, les difficultés, notamment techniques, liées à l'étude de tels phénomènes expliquent que ce genre de travaux restent encore très minoritaires (Ong 1995; Ozier-Lafontaine et al. 2000).

1.2.1. L'eau ou la principale ressource du sol

Comme la lumière, l'eau est une ressource indispensable à la croissance de toute espèce végétale. De la même manière, la quantité de biomasse produite dépend de la quantité d'eau consommée par la plante et de l'efficacité avec laquelle cette eau est utilisée. On définit donc le concept d'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE³).

1.2.1.1. Les termes du bilan hydrique

Le bilan hydrique représente les variations de la quantité d'eau présente dans un volume de sol considéré (généralement celui colonisé par le système racinaire de la plante) (Cosandey et Robinson 2000). Le bilan hydrique peut être représenté par l'équation simplifiée :

$$\Delta S_{(j)} = (P + I - R)_{(j)} - T_{(j)} - E_{S_{(j)}} - (D - Rc)_{(j)} \quad [1.1.2. a]$$

Avec ΔS : les variations du stock d'eau du sol (en mm d'eau)

P : les précipitations (mm)

I : les apports d'eau par irrigation (mm)

R : le ruissellement de surface (mm)

T : la transpiration du couvert végétal (mm)

Es : l'évaporation du sol nu (mm)

D : le drainage en fond de profil (mm)

Rc : les remontées capillaires en fond de profil (mm)

³ WUE : Water Use Efficiency représente l'efficacité d'utilisation de l'eau. Elle est exprimée en g MS produite.mm⁻¹ d'eau consommée.

D'un point de vue théorique, le calcul de ce bilan hydrique peut se faire à différents pas de temps et durées.

Précipitations, ruissellement de surface et infiltration

L'infiltration désigne le flux d'eau qui pénètre dans un sol à partir de sa surface. Celui-ci est considéré vertical et provoqué par simple gravité ou par succion matricielle. L'infiltrabilité, ou capacité d'infiltration, correspond à la valeur maximale de cette infiltration pour un sol donné (Swartzendruber et Hillel 1973). Cette capacité d'infiltration diminue avec le temps lors d'un épisode pluvieux.

Le ruissellement constitue en fait le refus à l'infiltration des apports d'eau (précipitations ou irrigation). Le ruissellement peut être la conséquence de précipitations trop importantes, qui dépassent la capacité d'infiltration de la surface du sol. Il peut également être provoqué par la saturation de l'horizon de surface, due à une conductivité hydraulique trop faible dans le fond de cet horizon, pour permettre d'infiltrer toute l'eau de l'évènement pluvieux. C'est donc bien une perte d'eau pour le système puisque cette quantité ne sera pas accessible pour la plante. Les « pluies efficaces » correspondent à la différence entre les précipitations et le ruissellement

L'évaporation du sol

Dans le cadre de couverts végétaux peu couvrants, comme la vigne, l'évaporation du sol est un flux important à considérer dans le bilan hydrique. Villalobos et al. (2000) observent que la part relative de l'évaporation du sol nu par rapport à l'évapotranspiration totale est très importante au cours de l'hiver et tombe à moins de 10% pendant l'été. Cela est dû à la pluviométrie particulière de la région sur laquelle ils travaillent (Cordoba, Espagne) et dont le climat est méditerranéen avec une saison humide d'octobre à avril et une saison sèche ensuite. Il apparaît que l'évaporation du sol peut représenter de 30 à 80%, suivant la région et la structure de plantation, de l'évapotranspiration totale pendant le cycle de la culture (Bonachela et al. 1999).

L'évaporation du sol nu se déroule en trois étapes après une réhumectation de la surface (pluie ou irrigation). Dans un premier temps, l'eau libre de l'horizon de surface est perdue rapidement et la résistance du sol au flux d'eau est considérée comme nulle. L'évaporation réelle est alors égale à l'évaporation potentielle. L'intensité du flux est à ce moment-là grandement déterminée par les conditions météorologiques du moment et l'énergie disponible (Ritchie 1972). Au cours de cette période, c'est l'eau libre des plus grandes pores du sol qui s'évapore en priorité (Alvenas et Jansson 1997). Cependant, le flux évaporatif est alors plus rapide que le flux d'eau qui monte des horizons plus profonds. L'horizon de surface sèche donc plus rapidement et, peu à peu, devient une barrière (particulièrement dans un sol travaillé) pour les flux d'eau à l'état liquide et gazeux tandis que l'eau qui reste est principalement localisée dans les pores plus petits et donc retenue par des forces capillaires importantes (« eau liée ») (Alvenas et Jansson 1997). Ainsi, le flux évaporatif diminue peu à peu tandis que la résistance de surface augmente (Radersma et de Ridder 1996; Wallace et Holwill 1997). Au cours de cette étape, l'évaporation est principalement liée aux propriétés physiques du sol. Enfin, l'évaporation du sol atteint un nouveau palier avec un flux de faible importance. La couche de surface est alors sèche et la perte d'eau par évaporation est très limitée. Les pertes se font sous la forme de vapeur qui traverse lentement la couche de surface.

Le flux évaporatif peut également être alimenté par des remontées capillaires depuis des horizons plus profonds que ceux à l'interface avec l'atmosphère. Ceci dépend de la teneur en eau des horizons sous la surface ainsi que des propriétés physiques du sol. La perte d'eau par évaporation subie par l'horizon à l'interface avec l'atmosphère entraîne une

chute simultanée de la teneur en eau, du potentiel hydrique du sol et de la conductivité hydrique mais elle peut aussi augmenter le gradient de potentiels hydriques avec les horizons plus profonds et donc créer ces remontées capillaires.

La transpiration des plantes

Le prélèvement d'eau par les plantes est conduit par un gradient de potentiel hydrique tout au long du parcours de l'eau du sol à l'air. A la différence de l'évaporation du sol, la transpiration est un flux qui induit un processus actif au travers de l'extraction racinaire et de la régulation stomatique.

Des racines jusqu'aux parois des cellules foliaires bordant les espaces intercellulaires, la sève circule en phase liquide. A partir de là, elle passe en phase gazeuse et s'échappe vers l'atmosphère après avoir traversé les stomates et la couche limite. La régulation stomatique est importante dans les processus de transpiration et de photosynthèse. C'est en jouant sur la fermeture de ces stomates, et donc sur la résistance stomatique au transfert d'eau, que la plante va pouvoir réduire fortement ses pertes d'eau par transpiration.

Le drainage et les remontées capillaires

Le drainage profond et les remontées capillaires correspondent aux mouvements d'eau verticaux respectivement orientés vers le bas et vers le haut et ayant lieu au fond du profil de sol considéré (généralement la profondeur de la zone racinaire).

Si le drainage a lieu généralement en hiver ou en saison humide, les remontées capillaires apparaissent plutôt dans le cas d'un temps sec et chaud, lorsque la demande évapotranspiratoire est forte.

Le drainage profond intervient généralement lorsque le profil de sol considéré est à une humidité supérieure à la capacité au champ. La macroporosité du sol se remplit alors d'eau et cette eau descend, souvent par simple gravité, hors de portée du système racinaire.

A l'inverse, lorsque l'évaporation (ou l'évapotranspiration) est élevée, le sol se dessèche et cette dessiccation est plus rapide en surface qu'en profondeur. En conséquence, un gradient de potentiels hydriques se crée avec des potentiels moins négatifs en profondeur. Ce gradient provoque un mouvement d'eau ascendant. Dans le cas d'un milieu drainé (sans nappe d'eau), ce mouvement est très lent puisqu'il se déroule dans un milieu sec et donc avec une conductivité hydraulique faible. En conséquence, ces remontées ne sont en aucun cas susceptibles de stopper la dessiccation du sol et ne font que la ralentir. Au mieux, dans le cas où la perte d'eau en surface s'arrête, les remontées se poursuivent jusqu'à ce que le profil hydrique se stabilise (même humidité partout) et le flux s'arrête alors lui aussi. Lorsqu'une nappe phréatique est présente en fond de profil, ces remontées capillaires sont beaucoup plus importantes et efficaces. Leur débit dépend de la conductivité du milieu et de l'importance du gradient d'humidité. En conséquence, c'est la texture du sol qui décide de leur importance. Dans le cas de textures limoneuses, qui sont les plus favorables, ce flux peut représenter jusqu'à 2 mm.j^{-1} (Duchaufour 2001). Ces remontées sont cependant limitées à une hauteur de remontée correspondant à la « frange capillaire » située juste au dessus de la nappe et sur une hauteur allant de 0,8 à 1 m environ. Au dessus, on repasse dans le cas de figure des remontées capillaires en milieu drainé.

1.2.1.2. L'eau : une ressource vitale

Importance physiologique de l'eau pour les végétaux

L'eau est à la fois le milieu dans lequel se déroule la quasi totalité des processus biologiques, un transporteur pour les solutés indispensables à la plante, un solvant, un

agent de réaction chimique. Elle donne également à la plante une partie de sa structure grâce à la turgescence et joue un rôle dans la croissance des végétaux. Elle permet enfin, grâce à la vaporisation au cours de la transpiration, d'évacuer une partie de l'énergie reçue par le soleil et donc d'éviter un échauffement excessif (Cruziat 1997).

La plupart des plantes cultivées voient leur fonctionnement physiologique fortement affecté dès que leur teneur en eau s'écarte de plus de 15% de leur valeur optimale. En conséquence, le contrôle de l'état hydrique de la plante s'avère critique.

Conséquences d'une contrainte hydrique

Les régulations physiologiques et morphologiques qui permettent aux plantes de s'adapter à une alimentation en eau déficitaire s'opèrent à différentes échelles. Dès qu'un déficit hydrique apparaît, la plante ajuste, rapidement et de façon réversible, les flux d'eau qui la traversent par la fermeture de ses stomates (Smart et Coombe 1983).

Des déficits hydriques plus longs induisent des changements plus irréversibles, notamment dans la morphologie du végétal (réduction des surfaces d'évaporation) (Chaves et al. 2003). Gomez-del-Campo et al. (2002) observent ainsi que la surface foliaire est fortement corrélée sur vigne, avec l'intensité de la contrainte hydrique. A la fois le nombre de feuilles et leur surface sont affectés. Dans les situations de sécheresse très longue et sévère, cette réduction peut devenir arrêt complet. Dans cette dernière situation, la question alors posée est celle de la survie des organes essentiels (méristèmes, racines) pour assurer une reprise de croissance lorsque les conditions hydriques sont à nouveau favorables (cas des espèces pérennes soumises aux climats arides comme le climat méditerranéen). Un déficit hydrique a également des conséquences sur la phénologie de la plante (Matthews et al. 1987).

Lorsque l'évapotranspiration potentielle, déterminée par les caractéristiques de l'atmosphère (Allen et al. 1998), devient supérieure à ses possibilités d'alimentation en eau, la plante réagit en fermant ses stomates pour éviter de se dessécher. On a longtemps considéré que cette fermeture était provoquée, mécaniquement, par une modification de la turgescence des cellules de la feuille, induite par la déshydratation (contrôle hydraulique) (Hsiao 1973). Les mécanismes en jeu sont en fait plus complexes, notamment avec l'action d'un signal chimique : l'acide abscissique (ABA), synthétisé par les racines soumises à un déficit hydrique (Cornish et Zeevaart 1985). L'ABA est véhiculé jusqu'aux feuilles par la sève brute (Tardieu et Davies 1993; Anderson et al. 1994; Assmann et Shimazaki 1999) y compris quand une partie des racines est soumise à une dessiccation alors que le reste de la plante est maintenu dans des conditions hydriques non limitantes (Stoll et al. 2000). Ces régulations diffèrent selon les espèces, leur capacité à maintenir un état hydrique presque constant étant variable. Par exemple, elle est bonne chez le maïs et le pois (espèces dites isohydriques) et moindre chez le tournesol (espèce anisohydrique). Des comportements différents ont même été observés entre divers cultivars de la vigne (Gomez-del-Campo et al. 2002; Soar et al. 2006).

Conséquence de cette régulation stomatique, un déficit hydrique de courte durée provoque une diminution de l'assimilation de carbone par la plante (Chaves 1991) d'où un ralentissement de la production de biomasse (Dorji et al. 2005; Inman-Bamber et Smith 2005). Cette réduction touche d'abord la croissance végétative, plus sensible à la contrainte hydrique que la croissance racinaire et reproductive (Hsiao et Xu 2000; Wery 2005). Diverses études ont montré que la ramification de l'appareil végétatif était souvent le premier élément touché par une contrainte hydrique (Pellegrino et al. 2005; Wery 2005). Cependant, divers mécanismes de protection de l'appareil photosynthétique existent si bien que la photosynthèse peut reprendre rapidement si les conditions deviennent plus favorables (Tardieu et Dreyer 1997).

Les déficits hydriques longs se traduisent par des changements progressifs dans la structure de la plante, qui visent à réduire sa surface transpirante (surface foliaire), mais qui induisent également une baisse de sa production. Au début du cycle végétatif, la plante ajuste sa taille à l'eau disponible dans le milieu en réduisant la surface et/ou le nombre de ses feuilles, et le nombre de ses organes d'accumulation. Ainsi, ses besoins en eau sont plus faibles mais sa biomasse réduite ; elle reste capable de produire des semences, mais moins nombreuses. Durant la seconde partie du cycle végétatif, c'est par une sénescence accélérée des feuilles et l'avortement de graines que les réductions de taille s'opèrent (Hsiao 1973; Matthews et al. 1987).

L'impact d'une contrainte hydrique sur la physiologie de la plante dépend également du stade de développement de la plante. Ainsi, Goldhamer et al. (2006) observent, sur amandier (*Prunus dulcis* Mill.), qu'une carence en eau importante avant la récolte réduit sensiblement la taille de la canopée sans affecter la charge en fruits. L'intensité de la contrainte hydrique joue évidemment un rôle. Besset et al. (2001), sur pêcher, et Guerrero et al. (2006), sur pistachier (*Pistacia vera* L.), montrent ainsi qu'un stress modéré, même aux stades phénologiques les plus sensibles, n'a pas d'impact sur la production finale.

Fonctionnement hydrique des systèmes de cultures associées

Dans un système où l'eau peut être un facteur limitant, il semble que la compétition pour cette ressource dépende principalement de trois éléments (Ozier-Lafontaine et al. 1995) :

- Dans un premier temps, de la disponibilité de l'eau dans le système, elle-même dépendante des propriétés hydrodynamiques du sol.
- Ensuite, de la distribution de la demande climatique entre les différents éléments qui composent l'association. L'importance du flux constitué par l'évaporation du sol, qui est affecté par la structure du système associé, peut être également un élément à ne pas négliger dans la compétition pour l'eau (Ozier-Lafontaine et al. 1997).
- Enfin, des capacités physiologiques et des stratégies morphogénétiques de chaque espèce pour le prélèvement de l'eau par les racines. Ce point dépend de la distribution des différents systèmes racinaires, de leur vitesse de croissance, de la capacité d'absorption des racines et du turn-over racinaire (Ozier-Lafontaine et al. 1998).

De nombreux auteurs pointent d'ailleurs l'importance de la distribution spatiale du système racinaire pour expliquer une telle compétition (Caldwell et Richards 1986; Tardieu 1988; Clarkson 1991; Habib et al. 1991; Tardieu et al. 1992).

Dans le cadre d'une association entre espèces ligneuses et annuelles, une complémentarité évidente dans l'utilisation des ressources du sol existe. En effet, l'espèce ligneuse possède un système racinaire déjà bien établi lorsque la culture annuelle est implantée. Bien souvent, le système racinaire de l'espèce ligneuse explore donc des zones inaccessibles à l'annuelle (Huxley 1996; Ong et al. 1996; Lehmann et al. 1998). Ainsi, la plus grande profondeur de sol explorée par le système racinaire de l'espèce ligneuse lui donne accès à un stock d'eau plus important et peut lui permettre d'accéder à une éventuelle nappe profonde (Schroth 1999). Cependant, cette complémentarité est surtout possible dans un sol profond. Ainsi, Odhiambo et al. (2001) n'observent pas de complémentarité des systèmes racinaires dans une association *Gliricidia sepium* Jacq.-*Grevillea robusta* Cunn. sur un sol superficiel.

Les différences dans la distribution verticale des systèmes racinaires des espèces associées seraient également à l'origine d'un phénomène de facilitation : l'ascenseur hydraulique (Burgess et al. 1998; Caldwell et al. 1998; Burgess et al. 2001). Ainsi, l'espèce

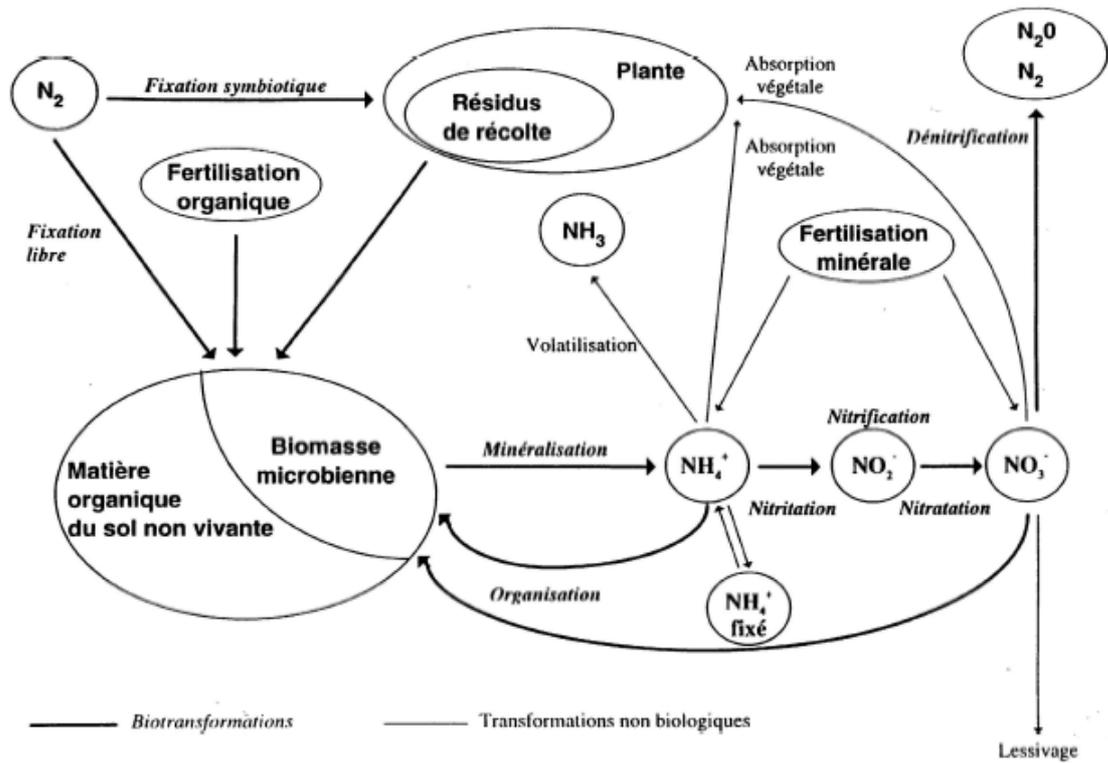


Figure 1.1 – Transformations biologiques et non biologiques affectant le devenir de l’azote dans les sols (Nicolardot et al., 1997).

dont le système racinaire est le plus profond déchargerait parfois une partie de l'eau prélevée en profondeur dans les horizons plus superficiels. Cette eau deviendrait alors accessible aux autres composantes du système associé dont le système racinaire ne colonise pas ces horizons profonds. Caldwell et al (1998) estiment ainsi que ce flux peut représenter jusqu'à 30% de l'ETP journalière.

La compétition entre les espèces présentes dans une association de cultures dépend également du moment de l'apparition du pic de consommation de chacune des espèces (Willey 1990). Bien souvent, ces pics de consommation se trouvent décalés entre les différentes espèces du mélange. Ce type de phénomène a été observé dans une association agroforestière (Mulia et Dupraz 2006).

Budelman (1989) observe comment un mulch végétal augmente fortement l'humidité des horizons de surface. Ceci s'explique à la fois par une diminution de l'évaporation du sol et par une amélioration des propriétés physiques du sol et de l'infiltration. Ainsi, plusieurs études ont montré une amélioration sensible des propriétés hydrodynamiques de la surface du sol suite à l'implantation d'une culture intercalaire (Yamoah et al. 1986; Lal 1989a; 1989b; Dalland et al. 1993). Cet effet consiste notamment en une augmentation de la porosité du sol et de la rugosité de surface. Ceci entraîne une amélioration du taux d'infiltration des pluies (Le Bissonais et al. 2004). L'augmentation éventuelle de la teneur en matière organique observée dans les horizons de surface avec une culture intercalaire contribue également à améliorer, de manière plus pérenne, la capacité de rétention du sol mais aussi la porosité du sol (Ong 1995). Enfin, la présence de la culture intercalaire a également une conséquence indirecte sur l'infiltration du sol en entraînant parfois une meilleure activité biologique du sol et notamment des lombrics (Lal 1989b; 1989c). Cette diminution significative du ruissellement améliore sensiblement l'efficacité des pluies, notamment au cours de la période hivernale, et donc la recharge du profil (Ong 1995; Celette et al. 2005). Ceci atténue la compétition pour l'eau entre les deux espèces.

1.2.2. Les ressources azotées du sol

Si l'azote existe sous trois formes dans la biosphère (organique, minérale et gazeuse), c'est principalement la forme minérale soluble qui est consommée par les végétaux. Il est d'ailleurs l'élément minéral le plus consommé par les plantes dans le sol. Les formes ammoniacales (NH_4^+) et nitriques (NO_3^-) sont celles participant à l'alimentation des végétaux. Dans le sol, souvent plus de 98% de l'azote se trouve sous la forme organique mais une partie de cet azote organique peut subir une transformation qui le rend disponible pour les plantes : la minéralisation.

Le nitrate (NO_3^-) est très soluble, du fait de sa charge négative, et donc très présent dans la solution de sol et facilement lixivié. C'est donc une source potentielle de pollution des ressources en eau.

1.2.2.1. Les termes du bilan azoté

Le cycle de l'azote est complexe, particulièrement dans le sol où l'azote subit de nombreuses transformations, biologiques ou non (Nicolardot et al. 1997)(*Figure 1.1*). Une approche similaire à celle du bilan hydrique peut être appliquée pour un bilan azoté du sol. Très simplifié, le bilan azoté peut s'écrire de la manière suivante :

$$\Delta S_{(t)} = (M + AE - Im)_{(t)} - C_{(t)} - Vol_{(t)} - Den_{(t)} - Lix_{(t)} + Nap_{(t)} \quad [1.1.2. b]$$

- Avec ΔS : les variations du stock de l'azote minéral du sol (en kg d'azote/ha)
M : la minéralisation de l'azote organique
AE : les apports d'azote minéral par la fertilisation et/ou l'eau d'irrigation
Im : l'immobilisation de l'azote minéral

C : la consommation d'azote par le couvert végétal

Vol : les pertes d'azote minéral par volatilisation

Den : les pertes par dénitrification

Lix : les pertes d'azote minéral par lixiviation

Nap : Les apports d'azote minéral grâce à une remontée de la nappe phréatique

Bien souvent, certains de ces flux sont très faibles ou difficiles à estimer. Il n'est donc pas rare de les négliger. De plus, d'autres flux peuvent encore être pris en compte comme la fixation de l'azote atmosphérique (avec la présence d'une légumineuse ou la fixation symbiotique libre) ou encore les apports atmosphériques.

La minéralisation de l'azote organique du sol

La minéralisation correspond à la transformation de l'azote organique en azote minéral accessible pour les plantes. En conditions tempérées, la minéralisation brute de l'azote est essentiellement le résultat d'une dégradation biologique de la matière organique du sol réalisée par les macro et surtout micro-organismes du sol (Jarvis et al. 1996). Le processus de minéralisation dépend de divers facteurs biotiques, dont l'activité microbienne, et abiotiques, essentiellement pour le rôle qu'ils jouent sur cette même activité microbienne (Rodrigo et al. 1997; Garnier et al. 2003). La minéralisation est ainsi fortement dépendante de la température du sol (Ellert et Bettany 1992; Kirschbaum 1995; Kirschbaum 2006) : elle augmente de manière exponentielle avec la température au dessus de 0°C. Cette augmentation se poursuit jusqu'à une température optimale et diminue après ce seuil (Ellert et Bettany 1992). Cet optimum est variable selon la famille de micro-organismes considérée mais il semble que celui pour la minéralisation de la matière organique du sol soit situé aux environs de 37°C (Kirschbaum 1995). Une bonne aération du sol est également favorable à la minéralisation. Ainsi, la teneur en eau du sol joue elle aussi un rôle important dans la transformation de l'azote organique puisqu'elle affecte la mobilité des bactéries du sol, mais aussi la diffusion des gaz (dont l'oxygène) et des solutés (Skopp et al. 1990; Paul et al. 2003). Il semble que l'optimum biologique soit compris autour de l'humidité à la capacité au champ (Myers et al. 1982). Enfin, un pH compris entre 6,5 et 8,5 semble être le plus favorable à la minéralisation.

L'azote organique, endogène du sol ou exogène, est dans un premier temps transformé en azote ammoniacal (Nicolardot et al. 1997). Cependant, la forme nitrique est souvent préférée par les plantes. Une autre transformation de l'azote joue un rôle important dans l'alimentation de la plante : la nitrification. Celle-ci est également une oxydation biologique et se déroule en deux étapes :

- Dans un premier temps, l'ammoniac est transformé en nitrites (NO_2^-) par des bactéries du genre Nitrosomonas. On parle de « nitritation ».
- La deuxième étape voit les ions NO_2^- transformés en NO_3^- . C'est la « nitratisation », réalisée par des bactéries spécifiques du genre Nitrobacter.

Cette nitrification ne peut avoir lieu qu'en conditions aérobies puisque les souches responsables de ces transformations ne tolèrent pas l'anoxie. Ainsi, la teneur en eau favorise cette transformation jusqu'à une teneur égale à 80% de la capacité au champ environ, mais la défavorise au dessus du fait de la limitation de l'oxygène dans le sol qu'entraînerait l'augmentation de l'humidité. Les conditions de températures et pH favorables à la nitrification sont sensiblement les mêmes que celles pour la minéralisation.

Si la nitrification est un processus distinct de la minéralisation, les deux processus sont bien souvent confondus sous un même terme de minéralisation. Cette minéralisation ayant besoin des sources d'azote organique que sont les matières organiques et de conditions aérobies, elle a lieu dans les horizons de surface du sol.

Les pertes d'azote minéral du sol

Une fois sous forme minérale, l'azote peut être consommé par la plante, comme nous le verrons plus loin, ou bien perdu par des processus biologiques et physico-chimiques. Cinq processus principaux peuvent entraîner la perte d'azote dans le stock du sol : l'immobilisation, la dénitrification, la volatilisation, la lixiviation et l'érosion (et le ruissellement).

L'immobilisation

Egalement appelé « organisation nette » de l'azote, il s'agit du processus inverse de la minéralisation. Les micro-organismes hétérotrophes du sol consomment ainsi une partie de l'azote minéral du sol, essentiellement la forme ammoniacale, pour leur propre besoin de renouvellement et de croissance (Nicolardot et al. 1997). Il ne s'agit pas d'une perte d'azote pour le système mais d'une indisponibilité temporaire pour les plantes.

La dénitrification

Ce processus consiste en la réduction partielle des NO_3^- en oxyde d'azote (NO et N_2O) puis en azote gazeux (N_2) par des micro-organismes du sol (par exemple *Pseudomonas fluorescens*). Cette transformation a généralement lieu en conditions d'anoxie. Le nitrate est alors utilisé par ces micro-organismes comme source d'oxygène. L'optimum de la dénitrification est observé entre 30 et 35°C et le taux de carbone organique peut en être un facteur limitant (Parry et al. 1999). Delphin et al. (1991) estiment que ce flux est généralement négligeable sous cultures. Pour autant, dans un sol cultivé, les pertes par dénitrification peuvent varier de quelques kg à quelques dizaines de kg par an (Elliott et Jong 1993; Luo et al. 2000). Valé (2006) précise que la dénitrification est négligeable en dehors des conditions proches de la saturation du sol en eau, conditions rarement obtenues en milieu tempéré. Grundmann et Rolston (1987) observent que la dénitrification débute pour une saturation de la porosité du sol de l'ordre de 65%. Outre qu'elle ne concerne que l'azote de l'horizon de surface, Valé (2006) mesure ainsi, dans des conditions proches des nôtres, que le flux de dénitrification n'est significatif que quelques jours après un apport d'eau et lorsque la température du sol est élevée. Il est donc possible de négliger ce flux dans les conditions pluviales qui sont les nôtres, tout au moins pendant l'ensemble du cycle végétatif de la vigne.

La volatilisation

Comme pour la dénitrification, il s'agit d'une perte d'azote du système par voie gazeuse. La volatilisation touche la forme ammoniacale et est un processus purement physico-chimique. Elle touche essentiellement l'azote fourni par fertilisation d'azote sous forme minérale (Egelkraut et al. 2003; Valé 2006). NH_4^+ se transforme simplement en NH_3 (gazeux) selon un équilibre physique régi par la nature du sol. Cette volatilisation est d'autant plus importante que la teneur en eau est faible. Un pH supérieur à 7.5 et une température élevée sont également des facteurs favorisant la volatilisation (Tournebize 2001).

La lixiviation

Elle concerne essentiellement la forme nitrique. En effet, étant de charge négative, comme le sont les argiles et les matières organiques, le NO_3^- n'est quasiment pas retenu par les colloïdes argileux et organiques du sol. Il est donc soumis à la percolation des eaux de drainage dans le profil de sol et sera entraîné en profondeur. Ceci explique que le NO_3^- est souvent responsable des pollutions des nappes (Ju et al. 2006).

L'érosion et le ruissellement

Comme nous l'avons vu, la minéralisation de la matière organique a lieu dans les horizons de surface du sol. En conséquence, le stock d'azote minéral est essentiellement contenu dans les horizons de surface, comme l'essentiel des matières organiques. Ceci explique que le processus d'érosion du sol peut être à l'origine d'une importante perte d'azote minéral. Cet azote minéral est emporté avec les particules de sol et peut même être solubilisé (notamment sous sa forme nitrrique) et entraîné par les eaux de ruissellement. Ballif (1999) estime les pertes d'azote par érosion sont de l'ordre de 5g.kg^{-1} de terre érodée dans un vignoble. Verchot et al. (1997), en zone de piémont, et Gaildraud (1996 ; cité par Tournebize, 2001), dans un bassin versant alsacien, évaluent les pertes par ruissellement à quelques kg, voire dizaines de kg par ha et par an.

La consommation de l'azote par les plantes

Les éléments minéraux dont se nourrissent les plantes sont apportés par la solution du sol. L'entrée des ions NH_4^+ est passive et se fait par l'intermédiaire d'un canal transmembranaire sous l'effet de la différence de potentiels osmotiques créée par l'afflux de protons. L'absorption d'ions NO_3^- se fait contre le gradient électrochimique par l'intermédiaire de protéines de transport et consomme donc de l'énergie (Heller et al. 1997). Suivant les plantes, la forme nitrrique ou la forme ammoniacale sont privilégiées. De par sa charge électrique, le NO_3^- est presque totalement compris dans la solution du sol et est la forme la plus mobile et donc la plus accessible.

Le flux d'absorption est une fonction à la fois des besoins de la plante, et de la disponibilité de l'azote dans le sol. En général, la cinétique d'absorption de l'azote par les racines des plantes varie en fonction de l'espèce et du stade de développement de la plante (Lemaire et Salette 1984b). Elle est nulle au début du cycle d'activité de la plante puis augmente tandis que la plante croît pour être, bien souvent, maximale en pleine période végétative. Elle diminue ensuite dans la phase de maturation du fruit. Salette et Lemaire (1981) ont défini la notion de courbe de dilution de référence pour évoquer la relation qui existe entre teneur critique en N, en dessous de laquelle la production de biomasse est affectée, et biomasse aérienne accumulée dans les organes végétatifs. Ils observent que cette teneur critique en azote diminue systématiquement avec l'augmentation de la biomasse. Il semble que cette relation ne soit quasiment pas modifiée par les conditions pédo-climatiques (Lemaire et Salette 1984a). Ceci laisse donc à penser que l'assimilation de l'azote par un peuplement végétal est avant tout déterminée par sa vitesse de croissance, en absence de contrainte majeure due à la disponibilité de l'azote dans l'environnement racinaire.

1.2.2.2. L'azote : première ressource minérale du sol

Importance physiologique de l'azote pour les végétaux

Chez les plantes supérieures, près de 75% de l'azote est stocké dans la machinerie photosynthétique où cet azote est utile à la production d'enzymes et de protéines (Evans 1983). En conséquence, métabolismes azoté et carboné sont profondément interdépendants et tous facteurs agissant sur l'un, favorablement ou non, a des répercussions sur l'autre (Ferrario et al. 1997). Ainsi, un apport d'azote stimule la photosynthèse à condition que le rayonnement soit suffisant (Foyer et al. 1994). Il favorise également le flux de carbone vers les voies de synthèse des acides aminés, au dépend de la synthèse des glucides (Champigny et al. 1991; Huppe et Turpin 1994). Une privation d'azote provoque en revanche une augmentation de la teneur en sucre des tissus, particulièrement des racines

(Rufty et al. 1988). Ainsi, à long terme, la capacité photosynthétique est fortement dépendante de la nutrition azotée.

Conséquences d'une contrainte azotée

Les conséquences d'une contrainte azotée sont souvent comparées à celles provoquées par une contrainte hydrique. Ceci explique d'ailleurs qu'il soit parfois si difficile de les distinguer.

Steer et Hocking (1983) rapportent que, sur le tournesol, une contrainte azotée entraîne une réduction du nombre de feuilles et de la surface foliaire. Ce phénomène est également observé sur vigne (Robinson 1998). Tolley-Henry et Raper (1986) observent que la croissance des bourgeons et des jeunes feuilles est fortement ralentie dans un milieu pauvre en azote et que la disponibilité en nitrate du milieu pilote la croissance en surface foliaire. Il apparaît donc que la carence azotée provoque une diminution de la surface foliaire produite puis une diminution de l'activité photosynthétique par unité de surface. Très nettement, une carence en nitrate affecte négativement l'efficacité d'utilisation de l'eau (Améziane et al. 1995). Ceci s'expliquerait par l'implication, directe ou non, des NO_3^- dans la régulation de la production d'aquaporines (Limami et Améziane 1997), protéines responsables d'une meilleure circulation de l'eau dans les tissus du végétal.

Tolley-Henry et Raper (1991) constatent que l'allocation des assimilats vers les racines augmente lorsque la disponibilité en NO_3^- du milieu diminue. L'azote a un impact sur la ramification du système racinaire, comme cela a été observé sur blé (Lambers et al. 1982).

Chez de nombreuses espèces, un manque d'azote semble également jouer sur la différenciation des fleurs et la formation des grains ou fruits. Ainsi, un déficit d'absorption d'azote peut, chez le blé, réduire le nombre de grains formés. Cette réduction est variable selon la date et l'intensité du déficit (Jeuffroy et Meynard 1997). Une nutrition azotée limitante chez le pois a pour effet de stopper précocement la floraison et de réduire le nombre de gousses (Jeuffroy et Sebillotte 1997). Une carence azotée provoque également une diminution des productions de bois et de fruits chez les espèces ligneuses. Cependant, une telle carence est plus ou moins tamponnée par l'existence de tissus de réserve. L'accumulation de ces réserves semble d'ailleurs favorisée par les facteurs environnementaux qui inhibent la croissance, et donc la demande en azote. Cette mise en réserve paraît provoquée, soit par des signaux externes comme la longueur des jours, soit par des signaux internes liés à l'équilibre source/puits (Gaudillère 1997).

On peut remarquer enfin qu'une carence azotée de la plante induit parfois une moins grande sensibilité aux parasites et aux attaques cryptogamiques (Chevalier-Gerard et al. 1994; Colbach et al. 1996).

Le partage des ressources azotées du sol pour des cultures associées

Dans le cadre d'une association d'annuelles, la compétition entre les deux espèces pour la ressource azotée dépend de leur enracinement respectif et de la période du pic de consommation de chacune des espèces (Willey 1990).

De nombreuses études ont montré que les associations contenant des légumineuses étaient particulières par rapport à la compétition pour la ressource azotée notamment. En effet, l'azote atmosphérique fixé par la légumineuse enrichit le milieu et peut être minéralisé et servir à l'alimentation azotée de l'espèce associée (Haynes 1980; Stern 1993; Senaratne et al. 1995; Dupraz et al. 1998; Haines et Lee 1999; Hauggaard-Nielsen et al. 2006; Thorsted et al. 2006). On a donc là une facilitation (Hauggaard-Nielsen et Jensen 2005).

Comme nous l'avons déjà vu précédemment, l'association d'une espèce ligneuse à une espèce herbacée permet une complémentarité spatiale dans les zones exploitées par les deux systèmes racinaires (Ong et al. 2002). Cependant, si cette complémentarité spatiale des systèmes racinaires peut permettre de diminuer (surtout dans les sols profonds) une concurrence directe entre les deux espèces pour l'eau (Schroth 1999), elle n'aura que peu d'impact sur la concurrence pour les ressources azotées qui sont généralement limitées aux horizons de surface. Pour autant, en cas de lixiviation de l'azote, le système racinaire plus profond de l'espèce ligneuse devrait lui permettre de consommer les nitrates emportés plus profondément par les eaux de drainage (Van Noordwijk et al. 1996; Schroth 1999).

Comme nous l'avons déjà signalé, les pertes d'azote minéral par érosion et ruissellement peuvent être très importantes. Or, certains auteurs ont montré que la présence de bandes enherbées associées aux cultures diminue très fortement ces pertes. Ainsi, Owino et al. (2006) estiment que, suivant les espèces utilisées pour les bandes enherbées, les pertes en nitrates et ammonium peuvent être diminuées de moitié, dans des systèmes de culture africains très sensibles à cette forme de perte de fertilité.

Dans un système agroforestier, la présence d'une culture intercalaire n'entraîne pas forcément une concurrence néfaste pour la culture pérenne. Ainsi, dans le cadre d'une association de noyers et de céréales non irriguées, une amélioration sensible de l'état de nutrition azotée de l'arbre a pu être observée au cours des 6 premières années (Chiffot et al. 2006). Celle-ci a été à l'origine d'une croissance de l'arbre beaucoup plus importante dans la parcelle agroforestière que dans le témoin forestier.

Cependant, dans une vigne enherbée notamment, le décalage dans le temps des consommations permet de mobiliser les nutriments du sol (dont l'azote) pendant la phase hivernale, et donc d'éviter leur lixiviation (Ryser et Pittet 2002), avant de pouvoir éventuellement les libérer par la suite. De plus, Tournebize (2001) observe dans un vignoble alsacien que la consommation d'eau de l'enherbement, notamment en hiver, diminue jusqu'à 40% le drainage annuel et donc limite indirectement la lixiviation. Cet azote pourrait alors devenir accessible à la vigne. Maigre et Murisier (1992) en Suisse, et Tournebize (2001) dans un vignoble alsacien, observent des pertes en nitrate entre dix et quinze fois supérieures pour une vigne désherbée (quelques dizaines de kg par an) que pour une vigne enherbée (quelques kg par an). Li et al. (2005) observent également une diminution significative de la lixiviation sous une association blé-maïs.

Mazarrino et al (1993) constatent une augmentation sensible de la teneur en matière organique et de l'activité microbienne du sol lorsqu'une culture annuelle (du maïs) est associée à des arbres dans le cadre d'un système agroforestier. Ceci a pour conséquence d'augmenter la minéralisation potentielle du sol et donc l'offre du sol en azote minéral disponible pour les plantes. Jose et al. (2000) évoquent également ce genre de phénomène dans une association agroforestière en climat tempéré. Au sein d'une vigne enherbée, la présence de la culture intercalaire signifie un apport de résidus à la surface de l'inter-rang. Ces résidus entrent ainsi dans le pool de matières organiques du sol et deviennent potentiellement disponibles pour les cultures une fois minéralisés (Morlat 1981).

2. Pour une approche systémique de la vigne enherbée

2.1. Petit point sur l'enherbement du vignoble

2.1.1. L'enherbement : qu'est ce que c'est ?

L'enherbement des vignes consiste à associer une culture intercalaire herbacée à la vigne. Pour cela, un engazonnement est implanté volontairement entre les rangs de vigne,

ou le viticulteur laisse un couvert spontané se développer pour un enherbement dit « naturel ». Le terme « enherbement » est utilisé à la fois pour désigner la pratique d'entretien du sol et pour désigner le couvert lui-même. L'enherbement se définit à la fois par sa nature (spontané ou semé) et par sa durée. Pour cela, on distingue les enherbements dits « temporaires » des enherbements « permanents ». Si les enherbements permanents maintiennent une couverture du sol toute l'année, les enherbements temporaires sont détruits au cours de l'année. On distingue dans cette dernière catégorie l'enherbement hivernal, où le couvert, généralement spontané, est détruit avant le débourrement de la vigne, des autres enherbements temporaires (Laffosse 2001).

2.1.2. Quelle histoire !

Déjà utilisée par les romains, il y a plus de 2000 ans (Dion 1993), la pratique de l'enherbement a été, au cours du 20^e siècle, presque éliminée de la plupart des vignobles. Bien que les effets positifs de ce mode d'entretien aient été longtemps reconnus, l'arrivée des engrais minéraux, la crainte d'une concurrence avec la vigne et le développement du travail du sol à la moitié du 20^e siècle ont fait peu à peu tomber la pratique dans l'oubli. Dans les années 1970, en France, le développement de la non culture et du désherbage chimique a incité les viticulteurs à conserver une vigne « propre ».

C'est dès les années 1950 que la pratique a été de nouveau développée dans certains vignobles européens. C'est d'abord en Autriche et dans les vignobles du centre de l'Europe qu'elle retrouve grâce aux yeux des vigneron, essentiellement pour maintenir la fertilité du vignoble et juguler l'érosion (Klik 1991). En France, l'Alsace s'initie à cette pratique et compte aujourd'hui la surface la plus importante de vignoble enherbé (50 % en 1991) (Laffosse 2001). Des études concernant les effets d'un enherbement ont également été mises en place dans les années 60-70 dans des régions comme le Bordelais ou le Val de Loire. Dans ces régions, l'excès d'eau à certaines périodes engendrait des problèmes de portance, d'érosion hydrique mais aussi une dégradation de la structure du sol et de l'activité biologique du sol et des rendements trop élevés (problème de vigueur excessive) (Soyer et al. 1984; Morlat et al. 1993).

L'enherbement est également très répandu dans certains vignobles du Nouveau Monde (Australie, Chili, Californie...), où l'irrigation est généralement de mise. L'adoption de l'enherbement dans le vignoble méditerranéen a été beaucoup plus lente. En effet, si l'enherbement naturel hivernal est empiriquement pratiqué en Languedoc depuis longtemps déjà, les enherbements plus pérennes sont particulièrement craints par les vigneron. En premier lieu, c'est la peur d'une concurrence pour l'eau trop forte les retient. Ceci est dû au climat particulier de la région avec des précipitations très variables d'une année sur l'autre et surtout très faibles pendant le cycle de la vigne.

Pourtant, et comme dans la plupart des vignobles français, l'enherbement a connu un essor significatif au cours des dernières années, au sein de l'arc méditerranéen. Aujourd'hui, la part de l'enherbement permanent dans le vignoble héraultais a probablement dépassé 5% de la surface viticole (et jusqu'à 30% dans les vallées de l'Orb et de l'Hérault) (Goma-Fortin, comm. pers.), alors qu'elle était encore inférieure à 2% en l'an 2000 (Laffosse 2001). Diverses raisons peuvent expliquer cette augmentation. Pour commencer, la liste des molécules herbicides autorisées a sensiblement diminué au cours des dernières années et le prix des désherbants est devenu rédhibitoire pour beaucoup de viticulteurs. De plus, la prise en compte, chaque jour plus importante, des questions environnementales par la société et la systématisation des analyses des cours d'eau et des réserves phréatiques, ont incité les viticulteurs à changer leurs pratiques et à éliminer le désherbage chimique systématique. Enfin, de nombreuses études expérimentales ont

montré les nombreux atouts de l'enherbement et ont permis de mieux comprendre son fonctionnement.

2.2. Le cas particulier de la vigne enherbée

La vigne enherbée est une association de cultures un peu particulière puisque seule la production de l'une des deux composantes de l'association est valorisée par le viticulteur. Par conséquent, la gestion du couvert vise, en premier lieu, à optimiser la production de la vigne et sa qualité. A ce propos, on peut noter que l'objectif ne sera pas nécessairement de supprimer toute concurrence entre les deux espèces, mais bien de l'optimiser. En effet, l'application d'une contrainte hydrique modérée est indispensable pour l'obtention d'une production viticole de qualité (*Cf Chapitre I -2.2.1.3*). La gestion de la culture intercalaire sera donc, en partie au moins, adaptée à cet objectif.

Vigne et enherbement sont deux espèces au comportement contrasté. Si les deux peuvent être des espèces pérennes, la première est une espèce ligneuse qui a notamment la possibilité de stocker de l'azote dans ses parties pérennes, tandis que la deuxième est de type herbacé. L'enracinement de la vigne explore des horizons plus profonds que ceux que peuvent coloniser les systèmes racinaires des cultures intercalaires généralement utilisées (Morlat et Jacquet 2003; Celette et al. 2005). Cette complémentarité, particulièrement dans un sol profond, permet de limiter fortement la concurrence pour l'eau entre les deux espèces. Ces deux espèces ont également un fonctionnement généralement décalé dans le temps, ce qui induit des compétitions pour les ressources directes mais aussi indirectes (Celette et al. 2005).

Enfin, la vigne enherbée a un comportement agronomique souvent assez différent de ce que l'on peut rencontrer dans les autres associations culturales. En effet, les besoins en azote de la vigne sont relativement faibles, comparés à ceux de nombreuses espèces cultivées, et les sols viticoles sont généralement assez pauvres en azote, tout au moins en région méditerranéenne. De plus, la production de la culture intercalaire est généralement nettement inférieure à ce qu'elle peut être pour une même espèce dans d'autres systèmes de production (fourrager par exemple). En conséquence, les flux d'azote dans ce système sont très faibles. C'est en partie vrai pour les flux d'eau puisque la vigne conduite pour une production viticole de qualité est une culture globalement économe en eau.

2.2.1. La vigne enherbée : croissance et production viticole

La vigne est une plante pérenne ligneuse appartenant à la famille des Vitacées (Galet 1991). Elle est largement répandue dans les zones tempérées et tropicales à travers le monde. Sa capacité de production varie de 30 à parfois plus de 100 ans selon son mode de culture (Champagnol 1984). Généralement, elle est conduite pour ne rentrer en production qu'au bout de trois ans après la plantation. Les premières années sont en effet utilisées pour former la vigne selon la conduite que l'on souhaite adopter et pour permettre à la plante de constituer des réserves dans ses bois et un système racinaire suffisant avant le début de l'exploitation.

En France, 227 variétés de *Vitis vinifera* ont été répertoriées, mais un nombre beaucoup plus restreint est réellement cultivé et utilisé pour la production viticole. D'ailleurs, de nombreuses restrictions existent quant aux variétés pouvant être plantées dans chaque région viticole. Dans la région Languedoc-Roussillon, les cépages traditionnels (Carignan, Aramon...) ont été en grande partie remplacés par des cépages « améliorateurs » (Grenache, Merlot...) au cours des 30 dernières années en conséquence d'une politique volontariste de reconversion vers un vignoble de qualité.

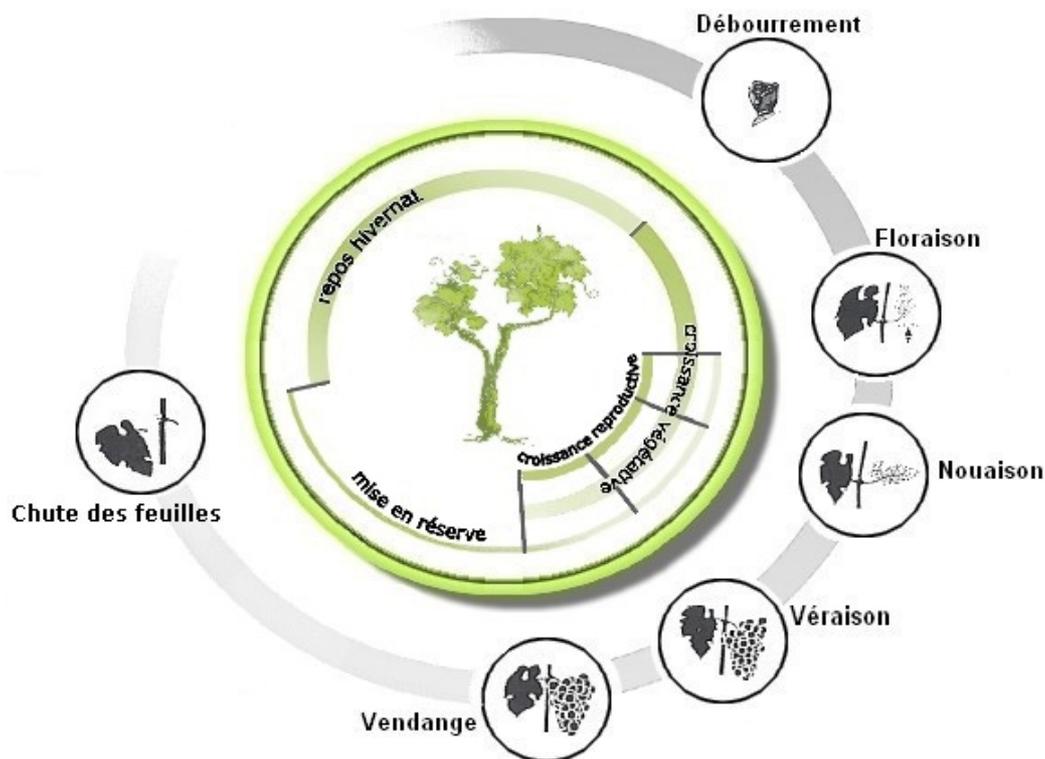


Figure 1.2 – Cycle de développement de la vigne.

Tableau 1.1 – Influence de divers facteurs sur l’organogénèse et le grandissement du rameau de vigne (Champagnol, 1984). La lettre p représente une influence progressive, o – un facteur sans influence et b – une influence brutale de type tout ou rien.

	Organogénèse	Croissance
<i>T°C air</i>	p	p
<i>T°C sol</i>	p	p
<i>Eclairement</i>	o	p
<i>Photopériode</i>	p	p
<i>Eau</i>	b	p
<i>NPK</i>	b	p
<i>Chlorose</i>	b	p

2.2.1.1. Développement et phénologie de la vigne

Le cycle annuel de croissance de la vigne comporte plusieurs stades phénologiques se déroulant sur une période allant de mars à novembre dans l'hémisphère Nord et définis pour la plupart par rapport à l'évolution des baies (*Annexe I*). Grossièrement, il est possible de diviser le cycle de développement de la vigne en trois grandes phases : une phase de repos hivernal, une phase de croissance végétative qui va du débourrement à l'arrêt de croissance (qui dépend de l'environnement de la vigne) et une troisième phase de développement reproducteur qui va de la floraison à la maturité (*Figure 1.2*).

Avant la levée de **dormance**⁴ des bourgeons, la vigne a un besoin en froid d'au moins 7 jours en dessous de 10°C (Pouget 1988). De leur côté, Nashimoto et Fujisaki (1995) mesurent un besoin en froid pour le cépage Kyoho (un hybride interspécifique) cultivé en pot, de 290 h en dessous de 7°C (à comparer avec les 790 h indispensables à la pêche (*Prunus persica* L.) par exemple). Toutes les variétés n'ont pas forcément de besoins en froid (Lavee et May 1997). Globalement, ces besoins en froid existent chez la vigne mais sont limités et le genre *Vitis vinifera* L. est classé dans la catégorie des plantes à besoins en froid moyens (Janick 1986).

Le **débourrement** est possible à partir de 5°C mais il est d'autant plus rapide que la température approche des 30°C (Pouget 1972). Après la levée de la dormance des bourgeons, les feuilles apparaissent et les pousses commencent à se former (débourrement, somme de températures base 10°C de l'ordre de 80°Cj). Des inflorescences apparaissent ensuite à la base des rameaux (**floraison**, somme de températures de l'ordre de 380°Cj (Christensen, 1969 ; cité dans Champagnol, 1984) puis se transforment en fruit (**nouaison**). Au cours de cette même période, les rameaux de vigne commencent généralement à s'aoûter⁵ progressivement. Au fur et à mesure de l'accroissement de la taille des baies, les espaces entre baies diminuent jusqu'à la **fermeture de la grappe**. Le début de la **véraison** marque le commencement de la maturation des fruits (courant juillet, somme de températures de l'ordre de 1100°Cj) et la **maturité** est généralement atteinte entre septembre et octobre (somme de températures de l'ordre de 1500°Cj). Le cycle végétatif de la vigne se termine par la **chute des feuilles** lors des premières gelées et le début du repos hivernal (novembre).

Il a déjà été montré qu'une contrainte hydrique pouvait altérer le développement de la vigne (Matthews et al. 1987). Dans le même ordre d'idée, une fertilisation azotée excessive peut entraîner un retard dans l'arrêt de croissance et dans l'apparition des stades véraison et maturité (Delas 2000).

2.2.1.2. Croissance de la vigne et vigueur végétative

La vigne est une plante dont la croissance est dite « indéterminée » et conserve ainsi une croissance active tant que les conditions du milieu lui sont favorables. La vigne est une liane particulièrement vigoureuse dans les zones naturellement fertiles telles que les bas-fonds et autres plaines productives. Cette grande vigueur se traduit par une croissance des rameaux principaux importante, mais surtout, par une ramification abondante (Smart et al. 1990; Dry et Loveys 1998; Pellegrino 2003). Une grande vigueur implique, notamment, un retard des différents stades phénologiques de la vigne, dont l'arrêt de croissance, la

⁴ **Dormance** : La dormance est l'inaptitude à l'élongation cellulaire entraînant l'impossibilité du débourrement des bourgeons. Durant cette période, il peut tout de même exister une activité mitotique tendant à l'élaboration d'ébauches florales ou foliaires.

⁵ **Aoûtement** : Lignification des rameaux encore herbacés ou verts qui deviennent alors du bois. Ceci correspond bien souvent à leur arrêt de croissance. Ce phénomène se produit généralement au mois d'Août, d'où le terme d'aoûtement.

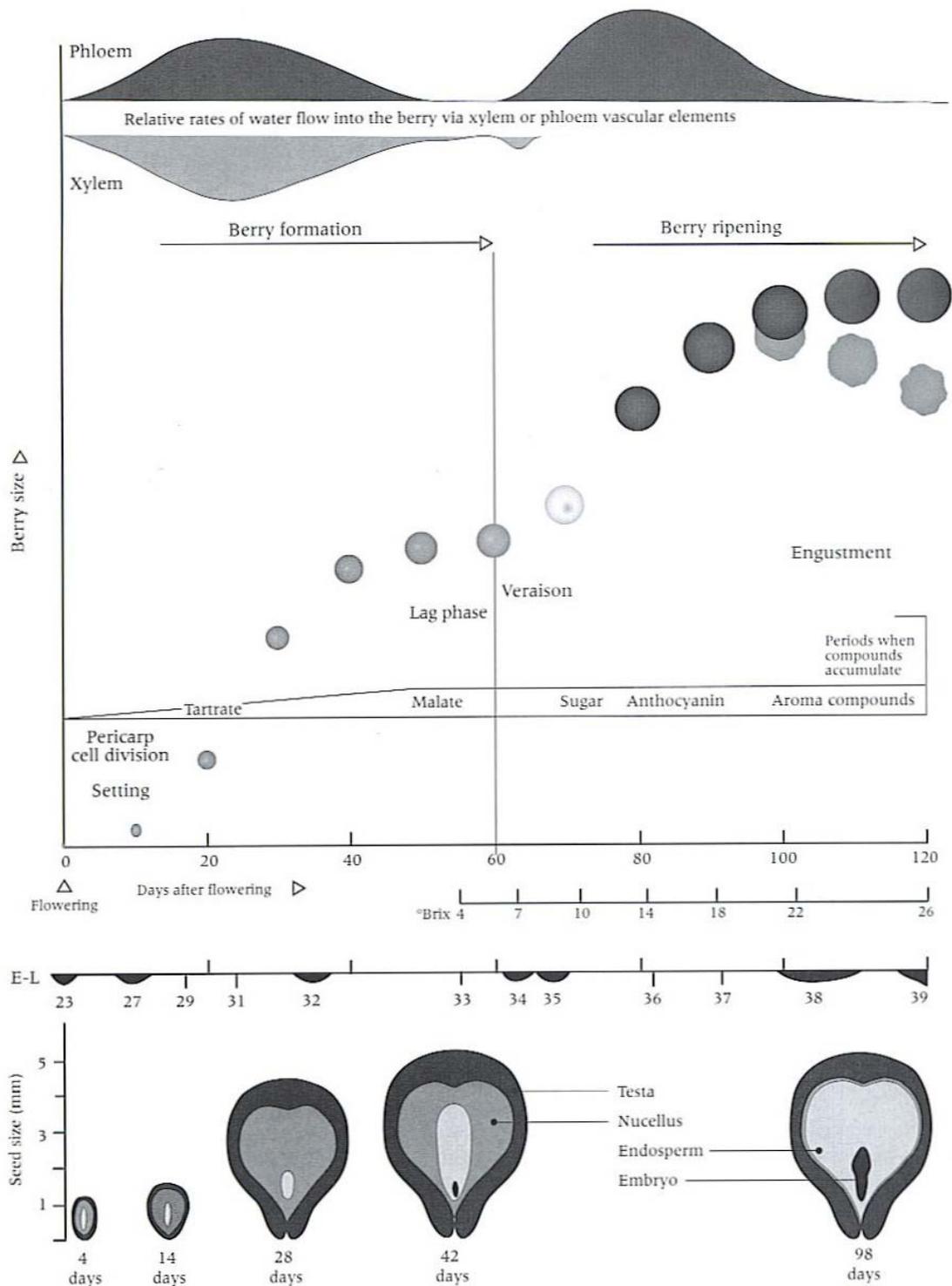


Figure 1.3 – Evolution selon une double sigmoïde de la taille de la baie au cours du temps (panneau central) (Coombe et McCarthy, 2000). Trois axes des X sont représentés avec le nombre de jours après floraison, le °brix approximatif du jus de la baie et les stades de développement de la vigne d’après la grille proposée par Eichorn et Lorentz (*Annexe 1*). Sont également représentés les principaux éléments synthétisés dans la baie et les taux d’apport d’eau respectifs par le xylème et le phloème. Le panneau du bas représente l’évolution de l’anatomie des graines en coupe longitudinale.

véraison et la maturité du raisin, ce retard étant très défavorable à la qualité de la production.

Champagnol (1984) a défini l'influence des différents facteurs abiotiques sur l'organogénèse et le grandissement des rameaux de vigne (*Tableau 1.1*). On observe dans ce tableau que tous les facteurs de l'environnement ont une influence progressive sur la croissance en longueur des rameaux de vigne, tandis que des seuils existent pour certains dans le processus de mise en place des organes. Dry et Loveys (1998) identifient également certains facteurs pouvant agir sur la vigueur végétative de la plante (porte-greffe, alimentation hydrique...).

Pouget (1968, cité par Champagnol, 1984) définit un seuil de croissance apparente⁶ de 11°C pour la variété *Vitis vinifera* cv. Ugni blanc. Nigond (1957, cité par Champagnol, 1984) sur Aramon et Buttrose (1969) sur Muscat d'Alexandrie observent un seuil de 10°C. Ce même seuil est généralement considéré comme représentatif des différentes variétés de vigne.

En général, la capacité maximale de croissance et de production de la vigne est atteinte pour une vigne dont l'âge est compris entre 7 et 15 ans (Champagnol 1984). Le système racinaire de la vigne a alors exploré un volume de sol suffisant pour subvenir aux besoins de la plante. Par la suite, la vigueur de la vigne a tendance à diminuer.

Les réserves carbonées pérennes de la plante jouent également un rôle important dans le métabolisme carboné de la vigne. Ces réserves, sous forme de sucres présents dans les structures pérennes de la vigne, varient en cours de saison tandis que la plante les mobilise pour sa croissance, lorsque le carbone fixé par la photosynthèse devient insuffisant pour satisfaire les besoins instantanés de la plante. Keller et al. (1995) observent que la translocation de carbone vers ces organes de réserve est fonctionnelle à partir du stade 10 feuilles et accélère fortement, 15 jours plus tard, autour de la floraison. A partir de ce moment là, la surface foliaire établie permet de satisfaire les besoins de carbone pour la croissance des pousses de l'année et les réserves carbonées deviennent un puit en concurrence avec les feuilles. Les réserves se reforment alors rapidement au cours du cycle de la vigne. Ainsi, il apparaît que les variations saisonnières de réserves carbonées du tronc sont relativement faibles. Elles sont en revanche plus importantes dans le système racinaire pérenne (Castelan-Estrada 2001).

2.2.1.3. Elaboration du rendement, développement et maturation des baies de raisin

Coombe (1992) et Coombe et McCarthy (2000) ont montré que la croissance de la baie de raisin se déroule selon deux sigmoïdes successives (*Figure 1.3*). La première phase de développement de la baie consiste en des divisions cellulaires, suivies par une augmentation de la taille de ces cellules. Cette division cellulaire est la plus intense environ 8 jours après la floraison et dure entre 30 et 40 jours (Jona et Botta, 1998 ; cités dans Ollat, 2002). Au cours de cette première phase, la structure de la baie et les graines se forment. De plus, de nombreux acides organiques sont produits et stockés. A la fin de cette période, soit environ 50 jours après la floraison, un premier ralentissement de la croissance de la baie apparaît. Les baies sont alors encore au stade « herbacé », vertes et dures. Elles ont peu grossi et l'acide malique est le principal acide organique accumulé. Entre les deux phases, la croissance en volume de la baie connaît un palier qui correspond à la véraison. Les baies commencent à changer de couleur et deviennent translucides pour les cépages blancs ou prennent des couleurs rosées à rouges pour les cépages rouges. Le début de la

⁶ **Seuil de croissance apparente** : il est défini par Pouget (1968) comme la température à partir de laquelle la croissance devient visible. Il est situé arbitrairement à la température au dessous de laquelle des bourgeons non-dormants nécessitent plus de 50 jours pour débourrer.

deuxième phase, une phase de maturation, est également marqué par un ramollissement de la baie (Coombe et Bishop 1980) qui serait la conséquence de la perte de certaines parois cellulaires internes (Lang et Düring 1991). La croissance en volume de la baie reprend alors selon la deuxième sigmoïde et c'est au début de cette phase que la croissance en volume est la plus rapide (Ollat et al. 2002). Au cours de cette phase, les baies accumulent des sucres (fructose et glucose pour l'essentiel) et des composés phénoliques (dont les anthocyanes qui donnent leur couleur aux grappes des cépages rouges). Les concentrations en acides organiques diminuent dans la baie, principalement par un phénomène de dilution. Les composés aromatiques ne s'accumulent qu'en toute fin de croissance, au moment du deuxième palier (Coombe et McCarthy 1997). La taille potentielle de la baie est un facteur génétique. Sa croissance réelle est ensuite affectée par de nombreux facteurs comme le nombre de baies de la grappe (Ollat et al. 2002), la nutrition carbonée (Kaps et Cahoon 1992), la température (Hale et Buttrose 1974), la lumière (Smart et Sinclair 1976) et, bien sûr, l'alimentation hydrique (Ojeda et al. 2001). Ainsi, un déficit hydrique affecte la taille de la baie quel que soit le moment d'apparition. Pour autant, il semble que ce soit la période allant de la floraison à la véraison qui soit la plus sensible à un stress hydrique (Ojeda et al. 2001; Ojeda et al. 2002). La période de la floraison est cruciale puisqu'une situation limitante pour la photosynthèse peut avoir un impact important sur l'allocation de carbone vers les inflorescences, celles-ci étant des puits de basse priorité (Keller et al. 1995), pouvant entraîner un défaut de nouaison. Une telle contrainte n'affecte pas la division des cellules mais plutôt leur grandissement. Il semble donc que la taille finale de la baie soit grandement définie dès la véraison (Ollat et al. 2002).

Première étape dans l'élaboration du rendement, la floraison est tributaire de la vigueur de la plante et des conditions environnementales au moment de l'apparition du stade phénologique (Tesci 2001), mais aussi de l'année précédente puisque le nombre d'inflorescences de l'année est déterminé au printemps de l'année antérieure (Rives 2000; Pearce et Coombe 2005). Le principal facteur environnemental affectant la floraison est la température de l'air (Williams et al. 1985). Pour autant, le nombre d'inflorescences et de fleurs semblent surtout être lié à la vigueur de la plante et à des caractéristiques génétiques. Ceci signifie que les facteurs affectant cette vigueur ont également un impact sur ces éléments (Costantini et al. 1996). Les facteurs environnementaux et génétiques jouent un rôle essentiel au cours de la mise à fruits et du développement de ceux-ci. Ainsi le taux de nouaison, qui correspond au nombre de baies réellement formées sur la grappe par rapport au nombre de fleurs, est fonction du génotype mais aussi des conditions environnementales (humidité et alimentation minérale notamment) (Hilbert 2002). Une carence carbonée ou une compétition de nature trophique ou hormonale peuvent induire un faible taux de nouaison (coulure) (Carbonneau et Ollat 1991; Lebon et al. 2004). Il semble également qu'une fertilisation azotée excessive ait les mêmes conséquences (Delas et Pouget 1984). Le rapport surface foliaire/masse de fruit influence également le développement et la composition des baies (Jackson et Lombard 1993; Murisier et Zufferey 1997) et une valeur de $1,5 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ de fruit est décrite comme un rapport optimal (Smart et al. 1990).

Un arrêt précoce de la croissance végétative pendant la période de maturation du raisin permet de favoriser l'alimentation carbonée de la baie. Il améliore également le potentiel œnologique du raisin en favorisant un microclimat lumineux de la grappe plus propice à la maturation (Smart 1987; Smart et al. 1990). Un déficit hydrique pré-véraison limite la taille des baies (Hardie et Considine, 1976 ; cité par Van Leeuwen et al, 2001) et permet ainsi d'atteindre plus facilement des teneurs optimales des baies en sucre et en anthocyanes (Matthews et Anderson 1988; Van Leeuwen et Seguin 1994a). Une limitation de l'alimentation en eau de la vigne réduit la teneur en acide malique des baies (Van Leeuwen

et Seguin 1994a). La régulation de l'alimentation hydrique de la vigne à un niveau limitant optimal est donc un important facteur de qualité.

Delas (2000) observe qu'un excès d'azote entraîne un retard de l'arrêt de croissance des sarments qui se fait au détriment de la synthèse des composés phénoliques de la baie et donc de la qualité de la production. Ainsi, si une alimentation azotée suffisante doit être apportée à la vigne pour lui permettre de croître et d'avoir une surface foliaire nécessaire à l'assimilation du carbone, une trop forte disponibilité de l'azote a des conséquences nuisibles à la production de raisins de qualité. Comme pour l'alimentation hydrique, une bonne régulation de l'alimentation azotée est donc indispensable chez la vigne.

2.2.1.4. Enherbement du vignoble et production de raisin de cuve de qualité

Delas (1996) note que l'un des problèmes de la viticulture est, aujourd'hui, la trop grande vigueur végétative des vignes. Sélection génétique et gestion du vignoble ont pu conduire à des vignobles trop luxuriants. Or, de nombreuses études ont montré qu'enherber un vignoble a pour principal impact de diminuer significativement la vigueur de la vigne mais aussi le rendement (Soyer et al. 1984; Rozier et al. 1989; Maigre et Murisier 1992; Morlat et al. 1993; Moulis 1994; Masson et Bertoni 1996; Dry et Loveys 1998; Rodriguez-Lovelle et al. 2000a). Cet effet semble toutefois s'atténuer après un certain nombre d'années de présence de l'enherbement (Morlat 1987; Moulis 1994). La concurrence pour l'eau a souvent été mise en avant pour expliquer cette diminution de vigueur et de production (Morlat 1987) mais la compétition pour les ressources minérales du sol est aujourd'hui considérée avec attention (Chantelot et al. 2004). Si une diminution trop importante du rendement peut être problématique pour le viticulteur, eu égard à la perte économique qu'elle représente, celle affectant la vigueur est perçue favorablement tant qu'elle reste raisonnable. En effet, une vigueur plus faible signifie en premier lieu, une diminution des travaux sur le végétal (rognages, ébourgeonnages, épamprages, etc.). Or, chacun de ces travaux a un coût en terme de travail. De plus, cette moindre vigueur a un impact sur le microclimat au sein du couvert, en augmentant la porosité du feuillage et son aération. Cela a pour conséquence de diminuer la sensibilité de la plante aux attaques cryptogamiques (Lebon 1993; Morlat et al. 1993; Pieri et al. 2001b; Zahavi et al. 2001) et d'améliorer la qualité du raisin (Rodriguez-Lovelle et al. 2000a; Hilbert 2002). La contrainte hydrique imposée à la vigne, tant qu'elle reste modérée, induit également un effet très favorable sur la qualité de la récolte (Pellegrino et al. 2005). En effet, on assiste généralement à une augmentation du degré alcoolique, une diminution de l'acidité, voire un enrichissement en certains polyphénols comme les anthocyanes qui donnent leur couleur aux vins rouges (Le Goff-Guillou et al. 2000; Hilbert 2002). Enfin, la compétition pour l'azote diminue souvent la teneur en azote des tissus de la vigne et nuit ainsi aux attaques de pourriture grise par exemple (*Botrytis cinerea*) (Maigre et Murisier 1992).

La couverture de l'inter-rang améliore la portance du sol, facilite ainsi le passage des engins agricoles après une pluie et diminue la dégradation du sol qu'ils entraînent parfois (Cock 1985). L'adhérence est par contre diminuée, ce qui peut être ennuyeux dans le cadre de vignobles à forte pente. L'impact environnemental de la culture de la vigne est encore amoindri par la moindre utilisation d'herbicides, voire de fongicides.

Pour finir, un enherbement correctement géré permet de contrôler le développement d'adventices (Moulis et Guillerme 1994; Porqueddu et al. 2000; Singh et al. 2007).

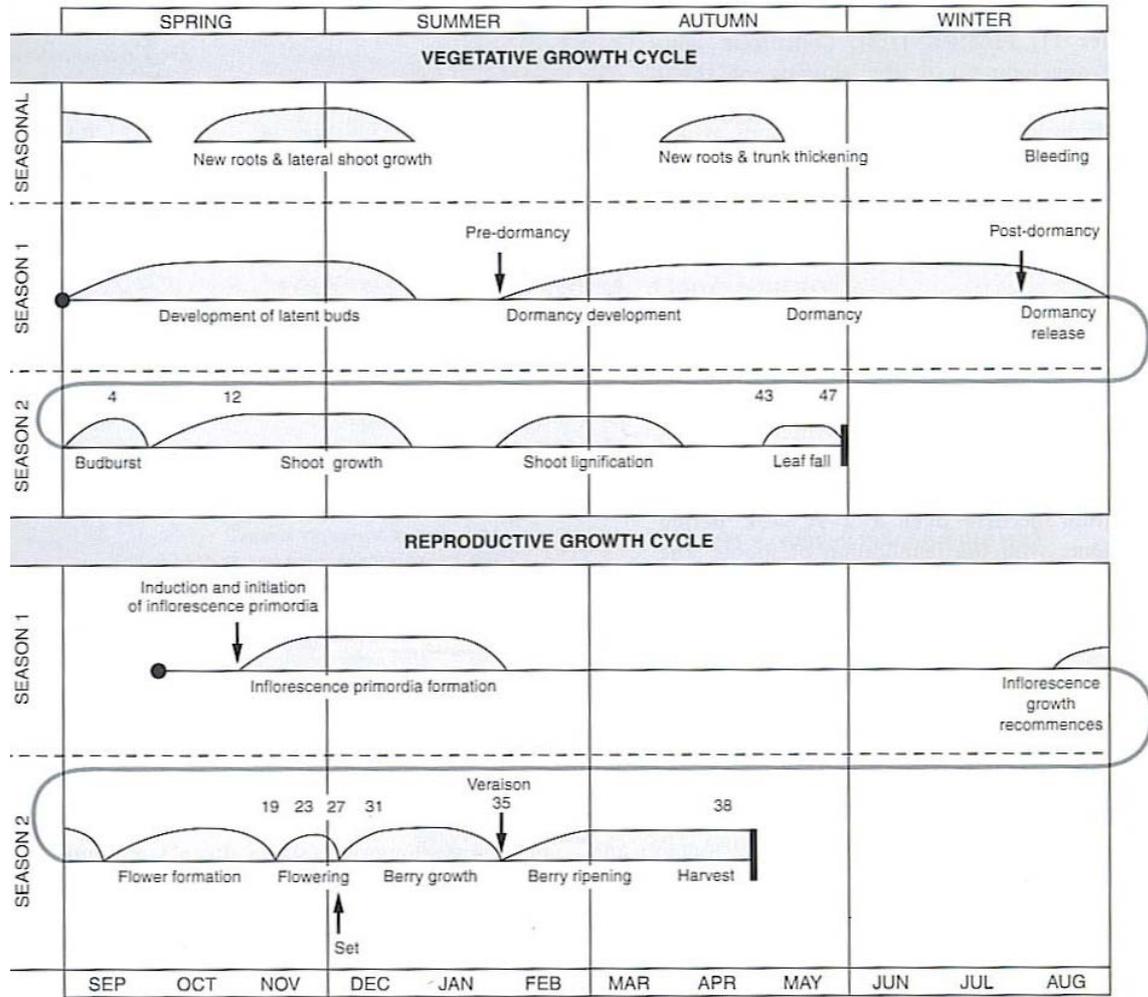


Figure 1.4 – Cycle de développement végétatif et reproductif de la vigne. Les nombres représentent les principaux stades de développement de la vigne évalués avec l'échelle de Eichorn et Lorentz modifiée (*Annexe 1*).

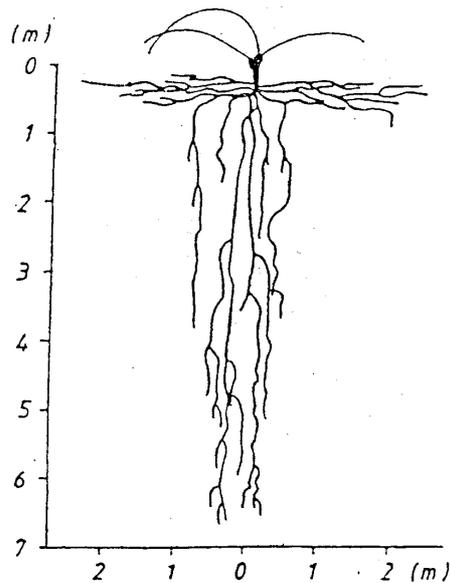


Figure 1.5 – Système racinaire de la vigne schématisé par Ionescu et al (1978).

2.2.2. La vigne enherbée et l'eau

2.2.2.1. La vigne : une culture bien adaptée à la sécheresse

Si la culture de la vigne se répand si rapidement dans le bassin méditerranéen, c'est parce qu'elle fait preuve d'une grande capacité d'adaptation à un environnement aride. On peut cependant noter que cette capacité reste variable en fonction de l'espèce considérée dans le genre *Vitis* (Padgett-Johnson et al. 2003).

Un système racinaire qui a l'âme d'un grand explorateur

La vigne est une culture pérenne avec un système racinaire qui lui sert à la fois de surface d'échange avec le sol et de système de transport. Le système racinaire présente une première période de croissance au printemps qui correspond plus ou moins à celle des rameaux. Elle débute lorsque les températures du sol dépassent 10°C environ et se termine lorsque l'humidité du sol devient insuffisante. Une deuxième période de croissance est possible à l'automne, après la vendange, lorsque le sol est réhumecté et que la vigne n'est pas encore en dormance (*Figure 1.4*) (Pearce et Coombe 2005). Le pic de croissance racinaire est observé entre la nouaison et le stade petit pois sur une vigne de variété « Concord » irriguée (Comas et al. 2005). Dans ce cadre là, l'essentiel des racines est produit dans les horizons de surface qui sont les plus affectés par l'irrigation. En ce sens, la vigne fait donc preuve d'une plasticité racinaire importante.

Lors de la phase de consommation d'eau, la ressource est généralement limitante (Tardieu 1988; Pagès et al. 1997) et le transfert de l'eau vers les racines dépend essentiellement de la localisation du système racinaire dans l'espace souterrain (Tardieu et Katerji 1991; Tardieu et al. 1992). En cela, la vigne est bien adaptée à des milieux contraignants, puisque son système racinaire est capable de coloniser un volume de sol très important, tant verticalement que latéralement. L'installation de ce système racinaire dépend de différents éléments que sont les facteurs pédologiques, la nature du porte-greffe (Swanepoel et Southey 1989), de la variété et de la conduite de la vigne. Ainsi, l'implantation d'un enherbement sur l'inter-rang entraîne un approfondissement du système racinaire de la vigne (Morlat 1981; Morlat et al. 1984).

Cependant, diverses études montrent que les conditions pédologiques expliquent la plus grande part de la distribution du système racinaire (Ionescu et al. 1978; Champagnol 1984; Morlat et Jacquet 1993; Morlat et Jacquet 2003).

Champagnol (1984) avance que le système racinaire de la vigne peut atteindre des profondeurs de l'ordre de 3 m en l'absence d'obstacles infranchissables. Seguin (1972) observe des racines de vigne à 7 m de profondeur sur des terrasses alluviales tandis que Ionescu et al. (1978) en observent jusqu'à 11 m de profondeur. Carbonneau (1984) montre tout de même qu'un enrichissement de la solution du sol en surface concentre le système racinaire de la vigne dans cette zone. Pour autant, les racines de vigne explorent généralement un volume de sol important et le système racinaire de la vigne se sent donc l'âme d'un grand explorateur.

Ceci peut expliquer en partie la grande résistance à la sécheresse de la vigne mais complique également fortement l'estimation du stock d'eau accessible pour la vigne (Morlat 1981). Pour autant, Champagnol (1984) soutient que l'examen du premier mètre de sol suffit pour connaître la majeure partie du système racinaire dans un milieu méditerranéen. De nombreuses expérimentations se contentent d'observer les systèmes racinaires sur une profondeur limitée à 1-1,2 m. Diverses études témoignent en effet d'une colonisation préférentielle des horizons de sol compris entre 30 et 70 cm de profondeur (Smart et Coombe 1983; Champagnol 1984; Morlat et Jacquet 1993; Stevens et Nicholas 1994). Beaucoup considèrent que les racines profondes, bien qu'elles soient peu



Figure 1.6a – Représentation artistique des systèmes racinaires de différents types d'espèces herbacées : de type herbe haute, herbe courte, à rhizome et légumineuse de saison chaude (Craine et al., 2003). Les systèmes racinaires sont représentés jusqu'à une profondeur de 1 m environ.

Festuca arundinacea

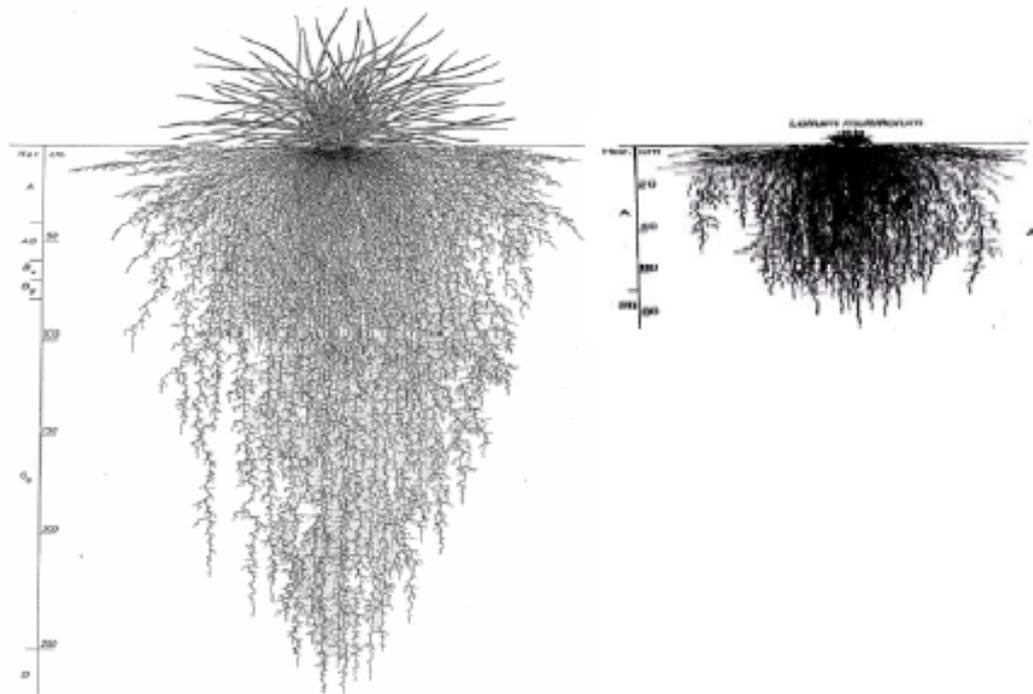


Figure 1.6b – Représentation du système racinaire de la fétuque élevée et du ray-grass d'Italie (Kutschera, 1960 ; cité par gonzales-Dugo, 2005).

nombreuses, contribuent grandement à la survie de la vigne en période de forte contrainte hydrique (Smart et Coombe 1983; Champagnol 1984; Morlat et al. 1992; Stevens et Nicholas 1994).

La répartition horizontale des racines de vigne dépend, notamment, de la densité de plantation de la vigne, mais aussi de la présence ou non d'un enherbement sur l'inter-rang. Ainsi, dans le cas d'un vignoble desherbé, le système racinaire de la vigne se développe selon le schéma présenté par Ionescu et al. (1978) (*Figure 1.5*).

Une telle représentation suggère que les différences entre rang et inter-rang sont minimales jusqu'à une certaine profondeur. Pourtant Branas et Vergnes (cités dans Trambouze, 1996) observent une densité racinaire plus importante sous le rang que sous l'inter-rang (entre 0 et 1,25 m) : pour une densité de plantation supérieure à 6000 pieds.ha⁻¹ (3 x 0,5 m), les auteurs ont observé trois fois plus de racines sous le rang. Lorsque la densité de plantation augmente (3 x 2 m), la proportion de racines sous le rang tend à augmenter (80% du nombre de racines sous le rang). Stevens et Nicholas (1994) observent plus de racines sous l'inter-rang que sous le rang pour une densité de plantation proche (3,1 x 2,2 m). Cette différence entre rang et inter-rang est en revanche fortement accentuée en présence d'un enherbement (Morlat et al. 1984; Morlat et Jacquet 2003; Celette et al. 2005). Ceci s'explique par la compétition entre les deux systèmes racinaires. C'est pourquoi, ces différences entre rang et inter-rang diminuent vers les horizons plus profonds où l'enracinement de la culture intercalaire n'arrive pas. En effet, l'enracinement des enherbements est généralement plus dense mais également plus superficiel que celui de la vigne (*Figure 1.6a*). Ainsi, Kutschera (1960, cité par Gonzalez Dugo, 2005) observe un système racinaire de la fétuque élevée jusqu'à une profondeur de 1,5 à 2 m (*Figure 1.6b*).

Ces différences de densités racinaires observées entre le rang et l'inter-rang conduisent à des différences de prélèvements d'eau. Trambouze (1996) observe ainsi des différences significatives entre rang et inter-rang mais il semble que ces différences soient essentiellement liées à une profondeur d'extraction de l'eau généralement plus grande sous le rang. Ceci va d'ailleurs dans le sens de la répartition du système racinaire proposée par Ionescu et al. (1978). Cependant, Trambouze (1996) précise que ces différences entre rang et inter-rang peuvent être très variables au sein d'une même parcelle.

Si le système racinaire de la vigne est bien adapté aux conditions limitantes de par sa répartition dans l'espace, on peut noter qu'il n'est pas forcément bien adapté à une compétition « frontale » avec une autre espèce dans le cas où ces deux espèces coloniseraient les mêmes zones. En effet, la densité de colonisation racinaire de la vigne est faible par rapport à la plupart des autres espèces (Smart et Coombe 1983). Ainsi, diverses observations au vignoble permettent d'évaluer les densités de longueur racinaire de la vigne à des valeurs comprises entre 0,01 et 0,03 cm.cm³ de sol dans des conditions édaphiques favorables (Ionescu et al. 1978; Smart et Coombe 1983; Champagnol 1984; Archer et Strauss 1985). Stevens et Nicholas (1994) mesurent des densités sensiblement plus élevées (entre 0,1 et 0,2 cm.cm³). Cette variabilité peut s'expliquer notamment par la capacité à distinguer des racines plus ou moins fines et à les mesurer. Pour autant, ces valeurs restent très en dessous de la plupart des autres espèces. A titre de comparaison, le pommier (Smart et Coombe 1983) présente des densités racinaires sensiblement identiques mais autant le poirier (0,1 à 0,6 cm.cm³) (Smart et Coombe 1983), le coton (1,5 à 2,5 cm.cm³) (Taylor et Klepper 1974), le soja (1 à 3 cm.cm³) (Reicosky et Richie 1976) que le maïs (1 à 3 cm.cm³) (Grimes et al. 1975) par exemple, présentent des densités très supérieures.

Une culture économe de son eau

Outre que la culture de la vigne pour la production de vin de qualité nécessite une limitation raisonnée de l'alimentation hydrique de la vigne, la culture de la vigne est relativement économe en eau du fait de particularités de l'espèce.

On distingue deux comportements distincts face à une contrainte hydrique naissante. Un premier groupe d'espèces est caractérisé par une stratégie « pessimiste » et ferme très tôt ses stomates. Ces espèces limitent ainsi l'assimilation de carbone et donc leur croissance mais régulent par la même occasion leur besoin en eau et l'épuisement des ressources du sol. Cette stratégie est qualifiée d'« isohydrique » (Tardieu et Simonneau 1998). Un deuxième groupe d'espèces régule moins précocement l'ouverture de ses stomates. Ainsi, sa croissance n'est pas ralentie mais ses besoins continuent à augmenter au risque d'épuiser les ressources. On parle de comportement « anisohydrique ».

La vigne est généralement considérée comme ayant un comportement isohydrique. Elle réagit donc d'autant plus rapidement à toute contrainte hydrique afin de maintenir un niveau de potentiel hydrique dans ses tissus le plus stable possible (Smart et Coombe 1983). Elle possède une WUE élevée (Jones 1983).

Les cultivars d'une même espèce, notamment chez la vigne, peuvent présenter des comportements différents (Winkel et Rambal 1990; Schultz 2003). Ainsi, Schultz (2003) observe que le cépage Syrah, originaire du nord de la Vallée du Rhône, a un comportement plutôt anisohydrique tandis que le Grenache, typique de la zone méditerranéenne, a un comportement quasi isohydrique. On peut noter que le cépage étudié ici, l'Aranel, est issu d'un croisement entre le Grenache gris et le Saint Pierre Doré. On peut donc attendre de sa part un comportement de type isohydrique. La différence entre les cépages présentant un comportement isohydrique ou anisohydrique semble être liée au seuil de déclenchement de la régulation stomatique. Ainsi, les variétés isohydriques déclenchent une fermeture de leurs stomates à un potentiel hydrique foliaire moins négatif (Schultz 2003) et la résistance stomatique résiduelle est faible (Durand, comm. pers.).

En conclusion, la vigne est une culture généralement économe de son eau. Ainsi, Tournebize (2001) estime la transpiration d'une vigne alsacienne à environ 350 mm.an^{-1} . Ceci correspond à une transpiration journalière qui oscille, selon les jours, entre 1 et $4,2 \text{ mm.jour}^{-1}$. Pour leur part, Trambouze et al. (1998) mesurent une transpiration journalière de la vigne comprise entre $1,8$ et $3,5 \text{ mm.jour}^{-1}$ dans une vigne méditerranéenne. En revanche, Droogers (2000) estime une transpiration cumulée sur l'année de près de 750 mm dans le cas d'une vigne irriguée (370 mm pour un champ de coton et plus de 800 mm pour un verger).

2.2.2.2. Ce que change la présence de l'enherbement au fonctionnement hydrique du système

Les espèces herbacées utilisées pour la mise en herbe des vignobles ne connaissent généralement pas de dormance hivernale, contrairement à la vigne. En conséquence, cet enherbement débute sa croissance, et les consommations des ressources du sol qui s'y rapportent, bien avant la vigne. Ce décalage dans le cycle des deux espèces associées joue un rôle important dans la complémentarité spatiale des deux systèmes racinaires décrite précédemment puisqu'il incite la vigne à délaisser le volume de sol compris sous l'inter-rang enherbé et à exploiter plus fortement le sol sous le rang et en profondeur (Morlat et Jacquet 2003; Celette et al. 2005). Cette redistribution du système racinaire de l'une des deux espèces a déjà été observée par Miller (1986) et a été qualifiée de « croissance compensatoire ».

Le vignoble, et cela reste vrai pour un vignoble enherbé, a la particularité d'être un couvert discontinu qui laisse une part importante du sol nu. En conséquence, l'évaporation

du sol nu peut représenter jusqu'aux $\frac{3}{4}$ de l'évapotranspiration totale du vignoble (Lascano et al. 1992; Heilman et al. 1994). Ceci rend complexe sa modélisation et notamment l'estimation des consommations en eau du couvert végétal. Pour autant, associer la vigne à une autre culture permet de fortement augmenter le taux de couverture du sol, comme c'est le cas également dans les systèmes agroforestiers. Ceci a notamment pour conséquence de diminuer fortement l'évaporation du sol, notamment lorsque la culture intercalaire n'est plus en activité et à l'état de mulch (Kinama et al. 2005).

L'enherbement du vignoble contribue à réduire le ruissellement et l'érosion (Klik et al. 1998; Battany et Grismer 2000) qui peuvent être sévères dans une région de vignobles (Le Bissonais et al. 2001). La culture intercalaire diminue ainsi fortement l'impact environnemental de la culture de la vigne, notamment en limitant la pollution des cours d'eau par des matières en suspension et des pesticides entraînés lors du ruissellement (Louchart et al. 2001). En fait, elle diminue la force de l'impact des pluies à la surface du sol (Stocking 1988) et améliore la structure de celui-ci (Ballif 1999). Ceci augmente l'infiltrabilité du sol et la capacité de rétention du sol (Leonard et Andrieux 1998; Wassenaar et al. 2005). Cette meilleure infiltration améliore ainsi la recharge hivernale du sol et limite notamment la concurrence entre vigne et herbe pour la ressource en eau (Celette et al. 2005). De plus, l'augmentation de la teneur en matières organiques observée à moyen terme (Morlat 1981) et l'amélioration de la structure augmentent également la capacité de rétention du sol (Tournebize 2001).

Pour autant, la principale conséquence de la présence de l'enherbement sur le fonctionnement hydrique du vignoble réside dans l'assèchement de l'inter-rang. Celui-ci est plus rapide et intense que dans le cadre d'une vigne désherbée (Celette et al. 2005). Cet assèchement induit par conséquent une contrainte hydrique subie par la vigne généralement plus importante.

2.2.2.3. Quels indicateurs pour évaluer le niveau de contrainte hydrique subie par la vigne ?

De nombreuses techniques ont été développées et utilisées pour déterminer le statut hydrique de la vigne. Les plus anciennes sont basées sur la mesure de la quantité d'eau du sol (par gravimétrie ou humidimètre à neutrons notamment) ou de sa disponibilité pour la plante au travers du potentiel hydrique du sol (Ψ_{sol})(tensiométrie). Une autre approche consiste en l'évaluation de l'état hydrique de la plante elle-même par l'intermédiaire d'indicateurs physiologiques. Ces indicateurs sont nombreux et leur utilisation en viticulture très répandue. Nous pouvons notamment citer le potentiel hydrique foliaire (Ψ_f) qui se décline notamment en potentiel hydrique foliaire de base (Ψ_b), potentiel hydrique foliaire minimum ou au midi solaire (Ψ_m) et potentiel hydrique de tige (Ψ_{tige})(Scholander 1965; Chone et al. 2001), le potentiel hydrique du fruit (Gelly et al. 2004), la mesure de la résistance stomatique de la feuille (R_s)(Medrano et al. 2002), la mesure du débit de sève (Valancogne et Nasr 1989; Lascano et al. 1992), le rapport isotopique du carbone des produits primaires de la photosynthèse de la vigne ($\Delta^{13}\text{C}$)(Van Leeuwen et al. 2001; Gaudillère et al. 2002) ou encore le suivi de micro-variations du diamètre de certains organes de la vigne (Van Leeuwen et al. 2000b; Medrano et al. 2003). D'autres indicateurs enfin font plutôt intervenir des paramètres méso ou micro-climatiques. C'est notamment le cas du Crop Water Stress Index (CWSI), déterminé à partir du différentiel de température entre l'air et la surface de la feuille (Riou et Lebon 2000) ou encore de la fraction de l'eau du sol transpirable par la plante (FTSW⁷) déterminées au travers d'un bilan hydrique théorique (Lebon et al. 2003).

⁷ **FTSW** : Fraction of Transpirable Soil Water en anglais

La plupart de ces techniques nécessitent un équipement matériel important (humidimètre à neutrons, chambre à pression, dispositif de mesure du flux de sève...) difficile à mettre en œuvre. Les tensiomètres ont une gamme de fonctionnement limitée et ne permettent pas de mesurer l'ensemble de la gamme de déficits hydriques que peut rencontrer la vigne. Les indicateurs de fonctionnement physiologique de la plante permettent d'avoir une caractérisation précise de l'état hydrique de la plante à un moment donné mais il est difficile d'extrapoler l'état hydrique de la plante sur l'ensemble du cycle de la culture. Le bilan hydrique théorique de la vigne nécessite une bonne connaissance de la réserve en eau du sol en début de saison et des flux du bilan au cours de la saison. Ceci s'avère difficile en viticulture du fait de l'enracinement de la vigne souvent profond et hétérogène (Seguin 1972; Smart et Coombe 1983; Champagnol 1984). De plus, en climat méditerranéen, l'hypothèse souvent retenue dans les modèles selon laquelle le stock d'eau du sol est rechargé en début de cycle est parfois fautive du fait d'une pluviométrie irrégulière et d'un ruissellement souvent important. En conclusion, la combinaison de plusieurs indicateurs pour une bonne caractérisation de cet état hydrique de la plante s'impose.

2.2.3. La vigne enherbée et l'azote

2.2.3.1. Alimentation azotée de la vigne

Les besoins en azote de la plante

Comme pour une contrainte hydrique, une carence modérée en azote peut s'avérer bénéfique puisqu'elle limite, en premier lieu, la croissance végétative de la vigne. En revanche, une carence trop importante entraîne un ralentissement du développement des raisins. Cela peut affecter la qualité de la vendange en rendant les moûts peu fermentescibles et provoquant une fermentation alcoolique languissante qui entraînent des défauts olfactifs (Ferrari 2002). Une gestion optimale de la ressource azotée est donc nécessaire afin de ne pas favoriser un développement végétatif excessif tout en maintenant une teneur en azote suffisante dans les raisins et les moûts. La vigne est généralement considérée comme une plante ayant des besoins en azote relativement faibles. Williams (1987) les évalue sur une vigne de variété sultanine, à 75 g par plante pour une année, soit 84 kg.ha⁻¹ pour la densité de plantation étudiée. Ces besoins varient cependant en fonction du rendement visé. Ainsi, Tournebize (2001) estime que les besoins annuels en azote de la vigne peuvent varier de 20 à 90 kg.ha⁻¹ pour des rendements de 7 à 25 T.ha⁻¹. Marocke et al. (1976 ; cités par Tournebize, 2001) mesurent des exportations d'azote comprises entre 45 et 65 kg.ha⁻¹ pour différents cépages septentrionaux et pour un rendement moyen de l'ordre de 7 à 10 T.ha⁻¹. Schaller (1982 ; cité par Nendel et Kersebaum, 2004) estime de son côté, que la consommation de la vigne est comprise entre 60 et 90 kg.ha⁻¹. Thiebeau et al. (2005), enfin, estiment des quantités d'azote absorbées par la vigne en Champagne comprises entre 40 et 90 kg.ha⁻¹. Ces ordres de grandeur restent donc faibles en comparaison d'une culture de maïs grain par exemple (production de matières fraîches de l'ordre de 7 à 9 T.ha⁻¹ pour 160 à 210 kg.ha⁻¹ d'azote consommé) (Tournebize 2001).

L'absorption d'azote par la vigne est directement liée à l'offre du sol et la plante adapte sa consommation en conséquence. Les besoins en azote de la vigne se répartissent tout au long de son cycle de croissance. Toutefois, Düring (1987) et Creasy et Lombard (1993) montrent que l'activité xylémique ralentit fortement, voire s'arrête, à partir de la véraison de la vigne. Ceci signifie que la maturation et une éventuelle croissance tardive s'effectue à l'aide du transfert phloémien et l'azote présent dans les baies est pour l'essentiel co-transporté avec les sucres des feuilles vers le fruit. Les consommations

d'azote minéral dans le sol se poursuivent potentiellement pour l'alimentation des feuilles notamment. Wermelinger et Koblet (1990) observent que l'azote utilisé dans la formation du raisin est pour moitié d'origine foliaire. Pour autant, un apport d'azote minéral peut faire diminuer cette proportion. La teneur en azote du raisin est donc très dépendante de l'état de nutrition azotée de la plante au cours de la formation et surtout de la maturation du raisin. De même, Conradie (1980) note que la contribution de l'absorption racinaire ne devient significative qu'à partir de la floraison de la vigne. C'est donc bien à partir de cette date que l'azote du sol doit être disponible en quantité limitée (pour ne pas provoquer une croissance excessive) mais suffisante. Le reste du temps, la satisfaction des besoins de la vigne se fait en remobilisant l'azote du bois, notamment en début de cycle, voire des feuilles, principalement en fin de cycle. Chapin et Kedrowski (1983 ; cités dans Gaudillère 1997) montrent que les espèces ligneuses se caractérisent par une grande efficacité dans la remobilisation de l'azote, des feuilles notamment. Cette efficacité est d'autant plus importante que la teneur en azote des feuilles est élevée. D'autres ont observé que la mobilisation de l'azote des feuilles concerne principalement les vignes les mieux alimentées en azote et ont observé une mobilisation finalement assez limitée au cours du cycle (Gaudillère et al. 2003). Un apport d'azote à l'automne permet de retarder la sénescence des feuilles et augmente significativement la réserve d'azote dans le tronc (Millard et Thomson 1989). En fin de cycle, l'azote des feuilles est en grande partie remobilisé, avant leur sénescence, et stocké dans les réserves pérennes.

Le tampon des réserves pérennes

L'alimentation azotée est plus difficile à maîtriser sur la vigne que l'alimentation hydrique. En effet, la vigne étant une culture pérenne, la source d'azote utile au développement et à la croissance des organes de la vigne peut se faire au travers de l'extraction racinaire mais également de la mobilisation de réserves azotées situées dans les organes de stockage que sont les racines et les bois. L'azote y est conservé sous la forme de protéines et surtout d'acides aminés, puisque cette forme est plus économique en carbone (rapports C/N plus faibles). Ainsi, l'arginine et l'asparagine sont les formes privilégiées dans les organes de réserve (Taylor 1967 ; cité dans Gaudillère 1997).

Le système racinaire, et notamment les racines de structures, représentent une part non négligeable de la matière sèche des organes de stockage (Kliewer 1991; Zapata et al. 2004). Ainsi, Williams (1987) estime le ratio des parties pérennes composées par les bois et les racines comme étant de l'ordre de 60/40% sur une vigne de sultanine. Ces chiffres confirment ce que mesure Conradie (1980) sur Chenin blanc (65/35%) et Williams et Biscay (1991) sur Cabernet-Sauvignon (65/35%). Or, les réserves azotées des racines sont les plus mobilisées au cours de l'année (Castelan-Estrada 2001). Pour autant, le rapport MS aérienne/MS racinaire semble relativement stable d'une année sur l'autre et l'estimation des réserves pour la partie aérienne donne une idée des réserves racinaires.

Sur Chenin blanc, la contribution des réserves pérennes est évaluée à 20 à 30% des besoins en azote de la vigne sur l'année (Conradie 1980). Zapata et al. (2004) confirment ces valeurs sur Pinot noir et remarquent que cette contribution est essentiellement réalisée avant la floraison et représente environ 50% de l'azote assimilé dans les parties aériennes de l'année à cette date. Le démarrage de la croissance au début du printemps est donc réalisé essentiellement grâce à la mobilisation des réserves azotées et carbonées de la vigne (Conradie 1980; Wermelinger et al. 1991; Zapata et al. 2004). Ainsi, la mobilisation des réserves débute au débourrement de la vigne et atteint un maximum au stade 6-8 feuilles (Yang et Hori 1979). L'assimilation d'azote et de carbone est en effet assez faible à cette période mais s'accélère progressivement jusqu'à atteindre son maximum après la floraison avec, en moyenne et dans des conditions optimales, 1 mg N.g⁻¹ de racine.j⁻¹ prélevés par

les racines entre la floraison et le stade petit pois (Zapata et al. 2004). Glad et al. (1994) observent que les réserves pérennes peuvent se révéler suffisantes au développement annuel de la surface foliaire d'une vigne. De plus, si l'alimentation azotée de la grappe pendant la phase de maturation dépend principalement de l'azote absorbé par les racines, les formes d'azote stockées dans les organes de stockage peuvent être redistribuées en cas de besoin. C'est notamment le cas en situations très stressantes pour la plante (Conradie 1992; Candolfi-Vasconcelos et al. 1994; Koblet et al. 1997) ou si la charge en fruits se révèle trop importante pour la capacité photosynthétique de la plante (Balasubrahmanyam et al. 1978). La formation de ces réserves azotées se fait par l'intermédiaire de l'absorption racinaire tout au long du cycle, simultanément à l'alimentation azotée des organes en croissance (Zapata et al. 2004). Les organes de stockage se comportent alors comme un puits similaire à tous les autres organes (Gaudillère et al. 2003).

La contribution des réserves pérennes à la nutrition azotée de l'année pouvant être par conséquent très significative, il est difficile d'évaluer le niveau de satisfaction des besoins azotés de la plante seulement par l'intermédiaire d'indicateurs liés au sol (dosage des matières organiques du sol, de l'azote disponible sous forme minérale). Ceci explique que les méthodes d'évaluation de l'état azoté de la plante basées sur le végétal se révèlent plus fiables et surtout plus directes (Kliwer 1991). Ces mesures doivent généralement être complétées par des observations d'indicateurs liés à la vigueur végétative de la plante (vitesse de croissance, biomasse produite, poids de bois de taille notamment) (Rodriguez-Lovelle et al. 2000a; Chantelot 2002; Chantelot et al. 2004).

2.2.3.2. Modification du fonctionnement azoté du système par la présence d'un enherbement

En premier lieu, l'enherbement consomme l'azote minéral situé dans la zone de sol explorée par son système racinaire. Il consomme également de l'eau et rend ainsi moins disponible pour la vigne l'azote minéral du sol et appauvrit le milieu temporairement (Maigre et Murisier 1992; Thiebeau et al. 2005). La concurrence entre vigne et herbe pour les ressources azotées du sol est d'autant plus importante qu'elle est asynchrone car l'enherbement est plus précoce que la vigne (Willey 1990). Smart et al. (2005) décrivent un phénomène de redistribution transversale de l'eau dans la zone du système racinaire d'une vigne. Si ce phénomène n'a que peu d'impact sur l'alimentation hydrique de la plante, il permet en revanche de distribuer de l'eau dans une zone sèche et où des nutriments peuvent avoir été immobilisés. Cependant, il est probable que dans le cas d'une vigne enherbée, ce phénomène ait peu d'impact puisque la densité racinaire de l'herbe reste très supérieure à celle de la vigne, ce qui laisse penser que c'est avant tout l'enherbement qui en profiterait.

La présence de cet enherbement augmente également la teneur en matières organiques du sol (Masson et Bertoni 1996) et améliore ainsi l'activité biologique du sol, rendant le cycle des nutriments du sol plus efficace (Young 1991; Reeleder et al. 2006). Cette plus forte teneur en matières organiques se traduit, entre autre, par une meilleure stabilité du sol et une plus grande capacité de rétention d'eau (Tournebize 2001).

A l'inverse, l'assèchement précoce de l'inter-rang par la transpiration de l'enherbement affecte la période de minéralisation de l'azote organique du sol. De plus, la redistribution du système racinaire de la vigne induite par la présence de l'enherbement pousse le système racinaire à exploiter des horizons plus profonds où la minéralisation est faible à nulle. Cette minéralisation étant la principale source d'azote pour la vigne, puisque la fertilisation azotée est souvent faible dans ce système, tout ceci diminue la quantité d'azote minéral potentielle à laquelle la vigne aura accès.

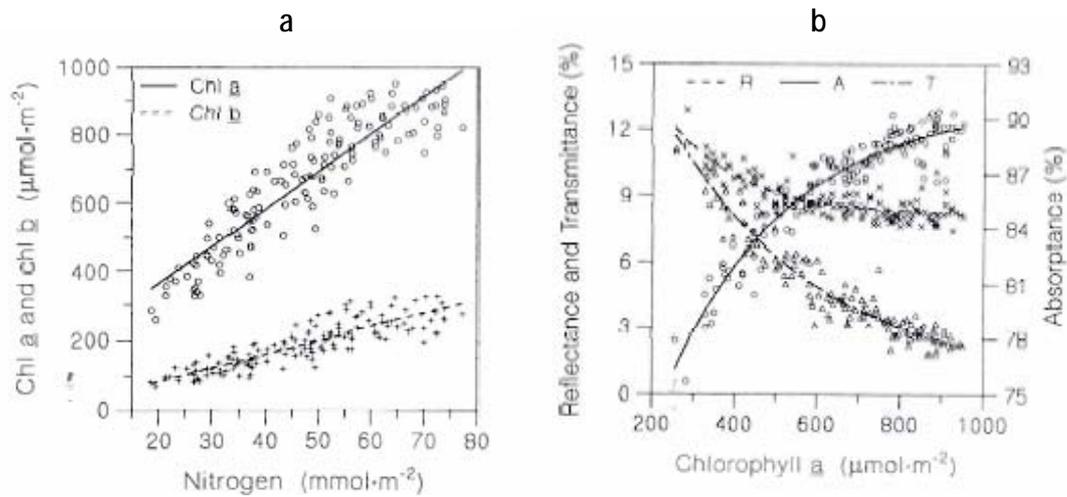


Figure 1.7 – Concentration de la feuille en chlorophylle a et b en fonction de la concentration en azote de la feuille (a) et propriétés optiques de la feuille pour un rayonnement dans la région du PAR (Photosynthetic Active Radiation) en fonction de la concentration en Chlorophylle a (b) (Ercoli et al, 1993).

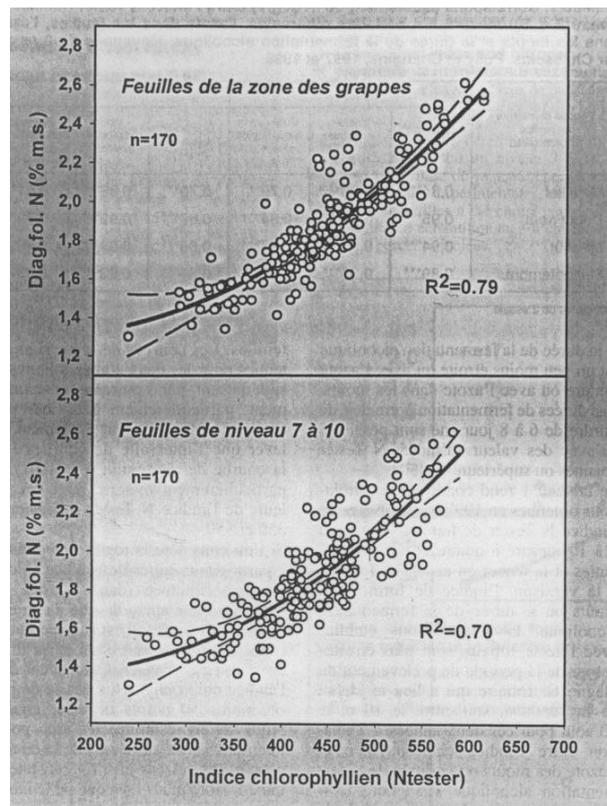


Figure 1.8 – Régression et intervalle de confiance ($p=0,01$) entre l'indice NTester de deux étages foliaires et la teneur en azote des feuilles (zones des grappes) à la véraison. Ensemble des mesures sur Chasselas en 1998. D'après Spring (1999).

La vigne est une culture à dormance hivernale. En conséquence, ses consommations au cours de l'hiver sont nulles et les précipitations de cette période peuvent lixivier des quantités importantes d'azote minéral sous forme de nitrate. Si cet azote minéral est entraîné suffisamment profondément, il n'est alors plus accessible pour la vigne. L'implantation de l'enherbement permet de réduire ce risque puisque une partie du nitrate en excès est prélevé par l'enherbement pendant la période de repos hivernal de la vigne (Schaller et al. 1991; Klik et al. 1998; Ryser et Pittet 2002; Spring 2002).

2.2.3.3. Quels indicateurs pour évaluer la statut azoté de la plante ?

Les méthodes les plus utilisées aujourd'hui consistent à doser l'azote total de la plante entière, l'azote minéral des pétioles ou des limbes de feuilles de vigne ou encore la teneur en arginine des fruits à la récolte ou des bois pendant la période de dormance. D'autres méthodes, comme le dosage des acides aminés, de l'ammonium (NH₄) ou l'activité des nitrate reductases dans divers tissus de la plante ont été testées mais ne semblent pas avoir été largement adoptées pour déterminer le statut azoté d'une vigne (Kliwer 1991). Jusqu'à présent, il n'existe pas à notre connaissance d'indicateur facilement mesurable et clair du niveau de contrainte azotée subie par la plante et les experts conseillent donc de croiser divers indicateurs pour évaluer le statut azoté de la plante (Gaudillère et al. 2003). La teneur en azote de la feuille est un indicateur préconisé de longue date puisque le limbe de la feuille est l'organe le plus riche en protéines et, par conséquent, en azote (Reuter et Robinson 1997). Des teneurs critiques de carence ont ainsi été définis à différents stades par Kliwer (1991) et Marchner (1995) notamment.

Il a également été démontré que la teneur en chlorophylle est linéairement corrélée à la teneur en azote (*Figure 1.7a*). Ercoli et al. (1993) observent une relation de type exponentielle entre la teneur en chlorophylle et les propriétés spectrales de la feuille de maïs (*Figure 1.7b*). En conséquence, ils estiment qu'il est possible de déterminer rapidement et avec une mesure non-destructive l'état de nutrition azotée de la plante par l'intermédiaire de mesures spectrales. A partir de ces observations, un système de mesure portable a été mis au point pour évaluer le statut azoté d'une plante au travers de la mesure de la transmittance de la feuille. Malheureusement, il n'existe pas de relation généralisable à toutes les espèces végétales. L'établissement de cette relation est compliquée et nécessite des conditions expérimentales strictes (Baret et Fourty 1997). Pour autant, l'indice chlorophyllien mesuré à l'aide de ce dispositif présente, sur vigne, de bonnes corrélations avec la teneur en chlorophylle de la feuille et cet indice est avant tout discriminant dans des situations de carence azotée prononcée (Bavaresco 1995). Cet indice est cependant fortement influencé par divers facteurs pouvant provoquer une modification de la couleur de la feuille (chlorose, vieillissement, sénescence, contrainte forte) (Schlemmer et al. 2005). Pour autant, Spring (1999) établit une relation entre teneur en azote des feuilles et indice chlorophyllien sur un réseau de parcelles de Chasselas en Suisse romande (*Figure 1.8*). Cette relation est ensuite confirmée sur d'autres cépages (Spring et Zufferey 2000).

L'azote des moûts fait souvent également l'objet d'un dosage puisqu'il joue un rôle important dans la fermentation. En effet, la quantité d'azote assimilable par les levures responsables de la fermentation du moût définit en partie la fermentescibilité du jus. Outre que cette teneur peut être fortement diminuée avec un fort rendement par un phénomène de dilution, elle est également fortement corrélée à la qualité de l'alimentation azotée de la plante au cours de la période de maturation du raisin (Gaudillère et al. 2003).

La mesure de la teneur en azote des bois donne également une information intéressante sur le statut azoté de la plante puisque, comme pour toutes les espèces ligneuses, ces réserves jouent un rôle important dans l'alimentation de la vigne.

En conclusion, il apparaît que l'enherbement du vignoble procure de nombreux avantages à la culture de la vigne à condition de maîtriser suffisamment la concurrence qu'il induit pour les ressources du sol (eau et azote notamment). Il convient toutefois de noter que les nombreux impacts listés ci-dessus dépendent en grande partie de la nature de l'enherbement et de sa durée de vie, et des caractéristiques du vignoble.

3. Définition de la problématique et des questions de recherche

Les intérêts d'adopter une pratique d'entretien du sol tel que l'enherbement sont multiples. Mais, l'impact de l'enherbement sur l'environnement physique et biotique de la vigne est complexe et une meilleure compréhension du fonctionnement de ce système est nécessaire pour une gestion plus raisonnée de cet enherbement (Gary et al. 2005). La concurrence pour l'eau est particulièrement critique dans la zone méditerranéenne mais certaines études ont montré que l'azote ne pouvait être négligé (Chantelot et al. 2004; Celette et al. 2005). D'autant plus que les interactions dans les dynamiques de ces deux ressources sont nombreuses et qu'il est difficile de considérer l'une sans l'autre (Dunbabin et al. 2002; Derby et al. 2005; Durand et al. 2005; Keller 2005; Gonzalez Dugo 2006). Ce travail cherche donc à décrire et comprendre les relations de concurrence pour les ressources hydriques et azotées entre vigne et culture intercalaire et à évaluer leur impact sur l'expression végétative de la vigne et sur sa production.

Cette problématique peut être subdivisée en différentes questions de recherche :

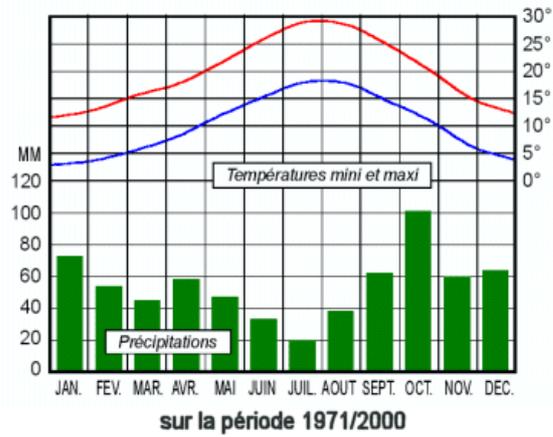
- ❖ Dans un premier temps, il est important de **bien identifier l'impact de l'implantation d'un enherbement et de sa gestion sur la croissance et la production de la vigne en région méditerranéenne**. Cet impact a déjà fait l'objet de différents travaux mais il est peu étudié dans cette région (Moulis 1994; Chantelot et al. 2004; Celette et al. 2005). Autant l'expression végétative que l'élaboration du rendement sont très sensibles à la contrainte hydrique et azotée qui peut affecter la vigne (Schultz et Matthews 1988; Ussahatanonta et al. 1996). Ces contraintes sont indispensables à une production de qualité à condition d'être maîtrisées (Deloire et al. 2004; Pellegrino et al. 2006). Leur impact est très variable selon leur moment d'apparition et leur intensité et il est donc intéressant d'évaluer comment le choix et la gestion de l'enherbement peuvent les affecter. La diminution de l'expression végétative est souvent recherchée car elle est susceptible de créer des conditions favorables à la qualité de la production et pénalisantes pour le développement de maladies cryptogamiques (Smart et al. 1988; Pieri et Fermaud 2005). Une diminution des rendements est parfois favorable également car elle induit une concentration des composés recherchés pour une production de qualité (sucres, polyphénols) et diminue encore la sensibilité de la grappe aux attaques de champignons comme le botrytis (Valdés et al. 2006). Elle ne doit cependant pas être excessive sous peine d'être très pénalisante économiquement.
- ❖ **L'incidence de l'implantation de l'enherbement et de sa conduite sur le fonctionnement hydrique** du système ainsi formé est étudié dans un deuxième temps. Une vigne enherbée se caractérise notamment par une structure en rangs et un contraste important dans la capacité d'exploration racinaire des deux espèces (ou mélange) associées. Ces éléments influencent fortement la dynamique de l'eau dans ce système. L'un des objectifs de cette partie est donc de vérifier et d'évaluer le phénomène de croissance compensatoire du système

racinaire de la vigne déjà observé dans une configuration semblable (Morlat et Jacquet 2003; Celette et al. 2005). Certains travaux mettent également en évidence une amélioration de la recharge hivernale en présence de l'enherbement (Celette et al. 2005). Ce phénomène doit donc être étudié et ce travail cherche à expliquer les raisons de cette modification de la dynamique de l'eau. La dynamique de partage des ressources entre les deux composantes de l'association est également à éclaircir. Une bonne caractérisation de celle-ci est susceptible de nous fournir les éléments nécessaires à la modélisation de la dynamique de l'eau au sein d'une vigne enherbée. Une compartimentation simple du sol pour l'accès aux ressources a ainsi été proposée dans de précédents travaux (Celette et Celette 2002; Celette 2003) et elle doit ici être vérifiée et évaluée.

- ❖ Dans des études récentes, l'azote est mis en avant pour expliquer l'impact de l'enherbement sur la croissance et le rendement de la vigne (Chantelot et al. 2004). Ainsi, **caractériser qui de l'eau et/ou de l'azote est un facteur limitant pour la croissance et la production de la vigne et quand se produisent ces contraintes** est un des objectifs de travail. Les interactions entre les dynamiques hydrique et azotée sont nombreuses et doivent être caractérisées. Avant cela, une bonne caractérisation des effets de l'implantation d'un enherbement sur le fonctionnement azoté du système est nécessaire. La vigne, pour atténuer la concurrence pour les ressources imposée par l'enherbement, redistribue son système racinaire vers des horizons plus profonds lorsqu'elle en a la possibilité. Ceci lui permet de trouver de nouvelles ressources en eau mais la prive des horizons de surface les plus riches en azote. La minéralisation de l'azote organique du sol est en effet la principale source d'azote minéral dans un système naturellement pauvre et non fertilisé. L'implantation d'un enherbement est susceptible de modifier profondément les conditions du milieu dont dépend cette minéralisation (Rodrigo et al. 1997; Valé 2006). Il est donc important de caractériser comment l'enherbement affecte cette minéralisation et le partage des ressources azotées entre les composantes de l'association.

LE CLIMAT DE L'HÉRAULT

Normales de températures et de précipitations à Montpellier



Données Météo France

Figure 2.1 – Climat moyen de la ville de Montpellier au cours des dernières décennies (1971-2000). Les précipitations mensuelles et les moyennes de températures minimales et maximales sont représentées.

Chapitre II - Matériel et Méthodes

1. La zone viticole languedocienne comme contexte

1.1. Le climat méditerranéen

La majorité du département de l'Hérault, et notamment la zone de l'étude, se situe dans l'aire géographique du climat méditerranéen.

De par sa configuration et sa situation géographique, la Méditerranée connaît une alternance de saisons océaniques tempérées, marquées par de fortes pluies, généralement concentrées sur l'automne et l'hiver et des étés arides et chauds.

Les températures. De manière générale pour la zone qui nous concerne, la température varie autour de 5 à 10°C durant l'automne et l'hiver avec au cours du mois le plus froid de l'année (généralement janvier ou février) une température moyenne mensuelle d'environ 6°C. Le mois le plus chaud de l'année (généralement juillet) présente quant à lui une température moyenne de 25°C environ. La température moyenne annuelle pour la région de Montpellier est de son côté de l'ordre de 15°C. Si le climat méditerranéen se caractérise donc par la douceur de ses saisons, il convient toutefois de se méfier de ses excès. Ainsi, des températures supérieures à 40°C sous abri sont parfois mesurées au cours de l'été alors que le thermomètre est déjà descendu à -29°C en plaine en hiver ! La proximité de la mer joue cependant un rôle important car elle assure aux régions côtières (où se trouve la parcelle de Villeneuve lès Maguelone) un écrêtement des extrêmes qui se traduit par des gelées moins nombreuses en hiver et une canicule plus supportable en été.

La somme thermique annuelle base 10°C est légèrement supérieure à 2000°C.j au cours des 40 dernières années et supérieure à 2300°C.j en moyenne depuis le début des années 1990. L'indice de Huglin permet ainsi de classer le climat de l'étude comme "tempéré" au cours des 40 dernières années et même de "tempéré chaud" au cours des 20 dernières années.

Les précipitations. La moyenne pluviométrique du département de l'Hérault varie entre 600 et 1400 mm de pluies par an selon un gradient orienté de la région côtière (où les pluies sont les moins importantes) vers les contreforts des Cévennes (où les précipitations sont les plus importantes). Les différences de pluviométrie ne sont pas tant dues aux nombres d'épisodes pluvieux mais bien plus à leur durée et leur intensité. Ainsi, les précipitations de la zone de Montpellier sont de l'ordre de 700 mm/an (*Figure 2.1*). Celles-ci sont très inégalement réparties au cours de l'année et généralement concentrées en quelques épisodes orageux au cours de l'automne pour l'essentiel. L'hiver est généralement humide. Le printemps et surtout l'été sont en revanche arides avec des précipitations moyennes mensuelles souvent inférieures à 30 mm au cours des mois d'été.

Il ne neige pour ainsi dire jamais en dessous de 500 m.

L'insolation est de 2700 heures par an à Montpellier, valeur conforme avec les moyennes que l'on rencontre sur l'arc méditerranéen français, nettement supérieure à la moyenne du territoire français.

Les vents Situé entre les vallées de l'Aude et du Rhône, l'Hérault est relativement protégé des vents forts d'ouest et de nord (Mistral). La Tramontane souffle sur tout le département, de manière plus intense dans la partie occidentale de l'Hérault. C'est un vent sec de nord-ouest très fréquent en hiver et au printemps, mais que l'on peut observer en toute saison. Le Marin (sud-est) et le Grec (est), plus rares, sont des vents souvent très violents associés à des passages perturbés en Méditerranée. Ils sont accompagnés d'un temps couvert et de pluies importantes. Le Mistral, orienté nord-nord-est, ne touche guère

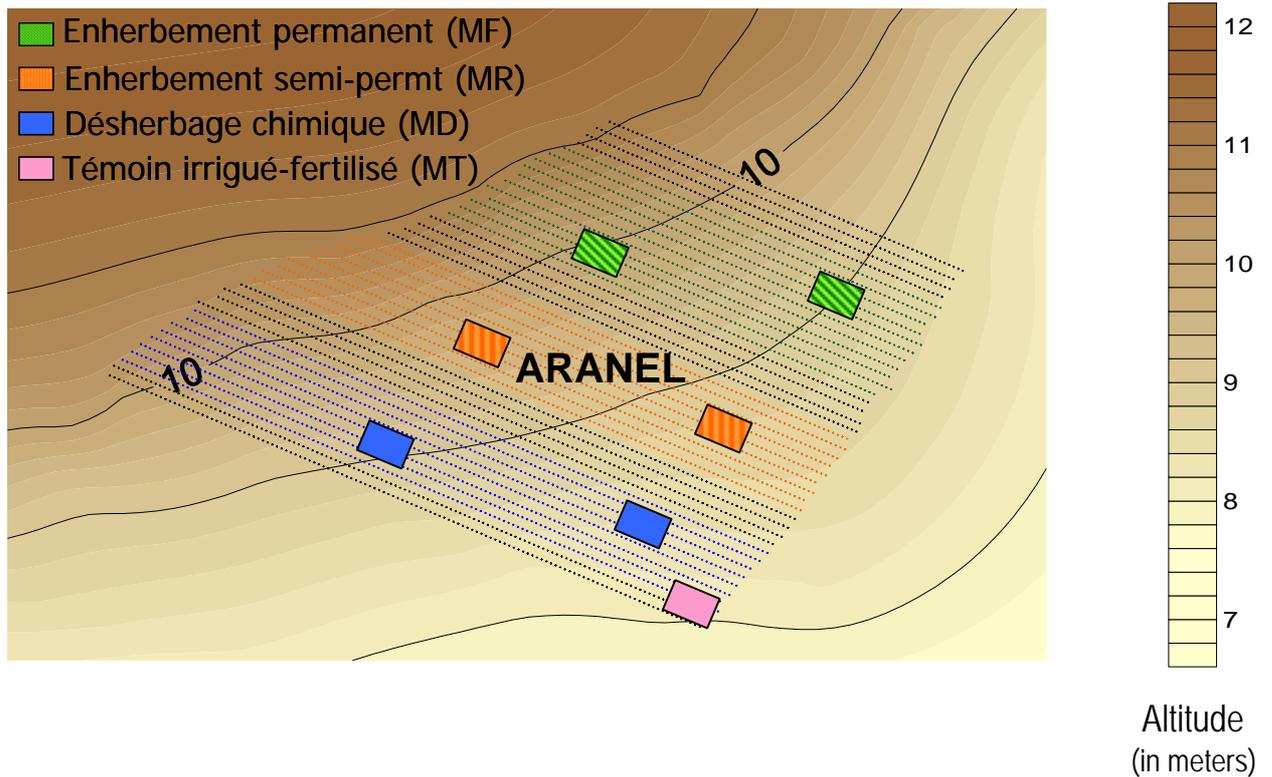


Figure 2.2 – Dispositif expérimental établi sur la parcelle expérimentale du Domaine du Chapitre (Villeneuve-lès-Maguelone). Ce dispositif est composé de trois modalités d’entretien du sol avec un enherbement permanent (MF), un enherbement semi-permanent (MR) et un désherbage chimique total (MD). Chaque modalité contient deux placettes d’études situées sur la plan et une placette témoin (MT) irriguée et fertilisée a été ajoutée.

que la bordure est du département. Il est moins violent que dans la vallée du Rhône mais très fréquent.

2. Dispositif expérimental

2.1. La parcelle du Larzat (Villeneuve-lès-Maguelone)

2.1.1. Description générale de la parcelle

L'étude a été conduite grâce à un dispositif expérimental implanté sur le domaine expérimental du Chapitre (SupAgro), situé à Villeneuve-lès-Maguelone (VLM) près de Montpellier. La parcelle étudiée est classée en Vins de Pays (appellation « Collines de la Moure »). Elle s'étend sur 1,5 ha et à une altitude moyenne de 10 m environ au dessus du niveau de la mer (Figure 2.2). La plantation du cépage Aranel (cépage blanc, issu de la sélection par l'INRA d'un croisement de Grenache Gris x Saint Pierre Doré), sur le porte-greffe Fercal a eu lieu en 1997 selon une densité de plantation de 3333 souches par hectares (1,2 x 2,5 m). Ainsi, au début de l'expérimentation, en 2003, la vigne en est déjà à sa quatrième récolte et le système racinaire de la vigne peut être considéré en fin de phase juvénile. Ceci signifie que le volume d'exploration racinaire devrait peu évoluer, au profit d'une densification du maillage racinaire pour une meilleure exploitation des zones déjà explorées (Champagnol 1984). Il est à noter que le porte-greffe utilisé sur la parcelle expérimentale a été caractérisé comme « peu tolérant » à la sécheresse par Carbonneau (1985). Les rangs de vigne sont orientés NO-SE. La pente de la parcelle est globalement peu importante et orientée du Nord au Sud avec une pente moyenne de l'ordre de 2% en haut de la parcelle et inférieure à 1% en bas.

La taille de la vigne est une taille courte (double cordon de Royat) et les rangs sont conduits en espaliers. Entre 1 et 2 rognages (entre juin et juillet) sont réalisés selon les années et les modalités d'entretien du sol pour maintenir une hauteur de la canopée comprise entre 1 m et 1.1 m et une épaisseur d'environ 0,5 m. A partir de l'année 2004, un ébourgeonnage a été réalisé afin d'essayer d'homogénéiser le nombre de rameaux par souche et d'améliorer l'aération des souches et faciliter les mesures. L'ébourgeonnage vise donc à ramener chaque souche à 12 rameaux, ce qui est le nombre de rameaux recherché par la taille (2 bras x 3 coursons x 2 bourgeons).

Cette même parcelle a servi de site expérimental pour une étude portant sur la protection intégrée des cultures. L'état sanitaire de la vigne a par conséquent été suivi de très près, notamment en ce qui concerne Mildiou (*Plasmopora viticola*), Oïdium (*Uncinula necator*), Excoriose (*Cryptosporella viticola*) et Botrytis (*Botrytis cinerea*), et la vigne a donc été maintenue dans un état sain malgré un nombre de traitements fongicides limité. La vigne a également subi des traitements insecticides réglementaires pour la protection contre la cicadelle dorée, vectrice de la flavescence dorée, ainsi que contre le ver de la grappe.

2.1.2. Des années climatiques très contrastées

Les données météorologiques locales ont été mesurées à l'aide d'une station météo située au cœur de la parcelle et installée à la fin de l'hiver 2002-03. Les éléments installés sur cette station sont destinés à permettre, notamment, de calculer la valeur de l'évapotranspiration potentielle (ETP) d'après la formule de Penman-Monteith (Penman 1948; Monteith 1965; Allen et al. 1998). Ainsi, une centrale d'acquisition CR10X (Campbell Sci., Inc. Logan, USA) a permis d'enregistrer en continu (intégration tous les ¼ d'heure) les données météorologiques souhaitées. Les différents capteurs ont été installés

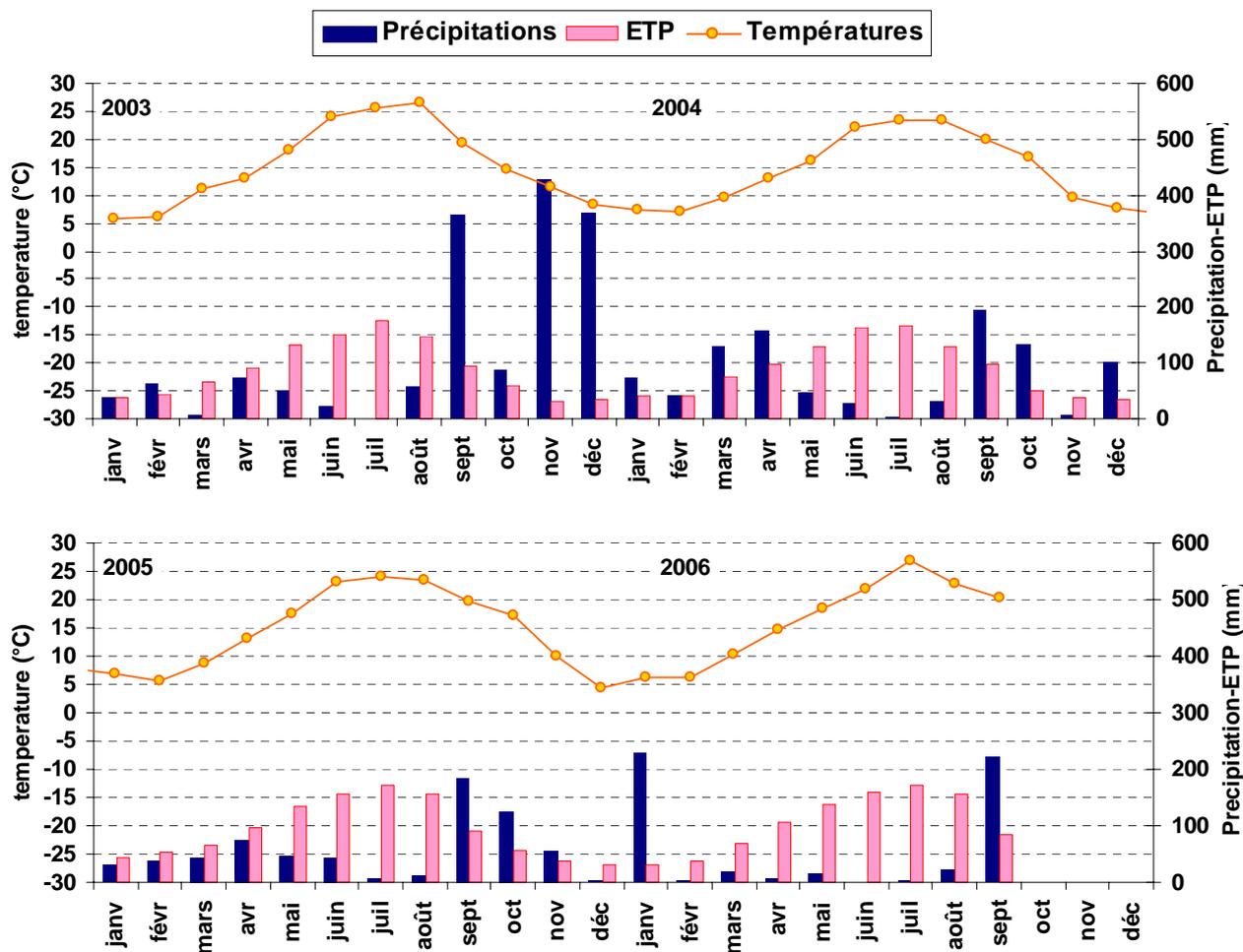


Figure 2.3 – Evolution des conditions climatiques de la parcelle expérimentale de Villeneuve-lès-Maguelone pour la période 2003-2006. Les précipitations et l’ETP mensuelles sont représentées (histogramme), ainsi que la température moyenne mensuelle (courbe).

au dessus du couvert. Les températures (T°C) et les humidités relatives (HR) de l'air minimales, maximales et moyennes ont été collectées par une sonde Vaisala HMP 35C (Campbell Sci., Logan, UT). Le PAR⁸ et le rayonnement global (Rg) ont été également mesurés, ainsi que la vitesse moyenne du vent (U) au dessus du couvert et les précipitations (P).

Du fait d'un fonctionnement parfois imparfait de cette station ou de la nécessité de la démonter en certaines occasions (vendanges mécaniques ou entretien de la station), quelques données manquantes apparaissent dans la base de données météorologiques pour la durée de l'expérimentation. Les séries incomplètes sont reconstituées à l'aide de données enregistrées sur la même période sur la station Agroclim au Domaine du Chapitre de VLM (températures et précipitations) et sur la station de Météo-France à Fréjorgues. Ces deux stations se trouvent à 2 et 12 km à vol d'oiseau de la parcelle expérimentale. Les données enregistrées dans ces deux stations sont transformées par régression pour pouvoir compléter notre base de données climatique.

Les données recueillies témoignent de grandes variations dans les conditions climatiques des 4 années qu'a duré l'expérimentation (*Figure 2.3*).

Hiver 2002 à Automne 2003 (Année 1)

L'hiver 2002-2003 n'a été que moyennement humide. Il a permis une bonne recharge du profil de sol jusqu'à une profondeur de 2,5 m environ pour toute la parcelle. Le mois de mars a été sec et les horizons de surface ont été en partie desséchés par l'évaporation du sol avant que la vigne ne débute son cycle. Les précipitations printanières ont été assez conformes aux moyennes sur la parcelle (environ 150 mm entre avril et juin). Les températures ont été élevées dès le mois de juin et l'été s'est révélé particulièrement chaud (été de la « canicule ») et sec. En effet, la parcelle n'a reçu aucune précipitation entre la mi-juin et les vendanges à la fin du mois d'août, mis à part un orage le 17 août. La demande climatique estivale est restée malgré tout raisonnable (465 mm entre juin et août). Suite à l'été caniculaire, l'automne de cette année 2003 a été exceptionnellement arrosé avec une succession d'épisodes pluvieux dont trois se sont révélés d'une très grande intensité (entre 185 et 270 mm en moins d'une journée). Au total, les précipitations ont été supérieures à 1200 mm au cours de cet automne.

Hiver 2003 à Automne 2004 (Année 2)

Après l'automne particulièrement arrosé de l'année 2003, les précipitations hivernales ont été conformes aux moyennes habituelles (environ 250 mm). Le profil de sol était totalement rechargé au début du cycle de la vigne (plus par remontée de la nappe que par infiltration des pluies en surface d'ailleurs). Le printemps a été encore très bien arrosé jusqu'à la fin du mois de mai. A partir du mois de juin, les précipitations se sont révélées peu importantes, ce qui est finalement assez caractéristique du climat méditerranéen. L'été n'a été que modérément chaud et la demande climatique a été limitée (450 mm entre juin et août). L'automne 2004 a été humide (330 mm de pluies entre septembre et novembre) avec des épisodes pluvieux réguliers et un nouvel orage d'importance peu après les vendanges (150 mm environ le 22 septembre).

Hiver 2004 à Automne 2005 (Année 3)

L'hiver 2004 a été particulièrement aride avec seulement 3 évènements pluvieux supérieurs à 2 mm/jour entre le 15 décembre 2004 et la fin du mois de mars 2005. En conséquence, le profil de sol était très mal rechargé lorsque le débourrement de la vigne est arrivé. Ainsi, le profil de sol n'était rechargé imparfaitement que jusqu'à 1 m dans la partie

⁸ PAR : Photosynthetic Active Radiation – Rayonnement actif pour la photosynthèse

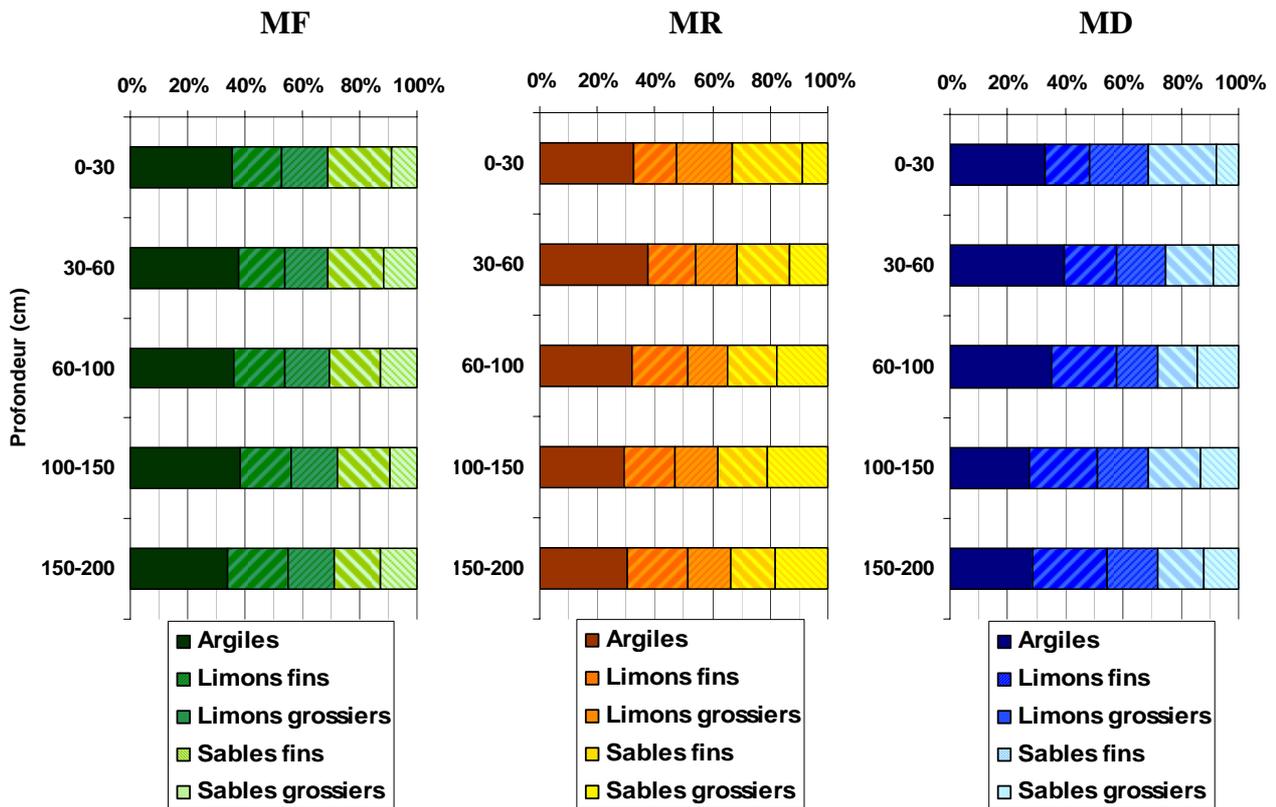


Figure 2.4 – Composition texturale de la terre fine des deux premiers mètres de sol de la parcelle d'étude pour les différentes modalités.

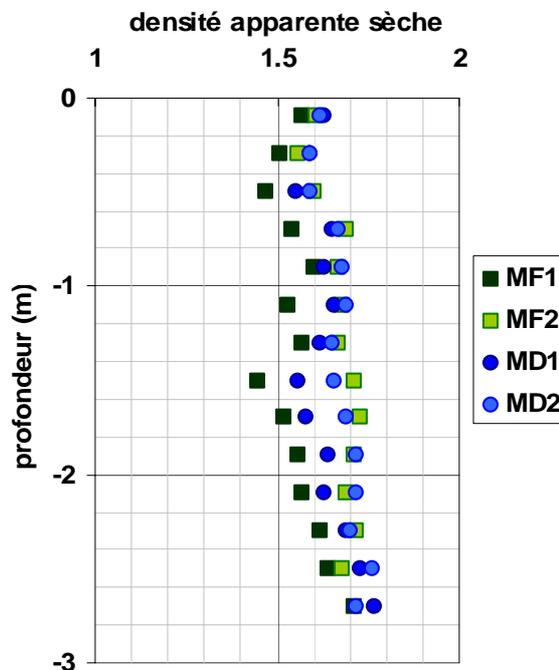


Figure 2.4b – Densité apparente sèche du sol des placettes des modalités MF et MD mesurées par gammamétrie.

dés herbée et environ 1,5 m dans la partie enherbée. Les pluies printanières, bien qu'elles aient été assez conformes aux moyennes observées dans la région (environ 200 mm entre mars et juin), n'ont pas permis de rattraper ce déficit et l'été 2005 a été marqué par une grande sécheresse (moins de 20 mm de pluies pour les mois de juillet et août). De plus, la demande climatique estivale a été élevée (485 mm entre juin et août). Peu après les vendanges, un important orage s'est abattu sur la parcelle (environ 150 mm le 8 septembre) ; marquant le début d'un automne avec des précipitations plus conformes à ce qui est habituellement observé dans cette zone.

Hiver 2005 à Automne 2006 (Année 4)

Les précipitations au cours de cet hiver ont été supérieures aux normales saisonnières jusqu'au mois de janvier 2006 inclus. La parcelle a reçu ainsi plus de 400 mm entre octobre et janvier, contre un peu moins de 300 mm normalement. En revanche, l'année 2006 s'est révélée particulièrement aride à partir du mois de février et ce jusqu'à la vendange. Ainsi, les précipitations cumulées entre février et août 2006 n'ont été que de 70 mm tandis que la moyenne habituelle se situe plutôt autour de 300 mm sur cette période. Le déficit climatique accumulé au cours de cette période a été d'environ 770 mm avec notamment une demande climatique équivalente à celle enregistrée en 2005. Les températures de l'air ont été plutôt en deçà des normales à la fin de l'hiver mais ont été par contre bien au dessus aux mois de juin et juillet. Comme chaque année qu'a duré l'expérimentation, un orage important est survenu peu après les vendanges (environ 150 mm entre le 13 et le 14 septembre). Cet orage a été suivi de plusieurs autres compris entre 15 et 60 mm.j⁻¹ avant le 15 octobre, constituant ainsi un début d'automne 2006 plutôt plus arrosé que la normale dans cette région.

2.1.3. Un sol profond et homogène

Avant le début de l'expérimentation, plusieurs carottages ont été réalisés afin de mieux connaître le sol de la parcelle et d'évaluer son homogénéité.

Ainsi, le sol de la parcelle du Larzat est un sol brun calcaire, profond et de texture relativement homogène selon la profondeur et la position dans la parcelle. En moyenne, on compte environ 30% de sables, 35% de limons et 35% d'argiles (*Figure 2.4*). Ainsi, selon le diagramme modifié de classification des textures de Jamagne (1967), ce sol est de texture argileuse. Il se caractérise également par une densité apparente, mesurée par gammamétrie, très élevée puisque généralement comprise entre 1,5 et 1,7 selon la profondeur et la modalité considérée.

La teneur en matière organique présente dans les premiers 0,6 m est moyenne pour un sol viticole avec des teneurs comprises entre 1 et 2% en surface. Le rapport C/N de la parcelle est de 11,3 en moyenne. Une analyse plus détaillée de la composition minérale du sol et de sa capacité d'échange cationique ne permet de mettre en évidence une carence particulière.

2.1.4. Description générale du dispositif expérimental

Afin d'étudier l'impact d'un enherbement sur le fonctionnement d'un vignoble, trois modalités d'entretien du sol ont été mises en place. Pour cela, la parcelle d'étude a été divisée en trois parties, composées de 11 à 15 rangs en fonction de leur longueur (*Figure 2.2*). Ainsi, chaque traitement suivi est composé d'environ 1400 souches de vigne. Chacune des modalités d'étude est séparée de la suivante par des rangs de bordure (3 inter-rangs chaque fois), afin d'éviter des interférences entre modalités. Ces inter-rangs ont été maintenus dés herbés par un travail du sol puis enherbés à partir de l'automne 2004.

La première modalité étudiée (appelée MD) correspond à un désherbage chimique sur l'intégralité de la surface. Pendant la période hivernale cependant, la flore spontanée est tolérée tant que son développement reste raisonnable. Il s'agit d'une modalité d'entretien du sol très répandue, notamment en Languedoc-Roussillon. C'est d'ailleurs ainsi que la parcelle du Larzat était entretenue avant l'installation du dispositif.

Le deuxième traitement (MR) a été imaginé comme un enherbement semi-permanent semé à l'automne et détruit pour la floraison de la vigne (début juin). Ainsi, chaque inter-rang de MR a été semé à l'automne, lorsque les conditions étaient favorables, avec de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) sur une largeur de 1,2 à 1,5 m environ. Cette culture intercalaire a ensuite été tondue début juin, tandis que l'orge était généralement au stade épiaison. Ensuite, lorsque les conditions étaient favorables (sol suffisamment meuble), le couvert et les chaumes étaient enfouis à l'aide d'un travail du sol sur une profondeur de 0,1 à 0,2 m environ. Tout au long de l'année, la surface sous le rang est désherbée à l'aide d'un herbicide post-levée (type glyphosates).

Un enherbement permanent forme la troisième modalité d'entretien du sol. L'enherbement, ou « engazonnement » puisqu'il s'agit d'un enherbement semé, est un mélange commercial composé de fétuque élevée (*Festuca arundinacea* L.) et de Ray-Grass Anglais (*Lolium perenne* L.). La culture intercalaire a été semée à l'automne 2002 sur une largeur de 1,5 m environ. Depuis, l'engazonnement est entretenu par des tontes lorsque nécessaire (hauteur dépassant 0,2 m). Le rang de vigne est entretenu par un désherbage chimique de la même manière que dans les autres traitements.

Deux placettes (ou stations de mesure) ont été délimitées dans chacune des trois modalités présentées ci-dessus. On trouve ainsi un bloc en bas de pente (placette 1) et un en haut de la pente (2) (Figure 2.2).

A partir du début de l'année 2004, une modalité témoin (MT) a été ajoutée au dispositif. Pour cela, une placette a été délimitée avec trois rangs de douze souches environ en 2004 et 2005, puis 3x20 ceps en 2006. MT a d'abord été fertilisée en 2004, avant d'être fertilisée et irriguée en 2005 et 2006. Le niveau d'irrigation ($3400 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en 2005, $7400 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ en 2006) a été maintenu au niveau de l'ETP, calculée selon la formulation de Penman-Monteith (Allen et al. 1998), afin de maintenir un état hydrique de la vigne maximal entre le débourrement et la vendange. La fertilisation apportée sous la forme d'engrais minéraux (ammonitrate) visait, quant à elle, à éviter toute contrainte azotée de la vigne sur cette même période. Pour cela, les valeurs observées dans la littérature comme étant les besoins d'une vigne pour une année en situation désherbée ont été utilisées comme référence. La fertilisation appliquée s'est ainsi composée de 50 UN⁹ (mi-avril) peu après le débourrement et de 30 UN (début juin) après la floraison en 2004 et 2005. Les mêmes apports ont été réalisés en 2006, auxquels s'est ajouté un nouvel apport de 30 UN (mi-juillet).

2.2. Observation de la phénologie, de la croissance et de la production de la vigne à l'échelle de la parcelle

Certaines variables ont été suivies à l'échelle de l'ensemble de la parcelle. Ceci concerne certains indicateurs de croissance de la vigne et de production. Ces indicateurs ont l'avantage de nous renseigner sur l'existence éventuelle d'une hétérogénéité au sein de la parcelle qui serait le fait du milieu.

Ainsi, des séries de trois ceps ont été sélectionnées dans toute la parcelle. Sur chacun de ces ceps, le rendement a été mesuré chaque année. De plus, au moment de la taille de la parcelle (décembre), le poids de bois de taille et le nombre de sarments de chacun de ces

⁹ UN : Unité d'azote (ou $\text{kg d'azote} \cdot \text{ha}^{-1}$)

Tableau 2.1 – Echantillonnage et fréquence des différentes mesures réalisées sur la parcelle d'étude.

Type de variable	Fréquence	Echantillonnage par placette	Placettes concernées
Phénologie	7-15 jours, mars-juillet + 1 fois à la récolte	10 plantes	Toutes
Biomasse et taux de couverture culture intercalaire	15-20 jours, mars-juin + 1 fois en fin d'automne + 1 fois en fin d'hiver	8 répétitions de 0,13 m ²	MF1-MF2-MR1-MR2
Gabarit du couvert	Fin juin en 2004-06	10 mesures sur 10 plantes	Toutes
Biomasse de la vigne	1 fois/mois, avril-août	2003: 8 rameaux, 2004-06: 16 rameaux	Toutes sauf pour 2004 où MR n'a pas été suivie
Surface Foliaire			
Destructive	1 fois/mois, avril-août	2003: 8 rameaux 2004-06: 16 rameaux	Toutes sauf pour 2004 où MR n'a pas été suivie
LAI - 2000	15-20 jours, avril-août 2004-06	10 m de rang répartie sur 2 rang	Toutes
Croissance des rameaux	15-20 jours, avril-août 2004-07	20 rameaux	2004: MF1-MF2-MD1-MD2 2005: toutes sauf MR1 2006: toutes sauf MR2
Densité du couvert	Fe -Ve-Re en 2004-06	5 m de rangs réparties sur 2 rang	2004: toutes sauf MR1 et MR2 à la fermeture 2005-2006: toutes
Rendement et composants	1 fois à Récolte	12 plantes	Toutes
Qualité vendange	1 fois à Récolte	200 baies	Toutes
Poids de bois de taille et circonférence du cep	1 fois en début d'hiver	12 plantes	Toutes sauf MT en 2005
Suivi de la T° et HR au sein du couvert végétal	En continu mai-septembre 2004-06	2 répétitions	MF1-MF2-MD1-MD2
Suivi de la T° des feuilles	En continu mai-août 2004-05	10 répétitions	MF1-MF2-MD1-MD2
Suivi de la T° des baies	En continu, août 2004-06	10 répétitions	MF1-MF2-MD1-MD2
Système Racinaire	1 fois en 2004 et 1 fois en 2006	1 fosse racinaires par placette	Toutes sauf MT
Suivi de la profondeur de la nappe phréatique	10-15 jours, mars-septembre + 1 fois/mois octobre-février	2 répétitions dans toute la parcelle	
Humidité du sol	1 fois/mois, avril-sept.	6 mesures: 3 dans le rang, 3 dans l'inter-rang	Toutes sauf MT
Pot. hydrique du sol	15-20 jours, avril-août 2005-06		MF1-MF2-MD1-MD2
Ruissellement de surface	En continu, 2004-06	1 répétition	MF1-MF2-MD1-MD2
Evaporation du sol	2 fois/semaine mars-septembre en 2004	2 répétition sur le rang et 2 sur l'inter-rang	Toutes
Pot. hydrique de la vigne	21 jours, juin-août	12 feuilles sur 6 plantes	Toutes
Conductance stomatique	21 jours, juin-août	12 feuilles sur 6 plantes	Toutes
Mesure du $\Delta^{13}C$	1 fois à Récolte	400 baies	Toutes
Dynamiques azotées du sol	1 fois/mois, avril-août 2004-06	2 répétitions	Toutes sauf MT
Température du sol	En continu, 2004-06	2 répétitions	Toutes sauf MT

ceps, ainsi que la circonférence des troncs au dessus du point de greffe et en dessous de l'insertion des deux cordons sont mesurés. D'autres souches, enfin, ont été sélectionnées sur toute la parcelle. Sur chacune d'entre elles, le poids de bois de taille est pesé au moment de la taille et un morceau de sarment est prélevé et broyé. Les sucres du bois sont ensuite dosés sur l'échantillon obtenu.

Le stade de développement phénologique de la vigne marque des changements dans le fonctionnement et la physiologie de la plante. C'est donc pour mieux comprendre ce fonctionnement que les principaux stades phénologiques de la vigne (débourrement, floraison, fermeture de la grappe, véraison et maturité) ont été suivis à l'aide de l'échelle de Eichhorn et Lorenz (1977) modifiée par Coombe (1995) (*Figure 1.2 et Annexe I*). Chaque stade suivi est encadré de deux observations à moins d'une semaine d'intervalle. L'évolution entre ces deux observations est ensuite considérée linéaire avec le temps et le stade de développement est considéré atteint lorsque plus de 50% des éléments observés (fleur, baie) ont atteint ce stade.

2.3. Le dispositif d'étude du système en placette

L'essentiel du dispositif expérimental porte sur les placettes délimitées au sein des modalités étudiées. C'est bien dans ces placettes que l'étude du fonctionnement hydrique et azoté du système étudié est mise en place. Un tel dispositif présente le gros avantage de pouvoir concentrer beaucoup de moyens sur un petit espace que l'on considère comme homogène. La disposition de ces placettes de mesure est donc importante car ces placettes doivent représenter le fonctionnement d'une parcelle entière et surtout permettre de comparer les différents traitements étudiés pour des conditions pédoclimatiques similaires. C'est bien pour essayer de prendre en compte, en partie au moins, l'hétérogénéité du milieu que deux placettes ont été équipées pour chaque modalité. Chaque placette est caractérisée par sa position sur la pente de la parcelle. La modalité témoin installée en 2004 fait cependant exception car sa surface est limitée. Elle est donc considérée comme une seule placette. Au final, sept placettes sont obtenues : MT, MD1, MD2, MR1, MR2, MF1 et MF2 (*Figure 2.2*). Sur ces placettes, diverses mesures ont été réalisées afin d'évaluer la croissance des cultures intercalaires, la croissance et la production de la vigne. D'autres mesures visent à caractériser les fonctionnements hydrique et azoté des différents systèmes étudiés (*Tableau 2.1*). Les protocoles élaborés pour les différentes mesures seront décrits dans les chapitres suivants.

1^{ère} Partie : Enherbement des vignobles en région méditerranéenne et impacts sur la croissance, l'élaboration du rendement et la qualité de la production de la vigne.

Les deux chapitres contenus dans cette partie servent de support à la rédaction de deux articles qui seront soumis à la revue : Australian Journal of Grape and Wine Research.

Chapitre III - Enherbement des vignobles en région méditerranéenne : I- Concurrence pour les ressources et effets sur l'expression végétative¹⁰ et la vigueur de la vigne

1. Mots clés

Compétition ; Contrainte azotée ; Contrainte hydrique ; Enherbement ; Fertilisation ; *Festuca arundinacea* Shreb ; *Hordeum vulgare* L. ; Indicateurs ; Irrigation ; Vigueur ; *Vitis vinifera* L.

2. Introduction

La vigne, de par sa croissance « indéterminée », maintient une croissance active tant que les conditions du milieu lui sont favorables. En conséquence, dans les zones naturellement fertiles (plaines et sols profonds) ou dans les vignobles fortement irrigués, elle produit des rameaux très vigoureux avec une abondante ramification qui se traduit par une forte expression végétative (Smart et al. 1991; Dry et Loveys 1998). Delas (1996) note ainsi que l'un des principaux problèmes de la viticulture est, souvent aujourd'hui, la trop grande vigueur végétative des vignes. Cette croissance importante entraîne un retard dans l'apparition des différents stades phénologiques de la vigne (comme la maturité). Elle induit également un entassement du feuillage et crée un microclimat peu aéré et peu lumineux au niveau des grappes (Dry et Loveys 1998; Pellegrino et al. 2005). Delas (2000) observe aussi qu'un retard de l'arrêt de croissance des sarments (dû à une bonne alimentation azotée) se fait au détriment de la synthèse des composés phénoliques de la baie et donc de la qualité des moûts. Par ailleurs dans les vignobles très vigoureux, les tissus sont riches en eau et en azote, les baies sont grosses et les grappes compactes. Toutes ces caractéristiques sont favorables à l'attaque des maladies cryptogamiques comme le botrytis, l'oïdium et le mildiou (Fermaud et al. 2001b; Zahavi et al. 2001; Pellegrino et al. 2005) qui diminuent la qualité de la récolte. Enfin, une diminution raisonnable de la vigueur végétative de la vigne est perçue favorablement par le viticulteur du fait de la diminution du nombre de travaux nécessaires, et donc du temps de travail, qu'elle entraîne.

Pour maîtriser les problèmes de vigueur du vignoble plusieurs techniques culturales ont été développées : taille équilibrée, systèmes de palissage visant à produire des canopées bien aérées et éclairées, opérations en vert (effeuillage, égrappage...), contrôle de l'irrigation, enherbements. C'est sur cette dernière pratique que l'attention de cette recherche est portée. Elle consiste à laisser se développer ou à installer un couvert végétal, de façon permanente ou temporaire, sur tout ou partie de la surface de la parcelle. C'est ainsi qu'on distingue trois types d'enherbements caractérisés par leur durée d'activité : 1) hivernal, détruit avant le débournement de la vigne, 2) semi-permanent, présent sur une partie du cycle de la vigne et 3) permanent, présent pendant tout le cycle de la vigne et d'une année sur l'autre et qui est généralement tondu régulièrement (Laffosse 2001). Pour ces enherbements, différentes espèces (Graminées, Légumineuses et Crucifères principalement) ou mélanges d'espèces peuvent être utilisés (Lal et al. 1991). Le développement d'un couvert spontané peut aussi être géré et utilisé.

¹⁰ **Expression végétative** : Elle représente la quantité de biomasse reproductive et végétative produite par la vigne entière au cours d'une saison (Champagnol 1984; Dokoozlian et Kliever 1995; Freeman et al. 1998).

La pratique de l'enherbement du vignoble est ancienne mais a été quasiment abandonnée au cours du XX^e siècle, du fait de l'apparition des désherbants chimiques et de la pratique de la non-culture (Dion 1993). Les inconvénients de cette dernière ont favorisé le retour de l'enherbement. C'est particulièrement le cas dans les zones où les précipitations sont importantes et/ou réparties de manière satisfaisante au cours de l'année (vignobles du centre de l'Europe, vignobles septentrionaux et atlantiques en France). Elle a été réintroduite pour lutter, dans un premier temps, contre les problèmes d'érosion hydrique des sols viticoles, notamment dans les parcelles à forte pente (Klik 1991; Le Bissonais et al. 2004). Or, ce problème est particulièrement critique dans les régions viticoles (Le Bissonais et al. 2001; Martinez-Casasnovas et al. 2005; Martinez-Casasnovas et Ramos 2006). La présence de l'enherbement améliore également la portance après un épisode pluvieux (Cock 1985). Ceci a conduit à de nombreuses études sur l'enherbement du vignoble et ses conséquences sur la vigne dans les parcelles viticoles de ces régions sont maintenant bien connus (Murisier et Beuret 1986; Ludvigsen 1987; Morlat 1987; Maigre et Murisier 1992; Morlat et al. 1993; Maigre et al. 1995; Carsouille 1996; Maigre 1996; Klik et al. 1998; Rodriguez-Lovelle et al. 2000b; Rodriguez-Lovelle et al. 2000a; Lisa et al. 2001). Les principaux effets observés consistent en une diminution notable de la vigueur des rameaux et de l'expression végétative de la vigne qui peut aller jusqu'à une réduction de 60 à 70 % du poids de bois de taille par cep par rapport à un témoin non enherbé (Morlat et al. 1993; Rodriguez-Lovelle et al. 2000b). Cet effet dépressif de l'enherbement sur la vigueur et l'expression végétative de la vigne semble toutefois s'atténuer après quelques années de présence de la culture intercalaire (Morlat 1987). Plus récemment, l'intérêt pour cette pratique s'est encore accentué du fait de la diminution de l'utilisation de pesticides (particulièrement d'herbicides mais aussi de fongicides) qu'elle induit. Cela s'explique par différents changements induits par l'introduction de l'enherbement dans le système de culture : 1) une sensibilité moins importante des vignes aux maladies cryptogamiques, liée à la diminution de la vigueur (Valdés et al. 2006), 2) une meilleure capacité à intervenir dans la parcelle (meilleure portance du sol pour l'application des produits chimiques après une pluie), 3) l'efficacité même des interventions (meilleure couverture des feuilles et pénétration dans le couvert végétal grâce à une surface foliaire réduite (Corino et al. 2003)), et 4) une fréquence nécessaire de traitements moins importante du fait de vignes moins vigoureuses qui limitent l'effet de dilution des produits systémiques ainsi que l'apparition de nouvelles feuilles qui seront sans protection par des produits de contact.

Il ressort que cette pratique apporte une réponse à de nouveaux enjeux pour la production viticole, les principaux étant une qualité de la production supérieure et une meilleure protection de l'environnement. Pour autant, la pratique de l'enherbement tarde encore à trouver sa place dans les régions viticoles méditerranéennes parce qu'elle pose de nouvelles questions. De fait, ses effets sur l'environnement physique et biotique de la vigne sont complexes. Or le climat méditerranéen est caractérisé par une grande sécheresse au cours de la période de croissance de la vigne et par la violence des épisodes orageux qui font suite à cette période sèche. On comprend donc bien que la présence d'un enherbement peut être intéressante pour lutter contre l'érosion et le ruissellement mais qu'elle pose de nombreuses questions sur l'intensité de la concurrence qu'elle va impliquer pour les ressources hydriques et azotées en particulier. Or, les résultats sont encore peu nombreux et récents dans les vignobles de l'arc viticole méditerranéen (Goma-Fortin 2002; Chantelot et al. 2004; Celette et al. 2005; Celette et Gary 2006).

L'objectif de ce travail est donc de mieux cerner les conséquences de la présence d'un enherbement et de sa gestion sur la vigueur des rameaux et l'expression végétative. Ainsi, l'impact qu'a l'enherbement sur la surface foliaire affecte la photosynthèse de la vigne

(Pellegrino et al. 2006) et peut perturber la maturation du raisin et la mise en réserve de carbone pour l'année suivante dans les parties pérennes de la vigne (Bates et al. 2002; Zapata et al. 2004). La ramification des rameaux et l'émission de jeunes feuilles peuvent également être réduites par la concurrence pour l'eau (Pellegrino et al. 2005) et l'azote (Robinson 1998) et ainsi affecter la sensibilité de la plante à l'oïdium (Emmett et al. 1998). La densité de la canopée obtenue influence le microclimat de la grappe (lumière, hygrométrie, température), la qualité de celle-ci (Smart et al. 1991; Percival et al. 1994b; Gladstone et Dokoozlian 2003) et sa sensibilité à certaines maladies comme le botrytis (Ferraud et al. 2001b; Pieri et al. 2001a). Ainsi, une meilleure connaissance de l'impact de l'enherbement sur ces différentes variables permettrait une gestion plus raisonnée de l'enherbement vis-à-vis des objectifs de production et des impacts sur l'environnement. Pour cela, une expérimentation a été conduite pendant 3 années à la pluviométrie contrastée, entre 2004 et 2006, afin d'étudier l'impact d'un enherbement permanent ou semi-permanent sur la vigne.

3. Matériel et Méthodes

3.1. Conditions générales de l'expérimentation

Ce chapitre s'appuie sur l'étude expérimentale menée entre 2004 et 2006 sur une parcelle à Villeneuve-lès-Maguelone, près de Montpellier. Le climat est de type méditerranéen (*figure 2.3*). Le sol de la parcelle est un sol brun calcaire de texture argileuse, profond et homogène (*Cf. Chapitre II-2.1.3.*). Les modalités d'entretien du sol considérées sont les modalités enherbées de façon permanente (MF) et temporaire (MR), la modalité désherbée (MD), ainsi que la modalité Témoin (MT) pour 2005 et 2006. Chacune de ces modalités est composée de deux placettes caractérisées par leur position par rapport à la pente de la parcelle. Cette pente, orientée N-S, reste légère avec une moyenne de 2% environ dans le bloc haut et inférieure à 1% dans le bloc bas. (*Figure 2.2*).

3.2. Croissance de la culture intercalaire

La croissance de la culture intercalaire renseigne sur l'importance de la compétition pour les ressources. Elle a donc été suivie au cours des 3 années d'expérimentation. Deux types de mesures ont été réalisés : la production de biomasse aérienne cumulée sur l'année et le taux de couverture de la surface enherbée (*Tableau 2.1*) pour chacun des enherbements étudiés. Les différentes mesures effectuées sont réalisées sur une surface délimitée par un cadre métallique de 0,13m². Ces surfaces sont choisies aléatoirement. Le taux de couverture de l'inter-rang par la culture intercalaire est évalué visuellement. La hauteur moyenne du couvert dans la surface délimitée est également mesurée à l'aide d'un réglet. Enfin, un prélèvement destructif de l'enherbement contenu dans la surface du cadre est réalisé. La biomasse prélevée est ensuite séchée à l'étuve à 65°C et pesée. Les prélèvements sont réalisés une fois à l'automne puis à partir du mois de mars tous les 15-20 jours environ. Huit prélèvements par placette sont réalisés à chaque fois.

3.3. Vigne et indicateurs de contrainte

Différents indicateurs ont été suivis sur la vigne afin d'évaluer une éventuelle contrainte hydrique ou azotée.

Pour repérer une contrainte hydrique, le potentiel hydrique foliaire de base (ψ_b), mesure très répandue dans le monde viticole (Van Leeuwen et Seguin 1994b; Deloire et al. 2004), a été mesuré tous les 20 jours environ, du début de l'été à la vendange. Il est présenté comme l'un des indicateurs les plus sensibles à la contrainte hydrique (Van Zyl

1987). Cet indicateur a été complété par un suivi de la conductance stomatique (gs) (Winkel et Rambal 1990) lorsque les conditions météorologiques le permettaient (vent modéré et rayonnement non limitant). Ces mesures ont été réalisées sur les mêmes souches que le ψ_b pour les années 2005-06 à l'aide d'un poromètre à diffusion dynamique (modèle AP4, Delta-T Inc.) sur deux feuilles différentes par souche. Les mesures ont été réalisées aux environs de 11 h du matin car la comparaison des traitements est moins aisée au midi solaire du fait que la vigne étant une plante isohydrique, elle a tendance à fermer très tôt ses stomates (Pellegrino 2003). Enfin, la contrainte hydrique subie par la plante lors de la maturation du raisin a été évaluée par un dosage du $\Delta^{13}\text{C}$ sur les produits carbonés du moût. Une corrélation très significative a en effet été observée entre le potentiel de base mesuré sur la plante entre la véraison et la maturité et le $\Delta^{13}\text{C}$ des moûts de raisin à la vendange (Van Leeuwen et al. 2001; Gaudillère et al. 2002).

Jusqu'à présent, il n'existe pas à notre connaissance d'indicateur facilement mesurable et clair du niveau de contrainte azotée subie par la vigne. Le plus souvent, les experts conseillent de croiser différents indicateurs et d'observer la vigueur générale de la plante pour se prononcer sur une éventuelle contrainte azotée subie par la plante (Gaudillère et al. 2003). Dans cette étude, les contraintes azotées ont été évaluées au travers de trois indicateurs. Cette mesure a été réalisée tous les 10-15 jours à partir de la première quinzaine de juin et jusqu'à la récolte. Chaque valeur mesurée est la moyenne de trente mesures. Les valeurs aberrantes mesurées sont éliminées automatiquement par l'appareil de mesure. Un dosage de la teneur massique en azote total des feuilles a également été effectué environ une fois par mois à partir de la deuxième quinzaine d'avril et ce jusqu'à la vendange. Cette teneur azotée a ensuite été exprimée en teneur surfacique (gN.m^{-2}). Enfin, la teneur en azote assimilable des moûts a été dosée à partir de raisins prélevés à la récolte. Elle renseigne notamment sur la qualité de l'alimentation azotée pendant la phase de maturation des baies (Gaudillère et al. 2003).

3.4. Développement végétatif de la vigne

Surface foliaire de la vigne (LAI)

L'indice foliaire de la vigne a été évalué *in situ* pour chacune des placettes à l'aide d'un LAI-2000 (Plant canopy analyser, Li-Cor Inc.) (Ollat et al. 1998). Cette mesure a été réalisée du débourrement de la vigne à la vendange à raison d'une mesure tous les 15-20 jours. De plus, les travaux en vert réalisés sur le végétal (ébourgeonnage et rognages) sont encadrés par deux mesures afin d'évaluer la quantité de surface foliaire supprimée. Une mesure est également réalisée avant le débourrement pour évaluer la part de l'indice mesuré liée au tronc et aux deux cordons de la vigne. Une autre mesure enfin est effectuée après la chute des feuilles pour évaluer la quantité de lumière interceptée par le cep et les sarments en fin d'année. L'indice mesuré par l'appareil est ensuite corrigé et transformé en LAI à l'aide d'une relation établie avec des mesures destructives de surfaces foliaires en laboratoire (Annexe 2).

Nombre de feuilles produites par la vigne

Ainsi, le nombre de feuilles a été mesuré tous les 15-20 jours du débourrement à la vendange. Les feuilles du rameau principal ont été distinguées des feuilles des ramifications primaires (FR_I) et secondaires (FR_{II}) (Cf. Chapitre II -2.3.2.4.). Dans ce chapitre, seules les feuilles des ramifications seront analysées. En effet, le rameau principal étant rogné au début de l'été, il est difficile de mettre en évidence des différences entre les modalités.

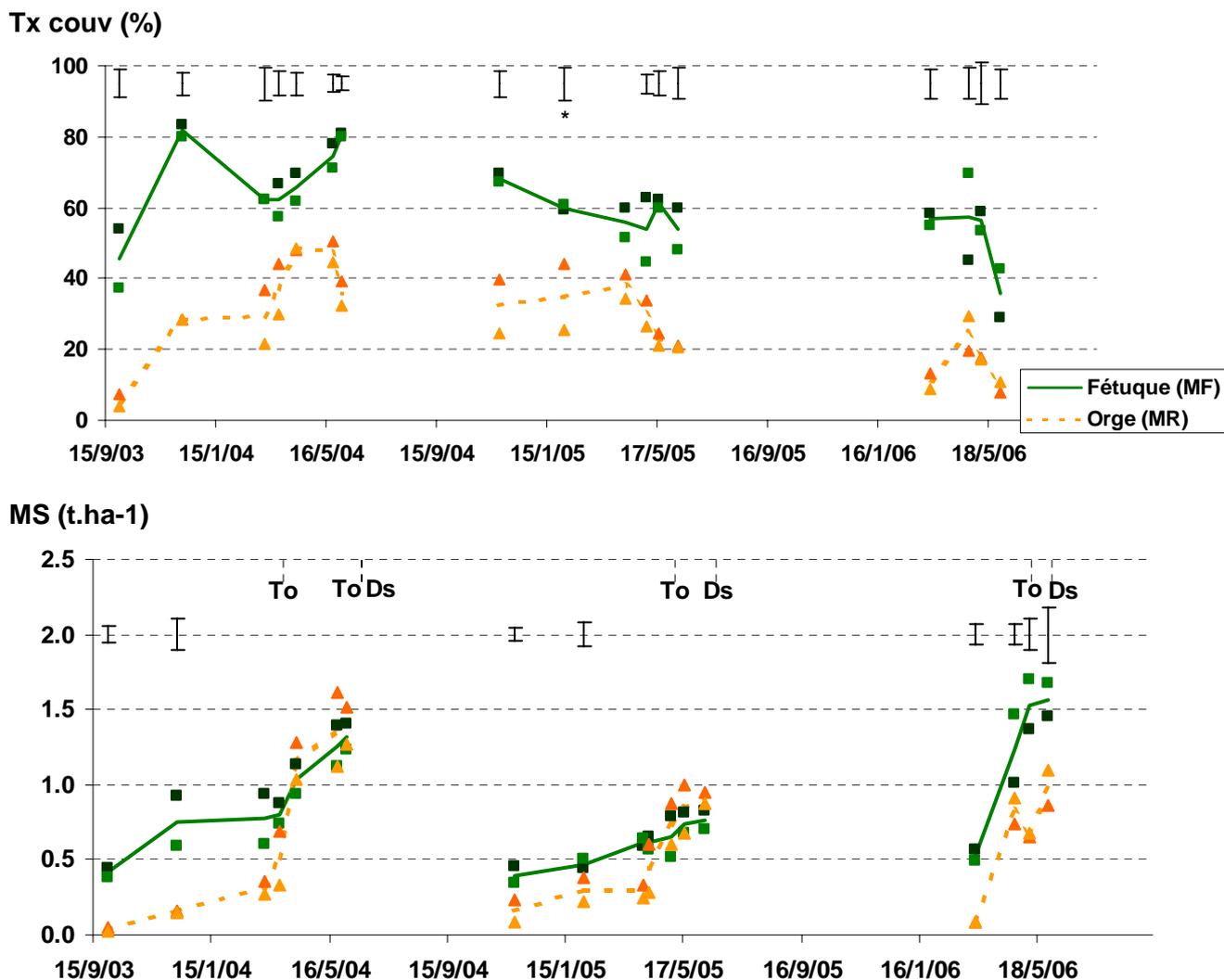


Figure 3.1 – Evolution des biomasses aériennes cumulées produites par les enherbements permanent et semi-permanent (panneau inférieur) et des taux de couverture de la surface enherbée par chaque enherbement (panneau supérieur). Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲) et MR2 (▲). Les barres d'erreur situées en haut du graphique représentent les ppas calculées avec un test de Newman-Keuls lorsque les différences sont significatives entre les deux traitements. * signifie que l'ANOVA a mis en évidence une interaction modalité x bloc. Les lignes verticales pointillées représentent les principaux travaux réalisés sur les enherbements : tontes (To) pour l'enherbement permanent en MF et destruction (Ds) du couvert intercalaire de MR.

Densité de la canopée

Le point quadrat est une méthode qui permet d'évaluer indirectement la densité du couvert dans la zone des grappes (Smart et al. 1988). Cette observation a été effectuée trois fois dans la saison : à la fermeture de la grappe (fin juin), à la véraison (fin juillet) et à la vendange (fin août). A chaque date, le nombre de couches de feuilles et la porosité dans la zone des grappes ont été calculés (Cf. *Chapitre II -2.3.2.5.*).

Croissance en biomasse de la vigne

La biomasse aérienne sèche produite par la vigne a été mesurée en distinguant différents compartiments (tige, feuille et fruit) (Cf. *Chapitre II -2.3.2.2.*). Cette mesure a été réalisée environ une fois par mois entre fin avril et la vendange, aux mêmes dates que les dosages de l'azote dans la plante. Des rameaux représentatifs de la vigueur moyenne de la placette sont choisis sur des souches tirées aléatoirement au sein des placettes. Aucune souche ne subit plus d'un prélèvement. Pour chaque rameau, feuilles et grappes sont séparées du sarment. Le poids sec de chacune de ces trois composantes est ensuite déterminé. A chaque date, seize échantillons sont prélevés par placette.

Ce suivi de l'expression végétative de la vigne en fonction de la placette au cours du cycle a été complété par des mesures en hiver au moment de la taille : nombre de sarments produits par vigne et le poids de bois de taille. Elles ont été mesurées sur douze souches représentatives par placette. Les mêmes souches sont utilisées chaque année.

Réserves carbonées et azotées

Les réserves carbonées et azotées ont été évaluées sur des souches réparties de manière homogène dans toute la parcelle (six souches par modalité). A chaque fois, un morceau de bois est prélevé au moment de la taille puis passé à l'étuve à 65°C pendant 72h. Une fois sec, celui-ci est ensuite broyé et conditionné dans un pilulier avant d'être envoyé au laboratoire d'analyse de l'INRA, en Avignon. Sur chaque échantillon, les teneurs en sucres solubles, en amidon et en azote total ont été dosées. Ces prélèvements ont été réalisés sur la période 2003-05. Les réserves carbonées et azotées de la vigne sont réalisées essentiellement dans les bois et le système racinaire pérennes (Kliwer 1991; Zapata et al. 2004). Pourtant, dans cette étude, les teneurs en sucres et en azote ont été suivies dans les bois de taille, en considérant que les différences observées sur celles-ci sont comparables à celles des bois pérennes (García de Cortázar 2006).

4. Résultats

4.1. Croissance des cultures intercalaires

Les deux enherbements étudiés ont un cycle de production de la biomasse différent (*Figure 3.1*). Ceci s'explique en grande partie par la gestion du couvert et le fait que l'orge (MR) est détruite et semée à nouveau chaque année. En conséquence, la croissance du couvert intercalaire dans la modalité MR dépend beaucoup des conditions climatiques et du sol (humidité et teneur en azote) au cours de la levée de l'orge.

Ainsi, le taux de couverture observé avec un enherbement permanent (MF) est systématiquement supérieur à celui observé en MR (*Figure 3.1*). En effet, l'enherbement permanent est correctement installé à la fin de l'année 2003. A chaque hiver cependant, le taux de couverture diminue légèrement. Au printemps 2004, le taux de couverture de l'enherbement dans cette modalité augmente et se maintient en moyenne à un niveau élevé (environ 70%). Au début de l'année 2005, il est légèrement inférieur (environ 60%) et se maintient toute l'année à ce niveau. Le taux de couverture n'augmente pas au printemps, contrairement à l'année précédente, du fait vraisemblablement de la sécheresse. Ce

phénomène se renouvelle en 2006 avec un taux de couverture stabilisé aux environs de 55% avant une chute à la fin du printemps. Dans la modalité MR, en 2003 et 2004, le taux de couverture de l'enherbement est d'environ 30% à la fin de l'automne. Par la suite, il se maintient à un niveau constant au cours de l'hiver avant d'augmenter au début du printemps 2004 mais il stagne en 2005. A la fin du printemps enfin, une diminution de ce taux de couverture est observée chaque année. Au cours de l'automne 2005, la levée paraît moins bonne et le taux de couverture en sortie d'hiver est alors très faible (10% environ). Il augmente ensuite au début du printemps comme en 2004 mais demeure à un niveau bas (maximum à 25% environ) et chute à la fin du printemps. La couverture se révèle donc médiocre cette année là dans la modalité MR.

Le niveau de biomasse aérienne au début de l'automne est toujours supérieur pour l'enherbement permanent du fait d'un reliquat de l'année précédente et/ou d'une croissance au tout début de l'automne de l'enherbement permanent (*Figure 3.1*). Ceci explique que le niveau de biomasse cumulée produite soit significativement supérieur dans cette modalité au cours de l'automne et de l'hiver. Aux printemps 2004 et 2005 en revanche, la production de biomasse par l'orge est nettement supérieure, si bien que les différences de biomasse aérienne disparaissent entre les deux modalités. La biomasse totale produite au cours de l'année par l'orge est même légèrement supérieure à celle produite par l'enherbement permanent mais cette différence n'est pas significative au seuil de $\alpha=5\%$. En 2005, cette production de matière sèche aérienne est significativement inférieure à celle des deux autres années pour les deux enherbements. En 2006, la biomasse cumulée produite en MF est significativement supérieure à celle produite en MR tout au long de l'année. Cependant, cette différence est surtout liée aux problèmes de levée connus par l'orge l'automne précédent et à la faible biomasse produite au cours de l'automne et de l'hiver. Au printemps, les biomasses produites par les deux enherbements sont sensiblement identiques (*Figure 3.1*). Cette production de biomasse est d'ailleurs très importante au cours des mois de mars et avril dans la modalité MF (1 T MS/ha). Elle est sensiblement la même que pour la même période en 2004 pour l'orge (environ 1 T MS/ha). Ainsi, la production annuelle de matière sèche aérienne pour les deux enherbements est comprise entre 0,7 et 1,6 T.ha⁻¹. Des productions supérieures (2,5 T.ha⁻¹) ont été observées pour une fétuque élevée dans des conditions similaires par Celette et al. (2005). Ces valeurs demeurent particulièrement faibles par rapport aux productions réalisées pour un couvert destiné à la commercialisation ou au pâturage. Ainsi, des productions de matière sèche aérienne de l'ordre de 10 T.ha⁻¹ ont été mesurées dans des conditions pluviales méditerranéennes pour l'orge (Cantero-Martinez et al. 2003). Concernant la fétuque élevée, des productions de 6 à 10 T.ha⁻¹ ont été observées en conditions méditerranéennes pour une production de fourrage irriguée pendant le printemps mais avec une sécheresse estivale imposée (Voltaire et al. 1998; Norton et al. 2006b). Cependant, ces productions sont obtenues dans des conditions beaucoup plus favorables d'alimentation hydrique et azotée à celles subies par un enherbement viticole.

4.2. Enherbement et contraintes hydriques et azotées

4.2.1. Quelle contrainte hydrique pour la vigne ?

Un niveau de contrainte hydrique variable selon l'année climatique

Les mesures de Ψ_b , de gs et de $\Delta^{13}C$ nous renseignent sur l'intensité de la contrainte hydrique subie par la vigne. Globalement, des différences de contrainte hydrique apparaissent entre les années (*Figure 3.2 et Tableau 3.1*) : l'année 2005 est la plus stressante, l'année 2004 la moins contraignante et l'année 2006 est intermédiaire mais plus

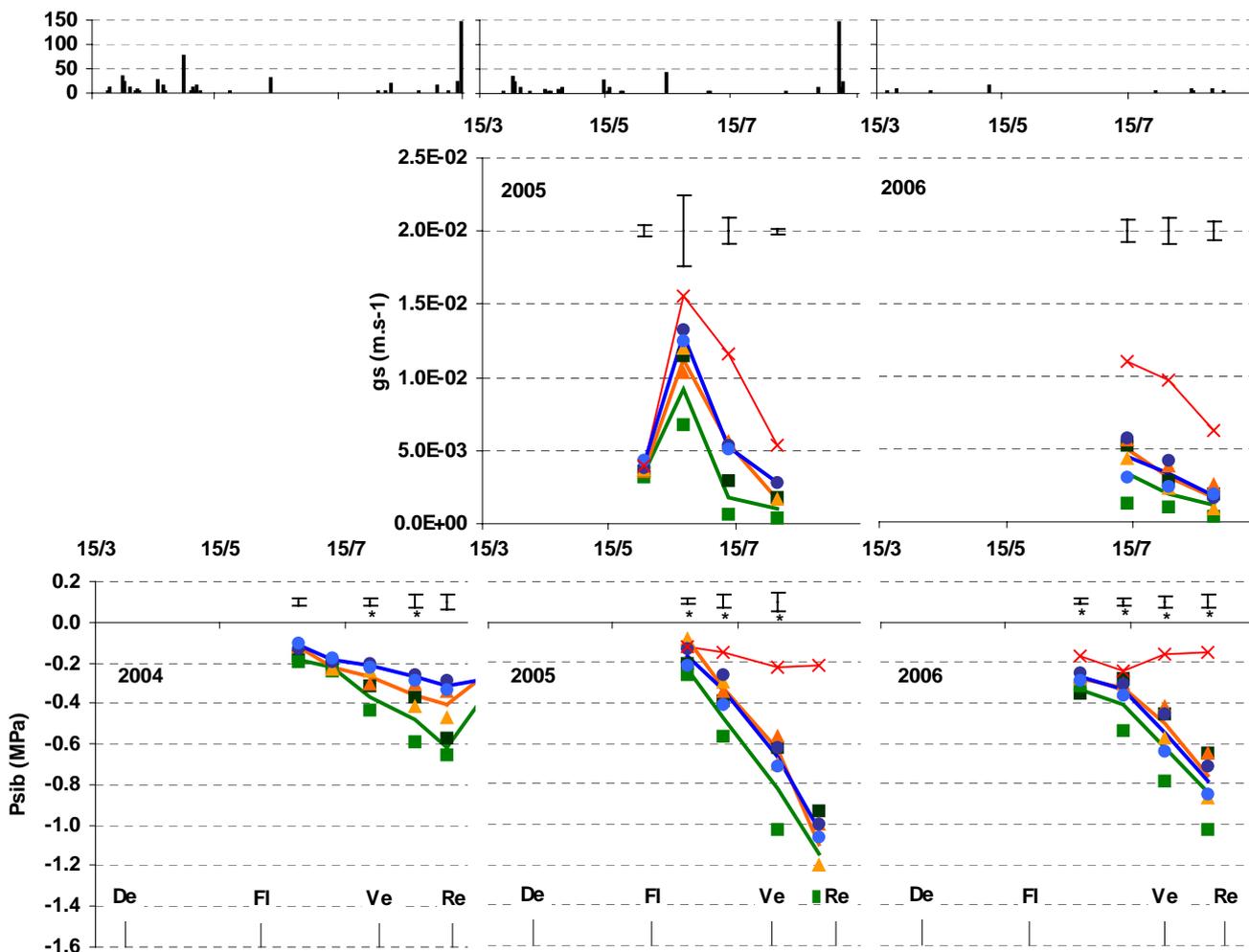


Figure 3.2 – Conductance stomatique (g_s – panneau du milieu), potentiels hydriques foliaires de base (ψ_b – panneau du bas) et précipitations (en mm) mesurés sous enherbement permanent (MF), temporaire (MR), sol nu (MD) et avec irrigation (MT). Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲), MR2 (▲), MD1 (●), MD2 (●) et MT (×). Les barres verticales continues situées en bas du graphique représentent les stades phénologiques. Débourrement (De), Floraison (Fl), Véraison (Ve) et Récolte (Re). Les barres situées en haut de chaque graphique représentent les ppas calculées avec un test de Newman-Keuls ($p < 0,05$) lorsque les différences sont significatives entre les traitements. * signifie que l'ANOVA a mis en évidence une interaction modalité x pente.

Tableau 3.1 – Rapport isotopique $\Delta^{13}C$ mesuré sur des échantillons de raisin prélevés à la récolte en fonction de la modalité étudiée et de l'année. Les lettres en gras représentent un effet significatif de la modalité d'entretien, tandis que les petites lettres représentent l'interaction entre traitement et bloc lorsque celle-ci est significative.

	2004		2005		2006	
MF1	-24.15	bc	-22.29	c	-22.79	
MF2	-22.71	d	-20.30	d	-21.39	
MF	-23.43	b	-21.29	c	-22.09	c
MR1	-25.06	a	-23.18	b	-24.71	
MR2	-23.70	c	-22.03	c	-22.83	
MR	-24.38	a	-22.60	b	-23.77	b
MD1	-24.54	ab	-22.50	c	-22.53	
MD2	-24.57	ab	-22.42	c	-21.96	
MD	-24.56	a	-22.46	b	-22.25	c
MT			-24.70	a	-26.07	a

proche de 2005. Ceci traduit bien les conditions météorologiques plus sèches de ces deux dernières années (*Figure 2.3*) et une moindre recharge hivernale du profil de sol. Ainsi, l'année 2005 se caractérise par des contraintes hydriques très sévères en fin de cycle pour toutes les modalités avec des Ψ_b compris entre -1 et $-1,4$ MPa suivant les placettes (Carbonneau 1998). Ceci se traduit notamment dans les valeurs de $\Delta^{13}C$ mesurées qui sont supérieures à $-22,5\%$ (*Tableau 3.1*), ce qui correspond à des contraintes fortes à très fortes (Guix 2005). En 2006 également, des contraintes hydriques importantes sont mises en évidence dans toutes les modalités.

Une interaction entre bloc et modalité qui accentue la contrainte hydrique imposée par l'enherbement

Systématiquement, pour les trois indicateurs, la modalité enherbée toute l'année (MF) subit une contrainte hydrique supérieure sur la période estivale. Cependant, cette différence est pour beaucoup la conséquence d'une placette MF2 beaucoup plus contrainte que toutes les autres (*Figure 3.2*). Un effet bloc est ainsi souvent mis en évidence.

Le bloc bas des modalités enherbées profite mieux des orages d'été que le bloc haut. Ainsi, un effet bloc significatif apparaît à partir de mi-août, du fait des 20 mm de pluies tombées au cours de l'orage du 10 août. Outre le potentiel foliaire de base, le $\Delta^{13}C$ témoigne également d'une contrainte hydrique supérieure au cours de la période de maturation du raisin, particulièrement en MF2 (*Tableau 3.1*). A l'opposé, la placette MR1 semble moins contrainte au cours de cette période de maturation. En 2005 et 2006 également, l'effet bloc prend de l'importance au cours de la saison et les placettes du bloc haut sont beaucoup plus contraintes que celles du bas.

Ceci peut être lié à une altitude plus basse de ces placettes qui permettrait éventuellement une alimentation de la vigne par la nappe plus proche à cet endroit. La nappe est en effet susceptible de jouer un rôle significatif dans l'alimentation de la vigne en période de sécheresse (Guix 2005). Divers auteurs ont également montré que le Ψ_b était un indicateur sensible à une hétérogénéité de l'humidité du sol entre les horizons. Ainsi, l'influence éventuelle de la nappe à une profondeur accessible pour une partie du système racinaire de la vigne pourrait suffire à faire remonter le Ψ_b (Tardieu et al. 1990; Tardieu et Katerji 1991; Améglio et Archer 1996; Améglio et al. 1999; Donovan et al. 2001). Cette différence entre bloc haut et bloc bas peut également être la conséquence d'une meilleure recharge au cours de l'hiver dans les placettes du bas où la pente est presque nulle.

Finalement, avec les indicateurs dynamiques de contrainte, l'interaction entre les effets bloc et traitement se présente plus tôt dans la saison (après la nouaison) si l'année est sèche et plus tard (après la fermeture de la grappe) si l'année est plus humide comme en 2004.

Une irrigation suffisante pour éviter toute contrainte hydrique

Pour les années 2005 et 2006, la placette irriguée (MT) présente des valeurs de Ψ_b et gs très différentes et systématiquement supérieures à, respectivement, $-0,25$ MPa et $0,4$ cm.s⁻¹. Le $\Delta^{13}C$ permet également de distinguer invariablement MT des autres placettes avec des valeurs inférieures à $-24,7\%$. Ceci confirme que, sur cette modalité irriguée, la vigne ne connaît pas de contrainte hydrique significative tout au long de la période suivie (Carbonneau 1998; Gaudillère et al. 2002).

L'enherbement permanent est source d'une concurrence féroce pour l'eau

En 2004, MF apparaît significativement plus stressée que les autres modalités dès la première date suivie. La modalité MR, quant à elle, ne décroche de la MD qu'à partir de la véraison. Tout au long du cycle, l'écart entre MF2 et les autres placettes se creuse. La

placette MF1 présente des contraintes hydriques proches de celles connues par les placettes de la MR jusqu'à peu avant la récolte, avant de rejoindre les valeurs connues par MF2.

Dès la première mesure de Ψ_b réalisée en 2005, un gradient de contrainte hydrique apparaît avec MR comme modalité la moins stressée et MF la plus stressée. Par la suite, l'effet bloc prend de plus en plus d'importance avec les placettes situées en haut de la pente qui s'avèrent beaucoup plus stressées que celles en bas de pente, ce qui est confirmé par la mesure du $\Delta^{13}C$. La conductance stomatique a permis de mettre en évidence une contrainte hydrique supérieure dans les modalités enherbées par rapport aux autres dès la floraison (début juin). Par la suite, cet indicateur fait ressortir un gradient de contrainte assez similaire à celui observé avec Ψ_b (Figure 3.2).

En 2006, le premier Ψ_b mesuré permet de différencier une modalité MF plus contrainte que les trois autres. Cette différence persiste tout au long du cycle et est confirmée par la conductance stomatique. A la véraison, un effet bloc important apparaît avec un bloc bas très significativement moins contraint que le bloc haut. La comparaison des indicateurs de contrainte mesurés en MR et MD témoigne de très faibles différences entre ces deux modalités en 2005 et 2006. Ceci peut s'expliquer notamment par la faible croissance de l'orge au cours de ces deux années (Figure 3.1) qui induit une concurrence pour les ressources plus limitée. Cette concurrence moins forte de l'orge fait que le $\Delta^{13}C$ de MR apparaît même inférieur à celui de MD et MF, qui eux ne sont pas significativement différents (Tableau 3.1). D'ailleurs, les valeurs mesurées en MR équivalent à une contrainte hydrique modérée d'après la classification établie par Guix (2005). Les autres modalités demeurent à des niveaux considérés comme fortement contraints (Gaudillère et al. 2002; Deloire et al. 2004).

4.2.2. Quelle contrainte azotée pour la vigne ?

Des différences entre modalités difficilement mises en évidence avec la teneur en azote surfacique de feuilles

La teneur en azote surfacique des feuilles de vigne (Nsurf%) augmente pour toutes les modalités avec le vieillissement des feuilles jusqu'à une valeur palier atteinte peu après la floraison. Chaque année, cette valeur palier est supérieure dans la modalité désherbée (MD) à la valeur observée dans une vigne avec un enherbement permanent (Figure 3.3). Cette valeur palier est relativement stable d'une année sur l'autre, bien que légèrement inférieure dans la modalité MF en 2005 et 2006. La Nsurf% de la modalité MR est généralement plus proche de celle de la modalité MF que de celle de la modalité MD. Pour autant, elle surpasse généralement la Nsurf% de la modalité enherbée toute l'année peu après la floraison et la destruction de l'enherbement semi-permanent. C'est notamment le cas en 2005 et 2006. Le fait que cet indicateur soit, pour la modalité MR, plus proche des valeurs de la modalité MF que de MD, tend à confirmer que la teneur en azote des feuilles est pour beaucoup associée à la nutrition azotée de la plante au cours de la période de mise en place des feuilles (Gaudillère et al. 2003). Or, sur cette période, la concurrence pour les ressources imposées par l'enherbement semi-permanent est probablement très proche de celle de l'enherbement permanent.

C'est finalement la modalité MT qui présente les Nsurf% les plus variables d'une année sur l'autre. Chaque année, la Nsurf% de cette modalité peu avant la floraison est plutôt comparable à celle des modalités enherbées. Ceci s'explique notamment par une croissance de la surface foliaire un peu plus rapide dans cette modalité du fait de l'irrigation. La fourniture de l'azote étant alors surtout dépendante de la capacité de la vigne à mobiliser l'azote de ses réserves pérennes (Yang et Hori 1979; Zapata et al. 2004), elle est probablement légèrement limitante à cette période là. Par la suite, la fourniture du

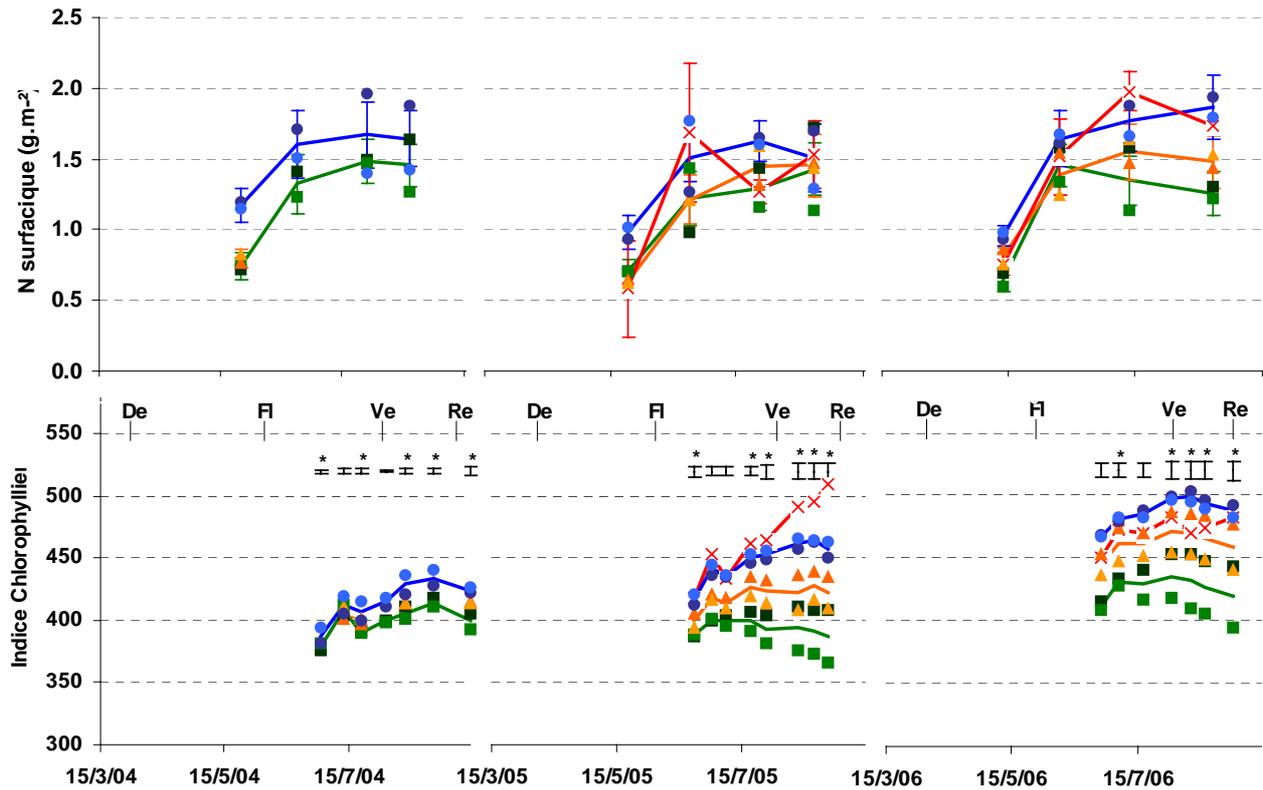


Figure 3.3 – Teneur en azote surfacique des feuilles (panneau du haut) et indices chlorophyllien mesuré à l’aide d’un chlorophylle-mètre (panneau du bas) en fonction du traitement. Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲), MR2 (▲), MD1 (●), MD2 (●) et MT (×). Les barres verticales continues représentent les stades phénologiques de la vigne : Débourrement (De), Floraison (Fl), Véraison (Ve) et Récolte (Re). Les barres d’erreur situées en haut du graphique de l’indice chlorophyllien représentent les pps calculées avec un test de Newman-Keuls ($p < 0,05$) lorsque les différences sont significatives entre les traitements. * signifie que l’ANOVA a mis en évidence une interaction modalité x pente. Les barres d’erreur situées sur les droites d’évolution de la teneur en azote surfacique des différentes modalités représentent l’intervalle de confiance calculé avec un test de Student et un risque $\alpha = 0,05$.

sol étant très supérieure (fertilisation et minéralisation de l'azote organique favorisée par l'irrigation), la N_{surf}° de la modalité MT augmente très rapidement et devient égale ou supérieure à celle de la modalité désherbée peu après la floraison (*Figure 3.3*). Ensuite, si en 2006, la N_{surf}° de la modalité MT se maintient à un palier égal ou légèrement supérieur à celle de la modalité désherbée, en 2005, en revanche, l'état de nutrition azoté de la vigne irriguée semble se dégrader brusquement peu avant la véraison et se maintient par la suite à un palier assez proche de celui des modalités enherbées, malgré une légère remontée des N_{surf}° peu avant la récolte (*Figure 3.3*).

Cet indicateur montre cependant une forte variabilité au sein même d'une même modalité. Ceci explique que peu de différences apparaissent significatives avec un test de Student et un risque α de 5%. Ainsi, seules les N_{surf}° mesurées avant la floraison de la vigne montrent que la contrainte azotée subie par les vignes enherbées est chaque année plus forte à cette période que celle connue par la vigne désherbée (*Figure 3.3*). Une fois les N_{surf}° arrivées au palier défini précédemment, la grande variabilité de la mesure ne permet plus de faire de différence entre les modalités. Kliewer (1991) avait déjà observé qu'il est difficile de montrer des différences de contrainte azotée subie par la vigne car la différence de N_{surf}° entre une vigne carencée et une vigne correctement alimentée est mince. Pour autant, cet indicateur permet de distinguer des tendances et un gradient d'état de nutrition azoté entre les plantes. L'année 2006 fait cependant exception et des différences significatives sont mises en évidence. En effet, cette année là, les N_{surf}° de la modalité MF sont significativement inférieures à celles de la modalité désherbée entre le 15 juillet et la récolte (*Figure 3.3*).

Il est difficile, voire impossible de comparer les valeurs observées ici à celles mesurées dans d'autres situations puisque cet indicateur varie beaucoup avec la situation géographique et le cépage (Kliewer 1991).

Un indice chlorophyllien discriminant mais sensible à la contrainte hydrique subie par la vigne

Au cours de l'année 2004, les différences d'indices chlorophylliens restent faibles entre les modalités mais sont tout de même significatives. En 2005 et 2006, les différences se creusent mais une variabilité de plus en plus importante apparaît entre blocs. Globalement, les indices mesurés au cours de 2005 sont plus faibles que ceux observés en 2006 (*Figure 3.3*).

Chaque année, l'indice chlorophyllien observé dans la modalité avec un enherbement permanent est significativement inférieur à celui observé sur les deux modalités MD et MT dès la fermeture de la grappe (fin juin) et jusqu'à la récolte (*Figure 3.3*). L'indice chlorophyllien mesuré sur la modalité MR n'est pas toujours significativement différent de celui mesuré en MF. Il est en revanche systématiquement inférieur à celui des modalités MT et MD en 2004 comme en 2005. Les indices chlorophylliens mesurés en MT et en MD sont similaires entre la fermeture de la grappe et la récolte en 2006. C'est également le cas au cours de l'année 2005 jusqu'à la véraison environ. Après ce stade, l'indice chlorophyllien de la modalité irriguée s'envole et devient très significativement supérieur à celui de la vigne en MD (*Figure 3.3*). Malgré, une légère remontée de la N_{surf}° entre la véraison et la récolte, cette différence n'a pas été observée avec la teneur en azote des feuilles. Aussi, l'écart entre les deux modalités MD et MT entre véraison et maturité est peut être plus le fait d'une différence de statut hydrique de la plante. La modalité MD subit en effet une contrainte hydrique forte à cette période (*Figure 3.2*). Or, comme certains auteurs l'ont déjà signalé (Spring 1999), l'indice chlorophyllien est sensible à une forte contrainte hydrique qui pourrait entraîner un jaunissement, même modéré, du feuillage.

Tableau 3.2 – Teneurs en azote assimilable des moûts (mg.L^{-1}) pour les différentes modalités étudiées. Les valeurs en italique représentent les intervalles de confiance calculés avec Test de Student et un risque $\alpha=0,05$.

	2004	2005	2006
MF1	104.1 ± 10.2	42.0 ± 13.7	56.0 ± 13.7
MF2	105.0 ± 36.6	77.0 ± 0.0	49.0 ± 0.0
MF	104.6 ± 17.6	59.5 ± 20.6	52.5 ± 6.9
MR1	137.4 ± 47.6	52.5 ± 6.9	84.0 ± 0.0
MR2	160.1 ± 15.7	77.0 ± 0.0	66.5 ± 6.9
MR	148.8 ± 24.7	64.8 ± 14.1	75.3 ± 10.3
MD1	123.4 ± 7.6	63.0 ± 0.0	87.5 ± 6.9
MD2	102.4 ± 19.9	70.0 ± 13.7	84.0 ± 0.0
MD	112.9 ± 12.6	66.5 ± 6.9	85.8 ± 3.4
MT		126.0 ± 0.0	185.5 ± 34.3

Une interaction importante est observée entre la modalité d'entretien du sol et le bloc. Cette interaction est essentiellement le fait, en 2004, d'un indice chlorophyllien très inférieur dans la placette MF2, située en haut de la pente. Ainsi, comme pour les indicateurs de contrainte hydrique, cette placette présente un niveau de contrainte azotée apparemment supérieur à celui des autres placettes (*Figure 3.3*). En 2005 et 2006, outre cette placette MF2, la placette MR2 se détache également nettement de la placette MR1 et contribue à créer une interaction forte entre ces deux variables, ainsi qu'un effet bloc significatif. En 2006, la situation est différente avec un indice équivalent à celui des modalités MD et MT dans la placette MR1, en bas de pente. En revanche, l'indice mesuré dans la placette MR2 est beaucoup plus proche de celui de la placette MF1. L'écart entre blocs n'est pas significatif, en 2005, avant le 15 juillet. Ce n'est qu'après cette date que les indices mesurés sur les placettes en haut et bas de la pente dans les modalités enherbées se distinguent significativement (*Figure 3.3*). En 2006, cet écart se creuse un peu plus tôt dans l'année et devient plus important qu'en 2005 au moment de la récolte.

Cette différence importante entre haut et bas de la parcelle dans les indices chlorophylliens mesurés est étonnante par rapport à la seule contrainte azotée que pourrait subir la vigne puisque de telles différences ne sont pas observées aussi nettement avec la teneur en azote surfacique. En effet, si ce premier indicateur montrait bien des différences similaires entre haut et bas dans la modalité MF, elles n'étaient pas perceptibles dans la modalité MR (*Figure 3.3*). Elles pourraient donc être la conséquence d'une contrainte hydrique importante. Autant en 2005 qu'en 2006, les potentiels de base mesurés après le 15 juillet dans les placettes du haut de la pente dans les modalités enherbées sont plus négatifs que ceux du bas de la pente (*Figure 3.2*). Cette contrainte hydrique forte se combine probablement à une offre du sol en azote plus faible dans les modalités enherbées du fait de la compétition entre vigne et enherbement qui induit une contrainte azotée modérée entre la véraison et la récolte, particulièrement en 2006. Celle-ci était d'ailleurs déjà perceptible avec la $N_{surf\%}$ (*Figure 3.3*). Ces deux contraintes additionnées expliqueraient la chute de l'indice chlorophyllien observé à partir de la véraison dans les placettes enherbées situées en haut de la pente. La distinction entre blocs n'existe en revanche pas dans la modalité désherbée alors qu'elle a été observée avec les indicateurs de contrainte hydrique. Cette dernière ne suffit donc pas à expliquer la différence d'indice chlorophyllien.

La teneur en azote des feuilles est un indicateur peu sensible aux variations de nutrition azotée postérieures à la mise en place du feuillage car la remobilisation de l'azote des feuilles en cas de besoin est apparemment un phénomène modéré sur la vigne (Gaudillère et al. 2003). Par conséquent, la teneur en azote surfacique devrait être assez stable une fois cette surface foliaire établie. Or, les deux indicateurs de contrainte azotée présentés ci-dessus se basent sur une teneur par unité de surface de l'azote. Il est donc important de suivre un autre indicateur, plus sensible aux variations de l'état de nutrition azotée plus tardives dans le cycle de la vigne.

Une nutrition azotée de la vigne fortement affectée par la sécheresse en période estivale

Les teneurs en azote assimilable dans les moûts sont sensiblement plus importantes au cours de l'année 2004 et dans la modalité irriguée au cours des deux autres années (*Tableau 3.2*). Ainsi, la teneur en azote assimilable des moûts la plus élevée mesurée au cours de cette expérimentation correspond à celle de la modalité MT en 2006. Cette modalité avait alors été irriguée tout au long du remplissage de la baie et fortement fertilisée. Globalement, les teneurs sont peu différentes d'une modalité à l'autre en 2004. Seule la teneur de la modalité MR est significativement supérieure à celle de la modalité

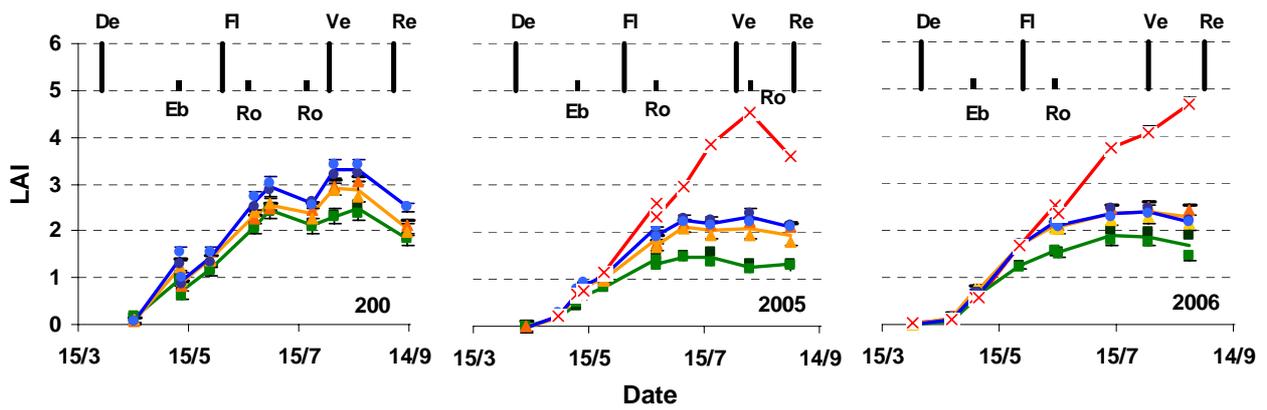


Figure 3.4 – Evolution des surfaces foliaires (LAI) produites par la vigne en fonction du traitement. Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲), MR2 (▲), MD1 (●), MD2 (●) et MT (×). Les barres verticales continues situées en haut du graphique représentent les stades phénologiques. Débourrement (De), Floraison (Fl), Véraison (Ve) et Récolte (Re). Les barres verticales pointillées représentent les principaux travaux réalisés sur le feuillage : Ebourgeonnage (Eb) et Rognages (Ro). Les intervalles de confiance ont été calculés par un Test de Student avec $\alpha=0,05$. Elles sont représentées par des barres encadrant les points.

MF (Tableau 3.2). Pour autant, cette différence est peu significative et pour beaucoup liée à une teneur en azote assimilable plus élevée dans la placette MR2. En 2005, seule la teneur mesurée dans la modalité MT se distingue des trois autres modalités. Les moûts de chacune des autres modalités ont des teneurs en azote assimilable très basses. En 2006 en revanche, un gradient de teneur apparaît avec $MT > MD - MR > MF$. Tous ces résultats semblent donc confirmer que cette teneur en azote assimilable des moûts est très sensible à l'offre en azote du milieu accessible pour la plante au cours de la période de croissance de la baie. Cette période de remplissage du raisin correspond également dans le climat méditerranéen à la période sèche. Ceci explique que cet indicateur diminue fortement en cas de forte sécheresse estivale comme c'est le cas en 2005 et en 2006. De plus, les consommations de l'enherbement permanent au cours de cette même période entraînent une diminution sensible de cet indicateur, particulièrement au cours des années où la contrainte hydrique est la plus modérée (2006 et surtout 2004) (Tableau 3.2).

4.3. Croissance et développement végétatif de la vigne

4.3.1. Un développement végétatif fortement et précocement diminué par la présence d'un enherbement

Evolution de la surface foliaire de la vigne

Les LAI mesurés en 2004 sont significativement supérieurs à ceux mesurés les deux autres années pour toutes les modalités étudiées (Figure 3.4) avec des valeurs comprises entre 2,5 et 3,5 selon la modalité. En 2005 et 2006, les LAI mesurés sont comparables pour toutes les modalités avec tout de même un LAI maximal supérieur en 2006 qu'en 2005, et ce particulièrement pour la modalité MF. Pour toutes les modalités (hors irriguée), l'arrêt de croissance en surface foliaire observé est plus précoce en 2005 qu'en 2006 (le 01/07/2005 contre le 15/07/2006).

En 2005 comme en 2006, le LAI de MT connaît une croissance presque linéaire au cours du temps, seulement interrompue par les rognages, et atteint des valeurs de LAI très élevées pour la vigne (>4) (Figure 3.4). Ceci suggère que l'évolution du LAI de cette modalité MT est proche d'une croissance potentielle. En 2004, la vigne dés herbée (MD) connaît une croissance en LAI proche de celle de la vigne irriguée en 2005 jusqu'au premier rognage. Par la suite, le LAI de cette modalité reste assez stable jusqu'à la chute des feuilles (Figure 3.4). En 2005 et en 2006 en revanche, la croissance de la vigne en MD décroche par rapport à celle de MT dès la floraison. La croissance de la modalité MR est intermédiaire à celle de MF et de MD en 2004 mais proche, voire identique, à celle de cette dernière en 2005 et 2006. Elle présente cependant un léger décrochement par rapport à celle de MD en 2005 à partir de la première quinzaine de juillet.

Chaque année, le LAI de MF est significativement inférieur à celui mesuré dans toutes les autres modalités (en moyenne de 30% par rapport à MD) et la croissance en surface foliaire de la vigne de MF décroche par rapport à celles des autres modalités dès la première quinzaine de mai (Figure 3.4).

Généralement, le LAI mesuré dans la placette située en bas de la pente de chacune des modalités est supérieur à celui du haut. Cet écart entre blocs apparaît significatif à partir de la deuxième quinzaine de juillet pour chacune des années. Ces différences entre placette d'une même modalité restent cependant moins importantes que les différences entre modalités.

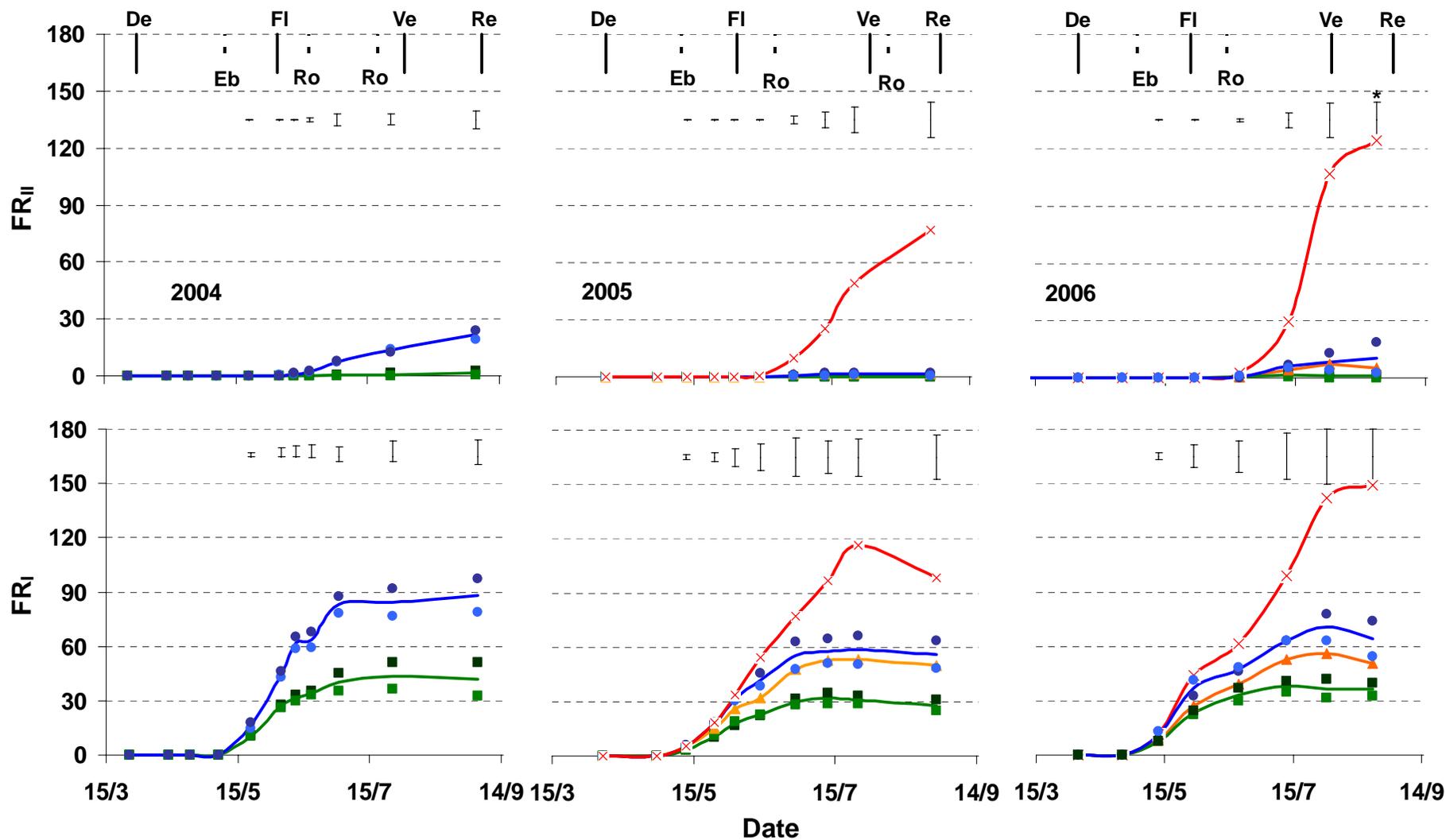


Figure 3.5 – Evolution du nombre de feuilles de ramifications primaires (FR_I) et secondaires (FR_{II}) produites par rameau de vigne en fonction du traitement. Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲), MR2 (▲), MD1 (●), MD2 (●) et MT (×). Les barres verticales continues situées en haut du graphique représentent les stades phénologiques. Débourrement (De), Floraison (Fl), Véraison (Ve) et Récolte (Re). Les barres verticales pointillées représentent les principaux travaux réalisés sur le feuillage : Ebourgeonnage (Eb) et Rognages (Ro). Les barres situées en haut de chaque graphique représentent les ppp calculées avec un test de Newman-Keuls ($p < 0,05$) lorsque les différences sont significatives entre les traitements. * signale une interaction modalité x pente.

Ramification des rameaux de vigne et nombre de feuilles

La production de feuilles de ramifications primaires (FR_I) et secondaires (FR_{II}) permet de fortement différencier les modalités (*Figure 3.5*). La différence de ramification des rameaux entre les modalités explique une bonne partie de la différence de LAI observée précédemment entre les modalités (*Figure 3.4*).

Le nombre de FR_{II} permet de différencier les années avec une production de FR_{II} par rameau presque nulle (hors MT) en 2005, inférieure à une dizaine en 2006 (MD1 et MT exceptées) et d'environ 25 en MD en 2004. Dans tous les cas, la production de FR_{II} est supérieure dans la modalité MT par rapport aux autres modalités. Elle est également plus importante dans cette modalité en 2006 qu'en 2005. Parmi les autres modalités, la production de FR_{II} en MD est supérieure à celles des traitements enherbés. Cependant, la production de FR_{II} en MR n'est que légèrement inférieure à celle de MD. De plus, en 2005 comme en 2006 seul le nombre de FR_{II} produites dans la modalité MT se différencie significativement de celui des autres modalités. Dans tous les cas en revanche, la production de FR_{II} est quasiment nulle en MF. La production de FR_{II} est donc particulièrement sensible à la contrainte subie par la vigne (Pellegrino et al. 2005). Celle-ci est suffisante pour stopper la production de FR_{II} en 2005 dans toutes les modalités non irriguées et chaque année en MF (*Figure 3.5*).

Comme pour les FR_{II}, le nombre de FR_I est sensiblement inférieur en 2005 et 2006 qu'en 2004. La vitesse d'émission de FR_I est quasiment constante en MT pour les années 2005 et 2006 et est seulement perturbée par les rognages (*Figure 3.5*). Ainsi, en 2005, la production de FR_I est constante jusqu'au 2^e rognage qui intervient peu après la véraison. Par la suite, cette production ralentit fortement tandis que les fruits deviennent des puits prépondérants. Ce phénomène est également observé en 2006 sans l'impact supplémentaire d'un rognage tardif. A l'opposé de MT, la modalité enherbée toute l'année (MF) produit significativement moins de FR_I que les autres modalités. Ainsi, la production de FR_I est, chaque année, environ deux fois moindre en MF qu'en MD. Les vignes enherbées de la modalité MF cessent d'émettre des FR_I à partir du début du mois de juillet quelle que soit l'année considérée. La modalité MR, suivie en 2005 et 2006, est intermédiaire à MF et MD mais généralement plus proche de cette dernière. En 2006 cependant, l'émission de FR_I en MR est comparable à celle de MF jusqu'à la destruction de l'orge (fin juin). Par la suite, l'émission de feuilles devient nulle en MF, tandis qu'elle se poursuit encore une quinzaine de jours en MR (*Figure 3.5*). En considérant la croissance de la MT comme une croissance potentielle, on observe que l'émission de FR_I est significativement inférieure à partir du 15 mai environ en MF et à partir de la floraison pour MD et MR.

4.3.2. Une canopée moins dense dans les vignes enherbées

Le nombre de couches de feuilles (NCF) observé par la méthode du point quadrat (Smart et al. 1988) nous renseigne sur la densité de la canopée de la vigne.

Globalement, en comparant les NCF mesurés sur l'ensemble des modalités étudiées et des trois années à ceux observés dans d'autres études, il apparaît que la densité de la canopée (*Tableau 3.3*) est faible à moyenne dans notre cas. Seul le NCF observé dans la modalité MT en 2006 entre dans la catégorie des fortes densités (Percival et al. 1994a; Dokoozlian et Kliever 1995). Les NCF dénombrés dans la modalité enherbée toute l'année correspondent systématiquement à une densité de la canopée faible tandis que ceux observés dans les modalités MD et MR renvoient généralement à une densité moyenne.

Chaque année, des différences significatives dans les NCF observés apparaissent généralement dès la fermeture de la grappe (fin juin) (*Tableau 3.3*). En 2004 cependant, le NCF observé dans la modalité désherbée est significativement supérieur à celui observé dans les deux modalités enherbées de la véraison à la récolte. La différence observée cette

Tableau 3.3 – Nombre de couches de feuilles (NCF) du couvert dans la zone des grappes mesurés par la méthode du point quadrat à trois stades phénologiques clés de la vigne : la fermeture de la grappe (Fe), la véraison (Ve) et la récolte (Re). Les lettres en gras représentent un effet significatif de la modalité d’entretien, tandis que les petites lettre représentent l’interaction entre traitement et position dans la pente lorsque celle-ci est significative.

	2004			2005			2006					
	Fe	Ve	Re	Fe	Ve	Re	Fe	Ve	Re			
MF1	2.4	b	2.8	2.5	2.1	2.0	1.6	d	2.5	2.3	2.1	b
MF2	2.4	b	2.6	2.2	2.0	1.4	1.1	e	2.1	1.7	1.3	c
MF	2.4 b	2.7 b	2.4 b	2.1 b	1.7 c	1.3 c			2.3 b	2.0 b	1.7 c	
MR1	--	3.0	2.7	2.8	2.6	2.1	b	2.7	2.2	2.7	b	
MR2	--	2.7	2.7	2.7	2.3	1.8	c	2.7	2.3	2.4	b	
MR	--	2.9 b	2.7 b	2.8 a	2.4 b	1.9 b			2.7 a	2.2 b	2.5 b	
MD1	3.4	a	3.4	3.1	3.0	2.7	2.1	b	2.8	2.4	2.4	b
MD2	2.7	b	3.2	3.2	2.8	2.3	1.8	c	2.2	2.3	2.3	b
MD	3.1 a	3.3 a	3.2 a	2.9 a	2.5 b	1.9 b			2.5 ab	2.3 b	2.4 b	
MT	--	--	--	3.2 a	3.7 a	3.7 a	a		3.0 a	4.2 a	5.2 a	a

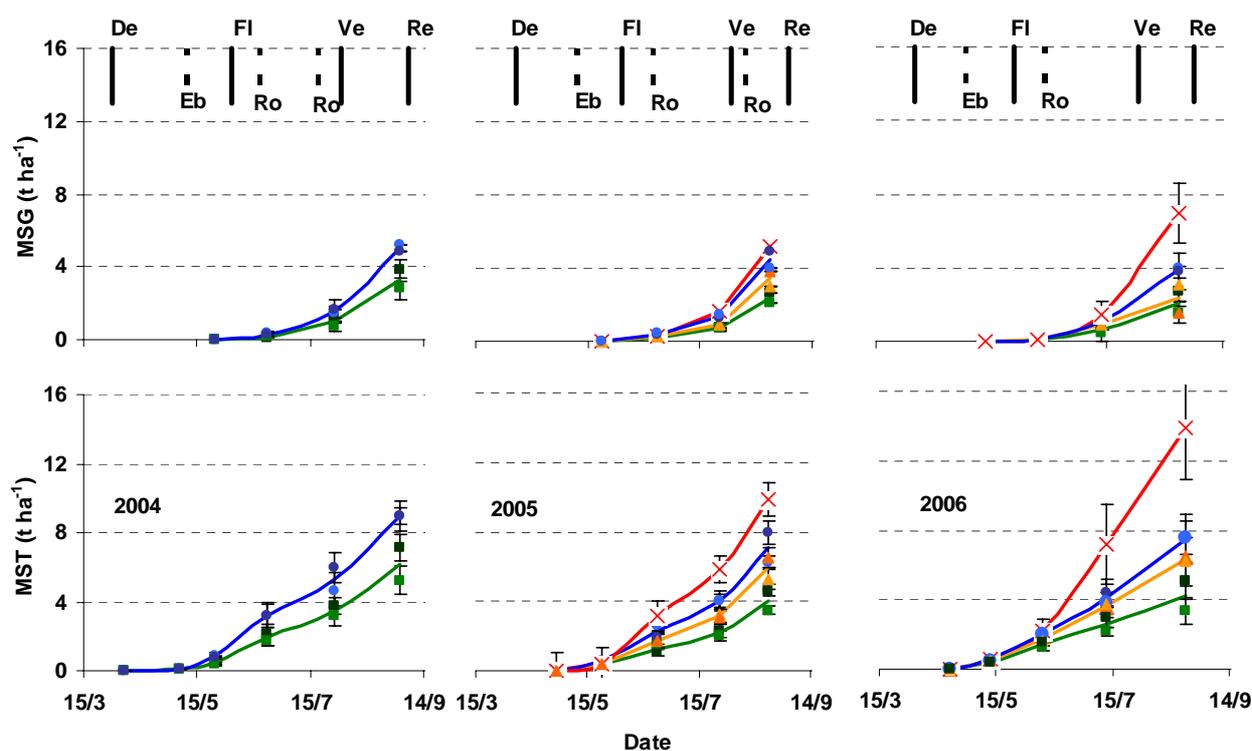


Figure 3.6 – Evolution des matières sèches totales (MST) et des fruits (MSG) produites par la vigne en fonction du traitement. Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲), MR2 (▲), MD1 (●), MD2 (●) et MT (×). Les barres verticales continues situées en haut du graphique représentent les stades phénologiques. Débourrement (De), Floraison (FI), Véraison (Ve) et Récolte (Re). Les barres verticales pointillées représentent les principaux travaux réalisés sur le feuillage : Ebourgeonnage (Eb) et Rognages (Ro). Les intervalles de confiance ont été calculés par un Test de Student avec $\alpha=0,05$. Elles sont représentées par des barres encadrant les points.

année-là à la fermeture de la grappe est surtout liée à une plus forte densité de la canopée en bas de la pente dans la modalité MD. Les deux modalités enherbées présentent une évolution de la densité du couvert similaire au cours de l'année. Cet indicateur montre également que, en 2004, la densité du couvert dans la zone des grappes est établie au moment de la fermeture des grappes et qu'elle évolue peu par la suite.

A la fermeture de la grappe en 2005, le NCF est sensiblement le même qu'en 2004 dans toutes les modalités. Pour autant, une différence significative est observée entre la modalité enherbée toute l'année et les trois autres (*Tableau 3.3*). A partir de la véraison, un gradient de densité de la canopée se développe avec $MT > MD > MR > MF$. Ces différences s'expliquent par une augmentation du nombre de feuilles dans la zone des grappes de la modalité MT, entre la fermeture de la grappe et la véraison, et une diminution de celui-ci dans les autres modalités. Ces observations confirment qu'en absence de contraintes hydrique et azotée, la vigne poursuit sa croissance et la production de ramifications. En revanche, dans toutes les modalités non irriguées, une chute des feuilles précoce est observée du fait de la sécheresse importante de l'année. Cette chute des feuilles est plus importante dans le bloc haut de la parcelle avec une diminution du NCF de près de 50% tandis que celle-ci est environ moitié moindre dans les placettes du bas de la pente (*Tableau 3.3*). Ces différences s'expliquent probablement par une contrainte hydrique subie par la vigne plus forte dans le bloc haut de la parcelle que dans le bas (*Figure 3.2*).

Les NCF observés à la fermeture de la grappe en 2006 sont comparables à ceux observés à la même époque en 2005. Seul le NCF de la modalité MD, particulièrement celui de la placette MD2 située en haut de pente, est inférieur à celui observé au même moment en 2005. En conséquence, la différence de NCF reste significative entre les modalités MF d'un côté et MR et MT de l'autre mais le NCF mesuré dans la partie désherbée ne se différencie d'aucun des deux groupes. Par la suite, le NCF demeure relativement stable jusqu'à la récolte dans la plupart des situations étudiées. Seule la placette MF2 présente une chute des feuilles progressive et importante sur cette période et le NCF de cette placette devient significativement plus faible que celui des autres placettes à la récolte. Ceci s'explique par une contrainte hydrique subie par la vigne très supérieure dans cette placette (*Figure 3.3*). De son côté, la modalité irriguée et fertilisée poursuit sa croissance et produit des ramifications nombreuses, plus encore qu'en 2005 sur la même période (*Figure 3.5*), si bien que le NCF observé en 2006 est très supérieur à celui de 2005.

4.3.3. Production de biomasse aérienne

Pour toutes les modalités étudiées, la production de matière sèche aérienne totale (MST) par la vigne est plus élevée en 2004 que pour les années 2005 et 2006. En revanche, la production de MST pour ces deux dernières années est similaire dans toutes les modalités en dehors de la modalité MT. En effet, la production de MST dans la modalité irriguée et fertilisée augmente significativement entre l'année 2005 ($10 \text{ T} \cdot \text{ha}^{-1}$) et l'année 2006 ($14 \text{ T} \cdot \text{ha}^{-1}$). Cette augmentation de la croissance aérienne de la vigne peut s'expliquer notamment par une augmentation de la fertilisation entre ces deux années et une poursuite de l'irrigation plus tard dans la saison en 2006. Pour chacune des trois modalités non irriguées, la placette située en haut de la pente de la parcelle produit sensiblement moins de biomasse aérienne au cours de l'année 2005 que la placette du bas (*Figure 3.6*). Cette observation confirme à nouveau que les vignes du bloc en haut de la pente ont subi une contrainte hydrique plus forte que celles du bas au cours de cette année (*Figure 3.2*).

Les MST produites dans la modalité théoriquement sans contrainte hydrique et azotée sont chaque année significativement supérieures à celles de toutes les autres modalités. Comme pour le LAI (*Figure 3.4*) et le nombre de feuilles des ramifications (*Figure 3.5*), la production de MST permet de différencier significativement la croissance de la modalité

Tableau 3.4 – Nombre de rameaux par souche et poids de bois de taille (PBT) mesurés au moment de la taille, en fonction de la modalité d'entretien considérée. Les lettres en gras représentent un effet significatif de la modalité d'entretien, tandis que les petites lettres représentent l'interaction entre traitement et position dans la pente lorsque celle-ci est significative.

	Nb de Rameaux (ram/cep)			PBT (kg/cep)					
	2004	2005	2006	2004	2005	2006			
MF1	11.3	11.6	11.4	a	0.63	b	0.31	0.58	bc
MF2	10.5	10.5	9.0	b	0.45	c	0.26	0.37	d
MF	10.9	11.0	10.2		0.54 b		0.28 c	0.48 c	
MR1	12.4	11.1	10.7	ab	0.63	b	0.42	0.61	bc
MR2	11.6	10.8	10.2	ab	0.59	b	0.44	0.53	c
MR	12.0	11.0	10.4		0.61 b		0.43 b	0.57 b	
MD1	11.6	11.5	11.3	a	0.86	a	0.51	0.62	b
MD2	10.8	11.3	10.1	ab	0.93	a	0.47	0.54	bc
MD	11.2	11.4	10.7		0.89 a		0.49 a	0.58 b	
MT			10.2	ab				1.18 a	a

dés herbée de celle de la modalité enherbée toute l'année. En revanche, la modalité MR montre un comportement intermédiaire qui ne se différencie significativement d'aucun des deux autres (*Figure 3.6*).

La différence entre MST produite sur la modalité dés herbée devient significativement supérieure à celle de la modalité MF peu avant la récolte en 2004 et en 2006. En revanche, cette différence existe dès le 15 juillet environ en 2005. La production de biomasse aérienne par la modalité dés herbée décroche significativement par rapport à la modalité irriguée à partir du 15 juillet environ en 2005, et un peu plus tardivement en 2006. Ceci est lié notamment à une croissance de la vigne dés herbée légèrement plus soutenue en 2006 du fait d'une contrainte hydrique moindre cette année-là.

Une croissance reproductive moins affectée par la concurrence pour les ressources

Les différences de MST aérienne produites par les modalités étudiées correspondent en partie à des productions de fruit (MSG) différentes entre les modalités (*Figure 3.6*). Ainsi, la production de raisin par la modalité dés herbée est significativement supérieure à celle de la modalité enherbée toute l'année. La production de fruits par la modalité MR est également intermédiaire mais ne se différencie pas significativement des deux autres. En revanche, la production de fruits par la vigne irriguée et fertilisée n'est pas différente de celle de la modalité dés herbée en 2005 mais elle le devient en 2006.

La production de MSG est légèrement inférieure (différence non significative) dans toutes les modalités en 2006 par rapport à 2005, mise à part dans la modalité MT où elle est plus élevée en 2006. L'augmentation de la production de MSG en MT entre 2005 et 2006 peut être liée, comme pour la MST, à une fertilisation azotée plus importante et une période d'apport d'eau par irrigation plus longue. Globalement, il semble que la MSG différencie moins facilement les modalités que la MST et la différence relative entre les modalités MD et MT est moindre pour la production de fruits que pour la production de MST, quelle que soit l'année. Ceci est lié à la tendance qu'aura la plante à privilégier la croissance végétative en conditions très favorables par rapport à la croissance reproductive (Matthews et al. 1987; Delas 2000; Howell 2001; Wery 2005). En condition de contrainte, les ramifications (sans grappes) sont les premières affectées et diminuent donc le poids de la partie végétative.

Détermination de l'expression végétative de la plante à la taille

Dans cette étude, l'expression végétative de la vigne est en partie contrainte par l'ébourgeonnage réalisé chaque année. En effet, à partir de l'année 2004, les vignes ont été ébourgeonnées pour obtenir un nombre de rameaux correspondant à ce qui était recherché par la taille. Ainsi, en théorie, toutes les vignes devraient comporter à partir de cette année-là 12 rameaux. Cependant, du fait d'une mortalité des bourgeons, plus ou moins importante selon l'année et la modalité considérée, le nombre de rameaux ayant réellement poussé est systématiquement inférieur (*Tableau 3.4*). Ceci explique en partie que les Poids de Bois de Taille (PBT) observés soient compris dans la gamme basse observée dans la littérature. Ainsi, chaque année, les PBT observés dans toutes les modalités sont compris entre 0,3 et 1,2 kg.cep⁻¹ (soit 0,2 et 1 kg.m⁻¹ de rang de vigne). Ces valeurs correspondent à des canopées de densité faibles à moyennes d'après la classification réalisée par Dokoozlian et Kliewer (1995) sur Cabernet-Sauvignon. Percival et al. (1994a) considèrent qu'un PBT supérieur à 0,85 kg.m⁻¹ correspond à une vigne de Riesling très vigoureuse. Cette valeur n'est finalement obtenue que pour la modalité irriguée et fertilisée en 2006. Elle est également approchée par les vignes dés herbées en 2004 et par les vignes de la modalité MT en 2005. Ceci confirme que dans ces situations, l'expression végétative de la vigne a été peu contrainte.

Tableau 3.5 – Teneurs en amidon, glucides solubles et azote total dosées au moment de la taille en fonction de la modalité étudiée. Les lettres en gras représentent un éventuel effet significatif de la modalité d'entretien.

	Amidon (%MS)			Gluc. Solubles (%MS)			Azote total (%MS)		
	2003	2004	2005	2003	2004	2005	2003	2004	2005
MF	7.0	4.2	5.9	4.9 a	4.8	4.3 b	0.50	0.48 b	0.49 b
MR	8.7	3.7	5.8	4.1 b	3.9	4.0 b	0.54	0.49 b	0.59 a
MD	8.0	3.0	5.5	4.4 ab	4.2	4.7 ab	0.49	0.55 a	0.57 a
MT			5.0			5.1 a			0.63 a

Les PBT mesurés sur les différentes modalités entre 2004 et 2006 témoignent d'une vigueur de la plante significativement plus importante, quelle que soit la modalité, au cours de l'année 2004. L'année 2005 présente, au contraire, des PBT plus faibles dans toutes les modalités à celles observées au cours des deux autres années. L'expression végétative de la vigne au cours de l'année 2006 a été intermédiaire (*Tableau 3.4*).

Le PBT mesuré dans la modalité irriguée et fertilisée est logiquement très supérieur à celui de toutes les autres modalités. Ceux mesurés dans la modalité désherbée sont généralement supérieurs à ceux des modalités enherbées mais l'année 2006 fait exception avec un PBT dans la modalité MR équivalent à celui de la modalité désherbée (*Tableau 3.4*). Cette diminution de la vigueur induite par la présence d'un enherbement est observée dès 2003, première année d'installation des enherbements, avec des PBT dans les modalités MR et MF significativement plus faibles qu'en MD (*données non présentées*). En effet, à l'opposé de la modalité désherbée, la vigne de la modalité avec enherbement permanent présente le plus souvent des PBT significativement inférieurs à ceux des autres modalités. Ceci est toujours vrai pour la placette enherbée située en haut de la pente (MF2), soit la plus contrainte mais la placette en bas de pente (MF1) présente souvent des valeurs de PBT plus proches de celles de la modalité MR. Au cours de l'année 2006, un effet bloc important a été observé avec des PBT dans les placettes en haut de la pente systématiquement plus faibles que ceux en bas de pente (*Tableau 3.4*).

Tout ceci montre donc bien que le PBT est un indicateur de l'expression végétative de la vigne au cours de l'année et la croissance de la vigne est très dépendante des contraintes qu'elle a pu subir. Ainsi, en moyenne sur les trois années suivies, la présence de l'enherbement permanent a induit une diminution des PBT d'environ un tiers par rapport au désherbé tandis que celle d'un enherbement semi-permanent n'induit une diminution du PBT que de 15% environ. Ces valeurs sont proches de la diminution observée en présence d'un enherbement sur Chasselas (Murisier et Zufferey 1999).

4.3.4. Réserves des bois

Teneur en sucres des bois de taille

L'essentiel du carbone est stocké dans les réserves pérennes de la plante sous forme d'amidon. En effet, cette forme a l'avantage d'être plus stable que les solubles et de ne pas contribuer à la pression osmotique des cellules de la plante. Or, les teneurs en amidon observées dans les bois de taille ne sont pas affectées significativement par les modalités étudiées (*Tableau 3.5*). Globalement, la teneur en amidon observée dans les bois à la fin de l'année 2003 est sensiblement la même dans toutes les modalités avec une teneur comprise entre 7 et 9% de la matière sèche. Ces valeurs correspondent assez bien à ce qui a pu être observé dans des conditions de croissance non limitantes sur Pinot noir (Zapata et al. 2004). En revanche, les teneurs en amidon observées en 2004 et 2005 sont significativement plus faibles qu'en 2003. La chute importante de la teneur en amidon en 2004 s'explique probablement par une attaque tardive de mildiou (*Plasmopora viticola*) qui a entraîné une défoliation presque totale de toutes les vignes à la fin du mois de septembre. Cette défoliation précoce (2 mois avant la période normale de sénescence environ) a ainsi limité la reconstitution des réserves après la vendange. En 2005, la sécheresse subie par la vigne a diminué la production de surface foliaire active dans toutes les modalités (*Figure 3.4*) et a également provoqué un arrêt précoce de la photosynthèse additionné à une défoliation partielle précoce (*Tableau 3.3*). En conséquence, la reconstitution des réserves carbonées sous forme d'amidon n'a pu être que partielle cette année-là (*Tableau 3.5*).

Contrairement à la teneur en amidon, la teneur en sucres solubles des bois de taille varient peu d'une année sur l'autre. Elles sont également peu variables d'une modalité à l'autre. Pour autant, la teneur en sucres solubles dosée dans la modalité enherbée toute l'année est significativement supérieure à celle de la modalité MR à la fin de l'année 2003. En 2005, c'est la teneur dosée dans la modalité MT qui se révèle supérieure à celle des deux modalités enherbées (*Tableau 3.5*). Cette différence peut s'expliquer par les contraintes fortes subies cette année-là dans les modalités enherbées qui auront induit une assimilation du carbone et une production de sucres plus faibles que pour les vignes irriguées.

Les réserves en azote des bois de taille

Zapata et al. (2004) observent dans des conditions optimales de nutrition azotée et hydrique, une teneur en azote des parties pérennes des bois comprises entre 0,65 et 0,90%. Les teneurs en azote observées sur les vignes étudiées sont systématiquement plus faibles et seule la teneur mesurée dans la modalité irriguée et fertilisée se rapproche de ces valeurs (*Tableau 3.5*). Au cours de l'année 2003, les teneurs en azote total sont similaires et faibles pour toutes les modalités. Entre 2003 et 2004, la teneur en azote remonte dans les bois de taille de la vigne désherbée, tandis qu'elle reste basse dans les deux modalités enherbées. En conséquence, la teneur observée dans la partie désherbée est significativement plus élevée que dans les deux modalités enherbées. Entre 2004 et 2005 enfin, la teneur en azote des bois reste faible dans la modalité MF tandis qu'elle remonte à un niveau plus favorable dans toutes les autres modalités (*Tableau 3.5*).

Les faibles teneurs observées à la fin de l'année 2003 signifient que la vigne débouffe en 2004 avec des réserves en azote limitées. Pour autant, les conditions de croissance ayant été peu limitantes cette année-là (*Figures 3.2 et 3.3*), la vigne désherbée a pu en partie reconstituer ses réserves d'azote au cours de l'année. En revanche, la concurrence induite par la croissance importante des deux enherbements au cours de cette année-là a dégradé l'état de nutrition azotée de la vigne et empêché cette remontée des teneurs en azote des bois (*Tableau 3.5*). En 2005, la concurrence de l'enherbement est encore forte et maintient une teneur en azote basse dans les bois. De son côté, l'orge (MR) dont la croissance est plus tardive et faible cette année-là concurrence moins la vigne qui peut ainsi reconstituer ses réserves.

5. Discussion Générale-Conclusion

Ce travail présente les influences multiples de différents modes d'entretien du sol sur l'expression végétative et la vigueur des rameaux de la vigne en milieu méditerranéen.

Dans les conditions estivales sèches de cette zone géographique, le premier élément à observer est la faible croissance des cultures intercalaires. La matière sèche aérienne produite est de près de 2 T.ha⁻¹ soit bien moins que les productions fourragères de fétuque élevée ou commerciales d'orge (Volaire et al. 1998; Cantero-Martinez et al. 2003; Norton et al. 2006b). Cette faible production est fortement liée à la faiblesse des ressources disponibles, notamment hydriques. Ainsi dans les années plus humides comme en 2004 (500 mm de pluie entre janvier et août), la biomasse aérienne produite est quasiment deux fois supérieure à celles des années moins favorables comme 2005 (300 mm de pluie entre janvier et août).

Si l'on considère une activité transpiratoire comparable entre les deux espèces d'enherbement étudiées, l'enherbement permanent composé principalement de fétuque élevée transpire une quantité d'eau cumulée supérieure à l'enherbement semi-permanent, malgré une biomasse aérienne produite comparable. En effet, l'activité transpiratoire a lieu

sur une période plus longue avec l'enherbement permanent et son taux de couverture du sol est plus élevé. En conséquence, le dessèchement potentiel du profil de sol, et par conséquent la concurrence entre vigne et enherbement, sont supérieurs pour l'enherbement permanent. A ce manque d'eau s'ajoute une contrainte azotée. Celle-ci peut être la conséquence des consommations d'azote par la culture intercalaire mais aussi de l'assèchement du profil qui diminue la disponibilité de l'azote (Cf. *Chapitre VII*) (Thiebeau et al. 2005). Ceci peut notamment être pénalisant pour le rendement et la qualité de la production de raisin au cours de la période de remplissage des baies. Ainsi, la teneur en azote assimilable des moûts, qui renseigne sur l'offre d'azote disponible pour la vigne au cours de cette période (Van Leeuwen et al. 2000a; Gaudillère et al. 2003), est diminuée chaque année dans la modalité avec un enherbement permanent. Les biomasses annuelles produites sont assez comparables entre l'orge et la fétuque au début de l'été, ce qui laisse penser que les quantités d'azote consommées par les deux enherbements sont similaires.

La croissance des enherbements induit des contraintes nutritionnelles (eau, azote) à la fois pour les enherbements eux-mêmes et pour la vigne. Le moment d'apparition de ces contraintes et leur intensité ont fortement conditionnés par les conditions météorologiques (principalement la pluie) pendant la période de croissance de la vigne, mais aussi par la recharge hivernale du profil de sol. Ainsi, pour la contrainte hydrique, un gradient est observé avec 2005>2006>2004 qui est le reflet direct du niveau de sécheresse de l'année. La modalité désherbée témoigne de cet effet année très marqué. Pour les trois indicateurs hydriques, la modalité enherbée toute l'année (MF) présente l'intensité de contrainte la plus élevée sur la période estivale. Avec ces indicateurs dynamiques de contrainte, il est possible d'observer qu'en cas d'année sèche et de profil de sol peu rechargé, une contrainte modérée se produit autour de la nouaison. Au contraire, lorsque les ressources hydriques sont moins limitantes, la contrainte apparaît plus d'un mois plus tard, après la fermeture de la grappe. Concernant l'intensité de cette contrainte, elle est moins importante, quelle que soit la modalité, au cours des années plus arrosées (2004) que pour les années sèches (2005 et 2006). Cependant des différences de statut hydrique plus importantes en 2004 ont été observées entre les vignes des différentes modalités. Ceci rend compte d'une concurrence plus importante des enherbements pour les années plus favorables à la croissance de la vigne et de l'enherbement.

Du point de vue de l'expression végétative du vignoble, les diverses variables de croissance suivies mettent en évidence un impact important du mode d'entretien du sol. Celui-ci est la conséquence directe de la compétition pour les ressources et des contraintes qu'elle induit comme cela a déjà été observé dans d'autres régions viticoles (Soyer et al. 1984; Morlat 1987; Maigre et al. 1995). Cependant, cet impact est visible plus ou moins tôt dans le cycle selon le moment d'apparition de la contrainte (hydrique ou azotée) et son intensité (Schultz et Matthews 1988; Ussahatanonta et al. 1996). Dans le même temps, le choix de la variable végétative mesurée influe sur la précocité de la détection de cet impact (Wery 2005). Ainsi, des effets de l'enherbement ont été observés, même avant que les indicateurs de contrainte puissent le montrer. Par exemple, les variables comme le nombre des feuilles et le LAI témoignent des contraintes très tôt dans le cycle (avant la floraison) surtout pour la modalité avec un enherbement permanent. Pellegrino et al. (2005) démontrent notamment que la production de feuilles de ramifications primaires, et plus encore de feuilles issues de ramifications secondaires, est très sensible à une contrainte subie par la vigne. Gomez del Campo et al. (2002) observent, sur vigne, que la surface foliaire est fortement corrélée avec l'intensité de la contrainte hydrique, particulièrement avant la floraison. Le nombre de feuilles et leur surface sont affectés. Une contrainte post-floraison, après que le méristème apical cesse la production de nouveaux phytomères, a un impact très limité sur la surface foliaire (Wery 2005). Dans les situations de sécheresse très

longue et sévère, cette réduction de la vitesse de croissance peut devenir un arrêt complet. Ainsi, chaque année, toutes les modalités, en dehors de l'irriguée, ont arrêté leur croissance à la véraison et même plus tôt au cours de l'année la plus sèche (2005). Pour les autres variables suivies, comme la densité du couvert, les contraintes sont visibles autour de la fermeture de la grappe ou plus tard encore pour la matière sèche totale. En conclusion, les contraintes associées à la présence de l'enherbement réduisent significativement la croissance végétative de l'année, bien que cet effet soit variable en fonction de l'année climatique.

L'échelonnement dans le temps de l'impact de la modalité d'entretien du sol sur les différentes variables de vigueur et expression végétative est intéressant vis-à-vis du contrôle des maladies cryptogamiques. En premier lieu, un taux faible d'apparition de nouvelles feuilles autour de la floraison indique un nombre faible de jeunes organes plus sensibles aux attaques d'oïdium (Halleen et Holz 2001). Plus tard dans la saison, une surface foliaire réduite et une faible densité du couvert signifient que l'environnement micro-climatique de la grappe (hygrométrie et humectation des feuilles notamment) est moins favorable au botrytis. De plus, la couverture et la pénétration dans le couvert des produits phytosanitaires sont meilleures dans des conditions de faible entassement du feuillage. Ces caractéristiques du couvert ont été rencontrées toutes les années dans la modalité avec enherbement permanent et dans un degré moindre dans la modalité MR. A l'opposé la modalité irriguée est la plus favorable au développement des maladies, compte tenu de son expression végétative excessive.

La mesure des PBT fournit une information intégrée sur l'expression végétative de la vigne et est très dépendante des contraintes subies pendant l'année. Cet indicateur est souvent utilisé pour évaluer l'équilibre (végétatif/reproductif) du vignoble. Dans cette expérimentation, sur les trois années suivies, la présence de l'enherbement permanent a entraîné une diminution des PBT d'environ un tiers, en moyenne, par rapport au désherbé. De son côté, l'enherbement semi-permanent n'induit une diminution du PBT que de 15% environ. Ces valeurs sont proches de la diminution observée en présence d'un enherbement sur Chasselas dans des régions plus continentales comme la Suisse (Murisier et Zufferey 1999) ou sur Chenin Blanc dans un climat plus océanique en Anjou (Morlat 1987).

La forte diminution, à la fois, des PBT et de la matière sèche aérienne produite observée dans la modalité enherbée toute l'année fait que les fortes contraintes nutritionnelles de l'année 2005 n'entraînent pas de diminution de la teneur en amidon des bois de taille. En revanche, une quantité plus importante d'amidon a été produite dans les vignes sans contrainte (irriguées et fertilisées) en comparaison avec les vignes enherbées. De la même manière, la teneur en sucres solubles de ces bois de taille est peu variable entre modalités au sein d'une même année. Seules des contraintes très fortes permettent d'observer une différence entre les modalités enherbées et celles sans contrainte. Ceci confirme que les performances photosynthétiques, et donc l'assimilation du carbone et la production de sucres, sont moins sensibles aux contraintes que d'autres processus (Wery 2005; Pellegrino et al. 2006). L'enherbement permanent, une fois bien implanté, affecte systématiquement les réserves azotées de la vigne, laissant moins d'azote à la vigne pour soutenir la période de croissance initiale de l'année suivante. L'enherbement semi-permanent n'a pas de conséquence aussi nette sur ces mêmes réserves. De plus, la croissance de la vigne du début de cycle étant fortement corrélée à l'état des réserves au débourrement (Conradie 1980), la diminution précoce de cette croissance observée dans la modalité avec un enherbement permanent montre que celui-ci affecte également le potentiel de croissance de l'année suivante au travers d'une diminution de la mise en réserve.

D'autres facteurs peuvent encore accentuer l'effet dépressif de la présence de l'enherbement sur la croissance de la vigne. Ainsi, une forte pente conditionne la recharge hivernale au travers du ruissellement (Leonard et Andrieux 1998; Celette et al. 2005).

En tous les cas, les modifications importantes de l'expression et de la vigueur végétative de la vigne s'accompagnent potentiellement de conséquences importantes sur les rendements et la composition des moûts. Ces effets sont encore à étudier et font l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV - Enherbement des vignobles en région méditerranéenne : II- Impact sur l'élaboration du rendement et la qualité des moûts

1. Mots clés

Compétition ; Contrainte azotée ; Contrainte hydrique ; Enherbement ; Fertilisation ; *Festuca arundinacea* Shreb ; *Hordeum vulgare* L. ; Indicateurs ; Irrigation ; Qualité ; Rendement ; *Vitis vinifera* L.

2. Introduction

Pour des raisons économiques, l'obtention de rendements suffisants est le premier objectif d'un vigneron. La définition d'un rendement suffisant est très variable selon le type de produit recherché. La zone d'appellation et les choix du viticulteur pèsent lourdement dans cette définition. De nos jours, la sélection génétique et la mise en place de systèmes de culture adaptés ont conduit à une amélioration notable des rendements. De ce fait, et parce que les exigences des consommateurs sont toujours plus élevées, la qualité du raisin produit est primordiale pour la filière viticole et les objectifs de rendement sont pour beaucoup fixés par rapport à ce critère.

Diverses caractéristiques de la baie conditionnent la qualité du moût et donc du vin qui en résulte. Notamment, des baies plus petites avec une pellicule plus épaisse et une concentration en phénols, anthocyanes (pour les vins rouges) et composants aromatiques plus élevée permettent la production de vins d'une qualité supérieure (Matthews et Anderson 1988; Jackson et Lombard 1993; Van Leeuwen et Seguin 1994b).

La taille potentielle de la baie est définie génétiquement mais sa croissance réelle est affectée par de nombreux facteurs comme le nombre de baies par grappe (Ollat et al. 2002), la lumière et nutrition carbonée (Smart et Sinclair 1976; Kaps et Cahoon 1992), la température (Hale et Buttrose 1974), et, bien sûr, l'alimentation hydrique (Ojeda et al. 2001). En effet, un déficit hydrique affecte la taille de la baie quel que soit le moment de son apparition. Pour autant, il semblerait que ce soit la période allant de la floraison à la véraison qui soit la plus sensible à un stress hydrique (Ojeda et al. 2001; Ojeda et al. 2002). Un déficit hydrique pré-véraison limite la taille des baies (Hardie et Considine, 1976 ; cité par Van Leeuwen et al, 2001) et permet ainsi d'atteindre plus facilement des teneurs optimales des baies en sucre et en anthocyanes (Matthews et Anderson 1988; Van Leeuwen et Seguin 1994b). Une contrainte hydrique modérée pendant la période véraison-récolte est également favorable à la qualité des baies (sucres, arômes, anthocyanes) (Coombe et Iland 2005). A l'inverse, une trop forte contrainte à cette période a un effet négatif sur la qualité du produit (Morlat et al. 1992; Koundouras et al. 1999). Enfin une limitation de l'alimentation en eau de la vigne réduit aussi la teneur en acide malique des baies (Van Leeuwen et Seguin 1994b). La régulation de l'alimentation hydrique de la vigne à un niveau limitant optimal est donc recherchée.

Une bonne régulation de l'alimentation azotée est également indispensable chez la vigne. Un excès d'azote peut en effet entraîner un retard de l'arrêt de croissance des sarments. Or, cette croissance se fait au détriment de la synthèse des composés phénoliques de la baie et donc de la qualité de la production (Delas 2000) et un arrêt précoce de la croissance végétative (par exemple liée à une contrainte nutritionnelle) pendant la période de maturation du raisin permet de favoriser l'alimentation carbonée de la baie. Il améliore

également le potentiel œnologique du raisin en favorisant un microclimat lumineux de la grappe plus propice à la maturation (Smart 1987; Smart et al. 1990). A l'opposé, dans des conditions nutritionnelles non limitantes la vigne produit une canopée dense et des rendements élevés. Cela se traduit par des grappes compactes, peu aérées et peu éclairées avec des tissus riches en eau et azote. Cette situation est propice à une attaque fongique, notamment de botrytis (Conradie et Saayman 1989; Maigre et Murisier 1992; Fermaud et al. 2001a). Cette attaque peut diminuer le rendement et nuire fortement à la qualité de la vendange.

L'obtention de qualité et rendement recherchés dépend donc du bon équilibre entre la production des biomasses végétatives et reproductives. Pour caractériser cet « équilibre », le poids de bois de taille (PBT) exprimé par mètre linéaire de rang de vigne (Smart et al. 1991) ainsi que plusieurs rapports qui tiennent compte du rendement, du LAI et du poids de bois de taille ont été développés. Les rapports LAI/rendement (Champagnol 1984) et rendement/poids de bois de taille (Smart 1985; Kliewer et Dokoozlian 2005) sont ainsi couramment utilisés. Cependant, les valeurs optimales de ces rapports dépendent souvent du cépage, ainsi que du système de conduite qui est utilisé au vignoble. Enfin, l'indice de récolte qui exprime la part de la biomasse reproductrice par rapport à la biomasse totale est souvent utilisée sur d'autres cultures et sera exploré ici. Il renseigne sur la part de la croissance annuelle affectée à la croissance reproductrice.

Dans ce contexte de réduction de l'expression végétative en faveur d'une production de qualité, l'enherbement du vignoble présente de nombreux avantages (*Cf. Chapitre III*). Globalement, il ressort que la présence de la culture intercalaire induit une concurrence pour l'eau mais aussi pour l'azote a priori favorable si elle est bien maîtrisée. Or, de la période à laquelle cette contrainte apparaît et de son intensité dépendent l'impact sur la croissance de la vigne et sur le rendement et la qualité du raisin (Conradie et Saayman 1989; Coombe 1992; Coombe et McCarthy 2000; Rodriguez-Lovelle et al. 2000a; Ojeda et al. 2001; Ojeda et al. 2002; Ollat et al. 2002; Rodriguez-Lovelle et Gaudillère 2002; Hilbert et al. 2003; Pellegrino et al. 2005). Plusieurs travaux sur l'enherbement montrent des réductions importantes (jusqu'à 50%) du rendement et des changements dans la qualité des moûts (Rodriguez-Lovelle et al. 2000b). Cependant les impacts de l'enherbement sur cette qualité sont encore peu clairs et très variables d'une situation à l'autre. Généralement une augmentation du degré alcoolique et une diminution de l'acidité ont été observées. Ceci peut s'accompagner d'un enrichissement en certains polyphénols comme les anthocyanes qui donnent leur couleur aux vins rouges (Le Goff-Guillou et al. 2000; Hilbert 2002). En climat méditerranéen, où les études portant sur les enherbements sont encore peu nombreuses (Goma-Fortin 2002; Chantelot et al. 2004; Celette et al. 2005; Celette et Gary 2006), la présence d'un enherbement peut être intéressante pour lutter contre l'érosion et le ruissellement dans les saisons humides (automne, hiver). Cependant, l'été étant souvent très sec, une contrainte hydrique trop forte est redoutée. En conséquence, l'impact d'un enherbement sur l'élaboration du rendement et de la qualité dans une telle situation est encore à éclaircir.

L'objectif de ce travail est donc d'évaluer les effets de l'enherbement en zone méditerranéenne sur l'équilibre végétatif/reproductif de la vigne et leurs conséquences sur le rendement et ses composantes. Il cherche également à mettre en évidence les relations existantes entre les pratiques d'enherbement et les contraintes hydrique et azotée qu'elles provoquent sur l'élaboration du rendement et la qualité de la vendange.

3. Matériel et Méthodes

3.1. Conditions générales de l'expérimentation

Ce chapitre s'appuie sur l'étude expérimentale menée entre 2004 et 2006 sur une parcelle du Domaine du Chapitre à Villeneuve-lès-Maguelone, près de Montpellier (Cf. *Chapitre III*).

3.2. Indicateurs de contrainte subie par la vigne

Les indicateurs utilisés pour évaluer les contraintes hydriques et azotées subie par la vigne ont été décrits dans le *Chapitre III*.

3.3. Vigne et élaboration du rendement

Au moment de la vendange, les différentes composantes du rendement ont été mesurées pour chacune des placettes. Ces mesures ont été réalisées sur douze souches représentatives de la vigueur moyenne de la placette. Les mêmes souches ont été conservées d'une année sur l'autre. Sur chaque souche, le poids de vendange et le nombre de grappes sont évalués. Vingt grappes représentatives de la placette sont ensuite choisies aléatoirement. Chacune d'entre elles est alors pesée fraîche, puis disséquée. Le nombre de baies qui la composent est déterminé, ainsi que le poids frais de 200 baies. Ces 200 baies sont ensuite séchées, avant d'être pesées à nouveau. La teneur en eau moyenne de la grappe est ainsi connue. Les poids frais et sec de la rafle sont également caractérisés.

3.4. Qualité des moûts de raisin produits

Pour chaque année d'étude, différentes analyses ont été réalisées sur les moûts issus de raisins prélevés au moment de la vendange. Pour cela, vingt grappes par placette sont choisies au hasard et deux échantillons d'environ 500 baies sont prélevés sur ces grappes en choisissant des baies aux différents endroits de la grappe (haut, bas, ailes). Ces baies sont ensuite pressées et le moût récolté. Ensuite, les teneurs en sucres, azote, potassium, acide malique, acide tartrique, l'acidité totale et le pH ont été dosées sur ces moûts (Iland et al. 2000). Ces analyses ont été réalisées par l'ITV¹¹ et donnent une information sur la qualité de la vendange pour la production d'un vin blanc. Deux répétitions par placette ont été réalisées pour chacune d'entre elles.

3.5. Indicateurs composites de fonctionnement du vignoble

Différentes mesures décrites dans le *Chapitre III* (LAI, MST, MSG et PBT) ainsi que le rendement ont permis de calculer les indicateurs utilisés pour caractériser le fonctionnement du vignoble en fonction de la modalité étudiée.

Surface Foliaire Spécifique (SLA)

La surface foliaire spécifique est définie comme :

$$SLA = \frac{SF}{MS_{\text{feuille}}} \quad [4.3.5. a]$$

Avec :

SLA : Surface Foliaire Spécifique (cm².g⁻¹)

SF : Surface Foliaire (cm².pl⁻¹)

MS_{feuille} : Matière Sèche des feuilles (g.pl⁻¹)

¹¹ ITV : Centre technique interprofessionnel de la vigne et du vin.

Du fait d'un épaissement du limbe lors du vieillissement de la feuille, le SLA d'une feuille donnée a tendance à diminuer avec son âge physiologique (Tanaka et al. 1974a; 1974b). L'évolution du SLA renseigne sur le fonctionnement physiologique de la plante au cours de la croissance du feuillage.

Outre cet effet de l'âge, la position de la feuille jouera un rôle sur le SLA. En effet, une feuille à l'ombre aura tendance à avoir une surface plus grande pour une même biomasse, son SLA sera donc supérieur (Tanaka et al. 1974a; 1974b).

Indices de performance du vignoble

Quatre indices ont été calculés pour évaluer l'équilibre du vignoble en fonction de la modalité utilisée : le PBT ramené en mètre de longueur de rang, le rapport LAI/rendement et rendement/PBT et l'indice de récolte.

4. Résultats

4.1. Enherbement et contraintes hydrique et azotée subies par la vigne

La croissance des enherbements étudiés et les contraintes hydrique et azotée subies par la vigne en fonction de la modalité d'entretien du sol ont été présentées précédemment (Cf. *Chapitre III -4.1 et Chapitre III -4.2*). Ainsi, les deux enherbements étudiés présentent des différences dans leur dynamique de production de la biomasse avec notamment une reprise de croissance de l'enherbement permanent avec le retour des précipitations en fin d'été ou début d'automne (*Figure 3.1*). A l'opposé, l'enherbement semi-permanent ne présente une croissance en biomasse que très limitée au cours de cette période et cette croissance est très dépendante des conditions de levée. Ceci explique d'ailleurs la très faible croissance de l'orge observée à l'automne 2005. La croissance printanière des deux enherbements est généralement assez comparable jusqu'au mois de mai où la croissance de l'orge s'accélère avec la montaison. Au début de l'été, l'enherbement semi-permanent est détruit et l'enherbement permanent se dessèche et entre dans un processus de survie, avec une croissance presque nulle (*Figure 3.1*). Ainsi, les différences de production de biomasse observées entre les deux enherbements sur une année sont essentiellement liées à la possibilité pour l'enherbement permanent de mettre à profit le retour de conditions plus favorables à l'automne. Le retour de l'enherbement à une activité normale est en effet assez rapide et peut ne prendre que quelques jours (Gonzalez Dugo 2006; Volaire et Norton 2006). L'enherbement semi-permanent, semé à nouveau chaque année, est très dépendant d'une bonne levée à cette période. Au printemps, le pic de croissance observé sur l'enherbement semi-permanent est lié à la montaison de l'orge. Le passage à ce stade est en grande partie empêché pour l'enherbement permanent du fait des tontes régulières notamment.

Conséquence de la présence de ces enherbements et des consommations de ceux-ci, les vignes enherbées sont généralement plus contraintes que les vignes désherbées. La vigne irriguée et fertilisée (MT) n'est jamais contrainte pour l'eau et généralement pas non plus pour l'azote. La teneur en azote surfacique semble toutefois mettre en évidence une légère contrainte azotée peu après la véraison de la vigne dans cette modalité. Celle-ci peut s'expliquer par une fertilisation insuffisante au regard de la croissance excessive de la vigne. La vigne du traitement MD est le plus souvent moins contrainte que celle des modalités enherbées. En général, les contraintes hydrique et azotée les plus fortes sont subies dans la modalité MF et la modalité MR se caractérise par des niveaux de contrainte intermédiaires (*Figures 3.2 et 3.3*). Suivant les années et la période considérée, ce niveau est plus proche de l'une ou l'autre des modalités. En 2005, la recharge hivernale ayant été

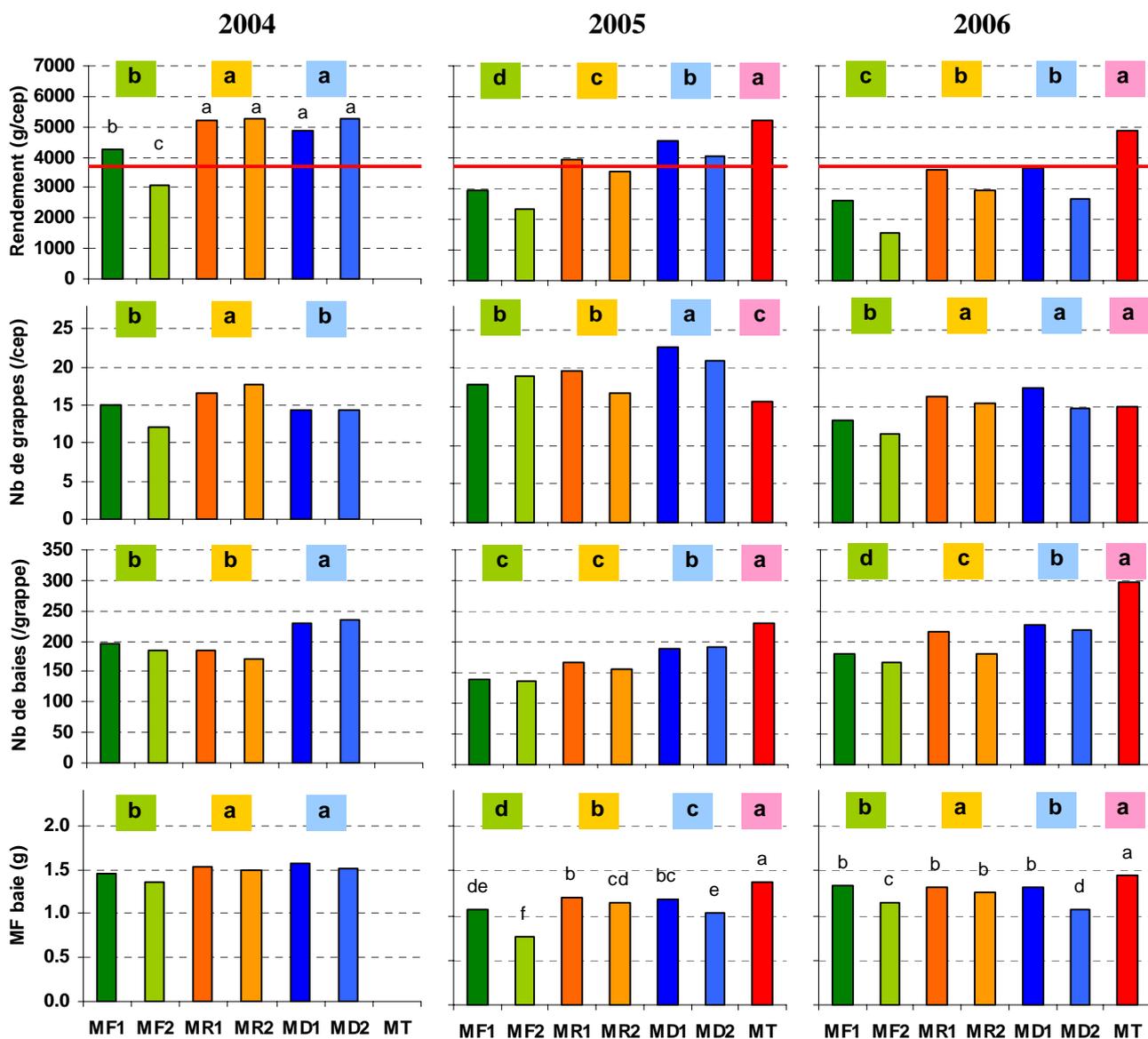


Figure 4.1 – Composantes de l'élaboration du rendement mesurées à la vendange pour chacune des stations étudiées. Les lettres en gras encadrées représentent les classes significativement différentes obtenues par ANOVA et un test de Newman-Keuls avec un risque $\alpha=0,05$ entre les modalités étudiées. Les lettres simples représentent une interaction entre modalité et bloc significative pour un risque $\alpha=0,05$. La ligne horizontale rouge dans les graphiques de rendement représente le rendement maximal autorisé dans la zone d'appellation de la parcelle expérimentale.

très limitante, une différence importante apparaît entre les blocs haut et bas avec des contraintes hydrique, voire azotée, plus fortes dans la partie haute, où la recharge en eau du profil de sol a été moins bonne (*Figures 3.2 et 3.3*).

4.2. Vigne et élaboration du rendement

Un rendement fortement diminué par la présence d'un enherbement

Pour tous les traitements, à l'exception du témoin irrigué et fertilisé, on constate une baisse importante et progressive des rendements entre les années 2004 et 2006 (*Figure 4.1*). Les rendements observés les plus élevés sont autour de 5 kg.pl^{-1} (environ 17 T.ha^{-1}) et correspondent aux vignes des modalités MD et MR en 2004 ainsi qu'à la modalité MT en 2005 et 2006. Les valeurs les plus faibles se situent aux alentours de 2 kg.pl^{-1} (environ 6 T.ha^{-1}) et concernent les vignes avec un enherbement permanent en 2006. En 2004 et en 2006 les vignes des modalités désherbées et avec un enherbement semi permanent ne se différencient pas mais ont produit un rendement significativement plus important que celles de vignes enherbées où la contrainte hydrique est plus forte. En 2005 en revanche, un gradient de production est observé avec $\text{MT} > \text{MD} > \text{MR} > \text{MF}$. La concurrence pour les ressources induite par la présence de l'enherbement permanent provoque donc une diminution claire des rendements. Ce phénomène a déjà été observé par de nombreux auteurs (Morlat 1987; Maigre et Murisier 1992; Rodriguez-Lovelle et al. 2000a; Chantelot et al. 2004; Celette et al. 2005).

Elaboration du rendement sans contrainte nutritionnelle

Les rendements obtenus dans la modalité irriguée et fertilisée sont systématiquement très supérieurs à ceux observés dans toutes les autres modalités. En revanche, la production de cette modalité est comparable à celle de la modalité désherbée au cours de l'année 2004, considérée comme peu contraignante. Il semble donc bien que ces rendements correspondent à un rendement en conditions peu contraintes pour une vigne ébourgeonnée. Le comportement de la modalité MT se caractérise notamment par un poids frais moyen de baie stable d'une année sur l'autre (*Figure 4.1*). Pourtant, cette modalité produit un nombre des baies par grappe significativement plus élevé et cela pour les deux années suivies. Ceci a induit un poids de baies peu élevé, qui n'a pas dépassé $1,5 \text{ g.baie}^{-1}$ observé pour la plupart des modalités en 2004. Cela suggère que ce poids correspond plus ou moins au poids frais potentiel de la baie sans contrainte hydrique forte au cours de son remplissage (Ollat et al. 2002). Pour autant, le poids frais de la baie est systématiquement plus élevé que celui mesuré dans les autres modalités qui subissent ces années-là une forte contrainte hydrique (*Figure 3.2*). Le nombre de grappes est également très stable d'une année à l'autre et relativement faible ($15 \text{ grappes.pl}^{-1}$). Il est ainsi équivalent à celui observé en MD et MR en 2006 mais très inférieur à toutes les autres modalités en 2005. Cette différence s'explique essentiellement par un nombre de rameaux plus faible dans cette modalité irriguée (*Tableau 3.4*), ce qui limite donc le nombre potentiel de grappes par plante.

Impact de l'entretien du sol et des conditions de l'année sur les composantes du rendement

Le nombre de grappes moyen en 2004 est d'environ $15 \text{ grappes.pl}^{-1}$, comme en 2006. En 2005 en revanche, il est sensiblement plus élevé avec environ une vingtaine de grappes par souche, valeurs également observées en 2003 (*données non présentées*). La fertilité d'un bourgeon est en grande partie la conséquence de la disponibilité en carbone au moment de la floraison de l'année précédente. Ainsi, le nombre de grappes par plante est pour beaucoup la conséquence des conditions de l'année antérieure (luminosité,

température, humidité, charge en grappes) (Williams et al. 1985; Rives 2000; Pearce et Coombe 2005). En conséquence, le nombre de grappes n'ayant pas été régulé, mise à part par l'ébourgeonnage, la vigne alterne des années avec une forte et une faible charge en grappes. De plus, le niveau de contrainte subi par la vigne l'année d'avant affecte ce nombre de grappes, ce qui explique que le nombre de grappes soit inférieur dans les modalités enherbées en 2005 et dans la modalité avec un enherbement permanent en 2006 (*Figure 4.1*).

Le nombre de baies.grappe⁻¹ moyen en 2004 et 2006 est d'environ 200. Par contre, il est très inférieur dans toutes les modalités (sauf irriguée) en 2005 (*Figure 4.1*). Un taux de nouaison deux fois plus faibles en 2005 qu'en 2004 (35% en 2004 et 17% en 2005) explique cette différence. Ce plus faible taux de nouaison en 2005 est probablement la conséquence d'une forte contrainte hydrique subie par la vigne avant la floraison (Hardie et Considine 1976; Matthews et Anderson 1989). Globalement, cette composante du rendement semble suivre, en partie au moins, une logique inverse au nombre de grappes par plante avec un nombre de baies plus élevé lorsqu'il y a peu de grappes et inversement. C'est ainsi que les rendements ont été identiques en 2004 entre les modalités MD et MR. Un nombre de grappes par plante plus faible dans la modalité désherbée a en effet été compensé par un nombre de baies par grappe supérieur (*Figure 4.1*). La même année, un nombre de grappes plus faible dans la modalité MF n'a pas été compensé par un nombre de baies plus élevé, notamment à cause d'une nouaison effective très inférieure dans cette modalité (28% en MF et 41% en MD). Différents travaux ont également montré comment le nombre de baies par grappe est affecté par les conditions et les contraintes subies au cours de la période de la nouaison, ainsi qu'au cours de la croissance et de la maturation de la baie, qui peuvent induire une abscission florale ou de la baie (Hsiao 1973; Matthews et al. 1987; Lindhard et Hansen 1997; McCarthy et al. 1998; Hilbert 2002; Lebon et al. 2004; Gladstones 2005). Ceci explique le faible nombre de baies observé dans les deux modalités enherbées en 2005 et en 2006. Une compétition entre vigne et enherbement pour l'eau mais surtout pour l'azote semble en être à l'origine (*Figure 3.4*).

La masse fraîche de la baie est en moyenne la plus élevée en 2004 (*Figure 4.1*). Ceci est la conséquence du niveau de contrainte, particulièrement hydrique, subie par la plante au cours de la période de formation et de remplissage de la baie (nouaison-maturité) (Ussahatanonta et al. 1996; Ojeda et al. 2001; Gomez-del-Campo et al. 2002). Ainsi, en 2004, la modalité avec un enherbement permanent a connu une contrainte hydrique modérée tandis que les autres modalités n'étaient pas significativement contraintes. Ceci explique une masse fraîche de la baie plus faible en 2004 et 2005 dans la modalité MF que dans les autres modalités. En 2006 en revanche, ce sont surtout les placettes MF2 et MD2 qui présentent un poids frais de la baie inférieur. Celui-ci est la conséquence d'une contrainte hydrique plus précoce dans ces placettes (*Figure 3.2*).

Les différences de contrainte observées entre blocs affectent les composantes du rendement

En 2005 et 2006, un effet bloc significatif est observé avec des rendements supérieurs dans le bloc bas. En 2004, seule la modalité avec un enherbement permanent présente une telle situation. Cette situation, déjà observée pour la croissance végétative, semble être la résultante d'une contrainte hydrique plus forte subie par les vignes du bloc haut (*Figure 3.2*). En 2005, cette différence entre haut et bas de la parcelle est uniquement perçue sur le poids frais de la baie toujours significativement inférieur à celui des placettes du bas de la pente (*Figure 4.1*). En 2006 en revanche, toutes les composantes du rendement étudiées sont significativement inférieures dans le bloc haut. Or, en 2005, les contraintes azotée et hydrique subies par la vigne sont peu différentes entre haut et bas de la pente

Tableau 4.1 – Evaluation de l'équilibre végétatif et reproductif du vignoble. Les valeurs en italique représentent les intervalles de confiance calculés avec le test de Student et un risque $\alpha=0,05$.

	LAI/Rdt			Rdt/PBT			MSG/MST		
	2004	2005	2006	2004	2005	2006	2004	2005	2006
MF1	1.8	1.4	2.2	6.9 ± 0.7	9.9 ± 1.0	4.6 ± 0.6	0.46 ± 0.05	0.58 ± 0.04	0.50 ± 0.07
MF2	2.3	1.7	2.7	6.8 ± 1.0	9.2 ± 0.6	4.3 ± 0.6	0.46 ± 0.10	0.62 ± 0.05	0.44 ± 0.06
MF	2.1	1.5	2.5	6.9 ± 0.6	9.5 ± 0.6	4.4 ± 0.4	0.46 ± 0.06	0.60 ± 0.03	0.47 ± 0.05
MR1	1.8	1.6	2.0	8.6 ± 1.3	9.6 ± 0.8	6.0 ± 0.7	---	0.60 ± 0.05	0.55 ± 0.03
MR2	1.6	1.5	2.2	9.1 ± 0.9	8.0 ± 0.3	5.7 ± 0.8	---	0.60 ± 0.06	0.51 ± 0.06
MR	1.7	1.6	2.1	8.8 ± 0.8	8.8 ± 0.5	5.8 ± 0.5	---	0.60 ± 0.04	0.53 ± 0.03
MD1	2.0	1.4	1.8	5.8 ± 0.9	9.0 ± 0.6	6.0 ± 0.5	0.49 ± 0.05	0.63 ± 0.05	0.50 ± 0.06
MD2	1.9	1.6	2.4	5.8 ± 0.6	8.8 ± 1.0	4.9 ± 0.8	0.51 ± 0.03	0.64 ± 0.03	0.53 ± 0.03
MD	2.0	1.5	2.1	5.8 ± 0.5	8.9 ± 0.6	5.4 ± 0.5	0.50 ± 0.03	0.64 ± 0.03	0.51 ± 0.03
MT	---	2.1	2.9	---	---	4.2 ± 0.7	---	0.53 ± 0.05	0.50 ± 0.04

avant la première quinzaine du mois d'août, soit peu avant la récolte (*Figures 3.2 et 3.3*). Cette différence tardive entre haut et bas de pente n'a donc d'effet que sur le remplissage de la baie. En 2006, ces différences apparaissent bien avant la véraison et affectent toutes les composantes du rendement autre que le nombre de grappes par plante (*Figure 4.1*).

4.3. Equilibre végétatif et reproductif du vignoble

Une surface foliaire spécifique peu différente d'une modalité à l'autre

Les valeurs de SLA observées sur chacune des modalités sont assez stables d'une année sur l'autre et peu différentes entre modalités. Ainsi, chaque année, la SLA est comprise au débourrement entre 160 et 200 cm².g⁻¹. Par la suite, la SLA est relativement stable au cours du cycle malgré un très léger fléchissement observé chaque année entre le débourrement et la floraison pour atteindre des valeurs comprises entre 120 et 160cm².g⁻¹ suivant les modalités et les années. Cette baisse s'explique très certainement par l'augmentation de l'âge moyen des feuilles des rameaux prélevés. Les SLA calculées pour les vignes enherbées sont généralement légèrement supérieures à celles des modalités MD et MT mais cette différence est rarement supérieure à 10%. Cet indicateur n'a donc pas permis de mettre en évidence de différence de fonctionnement physiologique de la vigne entre les modalités.

Les poids de bois de taille comme indicateur d'une expression végétative favorable à la qualité de la production

Des valeurs de PBT comprises entre 0,3 et 0,6 kg.m⁻¹ sont considérées par certains auteurs comme optimales pour une production de qualité sur Cabernet-Sauvignon (Kliwer et Dokoozlian 2005). Si ces PBT sont obtenus chaque année dans la modalité MR, ils ne le sont qu'en 2004 et 2006 pour la modalité enherbée toute l'année, la forte sécheresse de l'année 2005 ayant entraîné des PBT sensiblement plus faibles. Dans la modalité MD, seules les PBT des années 2005 et 2006 rentrent dans cette gamme de valeurs, les PBT de 2004 étant beaucoup plus élevés. Pour autant, d'autres études ont montré qu'une production de qualité pouvait être obtenu également avec du Cabernet-Sauvignon avec des valeurs de PBT allant jusqu'à 1 kg.m⁻¹ (Dokoozlian et Kliwer 1995; Acevedo Opazo et Ortega-Farías 2004). De plus, de tels indicateurs peuvent également être variables d'un cépage à l'autre (Freeman et al. 1980; Koundouras et al. 1999; dos Santos et al. 2003; De la Hera et al. In Press).

Un rapport LAI/rendement très sensible à une contrainte précoce

Au cours de l'année 2004, qui a été une année peu contraignante en terme hydrique, le rapport LAI/Rendement est peu différent entre les traitements MF et MD. Ainsi, la plus faible croissance en surface foliaire observée dans la modalité enherbée toute l'année (*Figure 3.4*) correspond à un rendement plus faible dans cette même modalité (*Tableau 4.1*). En effet, avec un enherbement permanent, une contrainte hydrique modérée mais significative est subie tout au long du cycle de la vigne et induit donc à la fois une surface foliaire et un rendement inférieurs à ceux de la modalité désenherbée. L'équilibre entre feuille et fruit n'a donc pas été affecté par la concurrence de l'enherbement cette année là. En revanche, ce même rapport est inférieur de plus de 15% dans la modalité MR par rapport aux deux autres modalités étudiées. Les vignes de cette modalité ont eu besoin de moins de surface foliaire pour produire un rendement identique à celui de la modalité MD. La compétition imposée par la présence d'un enherbement semi-permanent, principalement établie dans la première partie du cycle de la vigne, a essentiellement affecté l'établissement du feuillage. Au cours de la période de remplissage de la baie,

l'enherbement ayant été détruit, la concurrence entre vigne et herbe n'existe plus et le remplissage se déroule normalement. De plus, la contrainte subie par la vigne dans ce traitement MR est principalement azotée. Or, une contrainte azotée modérée affecte principalement le développement foliaire (Robinson 1998; Delas 2000).

En 2005, les rapports LAI/rendement sont fortement diminués pour toutes les modalités à cause d'une contrainte hydrique précoce et progressive du fait de la grande sécheresse de l'hiver précédent (*Figure 2.3*). Celle-ci a diminué plus fortement la croissance foliaire (en moyenne 40% de moins qu'en 2004) (*Figure 3.4*) que les rendements (en moyenne 25 % de moins qu'en 2004) (*Figure 4.1*). Cette contrainte hydrique, additionnée à une contrainte azotée dans les situations enherbées, est plus forte dans les modalités enherbées mais a évolué régulièrement et parallèlement dans toutes les modalités. En conséquence, la réduction de la surface foliaire et des rendements est comparable dans chacune des modalités. Seule la modalité MT a pu maintenir une surface foliaire conséquente au cours du printemps et présente ainsi un rapport LAI/rendement très supérieur (+25%) (*Tableau 4.1*).

Enfin, les rapports LAI/rendement sont plus élevés en 2006 qu'en 2004 mais avec une croissance générale moins importante. Ainsi la surface foliaire produite à la récolte en 2006 est en moyenne 30% plus faible que celle de 2004 tandis que les rendements produits sont diminués de plus de 40% entre les deux années. Ceci s'expliquerait par une croissance foliaire printanière assez similaire à celle de 2004 laquelle commence à diminuer vers la nouaison une fois que les ressources hydriques sont devenues limitantes. Par la suite, la sécheresse importante subie entre la floraison et la maturité a affecté fortement les rendements de tous les traitements (sauf irrigué).

Ces observations montrent donc bien à quel point ce rapport est sensible aux variations d'intensité des contraintes subies par la vigne au cours du cycle. Les valeurs de LAI/rendement obtenues dans cette expérimentation sont un peu plus élevées que celles rapportées dans la littérature (Kaps et Cahoon 1992; Howell 2001; Kliwer et Dokoozlian 2005). Ces chercheurs ont présenté des valeurs qui peuvent aller de 0,6 à 1,7 m² de surface foliaire par kg de fruit comme adéquates pour une bonne maturation du raisin. De son côté, Smart et al. (1990) considèrent une valeur de 1,5 m².kg comme un indice idéal. Cette importante variation dans les valeurs optimales dépendra, entre autres, du cépage, du climat de la région (principalement le rayonnement), du type de système de culture, de la durée de la période entre la récolte et la chute des feuilles. Seuls les indices observés en 2005, en dehors de l'irrigué, se trouvent dans cette gamme. Cela indiquerait un certain déséquilibre du vignoble pour les autres années. MR est plus proche dans tous les cas. La modalité irriguée et fertilisée en 2005 et surtout en 2006 présente des valeurs de LAI/RDT nettement supérieures aux autres modalités et aux références de la littérature qui témoignent d'un profond déséquilibre de la plante défavorable à une production de qualité.

Un effet année très marqué sur le rapport rendement/poids de bois de taille

Les valeurs les plus élevées pour le rapport rendement/poids de bois de taille, ont été observées en 2005, les plus faibles en 2006. L'année 2004 présente des valeurs intermédiaires (*Tableau 4.1*). Globalement, les causes de cette variation sont assez similaires à celles expliquant les variations de l'indice LAI/Rendement et une relation linéaire décroissante entre ces deux indicateurs a déjà été mise en évidence (Kliwer et Dokoozlian 2005). Toutes les situations observées ont un rapport rendement/PBT considéré comme favorable à une production de qualité. Seules les modalités MF et MT ont des rapports jugés trop faibles pour témoigner d'un équilibre du vignoble favorable (Bravdo et al. 1984; 1985). Cet indicateur est donc peu discriminant ici et ne permet pas de mettre en évidence des différences marquées entre modalités d'entretien du sol. Pour

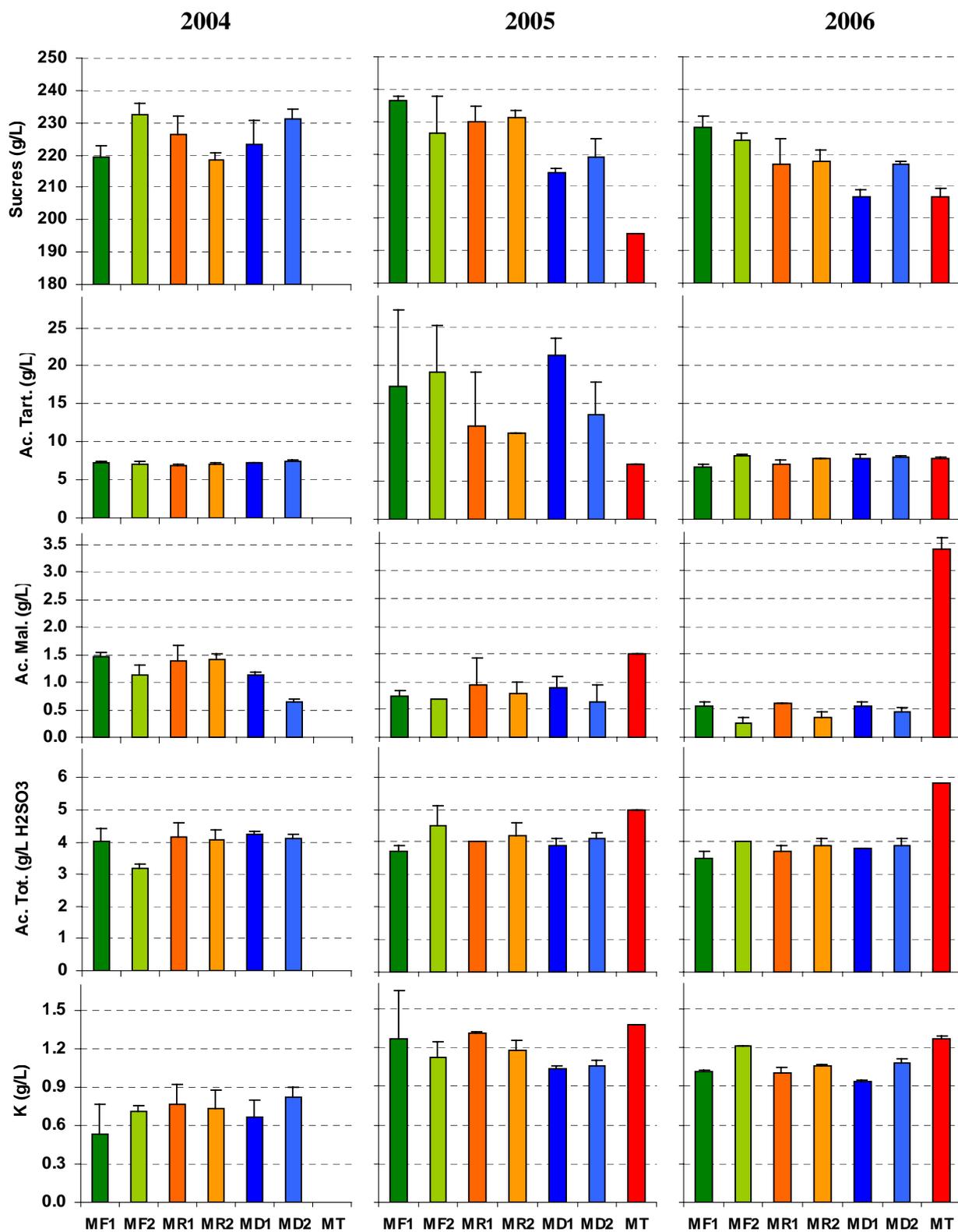


Figure 4.2 – Composantes de la qualité des moûts prélevés à la vendange pour chacune des stations étudiées. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance calculés avec un test de Student entre les stations étudiées pour un risque $\alpha=0,05$.

autant, une observation plus attentive des résultats montre que la modalité MR présente un indice rendement/PBT assez stable d'une année à l'autre, même si une baisse importante est observée en 2006. A l'opposé, la modalité avec un enherbement toute l'année est celle qui varie le plus fortement suivant les années. Il semble donc que la modalité avec un enherbement permanent soit très sensible aux conditions de l'année et notamment à la sécheresse tandis que la vigne associée à un enherbement semi-permanent maintient plus facilement un équilibre entre ses parties végétatives et reproductives.

L'indice de récolte est-il un bon indicateur de l'équilibre du vignoble ?

L'évolution des indices de récolte mesurés au cours de trois années d'expérimentation est systématiquement opposée à celle du ratio LAI/RDT. Ainsi, au cours de l'année 2005 les valeurs observées sont supérieures dans toutes les modalités à ceux de 2004 et de 2006 (*Tableau 4.1*). Ceci confirme qu'en cas de forte contrainte hydrique, le développement reproducteur est privilégié au dépend de la croissance végétative (Wery 2005). C'est également la précocité de cette contrainte qui limite la croissance végétative dans un premier temps et augmente ainsi l'indice de récolte. Ainsi, en 2006, le remplissage des réserves hydriques du sol ayant été meilleur au cours de l'hiver, la croissance de la vigne en début de cycle a été plus importante qu'en 2005. Par la suite, l'absence totale de pluies, ajoutée à une surface foliaire transpirante plus importante, a induit une contrainte hydrique importante pendant le remplissage des baies. La croissance végétative a donc été favorisée cette année là par rapport à 2005, d'où des indices de récolte plus faibles. Dans le même ordre d'idée, les conditions ont été peu contraignantes en 2004 dans toutes les modalités et les autres années dans la modalité irriguée et fertilisée. La croissance végétative s'est ainsi déroulée en conditions très favorables et la végétation obtenue a été plutôt luxuriante, entraînant des indices de récolte faibles (*Tableau 4.1*). Ainsi, l'indice de récolte différencie de manière satisfaisante les années climatiques. Il est en revanche moins discriminant pour les modalités d'entretien du sol.

4.4. Quelle qualité des moûts selon les années et les modalités d'entretien du sol ?

Des teneurs en sucres des moûts fortement affectées par la dilution et les contraintes subies au cours de la maturation du raisin

La teneur en sucres des moûts est peu variable d'une année sur l'autre et d'une modalité à l'autre (*Figure 4.2*). La teneur en sucres ne pouvant être corrigée dans la région (chaptalisation interdite), il est important d'atteindre une teneur minimale au moment de la vendange. C'est pourquoi la décision de la date de récolte est souvent prise par rapport à la quantité de sucres présente dans les baies et au degré d'alcool potentiel. Il est donc normal que les teneurs en sucres des moûts soient relativement stables d'une année sur l'autre. En effet, une maturation plus lente une année sera compensée par une récolte plus tardive. Ainsi si la vendange a eu lieu à peu près à la même date en 2005 et 2006, elle a été réalisée plus d'une semaine plus tard en 2004.

En 2004, aucune différence significative n'est mise en évidence entre les modalités. En revanche, en 2005 comme en 2006, des teneurs sensiblement plus faibles sont observées dans la modalité désherbée et plus encore dans la modalité irriguée. Or, un arrêt précoce de la croissance végétative pendant la période de maturation du raisin, obtenu par une contrainte hydrique et/ou azotée modérée, permet de favoriser l'alimentation carbonée de la baie. Il améliore également le potentiel œnologique du raisin en favorisant un microclimat lumineux de la grappe plus propice à la maturation (Smart 1987; Smart et al. 1990). Ainsi, la concurrence pour les ressources du sol entre la vigne et l'enherbement

pourrait être à l'origine de cette teneur en sucres supérieure dans les modalités enherbées. Cependant, la quantité totale de sucres accumulée dans les grappes d'une souche irriguée est plus importante que pour une souche enherbée (*données non présentées*). Ainsi, ces différences s'expliquent plutôt par un phénomène de dilution dans les modalités les moins stressées (*Figure 4.2*).

Une acidité tartrique peu variable d'une modalité à l'autre

L'acidité tartrique dosée dans les raisins à la vendange présente des teneurs généralement moyennes et différencie peu les modalités. La teneur en acide tartrique des moûts est cependant très élevée dans la plupart des modalités en 2005 (MT exceptée). Cependant, ces teneurs plus élevées s'accompagnent d'une plus grande variabilité qui rend impossible la différenciation des modalités. (*Figure 4.2*). Il est possible que ces teneurs élevées soient la conséquence d'un ralentissement, voire d'un blocage, de la maturation du raisin du fait d'une contrainte hydrique trop importante dans les trois modalités non irriguées. Cette contrainte hydrique a également diminué la teneur en eau des baies dans toutes les modalités (*données non présentées*). Or, la diminution de la teneur en acide tartrique au cours de la maturation de la baie est essentiellement liée à un phénomène de dilution puisque la majeure partie de l'acide tartrique présent dans la baie est synthétisé avant la véraison (Ollat et al. 2002; Coombe et Iland 2005). Cette dilution est en revanche importante dans la modalité irriguée et explique les teneurs sensiblement plus faibles observées dans cette modalité.

Une teneur en acide malique sensible à la contrainte hydrique

Les teneurs en acide malique observées sont faibles par rapport aux références proposées dans la littérature (Conradie et Saayman 1989; Coombe et Iland 2005). Or cet acide joue un rôle important dans la fabrication des vins et notamment dans la fermentation malo-lactique. Cependant, cette fermentation est moins recherchée pour les vins blancs que pour les vins rouges. La teneur moyenne observée diminue chaque année entre 2004 et 2006 (*Figure 4.2*). En 2004, la teneur en acide malique est comprise entre 1,1 et 1,5 g.L⁻¹ dans toutes les placettes suivies en dehors de la placette MD2 qui présente une teneur significativement plus faible (0,6 g.L⁻¹). Elle apparaît ainsi légèrement plus faible dans le traitement désherbé que dans les deux modalités enherbées (*Figure 4.2*) vraisemblablement du fait d'une dilution dans la baie. Elle est également faible dans la placette MF2. Ainsi, la contrainte hydrique importante subie par la vigne dans cette placette diminue la densité de la canopée et expose la grappe. La température de la baie est augmentée et la dégradation de l'acide malique est accélérée (Smart 1998; Coombe et McCarthy 2000). Ceci confirme qu'une contrainte hydrique induit une diminution de la teneur en acide malique de la baie (Van Leeuwen et Seguin 1994b). En 2005, comme en 2006, la contrainte hydrique subie par la vigne pendant la maturation de la baie est importante dans toutes les modalités, ce qui explique les faibles teneurs dans toutes les modalités et l'impossibilité de différencier ces modalités.

L'effet bloc est significatif ces années-là avec des teneurs plus faibles dans le bloc haut (*Figure 4.2*). Ceci est encore la conséquence d'une canopée plus dégagée dans ce bloc. A l'inverse, la modalité irriguée présente une teneur en acide malique supérieure à celle observée dans toutes les autres modalités du fait d'une canopée plus dense.

Une acidité totale très stable d'une année sur l'autre

Comme pour les sucres solubles, l'acidité totale dosée au moment de la vendange se révèle très stable d'une année sur l'autre avec une teneur moyenne proche de 4 g.L⁻¹ chaque année. En dehors de la modalité irriguée et fertilisée qui présente chaque année une

acidité totale sensiblement supérieure à celles des autres modalités, aucun effet clair de la modalité n'apparaît (*Figure 4.2*). Cependant, plus encore que la teneur elle-même, c'est l'équilibre entre les sucres et l'acidité qui est importante et qui définit si le raisin est mûr pour la récolte. Ce rapport est satisfaisant dans la plupart des cas à l'exception de la modalité irriguée qui présente toujours un rapport déséquilibré avec une acidité trop forte par rapport à la quantité de sucres accumulés dans la baie (*Figure 4.2*). Il est ainsi évident que le raisin de cette modalité MT n'est pas mûr au moment du déclenchement de la vendange. Ceci confirme que lorsque les conditions de croissance sont très favorables, la maturation du raisin est fortement ralentie (Matthews et al. 1987; Spayd et al. 1994; Keller et al. 2001).

Une teneur en azote assimilable diminuée par la sécheresse estivale

La teneur en azote assimilable est chaque année satisfaisante dans la modalité irriguée et fertilisée, ainsi que pour toutes les modalités en 2004 (*Tableau 3.2*). Elle est nettement plus faible dans tous les traitements non irrigués en 2005 comme en 2006. Quelle que soit l'année, elle est généralement plus faible dans le traitement MF. Ceci est lié à la concurrence qui s'établit entre la vigne et la culture intercalaire pour l'azote, mais aussi à la sécheresse plus prononcée du milieu dans cette modalité, du fait de la transpiration de l'enherbement. Cependant, cette teneur est globalement peu discriminante entre les traitements et semble fortement influencée par l'importance de la sécheresse estivale (Van Leeuwen et al. 2000a; Gaudillère et al. 2003) (*Cf. Chapitre III -4.2.2*). Si une teneur en azote des moûts trop élevée entraîne une sensibilité aux maladies supérieure (Bavaresco et Eibach 1987; Bavaresco et al. 1994) et peut induire une présence de composés nocifs à la santé humaine (Delas 2000), c'est plutôt une teneur en azote assimilable trop faible qui apparaît le plus souvent dans notre expérimentation. Un faible teneur en azote est redoutée par les vignerons car elle peut provoquer une fermentation languissante et l'apparition de défauts olfactifs dans le produit final (Ferrari 2002). S'il est difficile d'établir un seuil précis de teneur en azote assimilable en dessous duquel une carence apparaît, les teneurs observées en 2005 et 2006, notamment dans la modalité MF (entre 50 et 60mg.L⁻¹), pourraient être problématiques. Cependant, cette crainte doit être relativisée puisqu'un apport au cours de la fermentation est possible pour corriger partiellement une carence du moût.

Une teneur en potassium du moût très variable en fonction de l'année

Les teneurs en potassium observées dans les moûts sont faibles à moyennes pour toutes les années et toutes les modalités (Conradie et Saayman 1989; Coombe et Iland 2005). Avec des valeurs comprises entre 0,5 et 0,8 g.L⁻¹, l'année 2004 présente les teneurs les plus faibles. Elles sont un peu plus élevées en 2005 et 2006 avec des concentrations comprises entre 0,9 et 1,4 g.L⁻¹. En 2004, aucune différence significative n'est mise en évidence entre les modalités (*Figure 4.2*). En 2005 en revanche, les teneurs observées dans la modalité désherbée sont les plus faibles et sont significativement inférieures à celles mesurées dans les modalités MR et MT notamment. Les teneurs plus faibles mesurées en MD en 2005, ou dans toutes les modalités en 2004, s'expliquent probablement par une dilution du potassium du fait d'un rendement supérieur (*Figure 4.1*). En 2006, seule la modalité MT présente une quantité de potassium dans la baie sensiblement plus élevée que dans les autres modalités. Or les vignes vigoureuses présentent généralement des teneurs en potassium plus élevées dans la baie, du fait d'un microclimat lumineux de la baie défavorable à l'enrichissement relatif en sucres par rapport au potassium (Gladstones 2005). Il a également été observé qu'une richesse plus importante du moût en potassium

Tableau 4.2 – Matrice des corrélations entre les indicateurs de contraintes et les variables de croissance végétative et reproductive et de qualité du moût. Les valeurs représentées sont les coefficients de corrélation de Pearson. Les valeurs en gras représentent les valeurs significatives (hors diagonale) obtenues avec un test bilatéral et un risque $\alpha=0,05$. Les valeurs suivies d'un asterisque (*) représentent les corrélations peu significatives ($\alpha=0,1$). La valeur ns représente un test non significatif.

Variables	Pbase	DC13	PBT	NCF	Trou %	LAI	NB Gr.	SPAD	Rdt	Pbaie	Nb	Nass	Sucres	AT	K	Ac. Tart.	Ac. Mal
Potentiel de Base (Pbase)	1																
Delta 13C (DC13)	0.90	1															
Poids de Bois de Taille (PBT)	-0.87	-0.85	1														
Nombre de Couches de Feuilles (NCF)	-0.86	-0.88	0.96	1													
Porosité (Trou %)	0.69	0.72	-0.58	-0.62	1												
Indice de Surface Foliaire (LAI)	-0.89	-0.89	0.96	0.97	-0.59	1											
Nombre de Grappes (Nb Gr.)	0.41*	ns	ns	ns	ns	ns	1										
Indice Chlorophyllien (SPAD)	-0.45	-0.48	0.59	0.60	-0.69	0.52	ns	1									
Rendement (Rdt)	-0.70	-0.78	0.70	0.69	-0.57	0.78	ns	ns	1								
Poids de une baie (Pbaie)	-0.89	-0.84	0.72	0.69	-0.73	0.74	ns	ns	0.68	1							
Nombre de baies (Nb)	-0.73	-0.71	0.91	0.88	-0.59	0.85	ns	0.75	0.51	0.56	1						
Azote assimilable des moûts (Nass)	-0.78	-0.72	0.75	0.80	ns	0.86	ns	ns	0.70	0.65	0.62	1					
Sucres des moûts (Sucres)	0.38*	ns	-0.55	-0.55	ns	-0.50	ns	-0.74	ns	ns	-0.63	ns	1				
Acidité Totale (AT)	ns	-0.44*	0.64	0.66	ns	0.66	ns	ns	0.43*	ns	0.53	0.61	-0.54	1			
Potassium (K)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0.56	ns	ns	ns	ns	1		
Acide Tartrique (Ac. Tart.)	0.67	0.55	-0.52	-0.50	0.52	-0.50	0.75	ns	ns	-0.72	-0.49	-0.47	ns	ns	ns	1	
Acide Malique (Ac. Mal)	-0.61	-0.68	0.67	0.79	ns	0.79	ns	ns	0.58	0.45	0.56	0.81	ns	0.75	ns	ns	1

correspondait généralement à une acidité totale supérieure (Conradie et Saayman 1989), ce qui est vérifié en MT.

En outre, les teneurs observées dans le bloc haut en 2006 sont systématiquement plus élevées que celles dans le bloc bas. C'est particulièrement vrai dans les modalités MD et MF. Ces différences entre blocs s'expliquent vraisemblablement par un phénomène de dilution du fait de rendements sensiblement plus élevés dans le bloc bas cette année-là (*Figure 4.1*).

4.5. Relation entre niveaux de contrainte, élaboration du rendement et composantes de qualité

Une analyse en composantes principales (ACP) permet d'étudier les relations existantes entre le développement végétatif, le rendement et ses composantes, la composition des moûts et les indicateurs de contraintes hydrique et azotée. Toutes les valeurs utilisées sont mesurées à la récolte sauf le poids de bois de taille qui est mesuré 3 mois après. Les valeurs de chaque bloc sont utilisées pour augmenter la gamme de variations observée. Grâce à cette ACP, des corrélations entre les variables au moment de la récolte peuvent être établies (*Tableau 4.2*).

Des contraintes hydrique et azotée corrélées

Le Ψ_b (Pbase, exprimé en valeur absolue) et le $\Delta^{13}C$ (DC13) sont utilisés pour évaluer la contrainte hydrique subie par la vigne et sont fortement corrélés positivement ($r=0,9$) (Van Leeuwen et al. 2001; Gaudillère et al. 2002). Ces indicateurs sont également corrélés négativement à l'indice chlorophyllien (SPAD, $r=-0,45$ et $-0,48$) (Schlemmer et al. 2005) et à l'azote assimilable des moûts (Nas, $r=-0,78$ et $-0,72$) et donc positivement à une contrainte azotée. En revanche, la teneur en azote assimilable des moûts et l'indice chlorophyllien ne sont pas significativement corrélés. L'azote assimilable des moûts est en effet plus influencé par l'année que par le traitement car il est très sensible au rendement notamment (Gaudillère et al. 2003).

Une expression végétative fortement liée au niveau de contraintes subies par la vigne

Les trois variables suivies représentant l'expression végétative de la vigne (NCF, PBT et LAI) sont également intimement corrélées ($r>0,9$) (*Tableau 4.2*). La porosité de la canopée dans la zone des grappes (Trous) présente une évolution inverse aux trois variables précédentes ($r\approx-0,6$). Une vigne plus vigoureuse présente naturellement une canopée plus dense et donc une porosité inférieure. Une corrélation négative existe entre niveau de contraintes hydrique et azotée et expression végétative. Cette corrélation est supérieure pour la contrainte hydrique ($r>0,85$) à celle pour la contrainte azotée (r compris entre 0,5 et 0,6). La surface foliaire est en effet très corrélée à la contrainte hydrique subie par la plante. Autant, le nombre de feuilles et leur surface sont affectés (Gomez-del-Campo et al. 2002). A l'inverse, la porosité de la canopée dans la zone des grappes au moment de la récolte est autant corrélée à la contrainte hydrique, qu'à l'indice chlorophyllien ($|r|\approx 0,7$) (*Tableau 4.2*). Cette porosité du feuillage à la vendange est fortement liée à une éventuelle chute des feuilles à la base des rameaux en fin de cycle. Une contrainte hydrique importante comme une carence azotée peuvent induire cette abscission. Celle-ci est la conséquence d'une sénescence accélérée de la feuille qui peut perturber la mesure de l'indice chlorophyllien (Schlemmer et al. 2005) et ainsi entraîner une surestimation de la contrainte azotée par cet indicateur.

Un rendement final très sensible au poids de la baie

Le nombre de grappes (Nb Gr.) n'est pas corrélé aux autres variables de rendement (*Tableau 4.2*) comme cela avait déjà été observé par Considine (2004). Il n'apparaît d'ailleurs corrélé à aucune autre variable suivie. Le nombre d'inflorescences par rameau est en effet en grande partie lié à des caractères génétiques et le nombre de rameaux par plante est fortement influencé par la conduite la vigne (ébourgeonnage, taille). Le rendement final obtenu (Rdt) est plus fortement corrélé au poids d'une baie (Pbaie) qu'au nombre de baies (Nb) (*Tableau 4.2*) (Considine 2004; Morlat et Bodin 2006). Ceci témoigne de l'importance de la période de remplissage de la baie dans l'obtention du rendement final et comment un nombre de baies inférieur peut être en partie compensé par une croissance de chaque baie plus importante (Ollat et al. 2002).

Le rendement final est fortement et négativement corrélé ($r=-0,70$ à $-0,78$) à la contrainte hydrique subie par la plante (*Tableau 4.2*). Si le poids d'une baie n'est corrélé qu'à la contrainte hydrique ($r<-0,84$), le nombre de baies par grappe est autant affecté par une contrainte hydrique ($r<-0,71$) que par le niveau de contrainte azotée mesuré avec l'indice chlorophyllien ($r=0,75$). Ceci témoigne de l'impact négatif de contraintes trop fortes sur la nouaison (Hilbert 2002). Le nombre de baies par grappe est d'ailleurs la seule composante du rendement corrélée avec l'indice chlorophyllien (*Tableau 4.2*). L'azote assimilable des moûts ressort bien corrélé aux différentes composantes du rendement et plus encore au rendement final ($r=0,70$). Ainsi, les conditions favorables à un fort rendement semblent également favorables à une teneur en azote assimilable des moûts élevée. La modalité irriguée et fertilisée et la modalité enherbée toute l'année s'opposent fortement pour ces deux variables et pèsent certainement très lourd dans la relation établie entre ces deux variables.

Une composition des moûts plus souvent liée à l'expression végétative de la vigne que directement aux indicateurs de contrainte suivis

La concentration en sucres des moûts (Sucres, en $g.L^{-1}$) et l'acidité totale (AT) sont peu variables entre les modalités, si bien que peu de corrélations sont mises en évidence (*Figure 4.2*). Seule la modalité témoin présente des teneurs différentes des autres et explique l'essentiel des corrélations observées. On peut cependant noter une corrélation faiblement significative ($\alpha=0,10$) entre la teneur en sucres et les indicateurs de stress ($r<0,38$) et entre l'acidité totale et ces mêmes indicateurs ($r=-0,44$, $\alpha<0,10$). Une contrainte hydrique favorise généralement une teneur en sucres plus élevée et entraîne également une acidité totale plus faible (Hardie et Considine 1976; Morlat et Bodin 2006). Les acides étant formés, pour l'essentiel, avant la véraison, l'accumulation de sucres et de l'eau dans la baie après ce stade produit une dilution de ceux-ci et une diminution de l'acidité totale, d'où une corrélation négative entre ces deux variables ($r=-0,54$).

La teneur en acide tartrique (Ac. Tart.) est positivement corrélée aux indicateurs de contrainte hydrique et à la porosité du feuillage, mais négativement à toutes les variables liées à l'expression végétative de la vigne ainsi qu'au nombre de baies par grappe et au poids d'une baie (*Tableau 4.2*). L'acidité tartrique diminue en effet par dilution au fur et à mesure du remplissage de la baie. La teneur en acide malique (Ac. Mal) présente des corrélations opposées à celle de l'acide tartrique. L'acide malique est très sensible au microclimat de la grappe. Une température élevée de cette grappe, du fait d'une canopée très aérée notamment, accélère la dégradation de cet acide (Smart 1998). Ainsi, la teneur en acide malique est négativement corrélée à l'intensité de la contrainte hydrique subie par la plante ($r<-0,6$) (Van Leeuwen et Seguin 1994b). Le potassium (K) est parfaitement indépendant des autres variables, confirmant que l'alimentation potassique est peu dépendante des conditions du milieu en l'absence de carence marquée (Conradie et

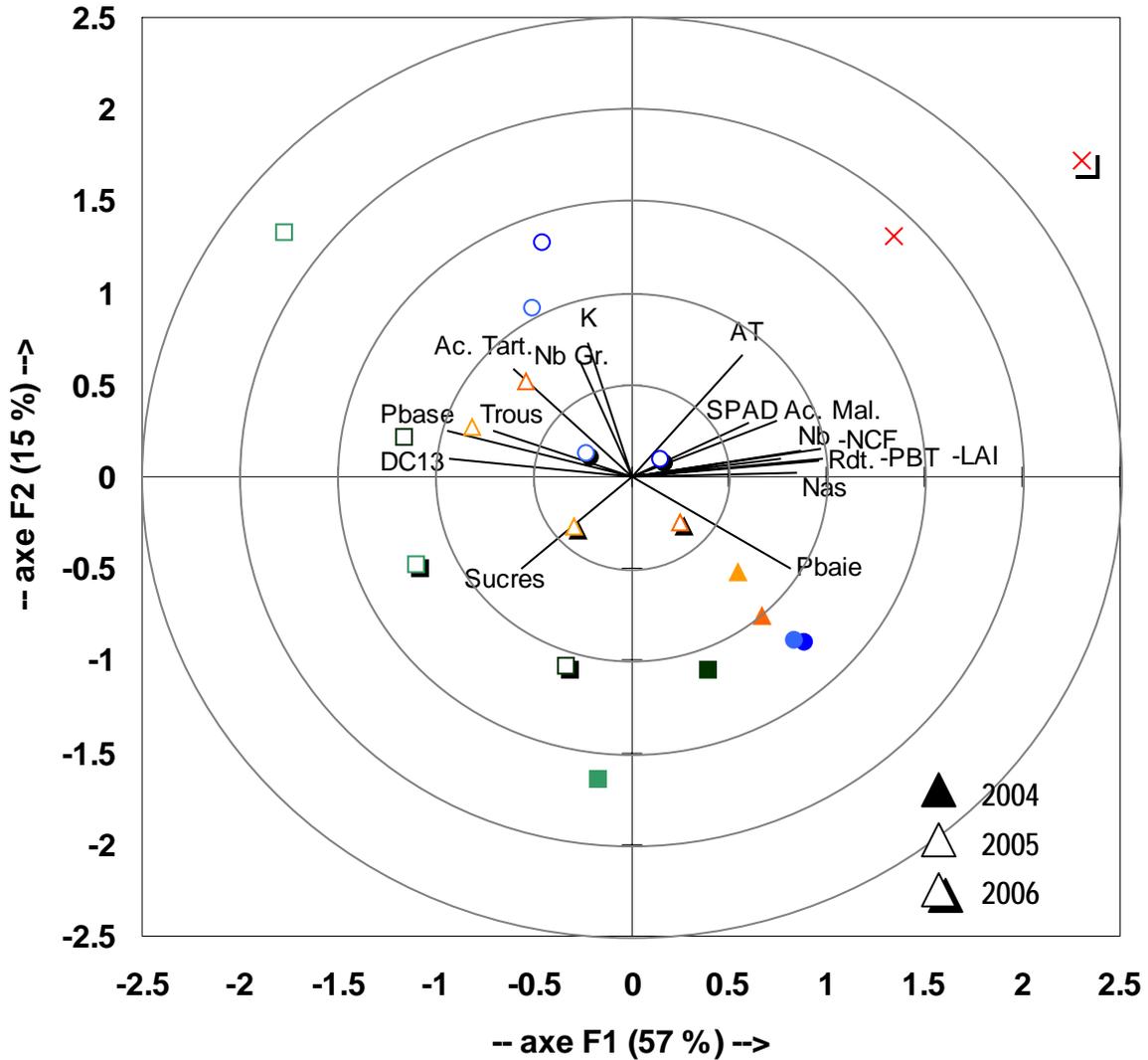


Figure 4.3 – Analyse en Composantes Principales (ACP) des indicateurs de croissance végétative, de composantes du rendement, de variables de qualité et des indicateurs de contrainte hydrique et azotée. Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲), MR2 (▲), MD1 (●), MD2 (●) en 2004. Les mêmes symboles évidés, auxquels s'ajoute MT (×) représentent les positions des placettes en 2005. Enfin, les points ombrés sont utilisés pour repérer les placettes en 2006. Les variables représentées sont les suivantes : $\Delta^{13}\text{C}$ des moûts (DC13), Potentiel hydrique foliaire de base (Pbase), Porosité du feuillage dans la zone des grappes (Trous), Acidité Tartrique (Ac. Tart.), Nombre de grappes (Nb Gr.), teneur en potassium (K), Acidité Totale (AT), indice chlorophyllien (SPAD), Acidité Malique (Ac. Mal.), Nombre de baies (Nb), Nombre de couches de feuilles (NCF), Rendement (Rdt), Poids de Bois de Taille (PBT), Surface foliaire (LAI), azote assimilable des moûts (Nas), Poids de une baie (Pbaie) et teneur en Sucres des moûts (Sucres).

Saayman 1989). La teneur en potassium du moût apparaît tout de même négativement corrélée au poids de la baie, du fait de la dilution provoquée par le remplissage de la baie (Tableau 4.2).

4.6. Analyse de l'effet de la modalité et du millésime sur la production de raisin

Construction des axes de l'ACP

Les deux premiers axes composites de l'ACP représentent respectivement 57 et 15% du total de la variance (Figure 4.3). Le premier axe est construit par la plupart des variables. Ainsi, trois variables du développement végétatif (PBT, LAI, densité foliaire dans la zone des grappes) expliquent une proportion équivalente à 29% de cet axe et se positionnent du côté positif, tout comme le rendement et ses composantes (sauf nombre des grappes) qui représentent 20,6%. Les indicateurs de contrainte hydrique (potentiel de base et delta C13) contribuent pour 17,7% à la construction de l'axe avec des coordonnées négatives. Ce premier axe met donc en évidence le niveau de contrainte subie par les plantes dans les différentes placettes et l'expression végétative et le rendement associés.

Le deuxième axe correspond principalement à la composition des moûts avec le potassium (20,3%), l'acidité totale (16,7%) comme principales variables explicatives positionnées du côté positif de l'axe. Par ailleurs, les sucres (coordonnée positive) et l'acide tartrique (coordonnée négative) expliquent à elles deux 20% de ce deuxième axe. Deux composantes de rendement contribuent également à cet axe avec le nombre des grappes (15,5% - coordonnée positive) et le poids de la baie (9,7% - coordonnée négative). Il convient toutefois de noter que le poids d'une baie est mieux représenté par l'axe 1 que par l'axe 2.

Un troisième axe explique encore près de 10% de la variance (*données non présentées*). Il est composé essentiellement de l'indice chlorophyllien (32,2% - coordonnée positive), de la porosité du feuillage (12,6% - coordonnée négative) et de divers éléments de la composition des moûts qui sont la teneur en azote assimilable, en sucres, l'acidité totale et malique et qui expliquent environ 40% de l'axe (coordonnées négatives). Cet axe semble donc associer contrainte azotée et composition du moût.

Un effet millésime mieux mis en évidence que l'impact de la modalité d'entretien du sol

Dans l'ACP basée sur les axes 1 et 2, les individus (modalité x année) ont été bien différenciés tout au long de l'axe 1 et un peu moins bien sur l'axe 2 (Figure 4.3). Les individus d'une même année sont bien regroupés et l'effet lié au millésime est clairement mis en évidence. Ainsi, l'année 2004 se caractérise par des contraintes moins importantes, une expression végétative à la récolte et un rendement supérieurs. Ce millésime se caractérise également par des moûts plus sucrés, avec une acidité intermédiaire et moins riches en potassium, peut être donc plus mûrs. Le millésime 2005 est opposé à 2004 avec des contraintes nutritionnelles fortes et une croissance et un rendement faibles. Le degré de maturité semble également moins avancé avec moins de sucres et plus d'acides dans la baie. Le millésime 2006 est intermédiaire entre les deux précédents et se situe globalement au centre du plan (Figure 4.3).

Une modalité témoin indépendante de l'effet millésime

Seule la modalité irriguée et fertilisée se détache totalement de cet effet année du fait de sa relative indépendance vis-à-vis des conditions climatiques. Elle se positionne à la fois à des valeurs de croissance et de rendement très élevées sur l'axe 1 et à des coordonnées également élevées sur l'axe 2, notamment du fait d'une acidité totale et d'une teneur en

potassium des moûts élevée (*Figure 4.3*). Cette position témoigne donc à la fois de la vigueur élevée de la vigne dans cette modalité du fait de l'absence de contrainte et d'une maturité peu satisfaisante au moment de la récolte. Il est également intéressant de noter que la modalité MT en 2006 se positionne à des valeurs supérieures sur les deux axes, confirmant que la vigne a subi moins de contraintes cette année là et présenté une croissance et une production supérieure.

Des gradients de contraintes mis en évidence entre les modalités au sein de chaque millésime

Si la différenciation entre millésimes semble la plus claire sur le plan, des gradients plus ou moins marqués apparaissent également entre modalités non irriguées au sein d'un même millésime. Ainsi, sur l'axe 1, MR est généralement à des coordonnées légèrement inférieures à MD. Cependant, l'écart est faible et même inexistant en 2005. Cette situation semble montrer que la concurrence entre l'enherbement semi-permanent et la vigne a un impact sur la récolte finalement modéré. La modalité enherbée toute l'année apparaît le plus souvent avec les coordonnées les plus faibles (généralement négatives) et donc avec les contraintes les plus fortes et l'expression végétative la plus modérée (*Figure 4.3*).

Sur l'axe 2, les classements sont moins évidents. Ainsi, en 2004, le gradient observé est de la forme MR>MD>MF. En 2005 et en 2006, la modalité désherbée se place à une coordonnée plus élevée que la modalité MR. Ce classement s'explique en grande partie par la dilution des sucres dans la baie de la vigne désherbée qui induit une concentration inférieure. La placette MF1 poursuit cette logique avec des coordonnées inférieures aux deux modalités précédentes (*Figure 4.3*).

L'axe 3 (*non représenté*) permet de classer chaque année les modalités dans l'ordre MD>MR>MF. Ce classement s'explique en grande partie par le gradient observé dans les indices chlorophylliens mesurés. Celui-ci semble autant le fait du niveau de nutrition azotée de la vigne que celui d'un vieillissement prématuré des feuilles dans les modalités où la contrainte hydrique est forte (MF notamment).

Un effet bloc très discriminant en année sèche

En 2006, l'effet bloc est nettement supérieur à celui de la modalité sur l'axe 1 avec le bloc haut placé plus à gauche que le bloc bas dans toutes les modalités (*Figure 4.3*). Cette différence entre les deux blocs met en évidence une recharge limitante particulièrement en haut de pente. Elle peut également être liée à la présence de la nappe, plus proche en bas de pente, avec des remontées capillaires qui maintiendraient un statut hydrique de la vigne moins défavorable pendant la sécheresse estivale. Différents auteurs ont montré qu'une nappe située à moins de trois mètres de profondeur pouvait jouer un rôle significatif dans l'alimentation hydrique de la vigne (Trambouze 1996; Guix 2005).

Des contraintes très fortes isolent la placette MF2

Sur l'axe 1, la placette MF2 est systématiquement à des coordonnées très inférieures à toutes les autres placettes du fait des contraintes hydriques très importantes qu'elle subit chaque année (*Figure 4.3*). Sur l'axe 2, en 2004, la placette MF2 sort du nuage de points des autres placettes avec des coordonnées beaucoup plus négatives et donc une teneur en sucres sensiblement supérieure notamment. Celle-ci est probablement la conséquence d'une contrainte hydrique supérieure mais encore modérée qui favorise une concentration en sucre. Au cours des années sèches en revanche, cette même placette présente systématiquement des coordonnées sur cet axe 2 très supérieur à celle de MF1 et même de toutes les autres placettes en 2005. Cette position de la placette MF2 s'explique à la fois par une teneur en sucres légèrement inférieure et une acidité totale supérieure. Celles-ci

sont probablement la conséquence d'un blocage tardif de la maturation du raisin suite à des contraintes hydriques excessives (Morlat et al. 1992).

5. Discussion Générale-Conclusion

Concurrence pour les ressources et conséquences sur la croissance et la production de la vigne

La présence des enherbements, malgré leur faible croissance, induit une concurrence pour les ressources du sol. L'espèce choisie pour enherber et la gestion du couvert qui lui est associée influencent fortement les périodes et les intensités des contraintes subies par la vigne. Or, selon la période à laquelle les contraintes sont appliquées, l'impact sur la vigueur végétative et l'élaboration du rendement est différent (Hardie et Considine 1976; Ojeda et al. 2001; Ojeda et al. 2002).

Les indicateurs de contrainte n'ont pas été présentés à différentes périodes dans l'ACP car ils ressortent très fortement corrélés et orientés dans le même sens. La sécheresse estivale forte, typique du climat méditerranéen, provoque précocement un gradient de contraintes dans le cycle lequel se maintient, voire s'accroît, tout au long du cycle. En conséquence, les corrélations entre les différentes variables étudiées et les indices de contrainte à différents stades phénologiques de la vigne sont similaires aux corrélations avec ces mêmes indices calculés à la récolte. La corrélation est même plus importante avec ces derniers puisque la discrimination entre les traitements s'accroît au cours du cycle. Ainsi, la présence d'un enherbement en climat méditerranéen influence principalement la précocité de l'apparition d'une contrainte et son intensité. L'enherbement permanent provoque donc une contrainte hydrique et azotée très forte et précoce de par son cycle décalé de celui de la vigne (Cf. *Chapitre III*). L'enherbement semi-permanent, du fait que sa croissance dépend fortement des conditions de levée à l'automne et d'installation au printemps, impose une concurrence pour les ressources moindre les années sèches. En conséquence, il induit une contrainte sur la vigne très variable d'une année sur l'autre mais généralement inférieure et plus tardive à celle de la modalité MF.

Les conséquences de la contrainte hydrique générée par l'enherbement permanent sont donc une réduction forte et précoce de la croissance végétative de la vigne (*Figure 3.4*). Le niveau de contrainte étant déjà important au moment de la floraison et de la nouaison, le taux de nouaison et le nombre de baies sont faibles (*Figure 4.2*) (Hardie et Considine 1976; Matthews et al. 1987; Lebon et al. 2004). Plus tard dans le cycle, un niveau de contrainte supérieur et une surface foliaire inférieure perturbent le remplissage des baies (Coombe et McCarthy 2000; Ojeda et al. 2001; Ollat et al. 2002). Finalement, la diminution de la vigueur des rameaux, de l'expression végétative et du rendement qu'entraîne la présence d'un enherbement en climat méditerranéen est assez comparable à ce qui a pu être observé dans d'autres régions (Soyer et al. 1984; Morlat et al. 1993; Maigre et al. 1995) avec une diminution de l'ordre de 30 à 50% selon les années. L'enherbement semi-permanent a un impact sur le développement végétatif variable selon les années. La diminution de l'expression végétative de la vigne qu'il entraîne est ainsi supérieure et parfois comparable à celle de l'enherbement permanent au cours des années climatiques plus favorables. Son impact est en revanche bien plus modéré les années sèches et la croissance de la vigne est alors comparable à celle d'une vigne désherbée. Chaque année en revanche, la contrainte, notamment azotée, induite par la présence de cet enherbement au moment de la floraison affecte la nouaison et diminue le nombre de baies. La contrainte subie par la vigne est également moindre qu'avec un enherbement permanent au cours de la période véraison-maturité et le remplissage de la baie est meilleur, ce qui compense partiellement la perte de

rendement occasionnée par une nouaison difficile. L'impact de l'enherbement semi-permanent sur le rendement est donc plus modéré que celui de l'enherbement permanent.

Impact de la gestion de l'enherbement sur l'équilibre végétatif et la qualité de la récolte

La présence des enherbements et la gestion qui leur est associée produit un gradient de contraintes qui est à l'origine d'expressions végétatives et de niveaux de production différents au moment de la vendange. Les dynamiques différentes des contraintes imposées à la vigne sont sources de modification des équilibres entre les parties végétative et reproductrice. Or, un bon équilibre entre ces deux composantes est primordial pour l'obtention d'une production suffisante et de qualité (Smart et al. 1991; Kliewer et Dokoozlian 2005). Une surface foliaire insuffisante peut en effet induire une photosynthèse trop limitante pour la maturation du raisin produit (Pellegrino et al. 2005). Une canopée trop dense crée en revanche un microclimat autour du fruit défavorable à sa qualité finale (Smart et al. 1988; Smart 1998) et favorable aux maladies cryptogamiques (Fermaud et al. 2001b; Halleen et Holz 2001; Zahavi et al. 2001). Les différents indices d'équilibre testés ici proposent une vision concordante quant à l'impact de l'enherbement et de sa gestion sur cet équilibre.

Une vigne avec un enherbement semi-permanent présente ainsi les indices les plus stables d'une année sur l'autre et l'équilibre le plus favorable, a priori, à une production de qualité. Tous les indices testés le confirment. Or, la faible dispersion du nuage de points observés dans l'ACP pour cet entretien du sol confirme qu'il est source d'une grande stabilité de l'équilibre des vignes d'un millésime à l'autre. La situation de ce nuage, au centre du plan, tend également à prouver qu'une situation intermédiaire entre les traitements les plus extrêmes est souhaitable avec un équilibre entre acidité et teneur en sucres qui s'opposent sur l'axe 2 de l'ACP.

L'installation d'un enherbement permanent très concurrentiel à base de fétuque élevée induit une grande instabilité de cet équilibre selon les millésimes. Les rendements sont généralement faibles et cette pratique est à l'origine d'un éventuel blocage de maturation en année très sèche, du fait d'une contrainte hydrique trop importante. Elle n'est donc favorable pour la qualité que dans des situations ou des millésimes peu contraignants.

Quel que soit le millésime, la fertilisation et l'irrigation excessives mises en place dans la modalité ont été à l'origine d'une croissance végétative excessive, au détriment de la production de fruit. Ce profond déséquilibre de la plante est représenté par des points très éloignés du centre de l'ACP et des indices d'équilibre très défavorables à une production de qualité. Il favorise le développement des maladies, comme le botrytis et l'oïdium qui nuisent à la qualité finale des moûts (Pool et al. 1984; Pearson et Goheen 1988; Emmett et al. 1998; Gadoury et al. 2003; Calonnec et al. 2004).

Les indices d'équilibre calculés semblent rendre assez fidèlement le potentiel qualitatif des vignes en fonction des modalités et des millésimes. Pour autant, ils se révèlent bien souvent peu discriminants et leur pertinence est mise en question. En effet, ce travail témoigne d'une limite de ces indicateurs de décision basés sur l'expertise et souvent liés à des systèmes de cultures (cépage, mode de conduite, etc.) locaux. Dans la situation présente, la plupart des traitements sont ainsi susceptibles, d'après ces indices, de fournir une production de qualité. Au sein des régions viticoles françaises, la réglementation cherche à imposer un équilibre favorable au travers de limitation des rendements autorisés. Dans la zone d'appellation des parcelles étudiées, le rendement autorisé est de $80 \text{ hL} \cdot \text{ha}^{-1}$, soit environ $3,7 \text{ kg} \cdot \text{pl}^{-1}$. Ainsi, seule une vigne enherbée toute l'année satisfait ces conditions au cours du millésime le moins contraignant (2004) tandis que les deux autres modalités produisent des rendements très supérieurs. Au cours des millésimes caractérisés par une sécheresse forte, les rendements produits par une vigne avec un enherbement semi-

permanent sont les plus stables et les plus proches de cette limite tandis qu'un enherbement permanent réduit trop fortement le rendement. Au cours de ces mêmes millésimes, un ébourgeonnage seul a suffi à maintenir un rendement acceptable dans la vigne désenherbée. L'observation de ces rendements produits confirme qu'une contrainte modérée et progressive est nécessaire pour une production conforme au cahier des charges des zones d'appellation.

L'enherbement semi-permanent est-il plus adapté au climat méditerranéen ?

La zone de production viticole méditerranéenne se distingue des autres zones de production par l'importance de sa sécheresse estivale. Celle-ci implique notamment qu'une contrainte subie précocement dans le cycle est généralement accentuée par la suite. Ainsi, la concurrence forte pour les ressources induite par la présence d'un enherbement permanent peut s'avérer rapidement problématique. Pour autant, cette pratique revêt un intérêt certain puisqu'elle induit notamment une diminution conséquente de la vigueur végétative de la vigne. Or, celle-ci signifie généralement une moindre sensibilité aux cryptogames comme le botrytis ou l'oïdium (Fermaud et al. 2001a; Halleen et Holz 2001; Morlat et Bodin 2006). L'enherbement permanent composé de fétuque élevée comme celui étudié ici s'est révélé très concurrentiel pour ce climat et induit souvent des contraintes hydrique et azotée fortes. Si celle-ci a été plutôt favorable au cours d'une année plus pluvieuse (2004), son impact a été très défavorable en année sèche (2005 et 2006). Certains auteurs ont observé que les rendements viennent à se stabiliser, voire à remonter légèrement, après quelques années de présence d'un enherbement permanent (Morlat et al. 1993; Chantelot et al. 2004). Un tel phénomène n'a pas été observé ici puisque les rendements diminuent encore chaque année, témoignant d'un éventuel effet cumulatif dû à une concurrence permanente pour les ressources du sol.

L'enherbement semi-permanent ressort comme une alternative favorable par rapport au climat rencontré et aux objectifs de production. La diminution de l'expression végétative de la vigne a été sensible au cours d'une année humide et modérée les années sèches, lorsqu'elle est moins utile. Le rendement est assez peu affecté et stabilisé d'une année sur l'autre du fait d'une croissance de l'enherbement très dépendante des conditions printanières et devant se réinstaller chaque année. Cette stratégie peut également présenter d'autres avantages comme la possibilité de choisir son espèce en fonction d'un objectif fixé chaque année (engrais vert par exemple). Pour autant, cette stratégie d'enherbement présente au moins deux inconvénients majeurs. En premier lieu, la couverture du sol au cours de l'automne et de l'hiver, période sensible pour le ruissellement et l'érosion, fait perdre l'un des principaux avantages de l'implantation d'un enherbement. Ensuite, le coût de cette option avec un semis chaque année peut être un blocage majeur quant à son adoption par les professionnels. Aussi, d'autres options techniques peuvent être envisagées.

2^e Partie : Enherbement des vignobles en région méditerranéenne et dynamique de partage des ressources en eau

Les deux chapitres contenus dans cette partie servent de support à la rédaction de deux articles présentés pour la revue : European Journal of Agronomy.

Chapitre V - Incidence de l'implantation d'un enherbement sur la dynamique de l'eau dans un vignoble méditerranéen

1. Mots clés

Bilan hydrique ; Contrainte hydrique ; Cultures associées ; Dynamique ; Enherbement ; *Festuca arundinacea* Shreb ; *Hordeum vulgare* ; *Vitis vinifera* L.

2. Introduction

Contrairement à la majorité des productions agricoles, pour lesquelles une absence de contrainte est recherchée, une production viticole de qualité nécessite des contraintes hydriques modérées, variables au cours du cycle de la vigne (Ojeda et al. 2002; Ollat et al. 2002; Deloire et al. 2004; Deloire et al. 2005; Pellegrino et al. 2006). En effet, un accès immodéré à l'eau se traduit par une croissance végétative excessive (Cf *Chapitre III*) souvent problématique (Delas 1996). Celle-ci, outre un besoin accru en travaux pour sa maîtrise, peut être à l'origine d'une mauvaise maturation du raisin, voire d'un risque accru d'attaques cryptogamiques (Zahavi et al. 2001). L'enherbement du vignoble est une pratique qui peut, entre autre, permettre de réduire la quantité d'eau disponible pour la vigne au cours de la phase de croissance, lorsqu'une ressource hydrique trop importante est néfaste. Cependant, cette compétition pour les ressources peut être à l'origine d'une contrainte hydrique trop importante, nuisible à la production. Une telle contrainte réduit en effet fortement la croissance foliaire (Gomez-del-Campo et al. 2002), particulièrement si elle intervient avant la floraison (Cf *Chapitre III*) (Wery 2005). Elle limite ainsi la photosynthèse et la production d'assimilats, et peut avoir une conséquence néfaste sur le rendement et la qualité de la production (Pellegrino et al. 2005).

Dans le climat méditerranéen, comme dans bon nombre de zones de production viticoles traditionnelles, l'eau est souvent le facteur limitant de la production (Seguin 1983). Les précipitations y sont en effet rares et surtout très irrégulières. De plus, les modèles climatiques prédisent, dans un avenir proche, des conditions plus arides encore (Qadir et al. 2003), laissant craindre un contexte climatique plus contraignant pour la production de vin de qualité. Si l'irrigation est maintenant autorisée en France pour les vins de table et les vins de pays, elle reste très encadrée pour les AOC (décret du 4 décembre 2006). Par ailleurs, l'eau n'est pas accessible partout. Les moyens de maîtriser le fonctionnement hydrique de la vigne sont donc limités. Ceci explique que, dans la zone de production viticole méditerranéenne, les vigneronns hésitent à adopter l'enherbement par crainte d'une contrainte hydrique trop forte (Gaudel 2002). Pourtant, des études récentes menées dans cette même région ont montré que la présence d'un enherbement ne s'accompagnait pas nécessairement d'une contrainte hydrique forte pour la vigne (Chantelot et al. 2004; Celette et al. 2005). En effet, cet enherbement modifie profondément le fonctionnement du système. Par exemple, la réduction de la surface foliaire de la vigne qu'elle provoque, du fait d'une contrainte modérée et précoce, contribue à atténuer la contrainte hydrique subie par la plante pendant la formation de la vendange. Une redistribution du système racinaire de la vigne des horizons de surface vers les horizons plus profonds a également pu être observée en présence de l'enherbement dans un sol profond (Morlat et Jacquet 2003; Celette et al. 2005). De plus, l'enherbement améliore la recharge hivernale du profil de sol et augmente ainsi le stock d'eau disponible pour les deux espèces (Celette et al. 2005). Ces changements semblent limiter la

concurrence pour les ressources imposée par l'enherbement. Pour autant, introduire un enherbement permanent au sein d'un vignoble reste une pratique risquée en cas de mauvaise gestion. La compétition pour l'eau existe fatalement et la contrainte hydrique n'est pas toujours évitée par la vigne (Cf *Chapitres III et IV*) (Morlat 1987; Moulis 1994; Maigre 1996). Une gestion raisonnée du couvert intercalaire dans cette association est donc indispensable et une bonne compréhension du fonctionnement du système s'impose.

Ce système se caractérise par un fort contraste entre les deux espèces et leur fonctionnement par rapport à l'eau. Les deux espèces se différencient notamment par une exploration racinaire très différente et par des cycles de croissance décalés. En effet, la vigne présente un système racinaire profond, difficile à observer dans son intégralité (Trambouze 1996). Pour autant, différents auteurs soutiennent qu'une observation du système racinaire sur le premier mètre de sol s'avère suffisante et c'est généralement la profondeur qui est choisie dans les études racinaires dans les parcelles viticoles (Champagnol 1984; Morlat et Jacquet 1993; Stevens et Nicholas 1994). Cependant, l'observation des systèmes racinaires *in situ* présente deux autres inconvénients de taille. Pour commencer, la distinction entre racines actives et inactives dans l'absorption est difficile, voire impossible (Radersma et Ong 2004). De plus, lorsque l'on s'intéresse à une espèce pérenne, comme la vigne, il est très compliqué de déterminer la profondeur du front racinaire et d'observer toutes les racines que comprend le système racinaire de la plante. C'est pourquoi certains auteurs suggèrent qu'il est préférable de mesurer directement la zone d'activité racinaire, notamment pour l'absorption de la ressource hydrique (Nelson et al. 2006). Cette mesure prend également en compte l'aspect dynamique de cette consommation de l'eau et considère les variations des zones d'absorption d'eau au cours de l'année mais aussi entre les millésimes (Trambouze 1996). C'est ce que cherche à représenter la TTSW (Sinclair et Ludlow 1986).

L'objectif de ce travail consiste à mieux comprendre le fonctionnement hydrique de ce système associé et sa dynamique pluriannuelle. Un vignoble enherbé présente généralement une structure en rangs qui peut générer une compartimentation du sol pour l'utilisation de la répartition de la ressource hydrique entre les deux espèces (Celette et al. 2005). Cette compartimentation est la conséquence notamment, de la redistribution du système racinaire de la vigne et ce travail cherche donc à observer les modifications de l'enracinement d'une année sur l'autre. Plusieurs études montrent également que la présence d'une culture intercalaire peut fortement affecter le rapport ruissellement/infiltration, en particulier pendant la recharge hivernale (Klik et al. 1998; Battany et Grismer 2000; Tournebize 2001). La capacité d'infiltration peut ainsi être doublée à condition que la couverture soit suffisante. Ces deux phénomènes peuvent ainsi atténuer la contrainte hydrique subie par la vigne. La recharge hivernale influence grandement l'importance de la concurrence pour l'eau dans une vigne enherbée (Morlat et Jacquet 2003; Celette et al. 2005) et le ruissellement a donc été évalué. Ce chapitre présente la dynamique de partage des ressources hydriques entre les deux espèces associées. Pour cela, une expérimentation a été conduite pendant quatre années sous différentes intensités d'enherbement. Ces quatre années ont notamment été caractérisées par des conditions climatiques qui ont créé des dynamiques hydriques très contrastées.

3. Matériel et Méthodes

3.1. Site expérimental

Ce chapitre s'appuie sur l'étude expérimentale menée entre 2003 et 2006 sur une parcelle du Domaine du Chapitre à Villeneuve-lès-Maguelone, près de Montpellier. Les conditions de l'expérimentation sont celle d'un climat de type méditerranéen (*Figure 2.3*).

Le sol de la parcelle est un sol brun calcaire de texture argileuse, profond et homogène. Les modalités d'entretien du sol sont les modalités enherbées (MR et MF) et la modalité désherbée (MD). La largeur de l'inter-rang enherbé est d'environ 1,5 m, soit 60% de la surface. Chacune de ces modalités est composée de deux placettes caractérisées par leur position par rapport à la pente de la parcelle. Cette pente, orientée N-S, reste légère avec une moyenne de 2% environ dans le bloc haut et inférieure à 1% dans le bloc bas. (Figure 2.2).

3.2. Mesures expérimentales

3.2.1. Les termes du bilan hydrique

Précipitations et demande climatique

Les données recueillies par la station météorologique installée sur la parcelle (Cf. Chapitre II -2.1.2.) expérimentale ont été utilisées pour connaître les précipitations journalières et calculer la demande climatique quotidienne (Allen et al. 1998).

Teneur en eau et stock d'eau du sol

Le suivi des teneurs en eau a été effectué par la méthode neutronique sur les trois modalités étudiées. Chaque placette est ainsi équipée de 3 paires de tubes d'accès de 3 m de profondeur. Chaque paire est composée d'un tube aligné avec le rang de vignes et d'un autre qui lui fait face au milieu de l'inter-rang. Un tube supplémentaire de 5 m de profondeur a été ajouté sur le rang de chaque placette des modalités MF et MD. L'hypothèse est faite, qu'à cette profondeur, le fonctionnement hydrique est sensiblement identique sous le rang et sous l'inter-rang puisque l'hétérogénéité du couvert affecte peu de telles profondeurs. Des comptages neutroniques (I_x) sont réalisées tous les 0,2 m entre 0 et 1,6 m puis tous les 0,4 m jusqu'à 5 m.

A partir de ces mesures d'humidité, la quantité totale d'eau transpirable par la plante (TTSW) de chacune des modalités a pu être établie et la quantité d'eau transpirable par la plante disponible (ASW) a pu être calculée à chaque date de mesure de l'humidité. Aucune variation significative de teneur en eau n'ayant été observée en dessous de 4 m de profondeur, il a été décidé de calculer le stock d'eau total du sol sur cette profondeur. La TTSW a été déterminée à partir de l'humidité à la capacité au champ pour chaque horizon, mesurée au cours des hivers 2002-2003 et 2003-2004 après d'importantes précipitations. Cependant, les mesures réalisées à la sonde à neutrons au cours du mois décembre 2003 n'ont pas été prises en compte pour certains horizons car il ressortait que les teneurs en eau mesurées correspondaient plutôt à une humidité proche de la saturation (Annexe 3). La borne W_{\min} également nécessaire au calcul de la TTSW a été déterminée comme étant l'humidité minimale mesurée à chaque horizon sur la période considérée (2003 à 2006) et ne correspond donc pas forcément au point de flétrissement permanent comme l'ont déjà montré divers auteurs (Sinclair et Ludlow 1986; Lacape et al. 1998; Pellegrino et al. 2004). La TTSW de chacun des enherbements a également été calculée. Chaque année, le profil observé au moment de la destruction de l'enherbement temporaire ou du début de jaunissement de l'enherbement permanent (généralement en juin) a été considéré comme le W_{\min} de l'année pour l'enherbement. Une approximation est donc réalisée puisque ce W_{\min} surestime en partie les consommations de l'enherbement car la vigne a également commencé à transpirer. A l'inverse, l'enherbement transpire encore une fois la saison sèche arrivée même si ce flux est fortement diminué (Voltaire et Lelièvre 2001; Voltaire et Norton 2006).

Potentiels hydriques du sol

Un suivi hebdomadaire des potentiels hydriques du sol des modalités MF et MD a été réalisé par tensiométrie entre le débourrement de la vigne et le décrochage des tensiomètres. Pour cela, des cannes tensiométriques à eau (SDEC, Inc.) sont disposées à proximité des tubes d'accès de sonde à neutrons. Une première série est placée sous le rang avec des profondeurs de mesure de 0,3, 0,5, 0,75 et 1 m de profondeur. Une deuxième série est située sur l'inter-rang, dans le prolongement des tubes d'accès de sonde à neutrons avec les mêmes profondeurs de mesure auxquelles s'ajoutent deux cannes à 2,5 m et 2,8 m. Ces deux dernières mesures nous permettent de suivre le gradient de potentiels hydriques qui existe en fond de profil et donc d'évaluer si un flux vertical important existe ou non à cette profondeur, ainsi que sa direction (Trambouze 1996).

Ruissellement de surface

La quantité d'eau ruisselée a été mesurée *in situ* tout au long de l'année dans les modalités enherbée (MF) et désherbée (MD). Pour ce dispositif, une aire de collecte a été isolée, à proximité de la placette de mesures neutroniques, à l'aide d'une bande en caoutchouc semi-rigide. A l'exutoire de cette aire de collecte se trouve un collecteur en PVC qui amène les eaux de ruissellement vers une chambre à augets. Cette dernière est reliée à une station CR10X (Campbell, Inc.) qui enregistre les basculements des augets toutes les 15 secondes. Le volume d'un auget étant connu, il est ensuite possible de connaître le volume d'eau ruisselée en fonction du temps. L'eau est ensuite évacuée de la chambre à augets en aval par un second tuyau en pvc. Le mauvais fonctionnement du système de mesure dans la placette MD1 a conduit à ne pas considérer les mesures effectuées dans cette placette. De plus, la précision limitée de la mesure incite à ne considérer qu'un comportement moyen pour les placettes de la modalité enherbée. L'évolution du coefficient de ruissellement en fonction des précipitations journalières est de la même forme pour toutes les modalités. Seuls le seuil de déclenchement et la pente d'augmentation du ruissellement diffèrent d'une modalité à l'autre. Cette courbe de réponse du ruissellement à l'intensité journalière des précipitations a été calculée à partir de la méthode développée pour le modèle SWAT (Chanasyk et al. 2003; Tripathi et al. 2003; Jayakrishnan et al. 2005; Tripathi et al. 2006) et le coefficient CN qui la caractérise a été optimisé à partir de données collectées au champ au cours d'une centaine d'épisodes pluvieux entre le printemps 2005 et l'automne 2006. Ce CN est un paramètre empirique dépendant notamment de la couverture du sol et de son état de surface, ainsi que des précipitations des 5 derniers jours (Chanasyk et al. 2003; Mapfumo et al. 2004; USDA 2004b).

Propriétés hydrodynamiques du sol

Les propriétés hydrodynamiques du sol de la parcelle expérimentale ont été évaluées en laboratoire à l'aide de la méthode de Wind (Tamari et al. 1993; Bruckler et al. 2002). Les cylindres de sol non remanié ont été prélevés lors de la réalisation des premières fosses racinaires, en 2004. Des échantillons ont été réalisés à deux profondeurs différentes (0,5 et 1,2 m de profondeur).

La courbe de rétention ($h(\theta)$) est obtenue par régression à partir des valeurs obtenues avec la méthode de Wind et des potentiels matriciels mesurés à l'aide des tensiomètres comparés aux teneurs en eau évaluées par la méthode neutronique (*Annexe 4*). Elle a été établie, ainsi que la courbe $K(h)$, aux deux profondeurs de prélèvement de ces cylindres par optimisation à partir de la formulation établie par Van Genuchten (1980). Pour cette courbe de conductivité hydraulique, la conductivité à saturation a été évaluée par la méthode de Wind. Le paramètre l , qui définit la connectivité des pores dans l'équation de la courbe de

conductivité est fixé à une valeur de 0,5 (Mualem 1976). Les observations réalisées sur les modalités enherbée toute l'année (MF) et désherbée (MD) montrent une assez grande variabilité entre les échantillons et ne permettent pas de mettre en évidence des différences entre les traitements. Par ailleurs, les caractéristiques du sol (texture notamment) ayant été considérées homogènes sur l'ensemble de la parcelle, il a finalement été décidé de rassembler les échantillons des deux modalités et d'évaluer un seul jeu de propriétés hydrodynamiques pour l'ensemble des traitements.

Evaluation du drainage et des remontées capillaires

Les tensiomètres installés en fond de profil permettent de calculer un gradient de potentiels en fond de profil au cours du cycle de la vigne. Malheureusement, la bougie poreuse a une gamme d'utilisation réduite à un potentiel hydrique du sol total supérieur à -8 à -10 m d'eau en général, soit un peu moins que la pression de vapeur saturante de l'air. Par conséquent, en installant des tensiomètres à une profondeur proche de 3 m, on réduit encore sa gamme de fonctionnement à des potentiels matriciels de l'ordre de 5 m d'eau. Il est donc peu surprenant que les tensiomètres aient tendance à décrocher facilement à ces profondeurs. Ils ont malgré tout été installés en faisant l'hypothèse que les variations de potentiels à cette profondeur seraient limitées.

Profondeur de la nappe phréatique

La profondeur de la nappe phréatique a été suivie au cours des quatre années d'expérimentation par une mesure piézométrique au point le plus haut et au point le plus bas de la parcelle (Cf. *Chapitre III – 4.4.*).

3.2.2. Distribution des systèmes racinaires et évaluation des stocks d'eau exploités par les systèmes étudiés

Les systèmes racinaires ont été observés en 2004 et 2006 par l'intermédiaire de fosses racinaires de 1 m de profondeur sur les trois traitements étudiés (Van Noordwijk et al. 2000). Ces fosses ont été creusées à la fin de l'hiver afin de limiter les dommages éventuels causés à la vigne. Les fosses de la modalité MR ont quant à elles été creusées entre la destruction du couvert d'orge et avant son retournement (soit au mois de juin) afin de limiter le piétinement d'un couvert intercalaire déjà fragile. Les fosses ont été creusées parallèlement à l'orientation des rangs de vigne et des comptages ont été effectués sur les murs parallèles au rang, près du rang et sous l'inter-rang, et sur un des murs perpendiculaires au sens du rang. Les racines de vigne et des cultures intercalaires ont été distinguées. Cependant, cette méthode n'offre qu'une vision en deux dimensions des systèmes racinaires et exprime la quantité de racines par le nombre d'impacts racinaires (NI) par unité de surface. Pour autant, il est possible de transformer ces valeurs en densités de longueur racinaire, plus représentatives de la capacité d'absorption d'un système racinaire dans un volume de sol donné (Bengough et al. 1992; Lopez-Zamora et al. 2002). La méthode développée par Chopart et Siband (1999) a été adoptée pour réaliser cette transformation. Pour cela, des cubes de sol de 0,1 m de côté ont été prélevés sur chacun des murs de comptage des fosses racinaires et les facteurs permettant la transformation ont été évalués pour chacune des espèces associées. Ainsi, les facteurs d'anisotropie (A_n) calculés pour l'orge et la fétuque montrent une anisotropie du système racinaire de type planaire avec une orientation préférentielle parallèle au plan d'observation ($P_x > 1$). Comme l'ont déjà observé Chopart et Siband (1999) sur maïs, l'anisotropie de type planaire observée pour les deux types d'enherbements tend vers une anisotropie directionnelle lorsque la DLR devient faible. C'est donc le cas dans les horizons plus profonds et le système racinaire tend vers une orientation préférentielle dirigée vers le bas. Pour autant, ce

phénomène est limité et uniquement observé pour de faibles densités racinaires, par conséquent, nous décidons de simplifier la transformation de NI en DLR et considérons le système racinaire des enherbements comme anisotrope planaire pour tous les horizons observés. La transformation se fait donc sous la forme :

$$DLR = X.NI \quad [5.3.2. a]$$

Avec
$$X = \frac{16P_x^2 + 8P_x + 6}{10P_x + 5} \quad [5.3.2. b]$$

On obtient finalement un facteur X d'une valeur de 3 environ pour l'orge et de 4,9 pour la fétuque élevée.

Pour le système racinaire de la vigne, il n'a pas été possible de mettre en évidence une orientation préférentielle ($P_x \approx 1$), ni aucune anisotropie. Ceci peut s'expliquer par de faibles densités racinaires sur tout le profil qui empêchent généralement de mettre en évidence une anisotropie (Chopart et Siband 1999). En conséquence, l'approximation la plus satisfaisante pour transformer les NI en DLR est de la forme (Van Noordwijk et al. 2000) :

$$DLR = 2.NI \quad [5.3.2. c]$$

La zone exploitée par le système racinaire a également été évaluée au travers de la mesure de la TTSW (Sinclair et Ludlow 1986; Trambouze 1996; Nelson et al. 2006).

4. Résultats

4.1. Une dynamique de croissance décalée entre vigne et culture intercalaire

Les deux espèces associées dans le système étudié présentent des dynamiques de croissance différentes. L'évolution des biomasses aériennes produites par chacune des espèces au cours de l'année (*Figures 3.1 et 3.6*) témoigne du décalage existant entre les pics de consommation des ressources du système par chacune des deux espèces. Ainsi, la croissance de la vigne est réalisée essentiellement au printemps et en été. Un premier pic de croissance apparaît au mois de mai, lors de la formation des rameaux de l'année, lorsque les conditions sont les plus favorables. La production de biomasse par la vigne s'accélère de nouveau lors de la formation et du remplissage des baies de raisin. Dans cette étude, l'enherbement permanent (modalité MF) est composé pour l'essentiel de fétuque élevée et, dans une moindre mesure, de ray-grass anglais. Cet enherbement présente des pics de croissance plus précoces que ceux de la vigne. Ainsi, un premier pic de croissance apparaît à la fin de l'été et au début de l'automne, lorsque les conditions du milieu redeviennent favorables du fait de l'apport des précipitations, souvent importantes en cette période. Ce premier pic est très variable selon les conditions du milieu et l'état physiologique du couvert. Un deuxième pic de croissance apparaît vers la fin de l'hiver et le début du printemps lorsque les températures deviennent plus douces et que les ressources du sol (hydriques notamment) sont facilement accessibles. Cette croissance reste forte jusqu'à ce que le milieu exploité par le système racinaire s'appauvrisse fortement avec l'arrivée de la saison sèche (juin). L'enherbement débute alors une période de survie et ralentit fortement son métabolisme et sa croissance jusqu'aux premières précipitations importantes de la fin de l'été (Volaire et Norton 2006). L'orge (modalité MR) semée à l'automne comme culture intercalaire présente une dynamique de croissance proche de celle de l'enherbement permanent. Cependant, le pic de croissance automnale est généralement plus faible pour l'orge et dépend fortement des conditions de levée. A l'opposé, la croissance printanière de l'orge apparaît plus importante que celle de la fétuque élevée, exception faite de l'année 2006 pour laquelle la levée fût tardive et la

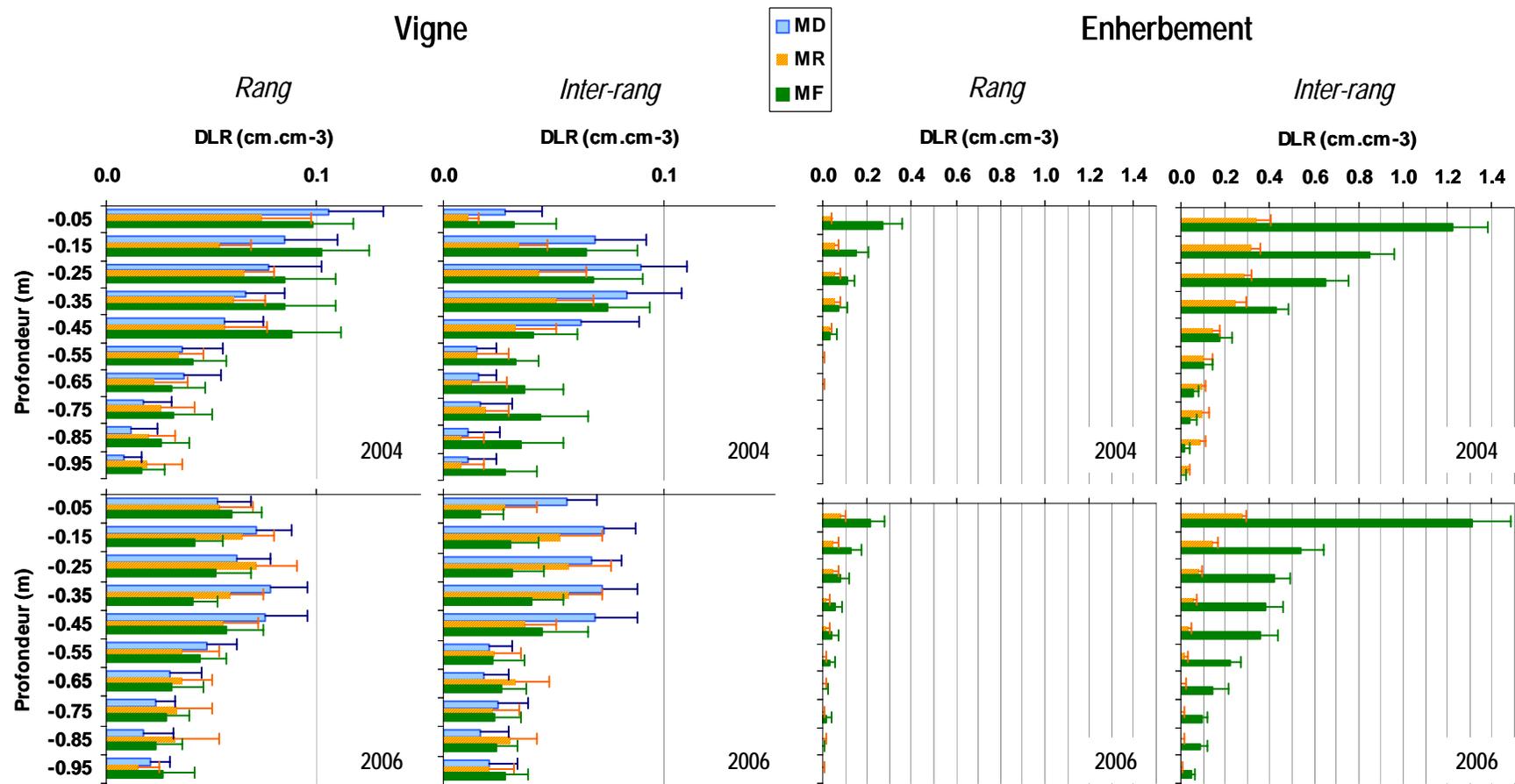


Figure 5.1 - Répartition des densités de longueur racinaire observées pour les 3 espèces étudiées entre rang et inter-rang en fonction de la modalité étudiée. Les observations ont été réalisées en mars en MF et MD et début juin en MR. Les valeurs de densité sont exprimées en cm de longueur racinaire par cm^3 de sol (cm.cm^{-3}). Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance autour de la moyenne calculés avec une loi de Student et un risque $\alpha=0,05$.

croissance hivernale rendue très difficile par un hiver rigoureux. Les biomasses aériennes produites par l'orge cette année-là sont ainsi significativement plus faibles.

Globalement, la croissance observée pour les différents enherbements est faible (*Figure 3.1*). Ainsi, la fétuque élevée produit 5 à 10 fois moins de biomasse que cette même espèce maintenue dans des conditions plus favorables pour une production de fourrage notamment (Lemaire et Salette 1981; Volaire et al. 1998; Cantero-Martinez et al. 2003; Norton et al. 2006b).

4.2. Enherbement et distribution des systèmes racinaires

4.2.1. Observation des systèmes racinaires de chacune des espèces

Les fosses racinaires creusées dans les différentes modalités étudiées ont permis de mettre en évidence la répartition des systèmes racinaires de chacune des espèces associées au sein du premier mètre de sol. Dans toutes les situations, des racines de vigne ont été observées à des profondeurs plus importantes mais seul le premier mètre est décrit ici car il met en évidence l'essentiel des interactions entre les deux systèmes racinaires et donne une idée du système racinaire de la vigne (Champagnol 1984). L'exploitation des horizons plus profonds fait l'objet d'une évaluation par la suite.

Sous sol nu (MD)

Les observations racinaires réalisées dans la modalité désherbée montrent une répartition homogène du système racinaire de la vigne entre rang et inter-rang (*Figure 5.1*). En effet, aucune différence significative n'apparaît dans le premier mètre de sol, si ce n'est dans les dix premiers centimètres où les racines de vigne sont en faible quantité sous l'inter-rang en 2004 seulement. Les DLR observées sont d'un ordre de grandeur conforme à d'autres références (Ionescu et al. 1978; Smart et Coombe 1983; Champagnol 1984; Archer et Strauss 1985; Stevens et Nicholas 1994), puisqu'elles sont comprises entre 0,01 et 0,1 cm.cm⁻³ de sol selon la profondeur. Cette stabilité de la distribution racinaire de vigne entre les deux années de comptage montre que la phase d'installation du système racinaire était vraisemblablement déjà terminée au début de l'étude, au moins sur le premier mètre de sol. Aucune différence significative n'apparaît entre les deux placettes MD1 et MD2, ni entre les années 2004 et 2006.

Sous enherbement temporaire (MR)

Une différence nette apparaît dans la colonisation racinaire entre le rang et l'inter-rang pour le couvert d'orge (*Figure 5.1*). Ainsi, les DLR d'orge sont significativement plus importantes sous l'inter-rang que sous le rang jusqu'à 1 m de profondeur en 2004 et jusqu'à 0,4 m de profondeur en 2006. Ces DLR sont significativement supérieures à celle de la vigne dans cette même modalité sous l'inter-rang jusqu'à 1 m de profondeur en 2004 mais seulement jusqu'à 0,2 m de profondeur en 2006. Ceci est surtout la conséquence d'une colonisation plus superficielle du profil par l'orge en 2006 avec une DLR de l'orge proche de 0 dès 0,6 m de profondeur.

Une densification du système racinaire de la vigne entre 2004 et 2006 est également observée sous l'inter-rang. Elle est significative en dessous de 0,8 m de profondeur. Les DLR de vigne observées dans les modalités MD et MR ne sont pas différentes sous le rang mais sont sensiblement plus faibles sous l'inter-rang dans la modalité MR. Ce phénomène est observé jusqu'à une profondeur de 0,5 m environ, profondeur la plus intensément exploitée par la culture intercalaire. Ces différences sont significatives en 2004 avec des DLR deux fois plus faibles en MR. Elles ne le sont pas toujours en 2006, malgré une diminution des DLR notable.

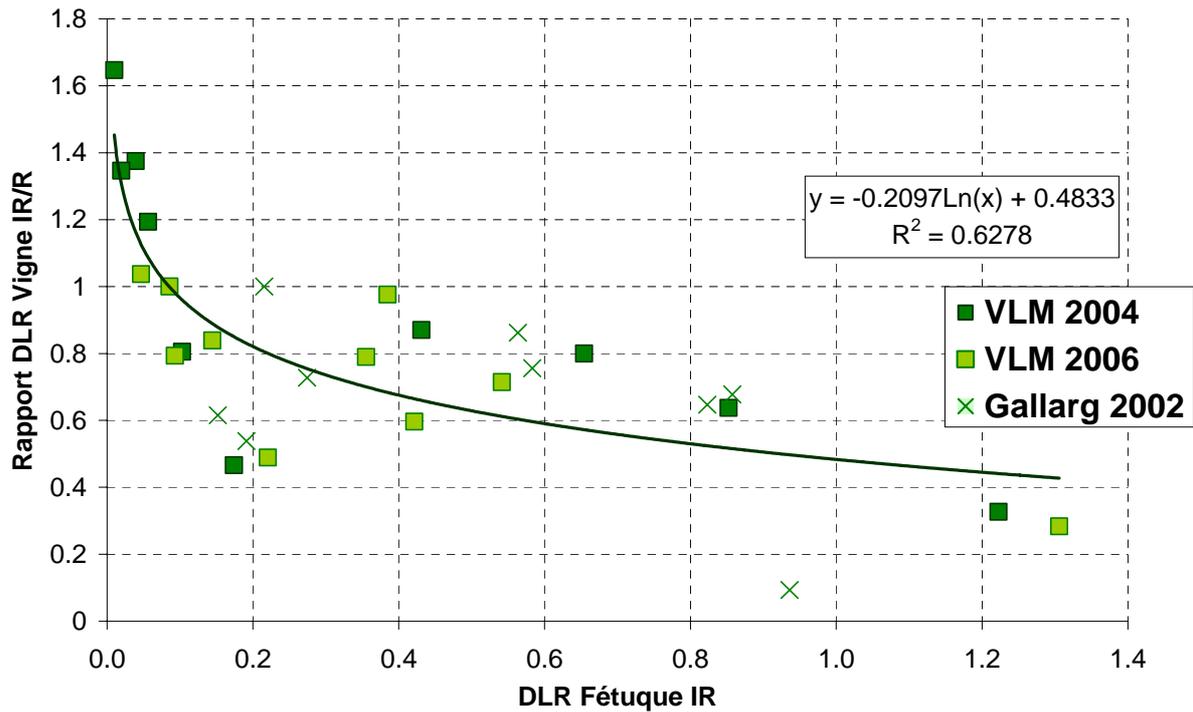


Figure 5.2 – Rapport entre les DLR de vigne sous l’inter-rang et celles sous le rang en fonction des DLR de fétuque sous l’inter-rang dans la modalité MF. Les carrés foncés (■) représentent les observations de l’année 2004 et les clairs (□) ceux de l’année 2006 sur la parcelle de Villeneuve lès Maguelone. (VLM). Les croix (×) représentent les observations réalisées sur la parcelle de Gallargues le Montueux en 2002 (Celette et al., 2005). La courbe correspond à la régression de type logarithmique pour les trois jeux de données confondus.

Si en 2006, les distributions racinaires de l'orge observées dans les deux placettes sont très comparables, des différences sont observées en 2004 (*données non présentées*). Ainsi, le système racinaire de l'orge est moins profond en MR1 mais présent à la fois sous le rang et l'inter-rang alors qu'il descend au moins jusqu'à 1 m de profondeur en MR2 mais n'est présent que sous l'inter-rang.

Sous enherbement permanent (MF)

Les DLR de fétuque dénombrées sous l'inter-rang sont très supérieures à celles sous le rang, les différences étant significatives pour toute la profondeur observée. L'essentiel des racines de fétuque (entre 85 et 100% des racines dénombrées dans le premier mètre de sol) est compris dans les premiers 50cm de profondeur, aussi bien sous le rang que sous l'inter-rang (*Figure 5.1*). Sous le rang, un nombre de racines de fétuque significatif (significativement différent de 0) n'a été observé que jusqu'à 0,5 m en 2004 et 0,6 m en 2006. Le système racinaire de la fétuque est plus dense que celui de la vigne jusqu'à 0,6 m en 2004 et jusqu'à 0,9 m en 2006. Ces différences entre les deux années s'expliquent autant par une diminution des DLR de vigne, particulièrement sensibles dans les 40 premiers cm de profondeur, que par une augmentation des DLR de la fétuque surtout en dessous de cette même profondeur de 0,4 m. Il apparaît donc que le système racinaire de la fétuque améliore sa colonisation du profil de sol sous l'inter-rang entre les deux années, au détriment de celui de la vigne. Les DLR de fétuque varient peu sous le rang d'une année sur l'autre et sont assez peu différentes de celles de la vigne.

En comparant les DLR de vigne observées dans les modalités MF et MD, on observe en 2004 (1) des DLR sensiblement supérieures sous le rang jusqu'à 0,5 m de profondeur (différences faiblement significatives – $p < 0,1$) et sous l'inter-rang en dessous de cette profondeur et (2) des DLR significativement plus faibles sous l'inter-rang jusqu'à une profondeur de 0,4 m. La situation est légèrement différente en 2006 avec des DLR de vigne plus faibles en MF qu'en MD sur une profondeur de 0,5 m, à la fois sous le rang et sous l'inter-rang (*Figure 5.1*).

Des différences de profondeur du front racinaire de l'enherbement permanent apparaissent entre les deux placettes mais ces différences sont variables d'une année sur l'autre (*données non présentées*). Cette observation semble donc plus montrer une hétérogénéité dans la colonisation racinaire de la fétuque au sein de la parcelle qu'un effet bloc.

4.2.2. Présence de l'enherbement et redistribution du système racinaire de la vigne

La présence de l'enherbement permanent sur l'inter-rang a un impact significatif sur la distribution du système racinaire de la vigne (*Figure 5.2*). Ainsi, plus la DLR de fétuque est grande sous l'inter-rang plus le rapport entre les DLR de vigne sous l'inter-rang et sous le rang diminue. Ceci tend à montrer qu'à partir d'une certaine DLR de fétuque sous l'inter-rang (seuil d'environ $0,1 \text{ cm.cm}^{-3}$), la vigne concentre plus de racines sous le rang et moins sous l'inter-rang. La relation de type logarithmique établie sur le jeu de données prélevé sur la parcelle de Villeneuve lès Maguelone est également valable dans une autre situation enherbée à Gallargues-le-Montueux en 2002 ($R^2=0,63^{***}$). Cette parcelle comprenait un traitement avec un enherbement permanent similaire à celui de Villeneuve-lès-Maguelone (Celette et al. 2005). Aucun phénomène de ce genre n'est en revanche mis en évidence dans la modalité MR. Il semble donc que c'est la présence permanente du couvert herbacé et de son système racinaire qui entraîne une modification de la distribution du système racinaire de la vigne. Les ratios supérieurs à 1 pour des DLR de fétuque sous l'inter-rang inférieures à $0,1 \text{ cm.cm}^{-3}$ sont observés en 2004 pour les horizons profonds où

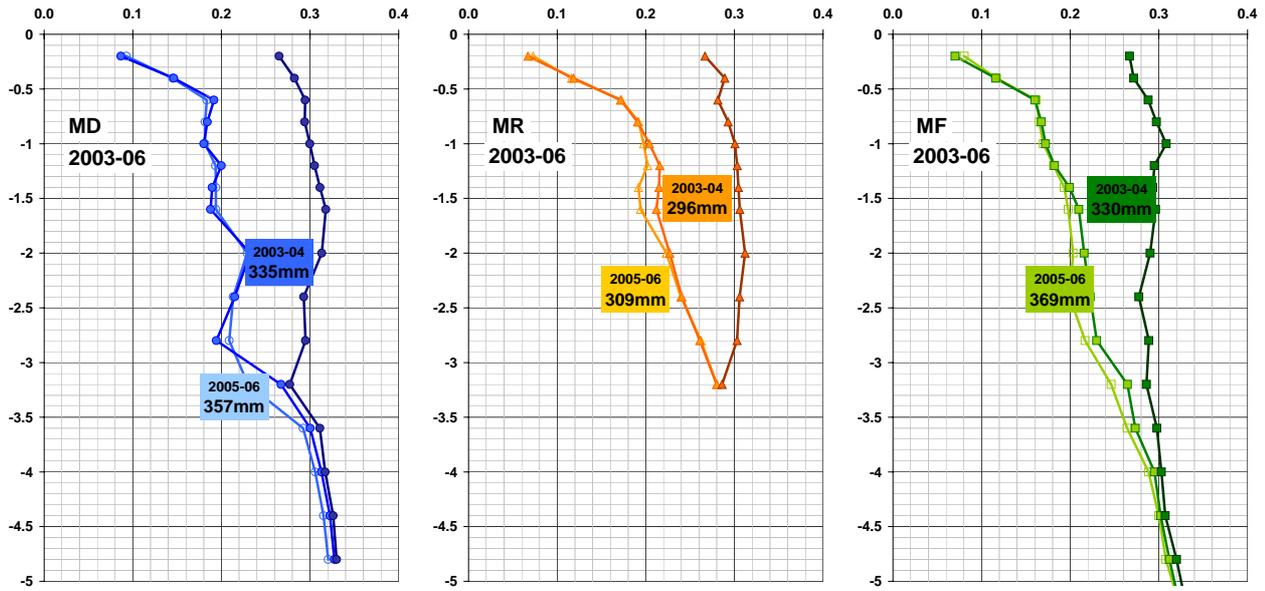


Figure 5.3 – W_{min} et W_{max} en fonction de la profondeur pour les 3 modalités étudiées : MD (○), MR (△) et MF (□). La valeur de W_{max} est l'humidité maximale mesurée au cours de la période 2003-06. Deux valeurs de W_{min} sont distinguées, une pour la période 2003-04 (plus foncée et points pleins) et une pour la période 2005-06 (plus claire et points vides).

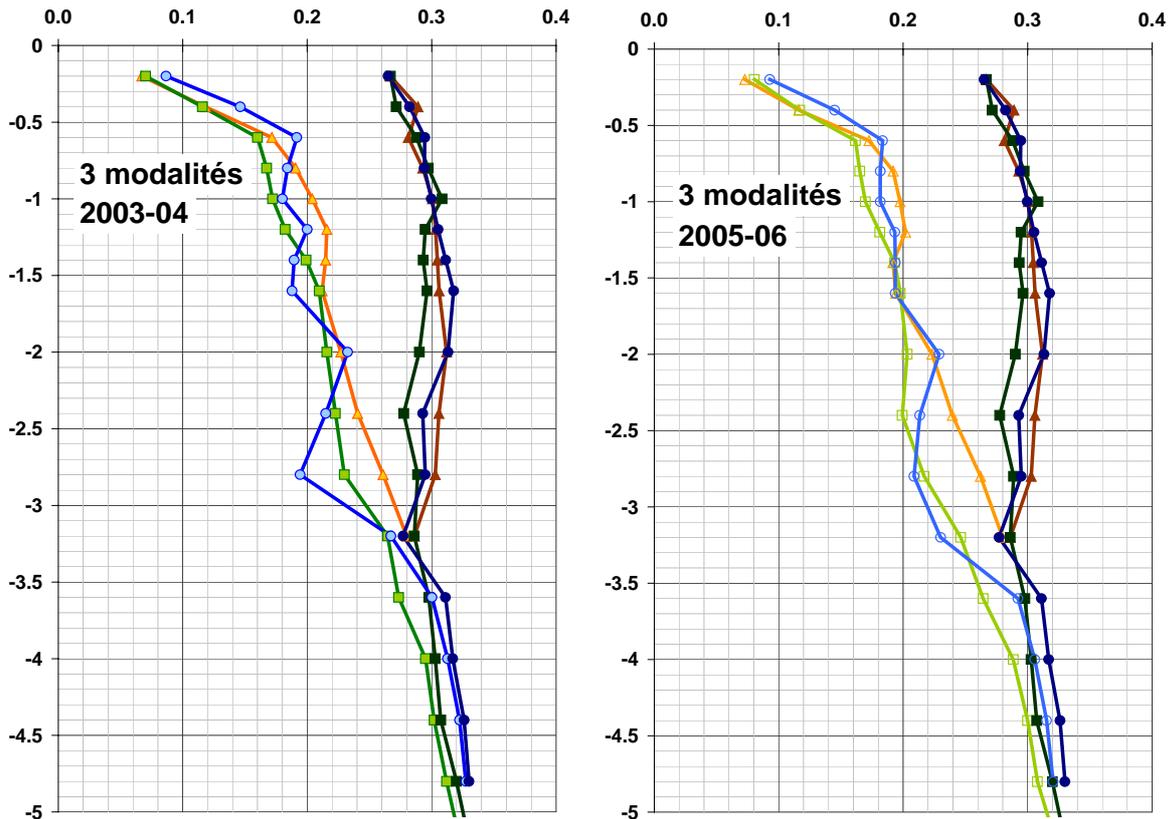


Figure 5.3b – W_{min} et W_{max} en fonction de la profondeur pour les périodes 2003-2004 et 2005-2006.

la DLR de fétuque est faible. La colonisation de ces horizons sous l'inter-rang par la vigne est alors importante. En 2006, la densification du système racinaire de la fétuque sous l'inter-rang ne permet pas d'observer de telles DLR de fétuque dans le premier mètre de sol et le ratio étudié est alors proche de 1.

4.3. Détermination des stocks d'eau disponibles pour chacun des systèmes étudiés

L'enherbement permanent composé de fétuque élevée exploite une zone de sol plus importante que ne le fait l'enherbement semi-permanent. En conséquence, l'implantation d'un enherbement permanent modifie le fonctionnement du système et oblige à une exploitation du profil hydrique plus en profondeur que dans le système dés herbé. La sécheresse connue en 2005 et 2006 a également poussé la vigne à exploiter plus intensément les horizons profonds du sol.

4.3.1. Zones d'absorption racinaire globales de chacun des systèmes

L'observation des profils d'humidité (*Annexe 3*) suivis par la méthode neutronique nous renseigne sur la zone exploitée par les systèmes racinaires des deux espèces associées. Il apparaît que la faible recharge des profils d'humidité pour les saisons 2005 et 2006 pousse la vigne et l'enherbement à consommer plus d'eau en profondeur au cours de ces années dans les modalités MD (+22 mm) et plus encore MF (+39 mm). Ceci s'accompagne d'un approfondissement des zones exploitées par le système entre la période 2003-04 et 2005-06. Cette zone passe ainsi de 3 m à 3,6 m de profondeur en MD et de 3,6 à 4 m en MF (*Figure 5.3*). Ainsi, et même si les variations d'humidité sont faibles et non significatives dans la modalité MR à partir de 2,8 m de profondeur sur toute la période expérimentale, deux zones d'exploitation racinaire et donc deux stocks totaux d'eau disponible pour la plante (TTSW) ont été définis pour chacune des modalités, pour les périodes 2003-2004 et 2005-2006 (*Figure 5.3*). Elles peuvent se justifier par la grande plasticité du système racinaire de la vigne, les racines de vigne étant très sensibles aux conditions d'humidité et de température à l'échelle annuelle (Guix 2005). D'autres études situées dans une zone climatique comparable avaient fixé une profondeur d'enracinement efficace aux environs de 2,5 m (Koundouras et al. 1999; Trambouze et Voltz 2001). Cette profondeur de 2,5 m est très comparable à celle observée en MR et en MD pour la période 2003-2004. En revanche, pour MD en 2005-2006, ainsi que pour MF pour toute la durée de l'étude, les variations d'humidité sont significatives à des profondeurs nettement supérieures. Cependant, si cette exploitation des réserves ne peut pas être négligée, notamment parce qu'elle correspond à ce que la vigne a pu exploiter pendant l'été lorsque les conditions étaient très contraignantes, les variations d'humidité en dessous de 3 m de profondeur ne représentent jamais plus de 4 à 7% des variations de stocks totales de la période.

Le W_{max} est considéré constant pour toute la période de l'étude, puisqu'il dépend essentiellement des caractéristiques physiques, notamment texturales, du sol. On note que le W_{max} observé est peu différent d'une modalité à l'autre, au moins jusqu'à 3,5 m de profondeur (*Figure 5.3b*), ce qui confirme l'homogénéité du sol dans cette parcelle. Le W_{min} , en revanche, est à la fois la résultante des propriétés du sol et du système racinaire. On peut ainsi noter que les W_{min} sont significativement inférieurs dans les modalités enherbées par rapport à la modalité dés herbée jusqu'à une profondeur de 0,6 m en MR et 1,2 m en MF. Ces différences s'expliquent vraisemblablement par les consommations des enherbements. Sur la période 2003-04, le W_{min} en MR est supérieur à celui des autres modalités dans les horizons compris entre 0,6 et 3 m de profondeur. Les W_{min} en MF et en MD sont sensiblement identiques. En dessous de 3,6 m de profondeur enfin, les

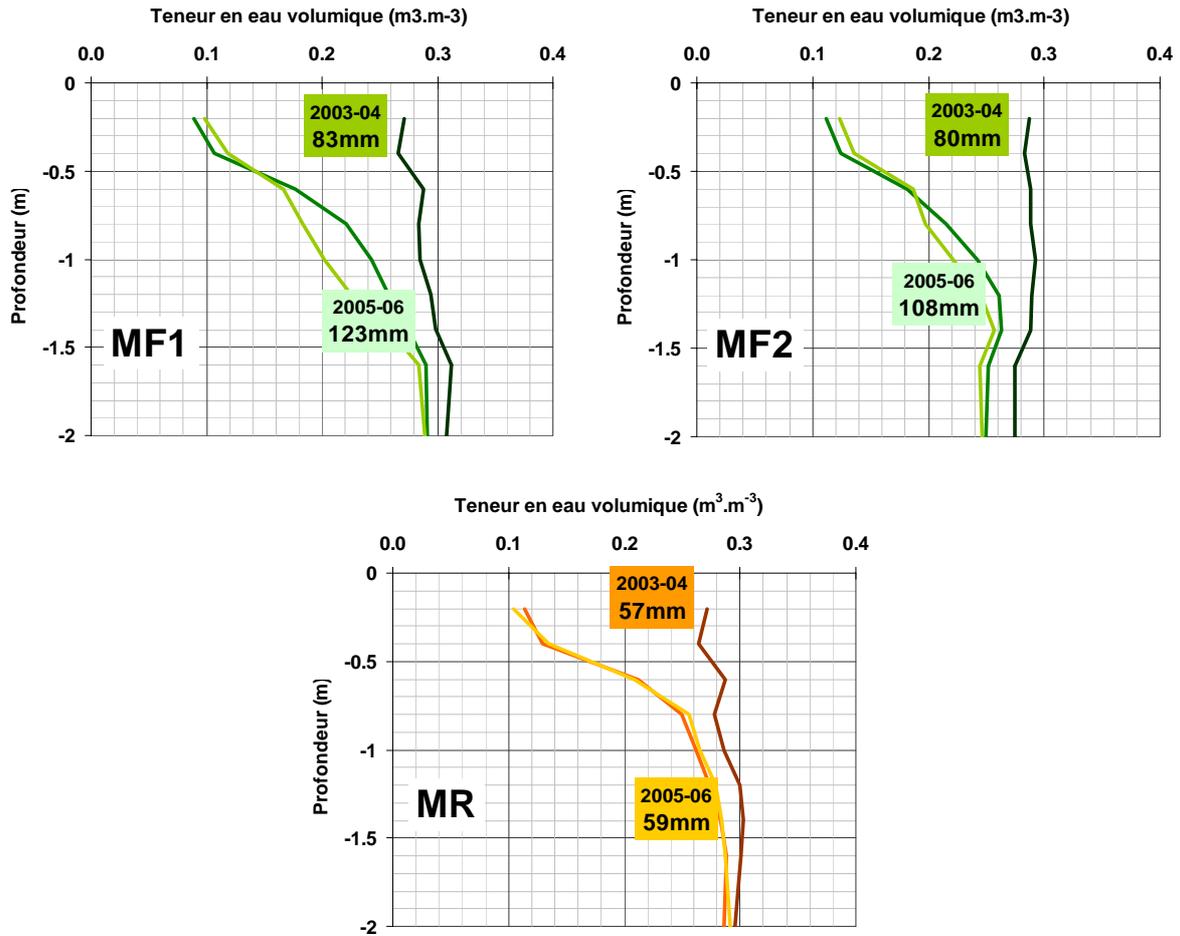


Figure 5.4 – W_{\min} et W_{\max} du compartiment sous l'inter-rang pour chacune des placettes enherbées MF1 et MF2 et pour MR. Les W_{\min} sont observés au début de la période sèche (mi-juin). La courbe la plus foncée correspond au W_{\min} pour la période 2003-04 et la plus claire à celle de la période 2005-06.

observations neutroniques montrent une variation significative des humidités en MF, qui n'existe pas en MD. Sur la période 2005-06, le W_{\min} de la modalité MF est significativement plus faible de celui des deux autres modalités entre 1,6 et 2,5 m de profondeur. Celui de MR demeure significativement supérieur jusqu'en bas du profil. Comme en 2003-04, les variations de stocks sont significatives à des profondeurs plus importantes en MF qu'en MD (*Figure 5.3b*).

La TTSW est sensiblement plus faible en MR, elle évolue d'ailleurs très peu entre les deux périodes (296 puis 309 mm). L'essentiel des différences est observé entre 1 et 2 m de profondeur, horizons mieux exploités par l'association vigne-orge sur la période 2005-06 que sur la période 2003-04 (*Figure 5.3*). La TTSW du système vigne-fétuque est sensiblement la même que celle de la vigne désherbée sur la période 2003-04 (330 puis 335 mm). En revanche, si les deux TTSW augmentent entre 2003-04 et 2005-06, elles deviennent plus élevées en MF (369 mm) qu'en MD (357 mm). Si le gain de stock s'est réalisé de manière assez homogène entre 1,5 et 4 m de profondeur en MF, il est surtout lié à une meilleure exploitation du stock d'eau entre 3 et 3,5 m de profondeur en MD (*Figure 5.3*).

Ces diminutions de W_{\min} entre les deux périodes à des horizons déjà exploités auparavant peuvent s'expliquer par une densification du système racinaire de la vigne à ces profondeurs, plausible du fait de la grande plasticité du système racinaire, mais aussi à des remontées capillaires plus importantes vers les racines des horizons supérieurs. Quelle que soit la raison, elle se justifie par la moins bonne recharge des profils hydriques au début des années 2005-06.

4.3.2. TTSW de chacun des enherbements

Des variations de teneurs en eau significatives apparaissent jusqu'à une profondeur d'environ 1,5 m pour la modalité MF et 1,2 m pour la modalité MR. On considérera donc ces deux valeurs comme étant la profondeur maximale d'exploitation efficace du stock d'eau du sol par les systèmes racinaires de chacun des deux couverts intercalaires.

Comme pour la TTSW générale, la sécheresse connue par la parcelle expérimentale au cours des années 2005-06 a provoqué une augmentation de la TTSW de chacun des enherbements (*Figure 5.4*) du fait d'une meilleure exploitation de certains horizons, entraînant une diminution du W_{\min} . Cependant, il apparaît que l'évolution du W_{\min} et, par conséquent, de la TTSW pour l'orge est très limitée. Le fait que ce couvert soit détruit et semé chaque année induit que le profil de sol doit être colonisé à nouveau. Ceci explique probablement la faible capacité de ce couvert à mieux exploiter le profil plus en profondeur. La TTSW de l'orge reste ainsi faible et stable pour les deux périodes (57 puis 59 mm) et est très comparable entre les deux placettes de la modalité.

Si pour la période 2003-04, les TTSW sont comparables également entre les deux placettes de la modalité MF (80 et 83 mm), elles deviennent très différentes pour la période 2005-06 (108 puis 123 mm) (*Figure 5.4*). C'est pourquoi nous les distinguerons par la suite. Pour autant, dans les deux placettes, l'augmentation de la TTSW exploitée par l'enherbement entre les deux périodes définies est significative. Cette augmentation correspond essentiellement à une exploitation plus intensive du stock d'eau des horizons compris entre 0,6 et 1,5 m (*Figure 5.4*). Elle s'explique par une densification du système racinaire de fétuque dans ces horizons déjà mise en évidence précédemment dans le premier mètre de sol (*Figure 5.1*).

4.4. Modalité d'entretien du sol et consommation de l'eau

L'observation des systèmes racinaires, et des zones exploitées par chacun d'eux, conduisent à une compartimentation du profil de sol pour observer les dynamiques de

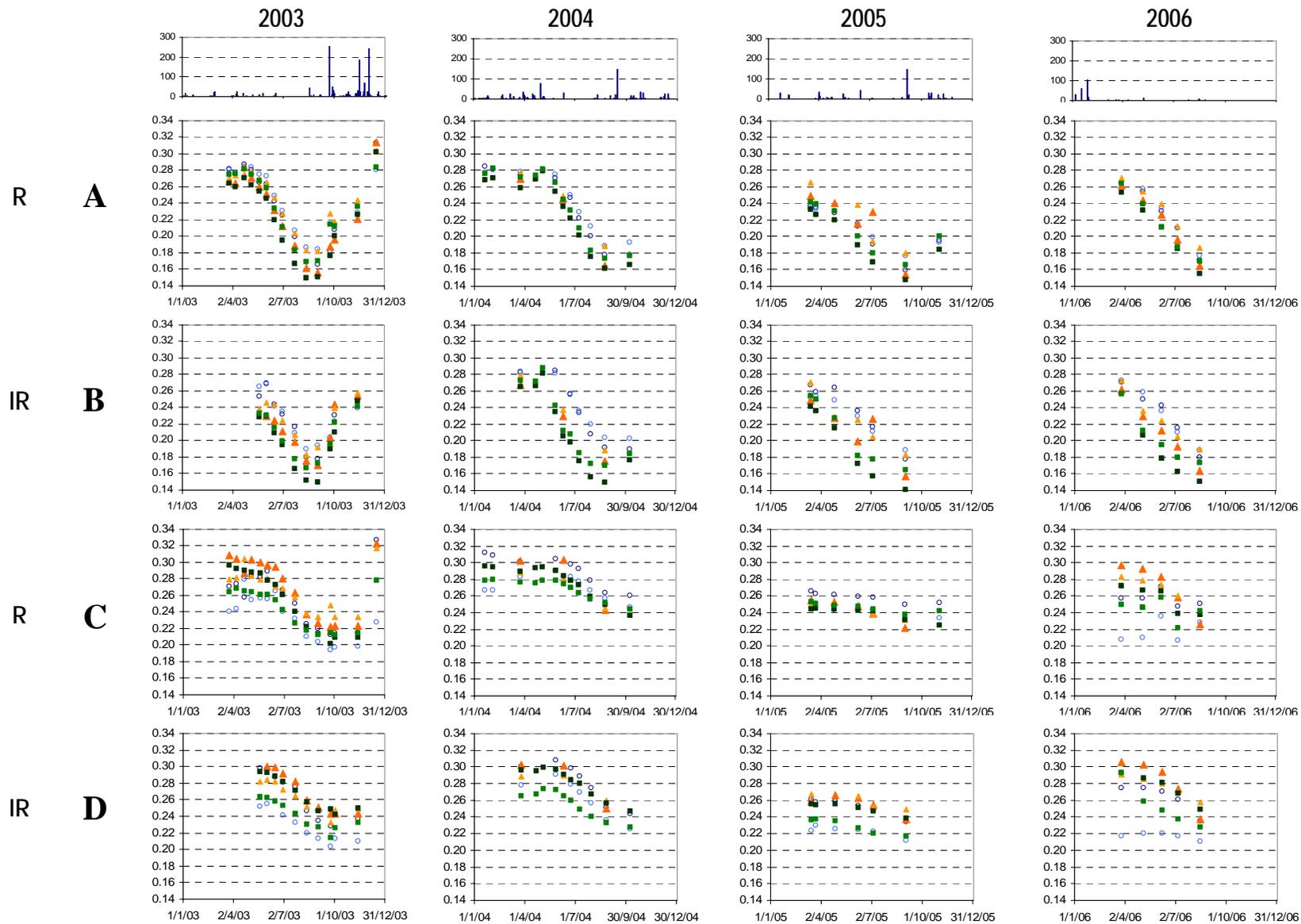


Figure 5.5 – Evolution des teneurs en eau volumiques moyennes ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) pour les compartiments de sol définis dans le modèle conceptuel de fonctionnement hydrique (*Figure 4.3*). Les évolutions sont représentées pour chacune des 6 placettes étudiées : MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲), MR2 (▲), MD1 (○) et MD2 (○). Les panneaux du haut (histogrammes) représentent les précipitations journalières (mm).

partage de la ressource hydrique. La transpiration des enherbements, particulièrement dans la modalité MF, assèche intensément le compartiment superficiel sous l'inter-rang. En conséquence, ce compartiment est significativement plus sec dans les modalités enherbées que dans la modalité dés herbée, malgré une meilleure recharge hivernale en présence de l'enherbement permanent. En conséquence, la vigne exploite plus fortement les compartiments sous le rang que dans une vigne dés herbée. Elle consomme également de l'eau plus en profondeur lorsqu'une mauvaise recharge hivernale l'y oblige.

Une compartimentation pour mieux décrire la dynamique hydrique des systèmes

Le profil de sol a été découpé en quatre compartiments pour distinguer ceux sous le rang (compartiments A et C) de ceux sous l'inter-rang (B et D) et ceux superficiels (A et B) de ceux plus profonds (C et D). La délimitation entre les horizons superficiels et profonds a été fixée à 1,5 m dans toutes les modalités, afin que le compartiment B représente le compartiment exploité théoriquement par la culture intercalaire, et que les modalités puissent être comparées. Les teneurs en eau volumiques moyennes pour chacun des compartiments ainsi définis ont ensuite été calculées grâce aux mesures neutroniques (*Figure 5.5*).

La transpiration hivernale des enherbements est compensée par une meilleure recharge

En observant les variations de stock dans le compartiment B, situé sous l'inter-rang, on constate que la recharge hivernale n'est jamais significativement différente entre les traitements dans ce compartiment (*Figure 5.6*). Ainsi, on peut en déduire que les consommations, il est vrai limitées, des enherbements sont pleinement compensées au cours de cette période par une meilleure efficacité des précipitations. Celle-ci est observée notamment lors des mesures réalisées à l'automne en 2003 et au printemps 2004, aussi bien dans le compartiment B que dans le A. Les teneurs en eau mesurées dans ce compartiment B sont ainsi peu différentes entre les modalités (*Figure 5.5*). Des pluies régulières au printemps, comme en 2004, permettent également de maintenir plus longtemps les teneurs en eau de ce compartiment B équivalentes entre les modalités. Cette recharge est souvent un peu meilleure dans le bloc bas que dans le bloc haut (*Figure 5.5*), ce qui s'explique probablement par la position par rapport à la pente qui permet au bloc bas de récolter le ruissellement du bloc haut. Cette meilleure recharge dans le bloc bas induit une croissance systématiquement plus importante des enherbements dans cette zone et souvent aussi de la vigne (*Cf. Chapitre III*). Celle-ci s'accompagne d'une transpiration du système légèrement supérieure et peut expliquer que les compartiments A et B du bloc bas des modalités enherbées soient généralement plus secs en été alors qu'ils étaient souvent plus humides en hiver (*Figure 5.5*).

Un assèchement plus rapide du compartiment B (inter-rang) en présence d'un enherbement

L'observation des dynamiques d'humidité dans le compartiment B montre que celui-ci est systématiquement plus sec dans la modalité MF que dans la modalité MD (*Figure 5.5*). On note également que l'assèchement de ce compartiment intervient systématiquement plus tôt dans le cycle pour la modalité MF. On note que la diminution du stock est significativement supérieure au printemps dans la modalité MF dans le compartiment sous l'inter-rang que dans le compartiment sous le rang (*Figure 5.6*). Les variations de stock dans le compartiment A sous le rang ne montrent d'ailleurs pas de différence significative entre les modalités au cours de la période d'activité des enherbements et prouvent que ces derniers n'affectent pas directement la dynamique hydrique sous le rang. Les consommations de la vigne au début du printemps étant encore limitées, on observe donc

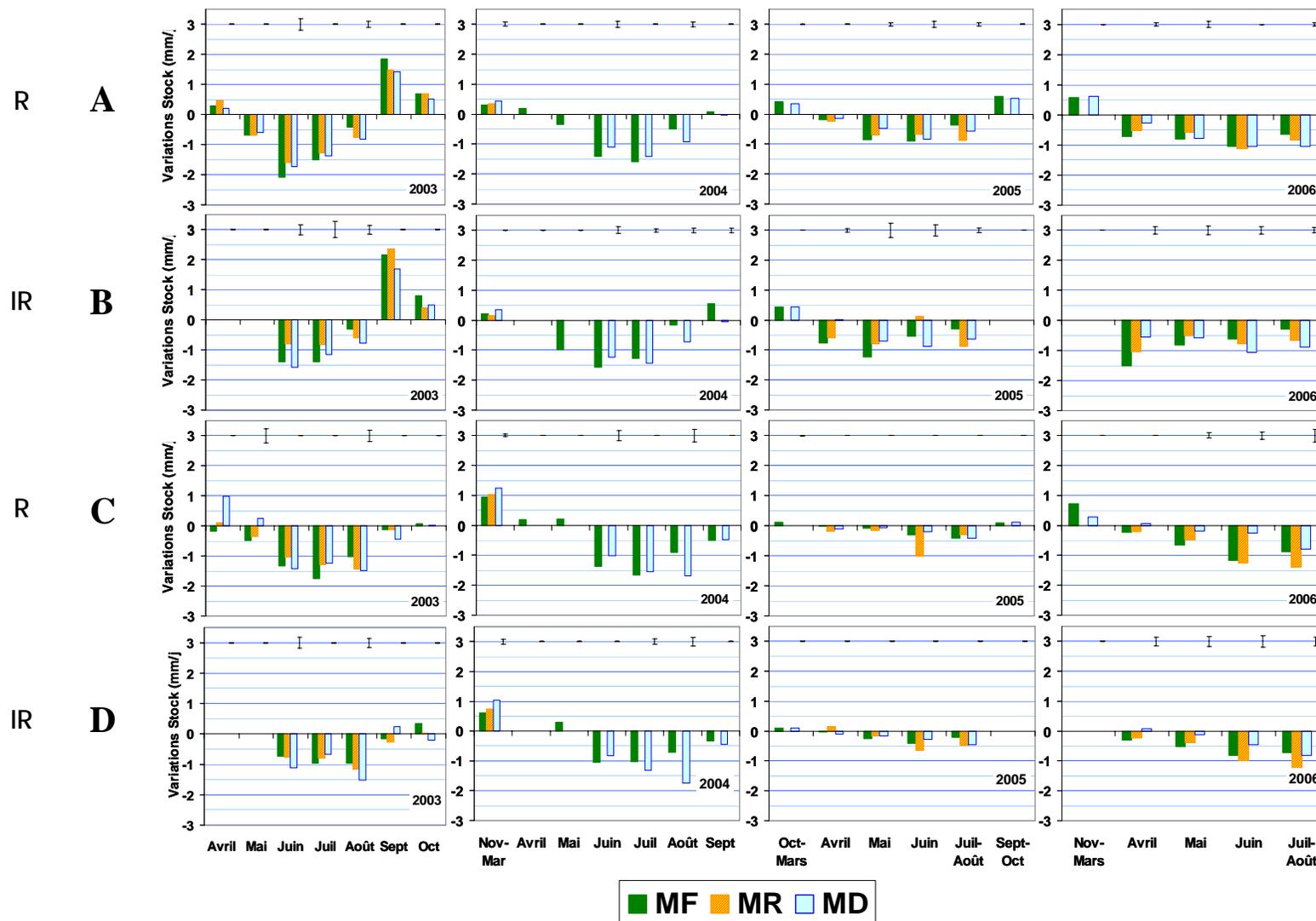


Figure 5.6 – Variations de stocks des différents compartiments définis en fonction de la modalité étudiée pour les 4 années de l'étude. Plusieurs mesures sont manquantes dans la modalité MR en 2004, ce qui explique l'absence d'historgramme en MR entre avril et septembre cette année-là. Les barres en haut de chacun des graphes représentent les p-pas entre chaque modalité, pour la période donnée, calculées grâce à un test de Newman-Keuls avec un risque α de 5%.

vraisemblablement l'impact de la transpiration de l'enherbement pérenne. Ceci témoigne de la précocité des consommations de la fêtuque qui sont donc supérieures à l'évaporation du sol nu et à la transpiration de la vigne en début de cycle dans la modalité désherbée. En conséquence, le compartiment B apparaît systématiquement plus sec en MF à partir du mois de mai et jusqu'aux premières pluies de l'automne (*Figure 5.5*). Les différences sont un peu plus précoces les années sèches comme 2006. Auparavant, les précipitations régulières du printemps permettent de recharger ce compartiment et maintiennent les trois traitements à des humidités comparables. Dans la modalité MR, seules les variations de stock observées au mois d'avril sont significativement supérieures à celles observées dans une vigne désherbée (*Figure 5.6*). Elles sont également supérieures sous l'inter-rang à celles sous le rang au cours de ce même mois et montrent que la transpiration de l'enherbement temporaire est également contenue dans ce compartiment B. Cette transpiration apparemment moins importante explique que les teneurs en eau observées dans ces modalités soient intermédiaires (*Figure 5.5*).

Une transpiration de la vigne enherbée contenue, en surface, dans le compartiment sous le rang

Les évolutions de la teneur en eau du compartiment A, situé sous le rang de vigne, sont comparables à celle du compartiment B (*Figure 5.5*). La modalité MF est généralement la plus sèche et les teneurs en eau en MR et MD sont peu différentes (*Figure 5.5*). L'écart entre la modalité MF et les deux autres modalités se creuse essentiellement au cours de l'été, ce qui suggère qu'il est la résultante de la transpiration de la vigne, les enherbements étant à cette période détruit (en MR) ou peu actif (en MF). Ceci est confirmé par le fait que l'assèchement du compartiment B devient équivalent, voire supérieur dans la modalité désherbée (MD). Cet assèchement est ainsi plus intense dans la modalité MD que dans les modalités enherbées à partir du mois d'août en 2003, juillet en 2004 et dès le mois de juin en 2005 et 2006 (*Figure 5.6*). De plus, les consommations hydriques de la vigne sont équitablement réparties entre rang et inter-rang en MD, confirmant la répartition homogène du système racinaire entre ces deux compartiments (*Figure 5.1*).

Sur cette même période, les diminutions de stock deviennent généralement significativement plus faibles sous l'inter-rang que sous le rang dans la modalité MF. Au début de la saison sèche, l'enherbement ralentit fortement sa consommation d'eau tandis que la transpiration de la vigne augmente significativement. L'assèchement du rang est systématiquement plus important sur la période mai-juin (2006 exceptée) dans cette modalité par rapport aux deux autres. Il est peu probable que ce soit la conséquence d'un transfert hydrique du rang vers l'inter-rang plus sec puisque la conductivité du sol est très faible à des teneurs en eau si basses. Ce phénomène est donc plus vraisemblablement lié aux consommations de la vigne, plus intenses sous le rang enherbé. Ces deux observations s'expliquent vraisemblablement par l'assèchement précoce du compartiment B dans la modalité MF (*Figure 5.5*). Les consommations de la vigne sont également plus intenses sous le rang, du fait d'une densité racinaire légèrement inférieure sous l'inter-rang en présence de l'enherbement (*Figure 5.2*). Au cœur de l'été, les variations de stock sont au contraire bien moins importantes sous le rang de MF, conséquence probable d'une contrainte hydrique plus importante qui induit une régulation forte de la transpiration du couvert.

La destruction de l'enherbement temporaire crée un mulch en surface

En 2003 et en 2005, la destruction de l'orge (modalité MR) a fortement diminué l'assèchement du compartiment B, alors que la teneur en eau est encore relativement élevée. Ce phénomène peut être lié à un effet mulch du couvert obtenu suite à la

destruction de l'enherbement, qui diminue les pertes en eau. On peut d'ailleurs noter que cet effet n'est pas perceptible en 2006. Or, cette année là, l'orge a bien été détruite en juin mais n'a pu être retournée, le sol étant déjà trop sec en surface.

La transpiration de la vigne est perceptible en profondeur très tôt dans le cycle et plutôt sous le rang

Une diminution de la teneur en eau est perceptible très tôt dans les compartiments plus profonds (C et D) (*Figure 5.5*). Elles sont sensiblement identiques entre rang et inter-rang, dans ces horizons (*Figure 5.5*). Entre 2003 et 2005, les variations de stock dans les compartiments profonds sont peu différentes entre les modalités mais l'assèchement est tout de même légèrement supérieur dans les modalités enherbées au cours du printemps (*Figure 5.6*). Ainsi, les teneurs en eau diminuent dès la fin du mois d'avril dans les modalités enherbées en 2006 et la fin du mois de mai dans la situation désherbée. En été, la situation est inverse avec un assèchement de ces compartiments profonds nettement plus important dans la partie désherbée qui s'explique probablement par une contrainte hydrique subie par la vigne moins forte et donc une transpiration plus importante. Les différences entre rang et inter-rang dans ces horizons profonds sont également significatives au cours de l'été, surtout dans les modalités enherbées. L'assèchement du compartiment sous le rang (C) est ainsi généralement plus rapide que celui du compartiment D. La différence est peu significative dans la modalité désherbée mais la tendance reste la même (*Figure 5.6*). La modalité MR, est en règle générale, celle dont la teneur en eau dans les compartiments inférieurs est la plus élevée. Ceci s'explique par une moindre profondeur d'enracinement efficace dans ce système, déjà observée lors de la détermination de sa TTSW (*Figure 5.3*).

Une exploitation des horizons profonds très dépendante de l'année climatique et des pluies printanières

L'assèchement des compartiments C et D au cours de l'année est significativement supérieur dans la modalité MD au cours de l'année 2003 avec une différence de teneur observée entre les teneurs maximales et minimales de $0,07 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ en moyenne, et de seulement $0,06 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ pour les deux modalités enherbées. En 2004 et 2005, cet assèchement est assez comparable entre les trois modalités avec en moyenne, environ $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ en 2004 et $0,02 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ en 2005 (*Figure 5.5*). En 2006, en revanche, l'exploitation de ces horizons profonds se révèle beaucoup plus importante dans les modalités enherbées avec une diminution moyenne des humidités d'environ $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ dans les modalités enherbées contre seulement $0,02 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ dans la modalité désherbée (*Figure 5.5*).

Les variations moindres de teneur en eau dans ces horizons en 2004 et surtout 2005 par rapport à 2003 témoignent d'une exploitation moins importante de ces compartiments par la vigne pour des raisons différentes selon l'année climatique. Ainsi, en 2004, elle est vraisemblablement liée à la bonne recharge du profil et à une pluviométrie plus importante et régulière au cours du printemps et du début de l'été. Le système a pu satisfaire une bonne part de ses besoins avec les compartiments superficiels régulièrement rechargés. A l'inverse, le profil de sol a été très mal rechargé au cours de l'hiver 2004, ce qui a induit une contrainte hydrique précoce pour chacune des espèces végétales présentes. Cette contrainte a eu pour conséquence de réduire fortement la croissance en biomasse des plantes (*Cf. Chapitre III*) et leur transpiration. Une pluviométrie régulière, bien que moins importante qu'en 2004, a rechargé les compartiments de surface qui ont pu satisfaire en grande partie les besoins réduits des plantes et de la vigne en particulier. La sécheresse précoce connue en 2006 (moins de 50 mm de pluies entre janvier et la récolte) a conduit la vigne à exploiter plus fortement les horizons profonds dans les modalités enherbées, aussi

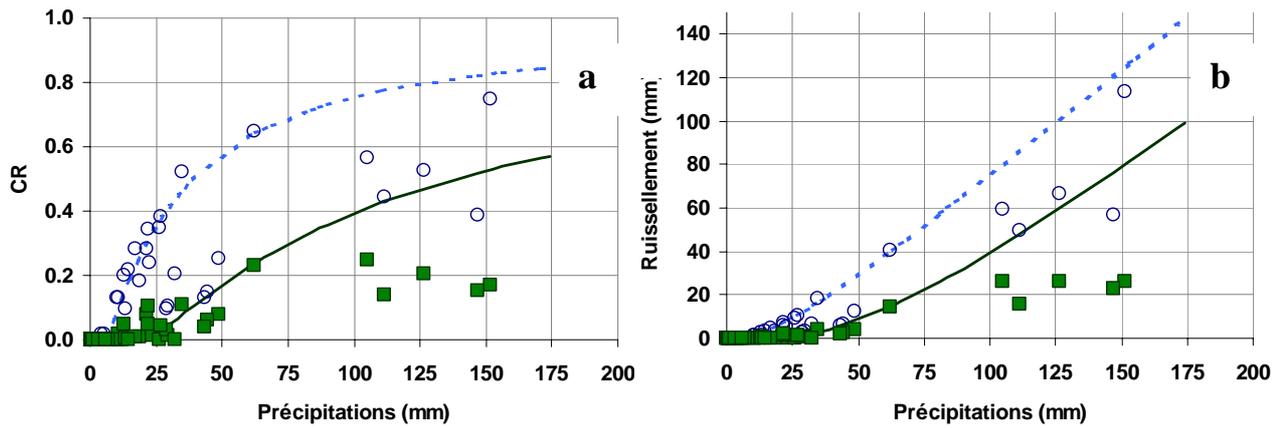


Figure 5.7 – Coefficient de ruissellement (a) et quantité d'eau ruisselée (mm) mesuré au pas de temps journalier (b) en fonction des précipitations de la journée sur la parcelle expérimentale du Larzat. Les points représentent les valeurs observées pour la modalité MD (○) et MF (■). Les relations établies entre intensité journalière des précipitations et coefficient de ruissellement pour la modalité désherbée (ligne pointillée) et la modalité enherbée (ligne continue) sont représentées également.

bien sous le rang que sous l'inter-rang. Ce phénomène est perceptible dès le mois d'avril (Figure 5.6). Cette année là, la diminution des stock dans ces horizons profonds se maintient à un niveau élevé au cours de l'été dans la modalité MR tandis que cet assèchement ralentit fortement en MF. La différence est probablement la conséquence d'une contrainte hydrique plus importante en MF et d'une surface foliaire moindre (Cf. Chapitre III).

Une recharge des horizons profonds plus efficace dans le bloc du bas

Dans ces compartiments C et D, ce sont généralement les placettes du bas de pente qui sont les mieux rechargées en début de cycle et ce, quelle que soit la modalité considérée. La différence entre blocs haut et bas est toutefois particulièrement marquée pour les modalités MD et MF. On note également que cette recharge des horizons profonds n'est perceptible que pour l'hiver 2003 et l'hiver 2005. La stabilité des teneurs en eau dans ces compartiments C et D au cours de l'hiver 2004 montre que les faibles précipitations de cette période n'ont pas pu s'infiltrer jusqu'à cette profondeur. Elles n'ont d'ailleurs pas permis de recharger complètement les horizons superficiels (compartiments A et B – Figure 5.5).

4.5. Modalités d'entretien du sol et ruissellement

Un CN différent a été obtenu pour chacune des modalités. Les coefficients de ruissellement (CR) mesurés au cours des forts orages de l'automne (supérieurs à 100 mm dans la journée) sont généralement fortement sous-estimés par rapport au CR optimisé avec cette méthode (Figure 5.7). Ceci s'explique par le fait que le dispositif de terrain avait été dimensionné pour fonctionner de manière optimale pour des épisodes pluvieux modérés. En effet, le flux de ruissellement que peut mesurer le dispositif ne doit pas dépasser 15 à 20 mm.h⁻¹ environ. Or, au cours de chacun de ces épisodes, cette intensité a été dépassée, rendant difficile l'évacuation de l'eau en aval. Ces points ont donc été exclus lors de l'optimisation du CN.

Finalement, des CN moyens de 91 et 74 ont été optimisés pour les modalités MD et MF. Ces valeurs correspondent pour MD à un sol nu dont l'infiltrabilité est médiocre et les conditions hydrologiques moyennes au moment de l'événement pluvieux médiocres à correctes. Dans la modalité MF en revanche, le CN optimisé est légèrement supérieur à celui d'une prairie avec un taux de couverture correct (>50%) pour un sol dont l'infiltrabilité est médiocre (USDA 2004a). Une relation entre intensité journalière de pluie et coefficient de ruissellement a déjà été établie dans la région sur une parcelle avec une pente comparable et en situation désherbée (Pellegrino 2003). Le coefficient de ruissellement ainsi calculé est très proche de celui obtenu avec un CN de 91. Au final, on observe que le seuil de déclenchement du ruissellement est obtenu pour une précipitation journalière supérieure à 6 mm dans la modalité désherbée et seulement à 25 mm dans la modalité MF. Ceci va dans le même sens que ce qui a déjà été observé par Wassenaar et al. (2005) avec un seuil de déclenchement du ruissellement pour une intensité de pluie de 9 mm.h⁻¹ dans des conditions désherbées contre 20 mm.h⁻¹ en situation enherbée. La corrélation obtenue entre les données observées et simulées est bonne dans chacune des modalités (MD : R²=0,98*** ; MF : R²=0,96***). Finalement, l'erreur relative moyenne calculée par rapport aux quantités ruisselées les jours où le ruissellement n'est pas nul (Figure 5.7b) est limitée (MD : RRMSE=0,15 ; MF : RRMSE=0,16).

Aucune mesure du ruissellement n'ayant été réalisée dans la modalité MR, il a finalement été décidé d'optimiser un CN par rapport aux ASW observées dans cette modalité. Pour cela, un modèle de bilan hydrique simple (Cf. Chapitre VI) (Lebon et al. 2003) a été utilisé sur la période sur laquelle a déjà été optimisée le CN dans les deux

autres modalités (du printemps 2005 à la fin de l'été 2006). Le CN calculé est de 90, soit une valeur très proche de celle obtenue en MD. Si au premier abord, il paraît étonnant que le ruissellement soit à peu près aussi important que dans la modalité désherbée sans travail du sol, certaines explications peuvent être avancées. Ainsi, Leonard et Andrieux (1998) observent que le flux de ruissellement est sensiblement diminué pour un taux de couverture de l'enherbement d'environ 50%. Or ce taux n'est jamais atteint par le couvert d'orge et n'est généralement pas approché avant le mois de mai (*Figure 3.1*). Il semble donc que le couvert intercalaire ne protège le sol du ruissellement de manière significative que très tard dans l'année. Leonard et Andrieux (1998) observent également qu'un travail du sol diminue très significativement le ruissellement (effet équivalent à supérieur à un enherbement couvrant) le temps qu'une croûte se forme et que l'état de surface redevienne moins favorable. Or, le travail du sol réalisé dans cette modalité MR est effectué à une période où les précipitations, et par conséquent le ruissellement, sont faibles. Les premiers épisodes provoquant un ruissellement significatif n'apparaissent qu'à l'automne et sont généralement de type orageux. L'état de surface est ainsi très vite dégradé et redevient comparable à celui de la modalité désherbée. En conclusion, les états de surface de la modalité MR sont finalement peu différents de ceux de MD au cours de l'année.

4.6. Evaluation du drainage et des remontées capillaires au cours de l'année

Dans le système étudié, il est difficile d'évaluer les flux d'eau en fond de profil. Le principal problème réside dans la profondeur exploitée par le système étudié (jusqu'à 4 m de profondeur). Pour autant, le drainage profond peut représenter une perte d'eau importante et surtout être à l'origine de la lixiviation de l'azote sous forme de nitrate. A l'opposé, les remontées capillaires peuvent jouer un rôle important dans l'alimentation de la vigne au cours de l'été notamment lorsque le profil de sol en surface est sec. D'après les estimations réalisées à partir de mesures tensiométriques et de la caractérisation des propriétés hydrodynamiques du sol à cette profondeur de 4 m, le drainage comme les remontées capillaires, sont faibles à nuls tout au long du cycle de la vigne. Ceci est lié à une conductivité hydraulique du sol très faible à cette période. Au cours de l'hiver, le drainage semble également très faible dans la modalité enherbée et modéré dans une situation désherbée.

Des pertes d'eau par drainage limitées en hiver

Au cours de la période comprise entre le début de l'automne (octobre) et le débourrement de l'année suivante, les fortes précipitations créent un bilan hydrique très positif du système. Ces conditions sont donc favorables à un éventuel drainage profond. Les relations établies précédemment permettent d'estimer le ruissellement dans chacune des modalités (*Figure 5.7*). Ainsi, un bilan hydrique très simplifié (Pluies-ETP-ruissellement) de la période allant d'octobre 2003 à mars 2004 présente un bilan largement positif avec un excédent de précipitations supérieur à 400 mm en MF et un peu plus équilibré en MD (200 mm). Ces conditions sont donc très favorables à un drainage profond. L'observation de la dynamique des profils de teneurs en eau mesurés par la méthode neutronique (*Annexe 3*) suggère également un drainage profond dans les modalités enherbées (MR et MF) au cours de l'hiver, mais pas dans MD. En effet, le profil établi notamment en décembre 2003 montre, dans les modalités enherbées, des teneurs en eau très supérieures à celles du début du cycle de vigne suivant, même à des profondeurs importantes. Or, si l'on considère que la transpiration de l'enherbement et l'évaporation du sol nu sont les seuls flux d'eau ascendants au cours de cette période, ceux-ci n'affectent pas les horizons profonds. La teneur en eau observée au mois de mars peut être considérée

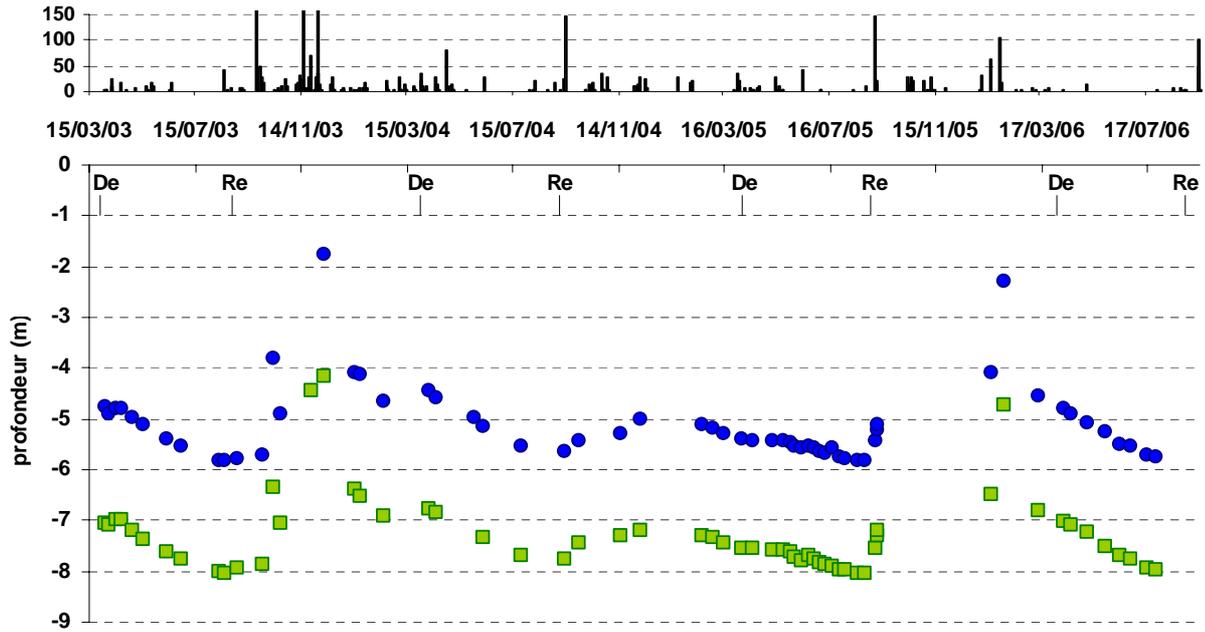


Figure 5.8 – Evolution de la profondeur de la nappe en bas (●) et haut (■) de la pente de la parcelle au cours de la période d'étude. Le panneau du haut représente les précipitations journalières sur cette période. Les dates de débourrement de la vigne (De) et de récolte (Re) sont repérées pour chacune des 4 années.

comme très proche de celle à la capacité au champ. On peut donc penser que la différence entre les deux profils (près de 100 mm d'eau) s'explique, au moins en partie, par du drainage profond. Dans la modalité désherbée en revanche, le profil de teneurs en eau établi à cette même date montre une humidité très supérieure à celle du début de saison, jusqu'à une profondeur de 1,5 m. Elle est en revanche clairement inférieure à l'humidité à la capacité au champ en dessous. On peut donc penser qu'il y a eu drainage des horizons compris entre 0 et 1,5 m de profondeur après cette date mais ce drainage a simplement rempli des horizons inférieurs encore secs et cette eau est donc toujours accessible pour la vigne. Le drainage profond peut donc être considéré comme faible, voire nul dans cette situation.

Au cours des hivers 2004-05 et 2005-06, le bilan (Pluies-Ruissellement-ETP) est négatif dans la modalité désherbée et très légèrement positif en MF. De plus, les profils d'humidité montrent clairement que le profil de sol n'est jamais rechargé jusqu'en profondeur dans aucune des modalités (*Annexe 3*). On peut donc penser que le drainage profond est négligeable dans toutes les modalités au cours de ces deux périodes.

Une conductivité hydraulique très faible en été qui empêche l'apparition de remontées capillaires

Globalement, le climat méditerranéen présente des précipitations modérées au cours du printemps et un été très sec. Ces conditions sont donc plus favorables à des remontées capillaires au cours de l'été qu'à un drainage profond. Le gradient de potentiels hydriques matriciels du sol a été mesuré entre 2,5 et 2,8 m de profondeur environ, pendant le cycle de la vigne. Il est généralement faiblement négatif en début de cycle, laissant augurer un flux d'eau descendant (drainage profond). En revanche, il devient positif au cours de l'été dans les deux placettes de la modalité enherbée (MF) et l'est toute l'année en MD2. Ceci suggère un passage d'un flux vertical descendant à un flux ascendant (remontées capillaires). Ce phénomène a déjà été observé dans un vignoble méditerranéen (Trambouze et al. 1998). Cependant, l'importance de ce flux dépend fortement de la conductivité hydraulique à cette profondeur.

Les conductivités hydrauliques ont été calculées grâce à la formulation de Van Genuchten (1980). La Loi de Darcy généralisée peut ainsi être appliquée et les flux d'eau à cette profondeur évalués. Il ressort que, en été au moins, la conductivité hydraulique à cette profondeur est extrêmement faible (de l'ordre de 10^{-11} à 10^{-12} mm.j⁻¹) quelle que soit la modalité considérée. Les gradients de potentiels matriciels étant limités, les flux d'eau estimés le sont également ($<10^{-8}$ mm.j⁻¹). Au cours de cette période, les humidités mesurées à 4 m sont sensiblement supérieures. La conductivité hydraulique peut ainsi être estimée à une valeur de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-8} mm.j⁻¹. Ces valeurs sont plus proches de la conductivité hydraulique à saturation (K_s), estimée à 3.10^{-5} mm.j⁻¹. Cependant, les flux ainsi estimés restent inférieurs à 10^{-4} mm.j⁻¹, soit bien moins que ce qui a déjà été mesuré dans un sol sableux en conditions méditerranéennes (Trambouze et al. 1998), et peuvent donc être négligés.

4.7. Suivi de la profondeur de la nappe phréatique

L'observation de la profondeur de la nappe phréatique par mesure piézométrique (*Figure 5.8*) montre que, la plupart du temps, celle-ci se situe à une profondeur peu susceptible d'affecter fortement l'alimentation hydrique du système. Celle-ci est en effet généralement située à plus de 5 m de profondeur en bas de la pente (côté MD1) et plus de 7 m en haut (côté MF2). La différence entre les deux profondeurs s'expliquent par la différence d'altitude des deux positions dans la parcelle.

Pour autant, les fortes inondations du mois de décembre 2003 ont induit une remontée importante de la nappe (*Figure 5.8*). Si celle-ci n'a jamais affleurée, elle est venue très proche de la surface dans le bloc bas (*Figure 5.8*) tandis qu'elle restait à plus de 2 ou 3 m dans le bloc haut. Un phénomène un peu similaire a été observé au cours des précipitations importantes de la fin 2005.

5. Discussion

5.1. L'enherbement de l'inter-rang permet une meilleure recharge hivernale du profil

L'implantation d'un enherbement au sein du vignoble est généralement source d'une meilleure recharge du profil de sol (Klik et al. 1998; Battany et Grismer 2000; Celette et al. 2005). Ainsi, l'enherbement présente des caractéristiques comparables à ce qui a pu être observé au sein d'une jachère (Moret et al. 2006). Cette meilleure recharge s'explique naturellement par une diminution du ruissellement en présence du couvert intercalaire et une meilleure infiltration des eaux de pluie. Cette diminution du ruissellement est directement liée à la surface couverte par l'enherbement (Battany et Grismer 2000). Ce phénomène a déjà pu être observé dans d'autres situations et joue un rôle important dans la zone de production méditerranéenne où les orages sont souvent violents (Leonard et Andrieux 1998; Wassenaar et al. 2005). Si l'impact de la couverture de sol sur le ruissellement est le plus important (Battany et Grismer 2000), la pente presque nulle en bas de pente peut avoir permis au bloc bas de récupérer ces eaux de ruissellement et ainsi creuser des différences entre les deux blocs. Ce phénomène est particulièrement visible les années où l'hiver précédent est peu arrosé (2003, 2005 et surtout 2006). Ces années-là, le profil de sol n'est pas totalement rechargé à la sortie de l'hiver, contrairement à ce qui est souvent considéré, notamment dans les travaux de modélisation du bilan hydrique de ce genre de système. De plus, les horizons profonds apparaissent nettement plus secs dans le bloc haut, où la pente est supérieure.

La faible recharge obtenue en 2005 met en évidence l'infiltrabilité limitée du sol de la parcelle étudiée au cours des orages de l'automne. Si cette capacité d'infiltration est liée à des caractéristiques hydrodynamiques propres à ce sol, elle est aussi liée à la dynamique des pluies au cours de l'année. Ainsi, après une période estivale particulièrement aride, les premiers orages souvent très violents arrivent sur un sol très sec. Le rapport infiltration/ruissellement est alors très défavorable quelle que soit la modalité (Mapfumo et al. 2004; Jayakrishnan et al. 2005). L'enherbement de l'inter-rang limite cependant ces pertes.

Cette faible infiltrabilité du sol n'empêche pas le sol de se recharger très rapidement à la fin de l'année 2003. En profondeur notamment, les humidités mesurées augmentent subitement, particulièrement dans le bloc bas. L'accumulation des pluies ruisselées ne peut expliquer à elle seule, une telle augmentation de la quantité d'eau contenue dans cette zone. La remontée importante de la nappe, du fait des inondations connues par la région, a en revanche rechargé le profil par le bas. Un tel phénomène a également pu intervenir à la fin de l'année 2005. Une remontée de la nappe, comme celle observée, crée une zone d'anoxie et une asphyxie du système racinaire peut être redoutée. Pour autant, cette anoxie doit se maintenir quelques mois pour entraîner une mortalité racinaire significative (Guix 2005) et ce n'est pas le cas ici.

La meilleure recharge observée dans la modalité avec un enherbement permanent compense le plus souvent le dessèchement plus important du profil de sol de cette modalité par rapport à une situation désherbée. Cette meilleure recharge atténuée, au moins au début du cycle, la compétition pour la ressource entre la vigne et l'enherbement qui s'établit plus

tard dans le cycle (Celette et al. 2005). Cependant, cette eau supplémentaire obtenue par le système au début du cycle profite essentiellement à la fétuque du fait du décalage qui existe entre les cycles végétatifs des deux espèces (Willey 1990; Celette et al. 2005).

5.2. Plasticité racinaire de la vigne et évitement d'une concurrence frontale avec l'enherbement

L'observation des systèmes racinaires et des profils exploités met en évidence une adaptation de la vigne à la présence de l'enherbement. Le décalage existant dans le fonctionnement des deux espèces étant en faveur de la fétuque, la vigne délaisse le compartiment exploité intensément par l'enherbement pour en explorer d'autres. Ce phénomène est sensible lorsque la densité racinaire de fétuque est élevée sous l'inter-rang. La vigne délaisse alors en partie ce compartiment et concentre son système racinaire sous le rang, où la densité racinaire de fétuque est très inférieure à celle sous l'inter-rang. Ce phénomène a déjà pu être observé dans d'autres vignobles enherbés (Morlat et Jacquet 2003; Celette et al. 2005) mais aussi dans d'autres associations, notamment agroforestières (Lehmann et al. 1998; Smith et al. 1999; Fetene 2003). Cette redistribution racinaire de l'espèce la plus soumise à la concurrence est qualifiée de « croissance compensatoire » (Miller 1986). Elle n'est pas seulement horizontale puisque les observations réalisées ici montrent que la vigne enherbée exploite également des horizons plus profonds que ne le fait la vigne seule. D'ailleurs, cet approfondissement de la zone exploitée par la vigne est observé dans le cadre de la modalité enherbée mais aussi lors des années sèches, où la recharge des horizons superficiels est insuffisante. Ceci montre que c'est la faible quantité d'eau contenue dans les horizons de surface du fait de la transpiration de l'enherbement qui pousse la vigne à exploiter les horizons inférieurs plus humides (Mulia et Dupraz 2006). La grande plasticité racinaire de la vigne lui permet ainsi d'éviter en partie la concurrence pour l'eau que lui impose l'enherbement. Ce fonctionnement n'est cependant possible que dans le cadre d'un sol profond. En cas de sol superficiel, le dessèchement prématuré de l'inter-rang peut être à l'origine d'une forte inhibition de la croissance racinaire de la vigne, comme cela a pu être déjà observé sur un système agroforestier (Odhiambo et al. 2001). La densité de plantation ici assez élevée a également provoqué une diminution de la densité racinaire de vigne (20 à 30% de racines en moins dans les modalités enherbées par rapport à la modalité MD en 2006) dans les horizons où le système racinaire de la vigne est en concurrence forte avec celui de l'enherbement permanent. Ce phénomène a déjà été observé dans une situation proche (Celette et al. 2005) et particulièrement sensible dans les 0,5 m de surface où la densité racinaire de la fétuque élevée est très importante.

5.3. Dynamique de partage des ressources au sein du système associé

Un partage des ressources hydriques déterminé par le décalage temporel entre les cycles des deux espèces associées

La vigne désherbée exploite le stock hydrique autant sous le rang que sous l'inter-rang comme cela a déjà été observé (Trambouze et al. 1994; Pellegrino et al. 2004; Celette et al. 2005). Dans le système associé en revanche, la dynamique de partage des ressources entre les deux espèces est déterminée par le décalage entre les cycles des deux espèces (Willey 1990; Celette et al. 2005). Ainsi, la croissance plus précoce des enherbements leur permet de consommer l'eau présente dans les premiers horizons de surface sous l'inter-rang enherbé bien avant que la vigne ne débouffe. C'est en effet dans cette zone que l'enherbement concentre l'essentiel de son système racinaire (80 à 90% de la DLR). Ceci explique que dans les modalités enherbées, le dessèchement de l'inter-rang est beaucoup

plus rapide en début de cycle. Cette différence entre les traitements est sensible jusqu'au mois de juin, qui marque le début de la saison sèche et donc le dessèchement de l'enherbement permanent et la destruction de l'enherbement semi-permanent. A cette même période, la transpiration de la vigne est nettement supérieure au début de cycle et ces prélèvements se font essentiellement sous le rang.

Un enherbement permanent qui exploite des horizons plus profonds que l'enherbement temporaire

L'exploration du profil de sol est nettement supérieure pour un enherbement permanent composé de fétuque élevée que pour l'enherbement semi-permanent. Ainsi, la profondeur exploitée est supérieure (1,5 m en MF pour 1,2 m en MR) et l'intensité de cette exploitation est très supérieure. Ceci peut s'expliquer par les caractéristiques des espèces utilisées, la fétuque élevée ayant la capacité d'explorer rapidement des horizons relativement profonds. C'est aussi la conséquence de la conduite de ce couvert intercalaire. Ainsi, l'enherbement semi-permanent étant semé à nouveau chaque année, il doit reconstituer l'ensemble de son système racinaire. A l'inverse, l'enherbement permanent peut s'appuyer sur les horizons déjà exploités auparavant pour en coloniser de nouveaux par l'intermédiaire d'un turn-over racinaire important. Si la profondeur exploitée est donc supérieure à 1 m pour les deux enherbements, ceci ne signifie pas nécessairement que l'enracinement de ces deux espèces est aussi profond, dans cette étude. En effet, l'assèchement d'horizons superficiels par la transpiration des enherbements peut être à l'origine de remontées capillaires des horizons inférieurs qui participent à l'alimentation de la couverture.

Une exploitation des horizons profonds variables selon la modalité d'entretien du sol et l'année climatique

Cette précision est également valable pour la profondeur exploitée par la vigne et explique qu'aucune remontée capillaire significative ne soit observée à cette profondeur de 4 m. En effet, la profondeur exploitée par le système est ici nettement supérieure (jusqu'à 4 m) dans les modalités MD et surtout MF, à celle observée dans d'autres études en situations comparables (2,5 m) (Trambouze 1996; Pellegrino et al. 2004). De plus, Trambouze (1996) observe que les horizons compris entre 1,8 et 2,7 m représentent à peine 10% de l'évapotranspiration total du couvert. Or, dans la modalité désherbée, les horizons inférieurs à 1,8 m représentent encore 25% des consommations sur la période 2003-2004, malgré une profondeur exploitée comparable à celle observée précédemment (Trambouze 1996), et même 30% sur la période 2005-2006 avec une profondeur exploitée plus importante. Cette différence de profondeur exploitée entre les deux périodes s'explique notamment par la faible recharge du profil en hiver qui a poussé la vigne à coloniser des horizons plus profonds. Les deux modalités enherbées n'ont pas le même comportement. La modalité avec un enherbement semi-permanent montre une grande stabilité sur toute la période étudiée dans son exploitation du profil hydrique et n'exploite jamais des horizons inférieurs à 2,7 m de profondeur. Ainsi, les horizons en dessous de 1,8 m de profondeur représentent un peu moins de 20% des variations de stock et la sécheresse des années 2005 et 2006 a été compensée par une recharge un peu meilleure qu'en MD et une faible croissance de l'orge, du fait d'une levée peu favorable. L'enherbement permanent de fétuque élevée dessèche plus fortement les horizons de surface et entraîne une exploitation plus importante des horizons profonds par la vigne. La part relative de la consommation en dessous des premiers 1,8 m de profondeur est comparable à celle observée dans la modalité désherbée (25 à 30%) mais la quantité d'eau représentée est légèrement supérieure. Pour consommer cette quantité d'eau, la vigne enherbée exploite des horizons plus profonds que

dans la situation désherbée et des variations de stock significatives sont observées jusqu'à 4 m de profondeur environ.

Des horizons profonds utiles à la survie de la vigne en été

La vigne consomme de l'eau sur l'ensemble de la zone explorée dès le débourrement (Trambouze 1996). Pour autant, les horizons profonds prennent de l'importance dans l'alimentation de la vigne tandis que l'on avance dans la saison et que les horizons de surface s'assèchent (Morlat et al. 1992). Ainsi, dans la modalité MD, les variations de stock en dessous de 2,7 m de profondeur représentent 5 à 7% des variations de stock total tandis que dans ces mêmes horizons, cette variation est de 10% dans la modalité avec un enherbement permanent. Ces variations sont donc assez faibles mais de nombreux auteurs mettent en avant l'importance de ces horizons profonds dans la survie de la vigne au cours des périodes de grande sécheresse (Seguin 1972; Smart et Coombe 1983; Champagnol 1984; Morlat et al. 1992; Stevens et al. 1995). Ceci ne signifie pas nécessairement qu'en fin de cycle seules les racines profondes sont actives, puisque l'on peut également avoir des remontées capillaires des horizons profonds plus humides vers les horizons plus superficiels, les racines de ces horizons superficiels restant alors actives. Ceci justifie également l'approfondissement de la zone exploitée au cours de l'été pour les années sèches.

6. Conclusion : Quelle compartimentation pour mieux représenter le système ?

Le dispositif présenté ici a permis de mieux comprendre comment l'implantation d'un enherbement dans l'inter-rang modifie le fonctionnement hydrique du vignoble. Ainsi, si elle diminue sensiblement le ruissellement de surface, ce flux entrant supplémentaire bénéficie vraisemblablement à l'enherbement. Ceci est lié au décalage temporel qui existe dans la consommation de l'eau par les deux espèces associées. Un décalage spatial est également observé mais celui-ci n'est que partiel. En effet, le système racinaire de la fétuque élevée est pour près de 90% compris dans la zone sous l'inter-rang. Si la vigne semble éviter une concurrence frontale avec l'enherbement en concentrant une partie de son système racinaire sous le rang, ce décalage n'est que partiel et des racines de vigne sont présentes sous l'inter-rang (30 à 40% des racines de vigne comprise dans le premier mètre de sol). La vigne a encore la possibilité d'exploiter ce compartiment mais cette exploitation est limitée par le dessèchement déjà avancé de cette zone du fait de la transpiration de l'enherbement. Finalement la vigne exploite des horizons sensiblement plus profonds que ceux que peut explorer l'enherbement et le principal décalage spatial entre les deux espèces est donc surtout vertical.

L'observation des dynamiques hydriques au sein d'une vigne enherbée au cours de quatre années climatiques contrastées permet d'obtenir une vision plus claire de ce fonctionnement. Il ressort que l'enherbement exploite un compartiment assez bien défini compris sous l'inter-rang et jusqu'à une profondeur variable selon l'espèce, les conditions du milieu et la conduite de ce couvert. La vigne, de son côté, peut exploiter aussi bien le rang, que l'inter-rang et une profondeur très supérieure. Pour autant, elle exploite surtout le rang du fait du décalage dans les cycles des deux espèces, et les horizons plus profonds. Cette exploitation des horizons de surface et des horizons profonds se fait simultanément comme l'ont déjà montré d'autres auteurs (Morlat et al. 1992; Trambouze 1996). Elle est cependant plus intense en surface en début de cycle puis en profondeur à partir du début de la saison sèche.

Cette compartimentation permet d'envisager une représentation simple du fonctionnement hydrique du système. Elle confirme également que la concurrence pour

l'eau entre les espèces associées est, en partie au moins, atténuée par une adaptation de la vigne. Cependant, cette adaptation ne va pas ici jusqu'à un évitement complet de la contrainte hydrique pour la vigne (*Cf. Chapitre III*).

Chapitre VI - Modéliser simplement une dynamique complexe de partage des ressources hydriques au sein d'une vigne enherbée

1. Mots clés

Bilan hydrique ; Contrainte hydrique ; Cultures associées ; Dynamique ; Enherbement ; *Festuca arundinacea* Shreb ; FTSW ; *Hordeum vulgare* L. ; Modèle ; *Vitis vinifera* L.

2. Introduction

L'enherbement du vignoble est une pratique qui procure de nombreux avantages à la production de raisin de cuve. Pour autant, particulièrement dans le climat méditerranéen, les vigneron craignent souvent une concurrence pour l'eau trop défavorable à la qualité. Une gestion raisonnée du couvert intercalaire dans cette association est donc indispensable et une bonne compréhension du fonctionnement du système s'impose. Un modèle de bilan hydrique peut être un outil de représentation du fonctionnement hydrique du système intéressant.

Comme souvent dans un système où sont associés deux cultures, implanter un enherbement sur les inter-rangs d'un vignoble modifie profondément le fonctionnement hydrique du système (Cf. Chapitre V) (Morlat 1987; Ong 1995; Ozier-Lafontaine et al. 1998; Black et Ong 2000; Celette et al. 2005). L'association d'une vigne avec un enherbement se caractérise par un fort contraste entre les deux espèces et leur fonctionnement par rapport à l'eau. Les deux espèces se différencient notamment par une exploration racinaire très différente et par des cycles de croissance décalés (Cf. Chapitre V) (Morlat et Jacquet 2003; Celette et al. 2005). De plus, un vignoble enherbé présente généralement une structure en rangs qui influe sur la dynamique hydrique du sol. L'observation des dynamiques de partage de la ressource en eau incite à envisager une représentation du système en deux dimensions avec deux compartiments différents (Cf. Chapitre V) (Celette et al. 2005). Si le système étudié s'avère complexe dans son fonctionnement, l'objectif du travail consiste à le représenter le plus simplement possible, afin de pouvoir insérer le modèle dans un futur outil d'évaluation de stratégie de gestion du sol. Il est donc important de définir auparavant les critères sur lesquels devront porter nos exigences et sur lesquels le modèle obtenu sera évalué.

En premier lieu, l'objectif d'un tel modèle est de représenter de manière satisfaisante la contrainte hydrique subie par la vigne à des périodes clés, notamment pour l'impact qu'elle a sur la croissance de la vigne et la qualité de la production (Van Leeuwen et Seguin 1994b; Deloire et al. 2005; Pellegrino et al. 2006). Ensuite, si la vigne est la seule culture valorisée, la contrainte hydrique subie par l'enherbement doit également être évaluée puisqu'elle affectera sa capacité de croissance et donc la concurrence qu'elle induit pour la vigne. De plus, une simulation satisfaisante de l'état hydrique de chaque compartiment s'avère également cruciale de par l'impact qu'il a sur la dynamique et l'accès à l'azote (Rodrigo et al. 1997; Valé 2006). Plusieurs études montrent également que la présence d'une culture intercalaire peut fortement affecter le rapport ruissellement/infiltration, notamment lors de la recharge hivernale (Klik et al. 1998; Battany et Grismer 2000). Or, cette recharge hivernale influence grandement l'importance de la concurrence pour l'eau dans une vigne enherbée (Morlat et Jacquet 2003; Celette et

al. 2005). Elle est donc importante à évaluer, notamment pour permettre d'enchaîner plusieurs cycles de vigne dans une même simulation.

La fraction d'eau du sol transpirable par la plante (FTSW) représente bien cette contrainte subie par les plantes. Elle se définit comme le rapport entre l'eau disponible du sol pour la plante au jour j (ASW_j) et le stock total d'eau du sol transpirable par la plante (TTSW) (Sinclair et Ludlow 1986). Cet indicateur de contrainte est pertinent sur vigne (Pellegrino et al. 2004). Il a notamment l'avantage de prendre en compte la répartition du système racinaire de chacune des espèces au travers de la définition de la TTSW. En rapport avec les densités racinaires présentes dans chaque horizon, une exploitation du stock d'eau du sol à des humidités plus faibles encore que l'humidité au point de flétrissement permanent théorique ($pF_{4,2}$) est possible (Trambouze et Voltz 2001). Dans les horizons profonds, moins explorés par le système racinaire, l'exploitation du profil est en revanche beaucoup moins intense (Cabelguenne et Debaeke 1998; Lacape et al. 1998). La TTSW est d'ailleurs susceptible d'évoluer au cours du temps du fait de la physiologie de la plante et des conditions climatiques notamment (Sadras et Milroy 1996). Pour finir, la FTSW est un indicateur pertinent car des relations robustes ont été établies entre cet indicateur et le fonctionnement de la plante face à une contrainte hydrique (Lecoeur et Sinclair 1996; Sadras et Milroy 1996; Lacape et al. 1998; Lebon et al. 2003; Pellegrino et al. 2004; Pellegrino et al. 2006).

Ce chapitre présente la structure du modèle et son évaluation par rapport aux résultats d'une expérimentation conduite pendant 4 années sur différents systèmes viticoles enherbés ou non. Ces quatre années ont notamment été caractérisées par des conditions climatiques qui ont créé des dynamiques hydriques très contrastées. Ce travail de modélisation se base notamment sur le modèle de bilan hydrique développé par Riou et al. (1994) sur la vigne. Ce modèle, prévu pour une vigne sans couverture du sol et correctement irrigué, est ici modifié pour représenter la dynamique observée du système associé. Le modèle est utilisé comme un outil de questionnement sur le fonctionnement hydrique du système et certains points de ce fonctionnement peuvent être mieux compris grâce à lui. Ceci amène finalement à proposer des pistes à explorer pour encore améliorer le résultat obtenu et rendre l'application du modèle dans le cadre d'une évaluation de stratégie d'entretien du sol plus accessible et performante.

3. Matériel et Méthodes

3.1. Le modèle de bilan hydrique

3.1.1. Bilan hydrique d'une parcelle viticole sans enherbement

Le modèle de bilan hydrique est basé sur le modèle de Riou et al. (1994) établi pour une vigne correctement irriguée. Celui-ci est un modèle simple à réservoir, basé sur le principe suivant :

$$\frac{T}{ETP} \approx \frac{R_{int}}{R_g} \quad [6.3.1. a]$$

Avec T : la transpiration de la vigne
 ETP : l'évapotranspiration potentielle
 R_{int} : la part du rayonnement intercepté
 R_g : le rayonnement global

Ces auteurs s'appuient ainsi sur un modèle d'interception du rayonnement développé précédemment (Riou et al. 1989) pour calculer la part du rayonnement intercepté par le couvert de vigne. Ce modèle a l'avantage d'être spécifique à la vigne, simple et de ne pas nécessiter de calibrage (Trambouze et Voltz 2001). Il considère en effet le couvert d'une

vigne palissée, comme un parallélepède de longueur infinie. Ainsi, seules la hauteur et la largeur doivent être déterminées, ainsi que la porosité de la canopée et la largeur des inter-rangs. Un modèle géométrique simple calcule et intègre la part du rayonnement intercepté au cours d'une journée.

Le modèle de bilan hydrique de la vigne a ensuite été repris par divers auteurs et adapté pour permettre de simuler correctement un couvert de vigne en rang palissé en conditions pluviales. Pour cela, un coefficient correcteur de la transpiration lié à l'augmentation de la résistance stomatique lorsque la vigne subit une contrainte hydrique a été introduit. Celui-ci est basé sur une fonction de réponse à la part de l'eau disponible pour la vigne (Riou et Lebon 2000; Trambouze et Voltz 2001; Lebon et al. 2003). La transpiration est ainsi affectée à partir d'un seuil de FTSW fixé à 0,4 par Lebon et al. (2003) et décroît ensuite linéairement avec la FTSW. L'évaporation du sol nu est calculée selon les modalités proposées par Brisson et Perrier (1991) dans un modèle d'évaporation du sol nu semi-empirique basé sur celui de Ritchie (1972). Le réservoir de sol est défini par sa TTSW.

Ce modèle a déjà fait l'objet d'une utilisation dans un couvert de vigne méditerranéen et a produit des résultats satisfaisants (Trambouze et Voltz 2001; Pellegrino et al. 2006).

3.1.2. Adaptation du modèle à une vigne enherbée

Compartimentation du sol

Le modèle établi pour la vigne a ensuite été adapté pour permettre de simuler une vigne enherbée. Pour cela un deuxième compartiment de sol a été défini, correspondant au stock d'eau utile à l'enherbement (Celette et Celette 2002; Celette 2003). Si l'hypothèse est faite que l'enherbement ne peut consommer de l'eau que dans le compartiment qui lui est réservé sous l'inter-rang, nous considérons que la vigne répartit ses consommations sur l'ensemble du profil de sol, compartiment de l'enherbement compris. En effet, les horizons colonisés par l'enherbement contiennent généralement des racines de vigne (Cf. Chapitre V -5.2.) (Celette et al. 2005). Les dimensions de chacun des couverts sont déterminées en fonction de la proportion de la surface représentée par l'inter-rang couvert par l'enherbement (p_{ir}) et la profondeur du compartiment de l'enherbement est déterminée en fonction des variations d'humidité du sol (Cf. Chapitre III -5.3.).

Contrôle de la transpiration de l'enherbement et gestion des tontes

Le contrôle de la transpiration de l'enherbement est commandé par un coefficient cultural (k_h) selon la formulation proposée par Allen et al. (1998). L'évolution de k_h au cours de l'année a été paramétrée (Lelièvre, comm. pers.) en relation à une somme de degrés-jours cumulés à partir d'une base de 0°C (Lemaire et Salette 1981). Par rapport à la référence donnée pour un couvert herbacé correctement irrigué qui sert au calcul de l'ETP (Penman 1948), le k_h de l'enherbement permanent, comme celui de l'orge, a été plafonné à une valeur de 1. Il a également été plafonné à 0,5 au cours de l'hiver pour représenter le ralentissement de la croissance au cours de l'hiver en conditions méditerranéennes (Hofmann 2006). La transpiration de l'herbe (T_h) est ensuite régulée par un coefficient de contrainte hydrique (k_{sh}) basé sur la FTSW du compartiment de l'enherbement (FTSW_h) sous la même forme que le coefficient de régulation de la transpiration de la vigne. Le seuil de régulation de la transpiration de l'herbe est fixé à 0,9 d'après des observations réalisées par Volaire et Lelièvre (2001) sur fétuque élevée.

Il est difficile de simuler une hauteur du couvert avec le modèle de bilan hydrique développé. En revanche, le k_h étant relié à cette hauteur, les tontes ont été automatisées par rapport à son évolution. En fait, un coefficient supplémentaires est créé (k_{tonte}). Celui-ci

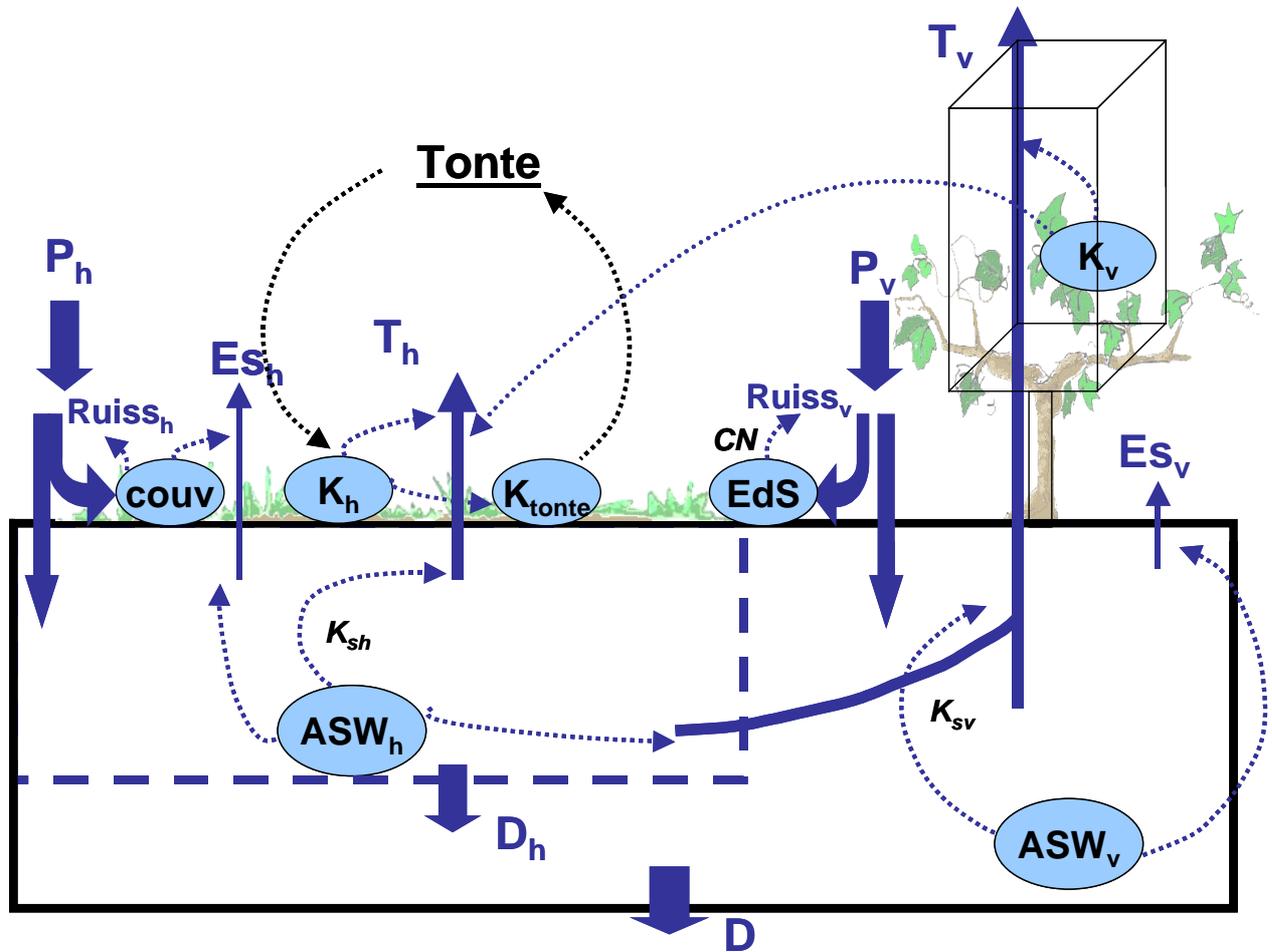


Figure 6.1 – Schéma conceptuel du modèle de bilan hydrique établi pour une vigne enherbée. La lettre associée au nom de certaines variables représente le compartiment ou la plante auquel elles sont associées avec h pour l'enherbement et v pour la vigne. Les noms de variables encadrés représentent les variables définissant l'état des différents éléments du système : le contenu en eau disponible pour le couvert dans le compartiment X (ASWX), le taux de couverture de la surface enherbée (Couv), le coefficient cultural de l'enherbement (K_h), le coefficient déterminant le déclenchement de la tonte par rapport au K_h (K_{tonte}), le coefficient d'interception du rayonnement par la vigne – détermine la part de l'ETP transpirée par la vigne (K_v), l'état de surface du sol, caractérisé par le CN, qui détermine la sensibilité au ruissellement du système. Les flèches pleines représentent les principaux flux : la part des précipitations destinée au compartiment X (P_x), la part du ruissellement n'entrant pas dans le compartiment X ($Ruiss_x$), la part de l'évaporation du sol nu dans le compartiment X (E_{s_x}), la transpiration de la plante X (T_x), le drainage du compartiment h vers le compartiment v (D_h), la perte d'eau du système par drainage profond (D). Les flèches en pointillés représentent les régulations des différents flux avec : le coefficient de régulation de la transpiration par la contrainte hydrique (K_{sx}) et le Curve Number qui est le facteur utilisé pour déterminer le coefficient de ruissellement en fonction de la couverture du sol et de l'état de surface (optimisé) (CN).

évolue selon la même relation que k_h . Cependant, à la différence de k_h , il n'est pas plafonné à une valeur de 1 mais poursuit son augmentation. Ceci est conforme au fait que la hauteur peut continuer à augmenter tandis que le coefficient cultural atteint un maximum. Hofmann (2006) a estimé que le seuil de déclenchement de la tonte pour l'enherbement pérenne était à une valeur de k_{tonte} de 1,35. Cette valeur a été optimisée par rapport aux données recueillies sur la parcelle entre 2003 et 2005. La dynamique des tontes obtenue est assez satisfaisante avec un décalage de 15 à 20 jours au maximum entre dates simulées et observées. Le nombre de tontes simulé est en revanche le bon, ce qui est important pour une évaluation économique de l'itinéraire technique. Le couvert intercalaire présent en MR ne subit pas de tonte mais est simplement détruit. Dans la simulation, cette destruction est déclenchée à la date observée.

Schéma conceptuel du modèle de bilan hydrique élaboré d'une vigne enherbée et algorithmes de calcul

Le modèle de bilan hydrique (*Figure 6.1*) est finalement composé des formules suivantes :

$$ASW_{h_j} = ASW_{h_{j-1}} + (P_{h_j} - Ruiss_{h_j}) - T_{h_j} - Es_{h_j} - \frac{ASW_{h_{j-1}}}{ASW_{totj-1}} T_{v_j} - D_h \quad [6.3.1. b]$$

$$ASW_{v_j} = ASW_{v_{j-1}} + (P_{v_j} - Ruiss_{v_j}) + D_h - Es_{v_j} - \frac{ASW_{v_{j-1}}}{ASW_{totj-1}} T_{v_j} - D \quad [6.3.1. c]$$

Les algorithmes de chacun des flux sont détaillés dans l'annexe 5.

3.1.3. Paramétrage du modèle

Quatre situations sont simulées : les modalités désherbée (MD) et enherbée temporairement (MR) et les deux placettes de la modalité enherbée toute l'année (MF1 et MF2). En effet, une analyse rapide du Ψ_b , principal indicateur du statut hydrique de la vigne, montre une importante variabilité au sein de la modalité MF par rapport aux deux autres modalités. Ainsi, le coefficient de variation (CV) est le plus souvent supérieur à 25% en MF, tandis qu'il est généralement inférieur à 20, voire à 15% dans les deux autres modalités. Chaque simulation est initialisée au premier janvier d'une année et terminée au 31 décembre de cette même année afin de limiter les dérives pouvant apparaître d'une année sur l'autre.

Paramétrage du coefficient d'interception du rayonnement maximal (K_m)

Le coefficient maximal d'interception du rayonnement (K_m) est indispensable pour déterminer la part de la demande évapotranspiratoire qui revient à la vigne ou à l'inter-rang. Il est considéré atteint peu après le premier rognage de la vigne qui fixe théoriquement les dimensions du couvert. Ce coefficient est calculé grâce au modèle d'interception du rayonnement proposé par Riou et al. (1989) et nécessite la caractérisation des dimensions du couvert (*Tableau 6.1*). La largeur considérée est une largeur moyenne du couvert entre le haut et le bas de la canopée. La porosité de la canopée a été estimée à partir de la valeur de LAI (*Cf. Chapitre VI – 4.1.4.*). Ces dimensions n'ayant pas été mesurées en 2003, une relation linéaire a été établie pour cette parcelle entre poids de bois de taille à la fin de l'année et K_m ($R^2=0,75^*$). Le K_m des différentes modalités en 2003 a été calculé à partir de cette relation.

Une décroissance linéaire du coefficient k_v de la vigne a été paramétrée pour représenter la dégradation du couvert et la chute des feuilles à l'automne. La période de décroissance de la transpiration du couvert de vigne a été fixée artificiellement entre le

Tableau 6.1 – Paramètres mesurés au champ pour le calcul du coefficient maximum d'interception du rayonnement par la vigne (K_{\max}). Les valeurs en italiques représentent les intervalles de confiance à 5% calculés avec une loi de Student.

MD						
	2003	2004	2005	2006		
Hauteur		1.08 <i>0.04</i>	1.14 <i>0.03</i>	1.23 <i>0.02</i>		
Largeur		0.53 <i>0.03</i>	0.46 <i>0.03</i>	0.50 <i>0.03</i>		
LAlmax		3.5 <i>0.1</i>	2.6 <i>0.1</i>	2.4 <i>0.1</i>		
Porosité		0.07	0.19	0.23		
Kmax	0.539	0.499	0.462	0.485		
MR						
	2003	2004	2005	2006		
Hauteur		1.04 <i>0.03</i>	1.13 <i>0.04</i>	1.15 <i>0.03</i>		
Largeur		0.45 <i>0.02</i>	0.43 <i>0.03</i>	0.52 <i>0.03</i>		
LAlmax		3.1 <i>0.1</i>	2.3 <i>0.1</i>	2.4 <i>0.1</i>		
Porosité		0.12	0.25	0.23		
Kmax	0.506	0.452	0.439	0.481		
MF1						
	2003	2004	2005	2006		
Hauteur		1.07 <i>0.03</i>	1.08 <i>0.04</i>	1.00 <i>0.06</i>		
Largeur		0.45 <i>0.03</i>	0.40 <i>0.03</i>	0.46 <i>0.03</i>		
LAlmax		2.6 <i>0.1</i>	1.3 <i>0.1</i>	1.9 <i>0.1</i>		
Porosité		0.19	0.51	0.34		
Kmax	0.470	0.447	0.377	0.420		
MF2						
	2003	2004	2005	2006		
Hauteur		1.06 <i>0.03</i>	1.00 <i>0.03</i>	1.12 <i>0.02</i>		
Largeur		0.43 <i>0.02</i>	0.35 <i>0.03</i>	0.35 <i>0.04</i>		
LAlmax		2.4 <i>0.1</i>	1.3 <i>0.1</i>	1.6 <i>0.1</i>		
Porosité		0.23	0.51	0.42		
Kmax	0.461	0.432	0.344	0.374		

15/10 et le 01/11, suite aux observations de l'état du feuillage au cours des quatre années d'expérimentation.

Paramétrage des dimensions du couvert intercalaire

La largeur de l'inter-rang enherbé a été considérée constante au cours de la durée de l'étude. Elle a été fixée à 1,5 m pour le couvert pérenne (MF) et 1,25 m pour le couvert d'orge (MR). Le rapport largeur couverte/largeur entre rang de vigne (p_{ir}) a donc été fixé à 0,6 (1,5 m/2,5 m) en MF et 0,5 en MR.

Le taux de couverture moyen de chacun des couverts a également été considéré constant au cours d'une même année. Pour cela, la moyenne des taux de couverture mesurés au cours de l'année a été paramétrée pour chacun des couverts.

Evaluation des TTSW des deux compartiments et initialisation du stock disponible

L'évaluation de la TTSW de chacune des espèces associées a été réalisée à l'aide des mesures de sonde à neutrons (Cf. Chapitre V-5.3.1.). Si dans les modalités MD et MR, les différences de TTSW sont faibles à négligeables, les placettes MF1 et MF2 ont montré des différences significatives entre les périodes 2003-2004 et 2005-2006. L'ASW présente dans chacun des compartiments au 1^{er} janvier a été réinitialisée et optimisée à partir des valeurs d'ASW mesurées à la sonde à neutrons au cours de l'année par minimisation de l'erreur relative.

Paramétrage du coefficient de ruissellement

La part de précipitation ruisselée a été mesurée sur les traitements MF et MD. Cette courbe de réponse du ruissellement à l'intensité journalière des précipitations a été calculée à partir de la méthode développée pour le modèle SWAT (Chanasyk et al. 2003; Tripathi et al. 2003; Tripathi et al. 2006) et optimisée à partir des mesures *in situ* réalisées en 2005 (Cf Chapitre V). La quantité d'eau ruisselée mesurée au champ ayant été mesurée pour une placette ne différenciant pas rang et inter-rang, il a été décidé de soustraire le ruissellement calculé aux précipitations entrant dans les deux compartiments en fonction du rapport p_{ir} . Cette hypothèse n'est probablement pas valable puisque l'on peut penser que le ruissellement est supérieur sur le rang laissé nu que sur l'inter-rang.

Finalement, la quantité d'eau ruisselée en fonction de la situation simulée va dépendre du CN (Curve Number) correspondant. Il est donc rentré dans le modèle comme un paramètre. Aucune mesure de ruissellement n'ayant été réalisée sur la modalité MR, le CN appliqué sur cette modalité a finalement été calé sur l'année 2005 également. En théorie, le ruissellement varie en fonction de l'état de surface (Leonard et Andrieux 1998). Le CN de chaque situation évolue donc au cours de la saison, en fonction de l'humidité de surface et de la couverture. Pour autant, l'objectif étant d'avoir un modèle simple, il a été décidé d'appliquer un CN constant pour chaque situation et ce pour les quatre années de l'expérimentation. Les CN paramétrés pour chacune des modalités sont MD : CN=91 ; MR : CN=90 et MF : CN=74 (Cf Chapitre V-5.5.).

Paramétrage de l'évaporation du sol nu

Le modèle d'évaporation du sol nu utilisé a déjà été décrit (Brisson et Perrier 1991). Les paramètres utilisés pour simuler l'évaporation du sol nu sont $a_1=15$ en 2003 (correspondant à une vitesse de vent moyenne sur l'année de $1,7 \text{ m.s}^{-1}$) et $a_1=14$ pour les années 2004-06 ($1,9 \text{ m.s}^{-1}$), $a_2=0,15$ (pour une texture de surface avec 35% d'argiles), ce qui nous donne un facteur $a=1,13$. Le facteur U qui détermine le passage de l'évaporation de la première phase à la deuxième a été fixé à 2,7 mm suite aux observations de Trambouze et Voltz (1998) dans des conditions méditerranéennes, avec un sol dés herbé chimiquement et compacté. Pour la surface de sol non enherbée, on considère que

l'évaporation est égale à celle calculée par le modèle de Brisson et Perrier (1991) avec une ETP incidente diminuée de la part interceptée par le couvert de vigne. Pour ce qui concerne le compartiment sous l'inter-rang, on applique finalement une évaporation du sol calculée de la même manière dans les trous laissés dans la couverture intercalaire (1-taux de couverture).

3.1.4. Croissance végétative de la vigne

Le gabarit de la vigne, nécessaire au paramétrage de la vigne, a été déterminé début juillet après le rognage de la vigne. On considère alors que la vigne a atteint son gabarit définitif visé par le viticulteur. A cette date, la hauteur de la canopée, ainsi que la profondeur moyenne sont évaluées pour chacune des placettes étudiées.

Le calcul du coefficient d'interception maximal du couvert de vigne (K_m) nécessite la valeur de la porosité minimale du couvert. Celle-ci n'ayant pas été mesurée directement, elle a été évaluée grâce à une relation entre le LAI et la porosité établie par Castelan-Estrada (2001). Cette relation est de la forme :

$$Porosité = 0.05.LAI^2 - 0.44.LAI + 1 \quad [6.3.1. d]$$

La valeur de LAI au mois de juillet a donc été mesurée à l'aide d'un LAI2000 (Cf. Chapitre III –4.4.).

3.1.5. Indicateurs de contraintes hydriques

Le potentiel hydrique foliaire de base (ψ_b) permet d'évaluer de manière dynamique la contrainte hydrique subie par la vigne a été suivi entre la deuxième quinzaine de juin et la vendange (Cf. Chapitre III –4.3.). Cet indicateur a également l'avantage d'être lié à la FTSW par une relation établie sur différents cépages et dans différentes régions (dont celle de Montpellier) (Lebon et al. 2003; Pellegrino et al. 2004). La FTSW peut également être estimée à partir des ASW calculées à l'aide des mesures neutroniques de l'humidité. Cet indicateur a l'avantage de pouvoir être mesuré tout au long de l'année et donc dans la période précoce de croissance de la vigne, qui ne peut être suivie par le ψ_b .

3.2. Traitement statistique des données et indicateurs d'évaluation de la qualité du modèle

Les différences entre traitements ont été évaluées par une ANOVA et un test de Newman-Keuls (logiciel Statbox version 6.23, Grimmersoft).

La qualité du modèle a été évaluée au travers de quatre indicateurs calculés à l'aide du tableur Excel (Microsoft) qui sont :

L'efficacité (EF) du modèle définie comme :

$$EF = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad [6.3.2. a]$$

avec : Y_i : les valeurs observées,

\hat{Y}_i : les valeurs simulées,

\bar{Y} : la moyenne des valeurs observées,

L'erreur relative (RRMSE) :

Tableau 6.2 – Indicateurs de qualité du modèle pour les différentes situations simulées. Pour chaque compartiment, sont donnés l'efficacité du modèle, l'erreur relative (RRMSE), le biais et le R². Le coefficient p montre si le coefficient de détermination est significatif ou non (* - significatif ; ** - hautement significatif ; *** - très hautement significatif).

Vigne	MD				MR				MF1				MF2			
	2003	2004	2005	2006	2003	2004	2005	2006	2003	2004	2005	2006	2003	2004	2005	2006
<i>Efficience</i>	0.98	0.98	0.94	0.99	0.43	0.93	0.96	0.98	-0.48	0.84	0.98	1.00	-1.08	0.83	0.72	0.89
<i>RRMSE</i>	0.07	0.11	0.21	0.08	0.53	0.21	0.15	0.10	0.89	0.30	0.10	0.03	0.99	0.31	0.33	0.23
<i>Biais</i>	-3.3	-15.4	-5.8	-0.8	-17.5	-22.8	-0.7	3.0	-28.1	-36.5	2.5	-0.8	-26.9	-29.2	-4.1	-13.5
<i>R²</i>	0.99	0.97	0.79	0.97	0.53	0.95	0.97	0.98	0.10	0.93	0.93	0.99	0.06	0.93	0.52	0.95
<i>p</i>	***	***	***	**	*		***	***		***	**	***		***		***
Enherbement																
<i>Efficience</i>					0.90	0.94	0.20	0.66	0.95	0.94	0.69	0.93	0.93	0.91	0.78	0.60
<i>RRMSE</i>					0.41	0.21	0.55	0.52	0.24	0.16	0.38	0.19	0.28	0.20	0.34	0.41
<i>Biais</i>					14.3	6.1	5.3	13.8	2.6	1.4	-7.8	4.4	-2.7	1.7	-5.7	18.7
<i>R²</i>					0.95	0.99	0.35	0.94	0.83	0.96	0.75	0.98	0.82	0.90	0.79	1.00
<i>p</i>					***			**	***	***	*	***	***	***	*	***

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_i (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{I}}}{\bar{Y}} \quad [6.3.2. b]$$

Le biais :

$$biais = \frac{\sum_i (Y_i - \hat{Y}_i)}{I} \quad [6.3.2. c]$$

avec : I : le nombre d'individus

Le coefficient de détermination classique (R^2) :

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^I [(Y_i - \bar{Y})(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^I [(Y_i - \bar{Y})^2] \sum_{i=1}^I [(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2]}} \right)^2 \quad [6.3.2. d]$$

avec : $\bar{\hat{Y}}$: la moyenne des valeurs simulées

4. Résultats

4.1.1. Dynamique des stocks d'eau du sol disponibles pour la vigne (ASWv)

La principale variable simulée par le modèle est l'eau disponible pour le système dans chacun des compartiments car sa dynamique détermine la fréquence et l'intensité d'apparition d'une contrainte hydrique subie par le couvert de vigne. Le modèle procure des résultats tout à fait satisfaisants dans la simulation de cette ASWv (*Tableau 6.2*) mais quelques erreurs persistent, notamment au cours de l'automne (*Figure 6.2*) caractérisé des précipitations orageuses importantes.

Un modèle très robuste pour simuler une vigne dés herbée

Les simulations réalisées confirment que le modèle, une fois correctement paramétré, simule de manière très satisfaisante un vignoble dés herbé en conditions méditerranéennes. Ainsi, l'efficacité calculée montre que le modèle est proche d'un modèle parfait en situation dés herbée (EF comprises entre 0,94 et 0,99 selon les années). Le biais calculé est faible et négatif dans la plupart des cas, témoignant d'une légère surestimation de l'ASWv par le modèle (*Tableau 6.2*). Il est le plus élevé en 2004 du fait d'une recharge hivernale légèrement surestimée (*Figure 6.2*) qui entraîne une surestimation de l'ASWv tout au long du cycle de la vigne. L'erreur relative est généralement faible mais un peu plus forte en 2005 à cause de la faiblesse des stocks moyens cette année là. Un biais moyen de moins de 6 mm au cours de l'année entraîne ainsi une erreur relative assez conséquente (RRMSE=0,21). Une tendance à surestimer la recharge automnale (l'écart entre le simulé et l'observé en novembre 2005 explique d'ailleurs plus de la moitié de l'erreur relative observée) est tout de même à signaler. Cette surestimation, au début et à la fin de chaque année, induit une ASWv simulée en fin d'année quasi systématiquement supérieure à celle

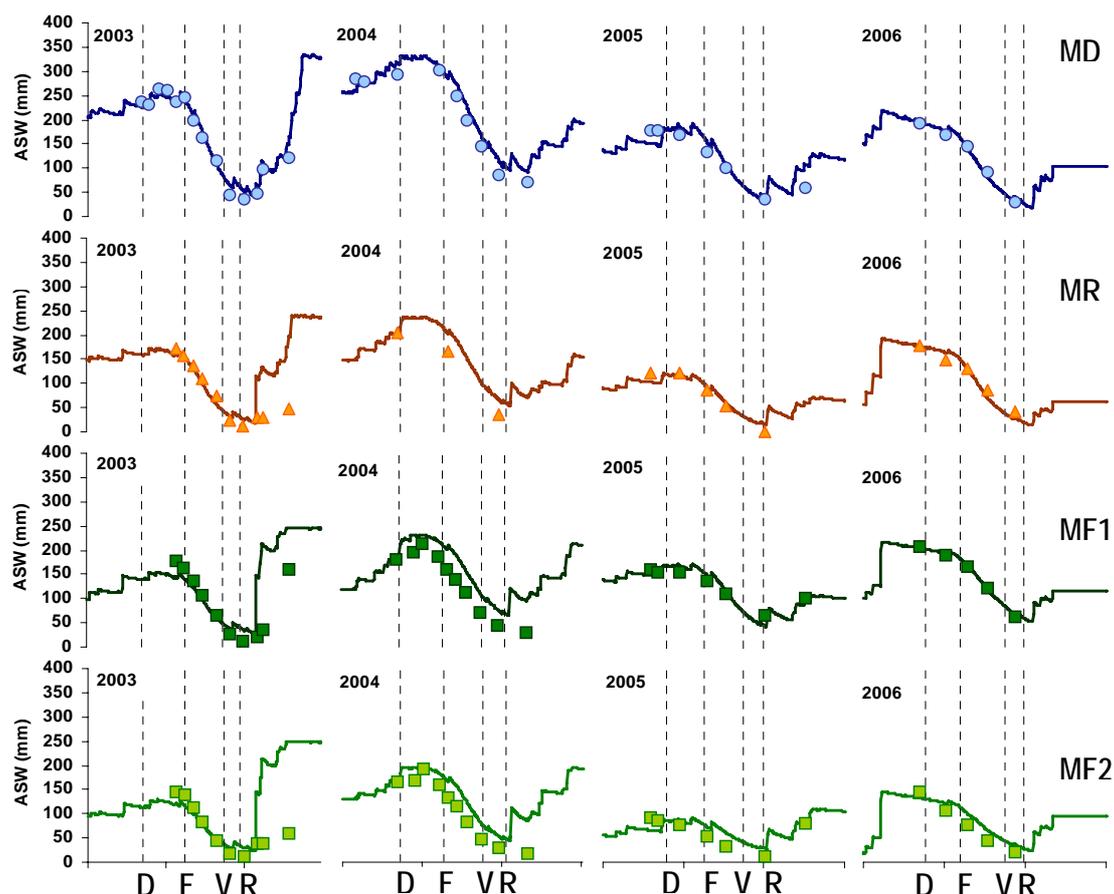


Figure 6.2 – Evolution des ASW dans le compartiment de sol exploré par la vigne. Les points représentent les ASW mesurées au champ par la méthode neutronique. La ligne continue représente l'ASW simulée. Les lignes verticales en pointillés représentent l'apparition des principaux stades de développement de la vigne avec dans l'ordre le débourrement (D), la floraison (F), la véraison (V) et la maturité (M).

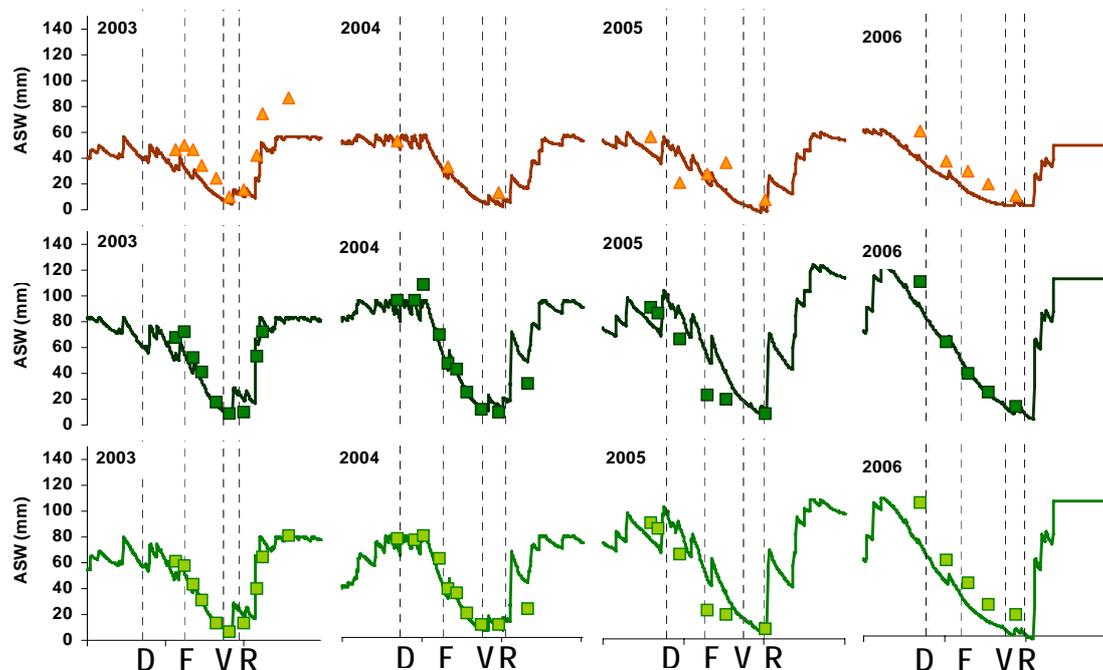


Figure 6.2b – Evolution des ASW dans le compartiment de sol exploré par l'herbe pour chacun des traitements considérés. Les points représentent les ASW mesurées au champ par la méthode neutronique. La ligne continue représente l'ASW simulée. Les lignes verticales en pointillés représentent l'apparition des principaux stades de développement de la vigne avec dans l'ordre le débourrement (D), la floraison (F), la véraison (V) et la maturité (M).

optimisée au 1^{er} janvier de l'année suivante (*Figure 6.2*). Cette simulation imparfaite de la recharge pourrait être problématique dans l'optique d'étudier la dynamique inter-annuelle.

L'enherbement consomme également de l'eau dans le compartiment de la vigne en hiver ?

Cette surestimation de l'ASWv en hiver paraît encore plus marquée dans les trois situations enherbées simulées (MR, MF1 et MF2). Elle peut également témoigner d'une sous-estimation des consommations du système au cours de l'hiver. Cette hypothèse est rendue plausible par la très faible remontée de l'ASWv mesurée par méthode neutronique au cours des automnes 2003 et 2004 malgré des précipitations importantes. Cette remontée est d'ailleurs plus faible en 2003 dans les situations enherbées que dans la situation désherbée et cette différence suggère une consommation de l'enherbement dans ce compartiment au cours de l'hiver. Cette dernière est rendue possible par l'existence de racines de fétuque en faible quantité sous le rang (*Figure 5.1*). Pour autant, cette éventuelle consommation de l'enherbement dans le compartiment de la vigne ne suffit pas à expliquer l'écart entre ASWv simulées en fin de cycle et au début du cycle suivant. Celui-ci est d'ailleurs presque nul au cours de l'hiver 2005-2006, ce qui s'explique par la faiblesse des précipitations au début de l'année 2006. Ainsi, cette surestimation systématique de l'eau infiltrée au cours des saisons arrosées suggère une prise en compte encore imparfaite du ruissellement dans les modalités enherbées.

Une sous-estimation du ruissellement dans les parcelles enherbées qui dégrade la qualité générale des simulations dans ces situations

Dans les modalités enherbées, la simulation de l'ASWv de la vigne est globalement satisfaisante. Entre 2004 et 2006, l'efficacité calculée pour chaque simulation montre une adéquation entre modèle et mesure satisfaisante à parfaite pour chacune des modalités étudiées avec une EF comprise entre 0,72 et 1 (Garnier et al. 2001). Cette EF est globalement moins bonne en MF2 mais reste très satisfaisante (EF comprise entre 0,72 et 0,89). L'observation du biais confirme cette bonne tenue du modèle en 2005 et 2006 mais montre une surestimation non négligeable de l'ASWv en 2004 par le modèle (*Figure 6.2*). Celle-ci s'explique par une recharge hivernale trop importante du modèle qui induit une ASW simulée par le modèle trop importante avant la floraison, lorsque les consommations de la vigne deviennent significatives. La dynamique d'assèchement qui suit est en revanche satisfaisante mais le biais est conservé. On peut donc penser que les consommations du couvert à ce moment du cycle sont satisfaisantes.

En 2003 en revanche, dans toutes les situations enherbées, les simulations ont été très peu satisfaisantes et l'erreur relative très importante ($RRMSE > 0,5$ et EF faible à négative). Cependant, 95% de cette erreur s'explique par les écarts entre les ASWv observées et simulées après les précipitations très importantes survenues à l'automne. L'infiltration de ces pluies paraît très fortement surestimée et il semble que la quasi-totalité des précipitations de cette période ait ruisselé. Ceci s'explique notamment car le dispositif du ruissellement au vignoble a une capacité de mesure du débit du ruissellement limitée et que celle-ci est dépassée au cours de ces orages. Ainsi, si les points observés après ces orages importants sont ignorés, les indicateurs de qualité du modèle sont sensiblement améliorés ($EF > 0,9$ et $RRMSE < 0,2$).

4.1.2. ASW du compartiment sous l'inter-rang enherbé (ASWh)

Les évolutions de l'ASW du compartiment exploré par l'enherbement sont globalement moins bien simulées que celle de l'autre compartiment (*Figure 6.2b*). Généralement, les EF calculées montrent tout de même une bonne adéquation entre modèle et observé (EF généralement comprises entre 0,6 et 0,95). Elles sont ainsi très bonnes pour

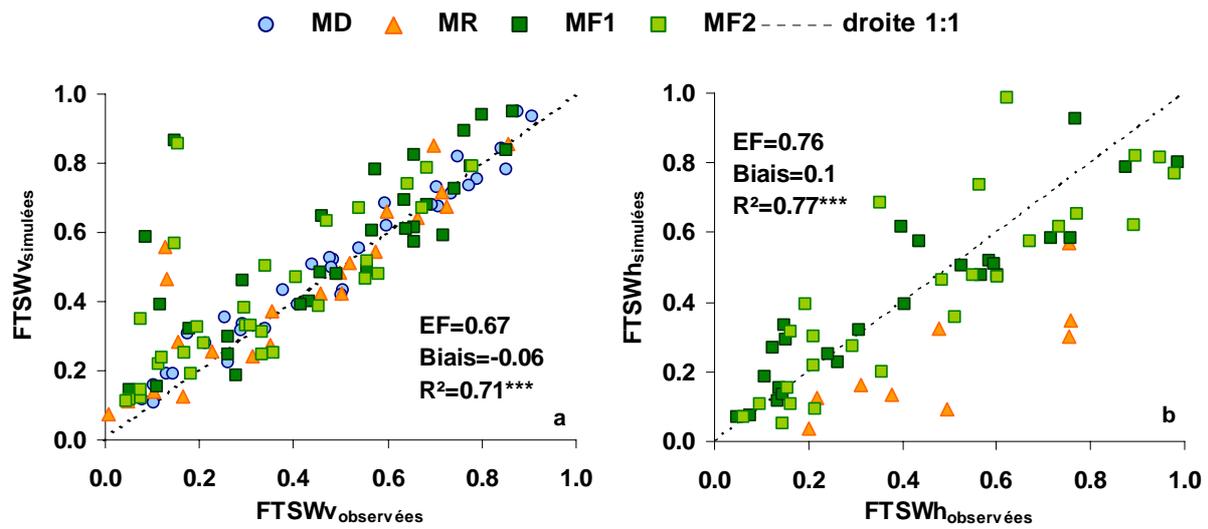


Figure 6.3 – Corrélation entre les valeurs de FTSW simulées et observées dans le compartiment de sol occupé par la vigne (a) et dans celui occupé par l'enherbement (b). Les indicateurs de qualité du modèle sont précisés pour chacun des compartiments.

les années 2003 et 2004 dans toutes les situations (*Tableau 6.2*) mais sont moins satisfaisantes en 2005 et 2006, années de forte sécheresse. Les erreurs relatives sont généralement assez importantes (RRMSE comprises entre 0,16 et 0,5) surtout dans la modalité MR où la TTSW de l'herbe (TTSWh) est faible. Ainsi, une erreur de quelques mm entraîne rapidement une erreur relative importante. Généralement, le biais est positif, signe d'une sous-estimation de l'ASW par le modèle. Cette sous-estimation apparaît tout particulièrement dans la modalité MR et en 2006 dans toutes les placettes (*Figure 6.2b*). Ceci peut être le fait d'une sous-estimation de la TTSWh. Elle peut également s'expliquer par une surestimation de l'évaporation du sol nu dans ce compartiment. Conséquence de la surestimation de cet assèchement du compartiment de l'herbe, la contrainte hydrique subie par l'enherbement est elle aussi surestimée par le modèle. Les problèmes liés à la recharge hivernale paraissent globalement moins importants que dans le compartiment de la vigne. Un décalage existe toutefois entre ASWh simulée en fin d'année et au 1^{er} janvier de l'année suivante en 2003 dans MF2 et 2006 en MF. Pour autant, il ne semble pas que cela soit lié ici à une surestimation des pluies infiltrées dans ce compartiment au cours de l'hiver, même si elle existe (Cf. automne 2004) mais plutôt à une sous-estimation de l'ASWh au 1^{er} janvier (*Figure 6.2b*).

4.1.3. Dynamique de contrainte hydrique (FTSW)

La contrainte hydrique subie par la vigne au cours du cycle est bien estimée

La corrélation établie entre la FTSWv simulée et observée (*Figure 6.3*) est très hautement significative ($R^2=0,71***$). Globalement, la contrainte hydrique subie par la vigne est tout de même légèrement sous-estimée par le modèle (biais=-0,06). L'efficacité du modèle est satisfaisante pour évaluer la contrainte hydrique mais de gros écarts apparaissent pour certains points (*Figure 6.3*). Ces points correspondent aux observations réalisées au cours de l'hiver 2003 et sont liés aux précipitations exceptionnelles de cette période (1000 mm entre septembre et décembre 2003). Ces erreurs sont donc peu importantes dans la caractérisation de la contrainte hydrique subie par la vigne puisque la vendange est alors déjà passée. Elle s'avère en revanche gênante si l'on souhaite enchaîner plusieurs simulations puisque la période hivernale est alors mal simulée. En ignorant ces quelques mesures, l'efficacité générale du modèle est très bonne (EF=0,9) et la surestimation très acceptable (biais=-0,03). Cette dernière est toutefois plus importante dans la modalité MF (biais=-0,04) que dans les modalités MR et MD (biais égal à 0 et -0,02 respectivement).

Une contrainte hydrique mieux estimée pour l'enherbement permanent que pour un enherbement semi-permanent

En ce qui concerne le compartiment de l'herbe (FSTWh), une corrélation très hautement significative existe entre valeurs simulées et observées ($R^2=0,77***$). Pour autant, les indicateurs sont très différents selon que l'on observe les simulations dans la modalité MF ou celles dans la modalité MR. Si l'efficacité générale est bonne (EF=0,76) et la contrainte hydrique surestimée (biais=0,1), les indicateurs sont très nettement améliorés si l'on considère la modalité MF seule. La surestimation de la FSTWh est alors très acceptable (biais=0,05) et l'EF encore améliorée (EF=0,82). La corrélation entre valeurs simulées et observées est excellente ($R^2=0,94***$). Dans la modalité MR en revanche, l'EF calculée du modèle est acceptable (EF=0,62) et la corrélation établie hautement significative ($R^2=0,66***$) mais le biais calculé témoigne d'une très forte sous-estimation de la FSTWh de l'orge (biais=0,3). Ces écarts s'expliquent en partie par la petite taille de la TTSWh de la modalité MR qui fait qu'une erreur modérée en valeur

Tableau 6.3 – Flux du bilan hydrique simulés par le modèle de bilan hydrique. Pour chaque année et chaque situation modélisée, sont précisés : la transpiration de la vigne (*Tv*), la transpiration de l'enherbement (*Th*), l'évaporation du sol nu (*Es*), le ruissellement (*Ruiss*) et le drainage profond (*D*).

	MD				MR				MF1				MF2			
	2003	2004	2005	2006	2003	2004	2005	2006	2003	2004	2005	2006	2003	2004	2005	2006
<i>Tv</i>	264	286	181	169	230	243	145	173	221	252	210	188	198	230	127	134
<i>Th</i>	0	0	0	0	52	69	49	17	117	181	130	69	114	153	126	67
<i>Es</i>	252	271	215	142	236	284	244	166	215	218	204	155	215	237	222	155
<i>Ruiss</i>	863	330	261	305	828	317	243	297	487	112	91	125	487	112	91	125
<i>D</i>	61	122	0	0	394	71	0	0	516	64	0	0	512	122	0	0

absolue induit une forte erreur relative. La sous-estimation de la TTSWh évoquée précédemment peut également être à l'origine de la sous estimation de la FTSWh. En effet, la dynamique des ASWh simulées est en bonne adéquation avec celles observées lorsque les pluies de printemps sont suffisantes comme en 2004 (*Figure 6.2b*). En revanche, en 2003 et plus encore en 2006, l'assèchement du compartiment de l'herbe semble débiter trop tôt même si la dynamique est bonne par la suite. Ainsi, la TTSWh est peut être plus importante dans cette modalité que ce qui a été paramétré. En conséquence de cette sous-estimation, les précipitations reçues par ce compartiment au cours de l'hiver sont ainsi drainées dans le compartiment de la vigne et ne servent pas à l'enherbement.

4.1.4. Les termes du bilan hydrique modélisés

Développer un modèle de bilan hydrique robuste permet ensuite d'étudier les différents flux du bilan hydrique pour chacune des modalités et notamment les flux qui n'ont pu être mesurés au champ (*Tableau 6.3*). Plus généralement, cela permet d'analyser et discuter le fonctionnement du système.

Dans un vignoble, l'évaporation du sol nu est une part importante des pertes en eau du système

Dans toutes les situations simulées, la part de l'évaporation du sol (E_s) par rapport à l'évapotranspiration réelle (ETR) simulée est très importante (*Tableau 6.3*). Ainsi, elle varie entre 33 et 55% selon les situations et les proportions les plus importantes sont obtenues dans les situations MD et MR en 2005. La dynamique journalière de E_s est assez conforme à ce qui a été mesuré sur la parcelle par l'intermédiaire de mini-lysimètres (*Annexe 6*) mais également dans une autre parcelle en conditions méditerranéennes (Trambouze 1996; Trambouze et al. 1998). Les valeurs d' E_s simulées sont généralement les plus élevées en MR, du fait d'une couverture du sol peu importante par le couvert intercalaire. La part de rayonnement interceptée par le couvert de vigne est également sensiblement inférieure à celle d'une vigne désherbée et le sol reçoit donc une quantité d'énergie plus importante. En MF1 et MF2 en revanche, si la part de rayonnement transmis jusqu'au sol est plus importante, la couverture du sol est supérieure, ce qui diminue sensiblement la surface de sol nu sensible à l'évaporation. Ceci explique que les E_s simulées sont le plus souvent plus faibles avec un enherbement permanent. Cette différence dans l' E_s simulée pour les deux traitements demeure faible cependant et il est possible de se demander si cette différence n'est pas trop limitée. En outre, l' E_s simulée en 2006 est supérieure en MF qu'en MD du fait d'un ruissellement inférieur et d'une meilleure infiltration de l'eau dans la modalité avec un enherbement permanent (*Tableau 6.3*).

Un ruissellement plus faible avec un enherbement permanent mais sous-estimé par le modèle

Les valeurs de ruissellement (Ruiss) simulées sont sensiblement plus élevées en MD et MR qu'en MF (*Tableau 6.3*). Cependant, la surestimation de la recharge hivernale (*Figure 6.2*) laisse craindre une surestimation de l'infiltration, particulièrement en MF. Les différences de ruissellement entre les traitements ne sont donc peut être pas aussi importantes que le montre le modèle avec un ruissellement deux à trois fois supérieur en MD et MR par rapport à MF (*Tableau 6.3*).

Une surestimation de l'infiltration qui induit une surestimation du drainage ?

Cette probable surestimation de l'infiltration au cours de l'hiver pourrait être à l'origine d'une surestimation du drainage (D) au cours de cette période. Ainsi, les valeurs simulées en 2003 dans la modalité MF sont très supérieures aux ordres de grandeur estimés

précédemment (Cf. *Chapitre V* –5.6.). Pour autant, en dehors de cet hiver 2003, au cours duquel les précipitations ont été particulièrement importantes, l'essentiel du drainage profond est finalement limité à une période hivernale (avant le 31 mars) et uniquement aux années plus arrosées (2003 et 2004) (*Tableau 6.3*). Ceci est conforme à ce qui avait été estimé précédemment (Cf. *Chapitre V* –5.6.) et le drainage simulé en MF cet hiver là est, comme attendu, supérieur à celui simulé en MD. Autrement dit, la dynamique de drainage profond simulée est conforme à ce qui était attendu mais son importance paraît surestimée, particulièrement dans la modalité MF.

Un drainage est simulé au début du printemps de l'année 2004 du fait des précipitations importantes de cette période et du bon remplissage du profil au cours de l'hiver. Au cours de cette période, le drainage simulé est supérieur dans la modalité MD par rapport à la modalité MF, malgré une infiltration des pluies au cours de l'hiver sensiblement améliorée avec la présence de l'enherbement. La différence a ainsi essentiellement servi à la recharge du profil et à la transpiration de l'herbe (Th).

Une transpiration de l'enherbement très faible

La transpiration de l'enherbement (Th) simulée dans la modalité MF est comprise entre 0,5 et 1,5 mm.j⁻¹ au printemps mais chute rapidement en été. Malgré un redémarrage aux premières pluies de l'automne, elle reste par la suite à un niveau modéré (0,5 mm.j⁻¹ environ) jusqu'au printemps suivant (*Annexe 7*). Ces valeurs paraissent acceptables même si elles sont assez faibles (Lelièvre, comm. pers.).

En revanche, les valeurs simulées de Th pour l'orge paraissent étonnamment faibles (*Tableau 6.3*). S'il est normal que le couvert d'orge transpire moins que le couvert permanent sur une année, les valeurs de Th semblent sous-estimées par le modèle (Th comprises entre 0,4 et 0,9 mm.j⁻¹ au printemps) (Jamieson et al. 1995; Kemanian et al. 2005).

Une transpiration de la vigne enherbée diminuée par la concurrence avec l'enherbement en année humide

Dans la modalité désherbée, la transpiration de la vigne (Tv) simulée est inférieure à 300 mm en 2003 et 2004, années où l'ASW en début de cycle était assez importante. Logiquement, les Tv simulées dans les situations enherbées sont plus faibles de 15 à 25% selon les situations. Ces valeurs sont sensiblement inférieures à la transpiration cumulée de 350 mm environ mesurée précédemment dans un vignoble alsacien (Tournebize 2001). Cependant, les conditions climatiques de ce vignoble septentrional sont différentes. Trambouze et al. (1998) ont mesuré cette même transpiration dans des conditions méditerranéennes et observent un flux compris entre 1,8 et 3,5 mm.j⁻¹. Ces valeurs sont plus conformes à celles simulées en MD les deux premières années (Tv comprise entre 1 et 3,5 mm.j⁻¹ entre le 15 mai et le 15 septembre environ) (*Annexe 7*). En MR, la transpiration journalière de la vigne est sensiblement la même qu'en MD jusqu'à la véraison avec des flux journaliers de l'ordre de 0,9 à 3,2 mm.j⁻¹ jusqu'à mi-septembre (*Annexe 7*). Par la suite, une contrainte hydrique modérée diminue sensiblement Tv jusqu'à la maturité. En MF1, les flux journaliers de Tv sont réduits tout au long du cycle de la vigne avec des transpirations journalières légèrement inférieures tout au long du cycle (entre 0,8 et 3 mm.j⁻¹). Ces écarts semblent essentiellement liés à une croissance de la surface foliaire de la vigne réduite très tôt dans le cycle (Cf. *Chapitre III*). En MF2 enfin, les valeurs simulées de Tv sont réduites assez tôt dans le cycle de la vigne et très fortement affectée par rapport aux autres modalités après la véraison (*Annexe 7*).

Une consommation d'eau par la vigne enherbée supérieure à celle d'une vigne désherbée en année sèche ?

En 2005 et 2006, la Tv simulée est sensiblement plus faible dans toutes les modalités du fait d'une sécheresse importante. Ces années là, une bonne infiltration des eaux de pluies devient cruciale car l'eau est très limitante. Ceci explique que la Tv simulée est supérieure en MF1, où le ruissellement est moindre, par rapport à toutes les autres situations (*Tableau 6.3*). En revanche, elle est la plus faible dans la placette MF2. Dans cette placette, la recharge observée a été très inférieure et l'ASWv a encore été diminuée par la transpiration de l'enherbement permanent. Ceci induit une contrainte hydrique subie par la vigne sensiblement supérieure dans cette placette. Cette contrainte est à l'origine d'une diminution de la croissance de la surface foliaire et d'une plus grande régulation stomatique de la transpiration. Le ruissellement paramétré est le même dans les deux situations de MF simulées mais la moins bonne recharge au cours de l'hiver est en partie prise en compte par l'optimisation de l'ASWv au 1^{er} janvier. L'essentiel des différences observées entre modalités se fait après les orages de l'automne qui s'infiltrent mieux en MF1 que dans les autres modalités. La contrainte hydrique est ainsi grandement levée en MF1 pour les deux espèces associées mais pas en MD. En conséquence, la transpiration de la vigne est très supérieure en MF1 (entre 0,8 et 1,8 mm.j-1) qu'en MD (entre 0,4 et 1 mm.j-1) jusqu'à la chute des feuilles (*Annexe 7*). Ainsi, d'après le modèle, la différence de contrainte hydrique subie entre MF1 et MD a lieu essentiellement après la vendange et est donc peu favorable à la production. Un orage plus précoce pourrait en revanche avoir un impact bien différent.

5. Discussion

5.1. Une représentation du fonctionnement dynamique du système satisfaisante malgré quelques limites

Une compartimentation qui représente bien le partage des ressources

Le décalage observé dans le cycle végétatif des deux espèces associées explique pour beaucoup la dynamique de partage des ressources au sein d'une vigne enherbée. Additionnée à un décalage spatial partiel des systèmes racinaires, elle légitime également la compartimentation mise en place pour simuler le fonctionnement hydrique du système (*Cf Chapitre V*). La simulation obtenue de l'ASW totale est très satisfaisante à la fois en valeur absolue et en dynamique. Ceci tend à démontrer que le compartiment total exploité par les différents systèmes étudiés a été correctement évalué. Un examen approfondi de la dynamique des stocks d'eau révèle cependant quelques limites. Ainsi, la surestimation quasi systématique de la contrainte hydrique subie par le couvert d'orge dans la modalité MR suggère soit que la TTSWh de celui-ci a été sous-estimée, soit que la transpiration de l'orge et/ou l'évaporation du sol nu dans ce compartiment sont surestimées. Les résultats présentés ici suggèrent plutôt une sous-estimation de la transpiration de l'orge (Jamieson et al. 1995; Kemanian et al. 2005) qui pourrait être la conséquence d'une sous-estimation de la TTSWh de l'orge. Ceci peut s'expliquer par un échantillonnage insuffisant particulièrement en début d'année. En effet, aucune mesure de sonde à neutrons n'étant disponible avant la fin du mois de mars, le calcul de la TTSWh ne prend pas en compte les consommations de l'enherbement plus tôt dans l'année et l'amplitude de cette TTSW a pu être sous-estimée. Ceci est particulièrement vrai dans la modalité avec un enherbement semi-permanent où la fréquence de mesure a été très inférieure et ceci expliquerait que cette TTSW soit la plus faible de tous les traitements étudiés. Cet assèchement prématuré du compartiment de l'herbe peut également être le fait d'une surestimation de

l'évaporation du sol nu dans ce compartiment. En effet, même si du sol nu apparaît dans le couvert intercalaire, laissant une surface sensible à l'évaporation, celle-ci n'est pas dans les conditions du sol nu désherbé puisque la hauteur de l'enherbement affecte la vitesse du vent et crée une couche limite à l'interface avec le sol différente de celle en conditions désherbées.

Une dynamique des contraintes hydriques convenable

Une bonne adéquation entre FTSW simulée par le modèle et FTSW observée dans le compartiment de la vigne est importante car elle est profondément liée à la croissance et à la production de la plante. Elle est également essentielle dans le compartiment de l'herbe pour pouvoir utiliser ce modèle pour évaluer la pérennité de l'enherbement notamment.

Globalement, la contrainte hydrique subie par la vigne entre le débourrement et la vendange est bien simulée dans chacune des modalités étudiées. Ceci est favorable à une bonne évaluation de l'impact du système de culture sur l'élaboration du rendement et de la qualité de la vendange. Une forte corrélation entre les classes de statuts hydriques simulés par le modèle et des variables liées aux composantes du rendement et de la qualité de la vendange a en effet déjà pu être observée (Gary et al. 2005; Pellegrino et al. 2006). Cette contrainte hydrique est cependant légèrement sous-estimée par le modèle, notamment en 2004 et dans les modalités enherbées. Cette année là, les précipitations ont été les plus importantes et les plus régulières au cours du cycle de la vigne leur efficacité est apparemment surestimée. Dans le même ordre d'idée, les contraintes hydriques subies par la vigne après la vendange, notamment après de gros orages, sont très fortement sous-estimées. Ceci a peu d'impact sur la simulation de la production de la vigne au cours de l'année mais peut s'avérer beaucoup plus gênant dans l'enchaînement de plusieurs cycles dans une même simulation. Cela peut également conduire à surestimer la mise en réserve de la vigne au cours de l'automne en cas de couplage du modèle de bilan hydrique avec un modèle de simulation du carbone et de l'azote.

La sous-estimation apparente de la TTSWh des modalités enherbées a conduit à surestimer bien souvent la contrainte hydrique subie par les enherbements. Ceci conduit nécessairement à sous-estimer la transpiration des deux couverts intercalaires et peut également être problématique pour évaluer la pérennité d'un couvert.

La simulation de certains flux reste à améliorer

Si peu de flux ont été directement mesurés au cours de cette étude, leur simulation semble en général satisfaisante. Ainsi, l'évaporation du sol nu représente entre le tiers et la moitié de l'évapotranspiration réelle, ce qui est assez conforme à ce qui a déjà été observé par d'autres auteurs au sein de vignobles (Lascano et al. 1992; Heilman et al. 1994). La dynamique journalière de l'évaporation est également similaire à ce qui a pu être mesuré au vignoble et d'autres études dans un climat comparable (Trambouze 1996).

La transpiration simulée de la vigne est également conforme à ce qui a pu être mesuré dans des conditions proches de celles de cette étude. Ce modèle a déjà prouvé son efficacité pour simuler correctement la transpiration d'un couvert de vigne en climat méditerranéen et une grande sensibilité du modèle au paramétrage du Km a été démontrée (Trambouze et Voltz 2001; Pellegrino et al. 2006).

Les ordres de grandeur de la transpiration des enherbements simulés sont faibles. Ceci pourrait s'expliquer en partie par la faible vigueur du couvert dans ce rôle d'enherbement. Ainsi, la biomasse produite par l'enherbement permanent est 5 à 10 fois inférieures à celle produite par cette même espèce en production fourragère (Lemaire et Salette 1981). En ce qui concerne la transpiration de l'orge, la surestimation quasi systématique de la contrainte hydrique a également contribué à sous-estimer ce flux. La courbe de croissance du Kh est

peut être également à revoir. La croissance de ce couvert a notamment été très importante au cours de l'automne 2003 où les conditions de levée ont été bonnes. Celle-ci a pu ainsi être sous-estimée par le modèle, ce qui induirait une sous-estimation également de la transpiration de l'orge sur cette période et pourrait expliquer la forte surestimation du remplissage du profil de sol au cours de cette même période.

De tous les flux simulés par le modèle, le ruissellement est certainement celui dont la simulation est la moins satisfaisante. En effet, si un ruissellement moindre est observé en présence d'un couvert herbacé (Le Bissonais et al. 2004; Moret et al. 2006), l'amélioration de la recharge du profil de sol au cours des événements pluvieux est clairement surestimée. Ce phénomène est particulièrement flagrant dans les situations enherbées à la fin de l'année 2003, dans des conditions il est vrai extrêmes (trois orages de 180 à 260 mm). Ainsi, la très forte intensité de ces événements pluvieux peut expliquer en partie les difficultés du modèle à représenter correctement le ruissellement à un pas de temps journalier. Ce flux est en effet très sensible à l'intensité instantanée de la pluie et vouloir le simuler au pas de temps journalier est problématique. De plus, l'établissement d'une courbe de réponse moyenne du ruissellement à l'intensité journalière des pluies pour les quatre années n'a pas permis de prendre en compte d'éventuelles variations.

Le rôle de la nappe dans la recharge du profil n'est également pas pris en compte par le modèle. Ainsi, la grande différence observée dans la recharge hivernale des placettes MF1 et MF2 ne peut être expliquée uniquement par une différence de quantité d'eau ruisselée. Une recharge par une remontée de la nappe au cours de l'hiver dans la placette du bloc bas a également été observée (Cf. Chapitre V). Ce phénomène n'est pas du tout pris en compte par le modèle et peut rendre une simulation pluriannuelle problématique. Certains auteurs ont également montré l'importance de cette nappe dans l'alimentation de la vigne, notamment en période sèche (Guix 2005). L'infiltration des pluies au cours de l'hiver est également surestimée pour prendre en compte cette recharge par le bas, ce qui conduit également à surestimer les pertes d'eau du système par drainage profond. Quelle que soit la modalité, ces pertes d'eau du système par drainage sont observées uniquement entre l'automne 2003 et le début du printemps 2004. Or, cette période a connu des précipitations assez exceptionnelles pour la région (plus de 1000 mm).

Les remontées capillaires, bien que faibles, peuvent avoir également un rôle important dans l'alimentation hydrique de la vigne en climat sec. Cependant, elles ne sont pas simulées directement dans le modèle de bilan hydrique présenté. Elles sont en revanche potentiellement prises en compte dans le découpage des compartiments réalisé et la détermination de la TTSW totale qui prend en compte la totalité de l'eau consommée par le système.

5.2. Mieux comprendre la dynamique de fonctionnement hydrique d'un système complexe

Une concurrence pour l'eau en défaveur de la vigne

Le décalage temporel existant entre les activités des espèces associées est également mis en évidence (*Annexe 7*). Ainsi, l'enherbement semi-permanent réalise entre 75 et 80% de sa transpiration annuelle entre le 15/10 et le 15/05. Cette proportion est comprise entre 65 et 70% pour l'enherbement permanent et inférieure à 5% pour la vigne. Par conséquent, il est évident que l'enherbement subit peu la concurrence entre les deux espèces contrairement à la vigne bien que les quantités d'eau transpirées par l'enherbement sont systématiquement moindres que celle transpirées par la vigne. L'essentiel de la transpiration de la vigne a de plus lieu au cours de la période sèche du climat

méditerranéen (plus de 60% entre le 15/06 et le 15/09). Ceci explique que la vigne soit incitée à explorer d'autres zones du sol inaccessibles pour l'enherbement (Willey 1990).

La bonne simulation des ASWv et FTSWv suggère que les TTSWv ont été correctement évaluées. Les TTSW totales calculées sont comparables entre les modalités enherbées et la modalité désherbée. Celle de la modalité MR est même inférieure mais pourrait être sous-estimée. Ainsi, dans un premier temps, l'implantation d'un enherbement prive la vigne d'une partie du stock d'eau qui lui était disponible. Cette privation représente 15 à 20% de la TTSW dans la modalité avec un enherbement semi-permanent et près de 25% avec un enherbement permanent composé de fétuque élevée. Par la suite, la sécheresse connue au cours de l'hiver 2004 à 2005 entraîne une faible recharge du profil. Celle-ci pousse la vigne à exploiter des horizons plus profonds. La présence de l'enherbement accentue encore cet approfondissement. Pour autant, la part du profil disponible pour le système exploitée par l'enherbement reste assez constante et augmente même avec l'enherbement permanent (jusqu'à un tiers de la TTSW totale est exploitée par l'enherbement permanent). Cet outil permet donc de confirmer la croissance racinaire compensatoire mise en place par la vigne (*Cf. Chapitre V*) (Miller 1986) et met en évidence le pouvoir concurrentiel de l'enherbement.

Evolution des états de surface et ruissellement

Les simulations réalisées sur les situations enherbées ont mis en évidence une sous estimation évidente du ruissellement dans ces modalités, particulièrement au cours des orages de l'automne. La relation entre précipitations journalières et ruissellement a été établie à partir de mesures expérimentales sur un dispositif qui montre quelques limites lors d'épisode orageux de forte intensité. Pour autant, une telle différence entre infiltration simulée et déduite des observations de stock d'eau est étonnante. Ainsi, l'outil met en évidence que le paramétrage d'une relation moyenne sur l'année entre précipitation et ruissellement entraîne un biais important. Celui-ci est lié en partie à l'humidité de surface qui affecte l'infiltrabilité du sol et évolue au cours de l'année (Mapfumo et al. 2004; Merz et al. 2006). Ce phénomène n'explique cependant qu'une part réduite de l'erreur puisque le ruissellement est par exemple correctement simulé en MD. L'état de surface de chaque modalité change également au cours de l'année et affecte ce ruissellement (Leonard et Andrieux 1998; Wassenaar et al. 2005; Merz et al. 2006). Or, le désherbage chimique pratiqué dans la modalité MD affecte peu cet état de surface. Ces changements d'état de surface dans la modalité MR sont évidents avec la destruction du couvert intercalaire suivi d'un travail du sol et finalement d'un nouveau semis. Ainsi, lors des orages post-vendanges, le couvert intercalaire de la modalité MR est peu couvrant puisque la levée est tout juste entamée ou le semis n'est pas même encore réalisé. Il est donc normal que le ruissellement observé soit important. Dans la modalité avec un enherbement permanent, le couvert intercalaire est présent toute l'année. Cependant, les orages arrivant après une longue période de sécheresse pendant laquelle l'enherbement cherche surtout à survivre (Volaire et Norton 2006), la couverture de l'inter-rang est fortement dégradée au moment où ces orages tombent. Ainsi, l'évolution des états de surface dans les modalités enherbées expliquent une bonne partie de la surestimation de l'infiltration au cours des épisodes pluvieux automnaux.

Une meilleure infiltration en situation enherbée favorable à l'enherbement

En 2003, la surestimation importante de l'infiltration des pluies à l'automne dans les modalités enherbées conduit le modèle à surestimer, a priori, les pertes d'eau par drainage profond. En 2004 également, l'infiltration des pluies semble surestimée au début de l'année et ceci conduit à sous estimer l'ASW initiale. Cette surestimation est surtout

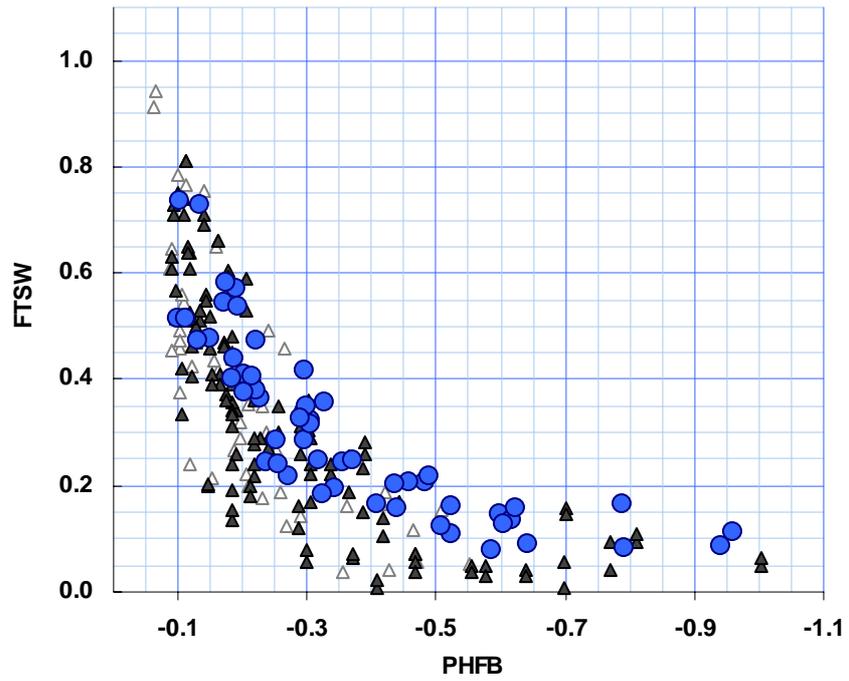


Figure 6.4 – Relation entre Potentiel hydrique foliaire de base (PHFB) et FTSW pour différentes localisations et cépages. Ces observations ont été réalisées en Alsace par Lebon et al. (2003) (▲), en Languedoc-Roussillon par Pellegrino et al. (2004) (△) et sur la parcelle expérimentale de Villeneuve-lès-Maguelone (●).

évidente dans le traitement enherbé toute l'année. Malgré cela, le ruissellement simulé dans cette modalité demeure nettement inférieur à celui de la modalité désherbée. Le drainage profond n'étant pas supérieur dans la modalité MF que dans la modalité MD, la meilleure recharge hivernale obtenue dans cette modalité a été utile au système. Clairement, cette eau supplémentaire sert principalement à recharger le profil de sol, plus sec à la fin du cycle de la vigne que dans un vignoble désherbé et plus encore à l'alimentation de l'enherbement. Ainsi, les pluies régulières de la fin de l'hiver et du début du printemps ne conduisent pas à un drainage important, malgré un profil déjà bien rechargé au début de l'année, mais permettent à l'enherbement de maintenir une activité transpiratoire et une croissance soutenues. Tournebize (2001) a ainsi montré que la présence d'un enherbement réduit de 40% le drainage dans un vignoble alsacien.

6. Conclusion - Peut-on améliorer le modèle et conserver sa simplicité ?

Le modèle exposé dans ce chapitre apporte une approche intéressante pour la modélisation du bilan hydrique d'une vigne enherbée. Il pourrait également être adaptée pour la modélisation du bilan hydrique d'autres associations de cultures en rang même s'il a été créé pour modéliser une vigne. La dynamique de contrainte hydrique subie par la vigne paraît correctement simulé malgré quelques imperfections, notamment en dehors du cycle de production de la plante. Des améliorations pourraient également être apportées simplement pour la simulation de la contrainte hydrique subie par l'enherbement puisque quelques mesures supplémentaires pendant la période de croissance de l'enherbement pourraient suffire. La dynamique du coefficient cultural de l'orge pourrait également être à revoir. Globalement, les efforts pour améliorer le modèle semblent devoir porter sur la prise en compte du ruissellement. Du fait de la pluviométrie du climat méditerranéen, les erreurs observées sont certes contenues pour l'essentiel en dehors de la période de croissance et de production de la vigne mais posent problème dans l'enchaînement de plusieurs millésimes au cours d'une même simulation. La méthode utilisée pour estimer le ruissellement au pas de temps journalier mérite cependant d'être approfondie car il serait difficile de simuler ce flux à un pas de temps inférieur. Une amélioration significative pourrait cependant être obtenue si l'évolution de l'état de surface pouvait être intégrée dans le modèle, notamment dans une modalité avec un enherbement semi-permanent. La prise en compte de l'humidité de l'horizon de surface serait également aisée et pourrait apporter une amélioration à la simulation du ruissellement.

Seule l'estimation de la TTSW a nécessité dans ce travail un dispositif lourd de mesure neutronique de l'humidité, difficile à mettre en œuvre au vignoble. Une méthode originale d'estimation de la TTSW a ainsi été proposée en utilisant la relation existant entre le potentiel hydrique foliaire de base et la FTSW (Lebon et al. 2003; Pellegrino et al. 2004). Cette méthode consiste à optimiser une valeur de TTSW à l'aide de l'évolution des potentiels de base mesurés (Pellegrino et al. 2006). La robustesse de la relation établie entre potentiel de base et FTSW est relativement confirmée par les mesures réalisées au cours de la présente étude (*Figure 6.4*). Pour autant, la grande dispersion existant pour des valeurs de FTSW peu négatives rend cette optimisation délicate et induit une très forte variabilité de la TTSW estimée pour une même situation d'une année sur l'autre. Si cette TTSW est susceptible d'évoluer au cours du temps (*Figure 5.3*), les variations de TTSW estimée d'une année sur l'autre paraissent exagérées. De plus, cette TTSW optimisée est généralement très différente de celle calculée par l'intermédiaire de mesures des évolutions du stock hydrique du sol. Tout ceci remet en question la validité de cette méthode.

Une fois les améliorations proposées apportées au modèle, celui-ci peut être un outil simple de représentation et de compréhension du fonctionnement hydrique du système

associant une vigne à un enherbement permanent. Sa simplicité et l'absence de calibrage nécessaire (Trambouze et Voltz 2001) en font également un outil intéressant dans l'évaluation *in silico* de stratégies de gestion de l'enherbement (Gary et al. 2006).

3^e Partie : Interactions entre les fonctionnements hydrique et azoté au sein d'une vigne enherbée en climat méditerranéen

Les deux chapitres contenus dans cette partie servent de support à la rédaction de deux articles destinés à la revue : Plant and Soil.

Chapitre VII - Association de cultures et dynamique de partage de l'azote au sein d'un milieu naturellement pauvre : exemple d'une vigne enherbée en zone méditerranéenne

1. Mots clés

Bilan azoté ; compétition ; contrainte ; dynamique ; enherbement ; *Festuca arundinacea* Shreb. ; flux ; *Hordeum vulgare* L. ; interactions eau-azote ; milieu méditerranéen ; minéralisation azotée ; *Vitis vinifera* L.

2. Introduction

L'enherbement des vignes est une pratique d'entretien des sols qui prend de l'importance dans de nombreuses régions viticoles. Elle apporte en effet une réponse à divers problèmes, agronomiques ou environnementaux, connus par la viticulture moderne. Elle permet notamment de juguler l'érosion hydrique dans les vignobles en pente (Battany et Grismer 2000; Le Bissonais et al. 2004) ou de maîtriser une vigueur excessive, généralement défavorable à une production viticole de qualité (Cf. Chapitres III et IV) (Smart et al. 1991), dans les zones fertiles. Pourtant, la crainte d'une trop forte concurrence hydrique entre l'enherbement et la vigne a fortement ralenti l'adoption de cette pratique dans la zone viticole méditerranéenne. Des études récentes ont montré que cette compétition pour l'eau ne suffisait pas toujours à expliquer les fortes diminutions de la croissance et de la production de la vigne après l'introduction d'un enherbement (Chantelot et al. 2004; Celette et al. 2005). Une compétition pour les ressources minérales du sol, l'azote en particulier, est ainsi envisagée mais l'impact de l'enherbement sur la dynamique azotée du système reste à creuser.

Les études portant sur la compétition pour les ressources du système (lumière, eau, minéraux) au sein d'une association de cultures sont nombreuses (Haynes 1980; Willey 1990; Sinoquet et Caldwell 1995; Tournebize et Sinoquet 1995; McIntyre et al. 1996; Van Noordwijk et al. 1996; Dupraz et al. 1998; Lehmann et al. 1998; Ozier-Lafontaine et al. 1998; Schroth 1999; Baumann et al. 2001; Berntsen et al. 2004; Cadisch et al. 2004; Dulormne et al. 2004; Ghosh 2004; De Costa et al. 2005; Corre-Hellou et al. 2006; Hauggaard-Nielsen et al. 2006). Pourtant, si la compétition pour la lumière, voire pour l'eau, sont maintenant assez bien connues (Black et Ong 2000), de nombreuses lacunes demeurent dans la compréhension des interactions entre les espèces associées pour les ressources minérales du sol. Ceci est surtout la conséquence de difficultés expérimentales et théoriques à l'étude de ces phénomènes (Ong 1995; Ozier-Lafontaine et al. 2000). Une meilleure compréhension des interactions pour les ressources du sol est pourtant considérée aujourd'hui comme essentielle pour une meilleure valorisation des ressources dans ce type de systèmes (Ong et Huxley 1996). L'étude du fonctionnement d'une vigne enherbée entre tout à fait dans ce cadre malgré quelques particularités.

Les vignes enherbées se caractérisent par un fort contraste entre les deux espèces associées et se rapprochent en cela d'un système agroforestier par exemple (Huxley et al. 1994; Lehmann et al. 1998; Montard (de) et al. 1998; Schroth 1999; Kho 2000; Ong et al. 2002; Bayala et al. 2004; Radersma et Ong 2004; De Costa et Surethran 2005). En effet, si dans un vignoble avec un enherbement permanent, les deux espèces sont pérennes, l'une est une espèce (ou un mélange d'espèces) herbacée tandis que l'autre est ligneuse. Cette caractéristique est importante à considérer pour étudier son alimentation azotée et carbonée

(Wermelinger et al. 1991; Keller et al. 1995; Gaudillère 1997; Zapata et al. 2004). Les deux composantes de l'association se distinguent également par leur capacité d'exploration racinaire, la vigne étant généralement capable d'explorer des horizons très profonds (Ionescu et al. 1978). Cette capacité lui permet ainsi de limiter partiellement la concurrence pour l'eau dans un sol profond mais vraisemblablement pas pour l'azote (*Cf. Chapitre V*) (Celette et al. 2005). Pour bien comprendre la gestion d'une vigne enherbée, il est également important de considérer que seule la production de la vigne est valorisée économiquement par le producteur. Or, la culture de la vigne se distingue de la plupart des cultures agricoles en cela qu'une production de qualité nécessite des contraintes modérées, variables au cours du cycle (*Cf. Chapitres III et IV*).

Cette dernière particularité conduit à une gestion qui vise à limiter l'accès de la vigne aux ressources nécessaires à sa croissance pour maintenir un équilibre délicat entre son développement végétatif et sa production de raisin. La gestion de la ressource hydrique demeure la plus sensible et fait l'objet de la plupart des études en agronomie viticole. (Ojeda et al. 2002; Ollat et al. 2002; Deloire et al. 2004; Deloire et al. 2005; Pellegrino et al. 2006). L'azote est également important puisque les impacts d'une contrainte azotée sont comparables à celle d'une contrainte hydrique (Schultz et Matthews 1988; Ussahatanonta et al. 1996). En conséquence, la gestion de l'alimentation azotée de la vigne permet au viticulteur d'agir sur l'équilibre entre croissance végétative et développement du fruit. Une fourniture d'azote excédentaire favorise la croissance végétative au détriment de la maturation de la baie (Delas 2000; Rodriguez-Lovelle et al. 2000b). A l'inverse, une contrainte azotée excessive rend les raisins peu fermentescibles et provoque une fermentation alcoolique languissante source de défauts olfactifs du vin (Ferrari 2002). La vigne se caractérise par des besoins en azote très faibles au cours du cycle, généralement considérés très inférieurs à $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Champagnol 1984; Williams 1987; Wermelinger et Koblet 1990; Schaller et al. 1991; Delas 2000; Tournebize 2001; Nendel et Kersebaum 2004; Thiebeau et al. 2005). Ceci conduit les viticulteurs à limiter, voire exclure, la fertilisation azotée des parcelles viticoles. En conséquence, les sols viticoles sont généralement pauvres en azote, en particulier dans la zone méditerranéenne. La production des enherbements, et donc leur consommation d'azote, est également très limitée par rapport à ce que produisent les mêmes espèces en conditions plus favorables. Tout ceci induit un système dans lequel les flux d'azote sont faibles, ce qui complique son étude.

Les parcelles viticoles de la région languedocienne font rarement l'objet d'une fertilisation azotée. En conséquence, la minéralisation de l'azote organique du sol est, de loin, la principale source d'azote minéral pour la plante. Il est donc important d'observer comment la modalité d'entretien du sol et la présence ou non d'un enherbement affecte ce flux au cours du temps. En conditions tempérées, la minéralisation brute de l'azote est essentiellement le résultat d'une dégradation biologique de la matière organique du sol réalisée par les macro et surtout micro-organismes du sol (Jarvis et al. 1996). La minéralisation nette de l'azote va être la résultante de cette minéralisation brute et de la réorganisation. Elle va donc fortement dépendre de l'activité des micro-organismes. L'humidité et la température du sol sont les principales variables qui affectent l'activité microbienne responsable de la minéralisation de l'azote organique du sol (Kirschbaum 1995; Rodrigo et al. 1997; Garnier et al. 2001; Paul et al. 2003; Kirschbaum 2006). Il est donc intéressant d'évaluer l'impact de la présence d'un enherbement sur ces deux facteurs.

Ce travail se propose d'évaluer, par l'intermédiaire de l'étude de certains flux du bilan azoté du système, comment l'enherbement modifie le fonctionnement azoté d'une vigne. L'objectif est d'essayer de comprendre comment ces modifications peuvent être source d'une contrainte azotée pour la vigne. Cette meilleure compréhension devrait ainsi permettre d'adapter la gestion du couvert intercalaire aux objectifs de production du

vigneron. Ce travail est également l'occasion d'évaluer la compartimentation proposée pour la représentation du fonctionnement hydrique d'une vigne enherbée (Cf. Chapitre VI) par rapport au fonctionnement azoté. En effet, la productivité de chaque espèce du système dépend de sa capacité à capturer les ressources dans le système, ce qui peut se faire au détriment des autres composantes de l'association. L'importance de la concurrence pour les ressources pour chaque espèce est la résultante des décalages et recouvrements qui existent entre les cycles d'activité des espèces associées (Willey 1990). Elle est aussi pour beaucoup la conséquence de la répartition des systèmes racinaires et de leur éventuel chevauchement (Singh et al. 1989; Jose et al. 2004). Sillon et al. (2000) soulignent l'importance de bien définir les zones d'exploitation racinaire de chaque espèce pour mieux décrire le fonctionnement du système. Une telle division a déjà été proposée pour l'exploitation de la ressource en eau et sa modélisation (Cf. Chapitres V et VI) mais elle doit encore être testée pour l'azote. Ce travail essaye notamment d'apporter les éléments nécessaires à la définition de ce que peut être une représentation simple et valable des fonctionnements à la fois hydrique et azoté du système. Pour cela, ce chapitre présente des résultats originaux obtenus au travers d'une expérimentation de trois années réalisée dans la zone viticole méditerranéenne. Cette étude s'appuie sur trois modalités d'entretien du sol apportant différents niveaux de concurrence pour l'azote.

3. Matériel et Méthodes

3.1. Site expérimental

L'expérimentation a été menée entre 2004 et 2006 sur une parcelle du Domaine du Chapitre situé près de Montpellier (43°31' N-3°51' E). Ce site se situe donc dans l'arc méditerranéen du vignoble français. La région se caractérise par un climat méditerranéen avec des précipitations moyennes annuelles d'environ 750mm et un déficit moyen sur l'année de 174mm pour la période 1975-2007. Ce déficit hydrique moyen est supérieur pour les mois d'Avril à Octobre (cycle végétatif de la vigne) sur cette même période. Les conditions climatiques de l'expérimentation sont représentées dans la *figure 2.3*.

Le sol de la parcelle d'étude est un sol brun calcaire, profond et homogène. Sa texture est argileuse selon le diagramme modifié de classification des textures de Jamagne (1967). Les vignes (*Vitis vinifera* L. cv. Aranel/Fercal) ont été plantées en 1998 à une densité de 3333 souches.ha⁻¹ (2,5 m x 1,2 m). Elles sont conduites selon une taille en double cordons de Royat et rognées à une hauteur de canopée de 1 m environ. Les rangs de vignes sont orientés W-NW/E-SE. Les modalités d'entretien du sol considérées sont les modalités enherbées (MR et MF), la modalité désherbée (MD), ainsi que, pour certains éléments, la modalité Témoin (MT) présente pour les années 2005 et 2006. Comme nous l'avons déjà vu, chaque traitement étudié (hors MT) contiennent deux placettes situées dans la parcelle en fonction de la position par rapport à la pente.

3.2. Expérimentation de terrain

3.2.1. Croissance végétative et élaboration du rendement de la vigne

Surface foliaire de la vigne

La surface foliaire de la vigne a été évaluée *in situ* pour chacune des placettes à l'aide d'un LAI-2000 (Plant canopy analyser, Li-Cor Inc.). Cette mesure a été réalisée du débourrement de la vigne à la vendange à raison d'une mesure tous les 15-20 jours (Cf. Chapitre III -4.4.).

Biomasse aérienne produite par la vigne

Une fois par mois environ, entre le débourrement et la vendange, la matière sèche de 16 rameaux par placette d'étude a été pesée. Les biomasses représentées par le bois, les feuilles et le fruit ont été distinguées (Cf. *Chapitre III –4.4.*).

Rendement en raisin produit à la vendange

Chaque année, le rendement a été mesuré au moment de la vendange pour une douzaine de souches par placette (Cf. *Chapitre IV –4.3.*).

Poids de bois de taille de la vigne

Chaque hiver, le poids de bois de taille a été mesuré sur ces mêmes souches (Cf. *Chapitre III –4.4.*).

3.2.2. Croissance de la culture intercalaire et consommation d'azote

La croissance de la culture intercalaire renseigne sur l'importance de la compétition pour les ressources. Elle a donc été suivie au cours des 3 années d'expérimentation. Deux types de mesures ont été réalisées : la production de biomasse aérienne cumulée sur l'année et le taux de couverture de la surface enherbée pour chacun des enherbements étudiés (Cf. *Chapitre III –4.2.*). Les prélèvements sont réalisés une fois à l'automne puis à partir du mois de mars tous les 15-20 jours environ pour un total de sept à huit prélèvements par an. Huit prélèvements par placette sont réalisés à chaque fois.

3.2.3. Les termes du bilan hydrique

Toutes les mesures réalisées pour caractériser les différents termes du bilan hydrique des systèmes de culture associée étudiés ont été précisées dans le *Chapitre V*.

3.2.4. Caractérisation du fonctionnement azoté

Stock d'azote minéral du sol

Chaque année, des prélèvements de carottes de sol sont réalisés afin de doser la teneur en azote minéral (N-NO₃ et N-NH₄ séparément) des horizons 0-0,1 m, 0,1-0,3 m et 0,3-0,6 m dans les différentes placettes étudiées. L'horizon 0,6-1 m est également suivi une fois au début et à la fin du cycle de la vigne. Deux dosages sous le rang et deux sous l'inter-rang sont réalisés par horizon dans chaque placette. Chaque échantillon dosé est lui-même le mélange de deux prélèvements de sol afin de limiter l'impact de la variabilité spatiale des teneurs en azote du sol, souvent très importante (Bundy et Andraski 2004; Russow et Böhme 2005). Ce dosage de l'azote minéral permet ainsi de calculer le stock d'azote minéral contenu dans les premiers horizons de sol en fonction de la modalité étudiée. Ces prélèvements sont réalisés principalement entre le débourrement et la récolte, à raison d'une date de prélèvement par mois environ.

Stocks de carbone et azote organiques du sol

Les teneurs en matières organiques, carbone organique, azote total des horizons 0-0,1 m ; 0,1-0,3 m ; 0,3-0,6 m et 0,6-1 m sont mesurées sur des échantillons de sol de chacune des placettes des traitements MF, MR et MD. Pour cela, les prélèvements réalisés en début d'année pour la détermination de la teneur en azote minéral du sol sont mis à profit pour collecter des échantillons de sol. Pour chaque placette, chacun des dosages cités est réalisé sur deux échantillons de sol pour chaque horizon. Chacune de ces teneurs est déterminée en laboratoire par combustion sèche. Le rapport C/N est également calculé.

Suivi de la température de l'horizon de minéralisation de l'azote organique

Pour chaque placette des traitements MF et MD, des thermocouples sont installés à une profondeur d'environ 0,2 m pour mesurer en continu la température du sol de l'horizon considéré comme actif pour la minéralisation de l'azote organique (Mary et al. 1999). Pour chacune des placettes, deux thermocouples sont installés sous le rang et deux sous l'inter-rang.

Mesure in situ de la minéralisation de l'azote organique du sol

La minéralisation de l'azote organique du sol a été déterminée par la méthode des incubations *in situ* en cylindres (Raison et al. 1987). Un dosage de l'azote minéral par extraction au KCl est réalisé au début de l'incubation, un autre à la fin et la différence représente la quantité nette d'azote minéralisé, sous réserve que l'échantillon est libéré des pertes d'azote minéral par lixiviation ou par prélèvements racinaires des plantes. Pour cela, des cylindres de PVC de 0,35 m de longueur et 0,08 m de diamètre sont enfoncés progressivement par pression hydraulique afin de ne pas perturber l'organisation du sol. Chaque cylindre est enfoncé sur 0,3 m de profondeur et dépasse donc de 0,05 m environ. Le cylindre est ensuite recouvert de deux feuilles de plastique transparentes afin de permettre à lumière de rentrer mais d'empêcher la pluie de le faire. Celle-ci pourrait en effet lixivier une partie de l'azote minéral et ainsi fausser la mesure. Le dépassant est ensuite perforé de 4 trous (5 mm de diamètre) pour permettre un renouvellement de l'air à l'intérieur du cylindre afin que les conditions d'incubation soient les plus proches possibles de celle de l'extérieur. Ces perforations sont réalisées à au moins 0,02 m de la surface du sol afin d'éviter que l'eau ruisselée en surface lors d'un événement pluvieux puisse pénétrer dans le cylindre et entraîner de la lixiviation. Pour chaque période de suivi, six paires de cylindres ont été enfoncés dans chaque placette suivie sur deux inter-rangs différents. Le sol contenu dans chaque paire de cylindres est mélangé avant que l'azote minéral de cet échantillon ne soit dosé en laboratoire par extraction au KCl. Des cylindres ont été installés à deux périodes au cours de l'année 2005 pour mesurer directement la minéralisation nette de l'azote au champ et évaluer une vitesse de minéralisation réelle (V_m) pour les modalités enherbées (MF et MR) et la modalité désherbée.

Consommation d'azote minéral par les espèces végétales associées

A chaque prélèvement pour déterminer la biomasse aérienne produite par la vigne, la teneur en azote de chaque compartiment distingué (bois, feuille, fruit) a été déterminée à raison de deux échantillons, composés de huit rameaux, par placette de suivi (Cf. *Chapitre III – 4.4.*). De la même manière, la teneur en azote de la biomasse aérienne produite par l'enherbement est dosée sur deux échantillons par placette composé de quatre prélèvements chacun (Cf. *Chapitre III – 4.2.*).

3.2.5. Indicateurs de contrainte hydrique

La FTSW a été utilisée pour servir d'indicateur du statut hydrique de chacun des systèmes étudiés. Elle est calculée à partir des mesures neutroniques (Cf. *Chapitre V – 4.2.1.*) réalisées entre 2004 et 2006. Les potentiels de base (Ψ_b) ont également été mesurés au cours des 3 années étudiées (Cf. *Chapitre III – 4.2.*) et peuvent être transformés en FTSW selon la relation proposée par Lebon et al. (2003) et Pellegrino et al. (2004). Enfin, la mesure du rapport isotopique $\Delta^{13}C$ sur les produits carbonés du jus de raisin nous renseigne sur la contrainte hydrique subie par la vigne au cours de la période de maturation du raisin. Il a été mesuré chaque année (Cf. *Chapitre III – 4.2.*).

3.2.6. Indicateurs de contrainte azotée

Chaque année, l'indice chlorophyllien des vignes de chacune des placettes d'étude a été suivi à l'aide d'un chlorophylle-mètre (Cf. Chapitre III –4.2.). Cet indice, bien corrélé au statut azoté de la plante (Ercoli et al. 1993; Baret et Fourty 1997; Spring et Zufferey 2000), a été suivi chaque année entre le mois de juin et la vendange.

Les teneurs en azote massiques des feuilles de vigne sont régulièrement dosées pour chacune des placettes de suivi (Cf. Chapitre III –4.2.). Ces teneurs en azote peuvent ensuite être transformées en teneur en azote surfacique à l'aide des mesures de surfaces foliaires réalisées (Cf. Chapitre III –4.2. et 4.4.).

De plus, la teneur en azote des moûts a été mesurée pour chacune des placettes (Cf. Chapitre IV –4.4.).

Enfin, la teneur en azote des bois de taille a été déterminée chaque hiver sur six ceps par modalité (Cf. Chapitre III –4.4.).

3.3. Détermination de la vitesse de minéralisation de l'azote organique du sol

Plusieurs modèles de minéralisation de la matière organique du sol et de l'azote en particulier ont été développés. Certains lient température et humidité de l'horizon de minéralisation à la transformation de l'azote organique en azote minéral (Mary et al. 1999; Garnier et al. 2001; Garnier et al. 2003). On considère que la minéralisation de l'azote organique du sol est réalisée dans les trente premiers centimètres de sol. La vitesse de minéralisation journalière peut alors être calculée sous la forme :

$$V_m = f(T)f(\theta)V_p \quad [7.3.3. a]$$

Avec V_m : la vitesse de minéralisation journalière réelle

$f(T)$: le facteur lié à la température

$f(\theta)$: le facteur lié à l'humidité

V_p : la vitesse de minéralisation potentielle

Dans notre cas, le facteur dépendant de la température ($f(T)$) suit un modèle de type Van't Hoff (ou loi de Q_{10}) d'après la formulation proposée par Recous et al. (1995) et reprise par Garnier et al. (2001). Il est de la forme :

$$f(T) = e^{b_T(T - T_{ref})} \quad [7.3.3. b]$$

Le paramètre b_T est considéré variable avec la température pour la minéralisation de la matière organique fraîche et constant pour la minéralisation de la matière organique humifiée (Garnier et al. 2001). Dans notre système, les apports de matières organiques fraîches sont relativement limités puisqu'ils concernent essentiellement les feuilles de vigne après leur abscission, la part d'herbe fauchée à chaque tonte et le turn-over racinaire. Or, mis à part cette dernière source d'azote, les feuilles et les produits de la fauche ne sont pas incorporés dans le sol. En conséquence, la décomposition est plus lente et une part non négligeable de ces résidus est entraînée par le ruissellement et le vent avant de pouvoir être entièrement décomposés. Nous considérons donc que l'essentiel de l'azote fourni par la minéralisation de l'azote organique provient de la matière organique humifiée (Justes, comm. pers.). C'est pourquoi, nous considérons finalement une constante d'action $b_T = 0,115 \text{ K}^{-1}$ pour une température supérieure à 0°C .

Le facteur humidité a été calculé sous la forme proposée par Mary et al. (1999) :

$$f(\theta) = (1-c) \frac{\theta - \theta_{PFP}}{\theta_{CC} - \theta_{PFP}} + c \quad [7.3.3. c]$$

Avec θ : la teneur en eau volumique au jour j

θ_{CC} : la teneur en eau volumique à la capacité au champ

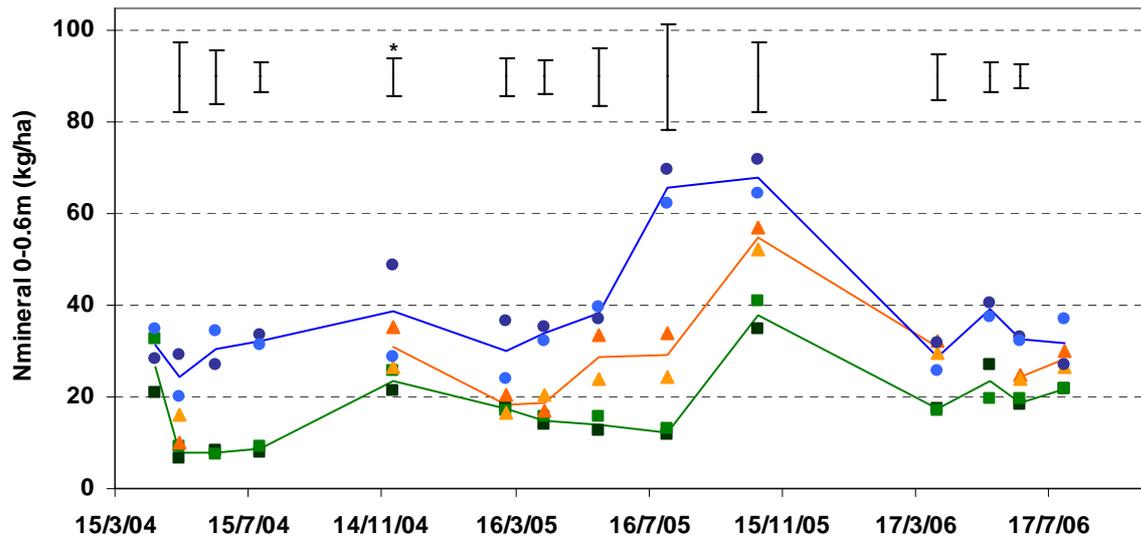


Figure 7.1 – Evolution des stocks d’azote minéral pour l’horizon de sol 0-0,6m en fonction du traitement considéré. Les lignes continues représentent l’évolution du stock d’azote minéral pour chacune des modalités d’entretien du sol. Les points correspondent aux stocks mesurés pour chacune des placettes : MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲), MR2 (▲), MD1 (●) et MD2 (●). Les barres d’erreur situées en haut du graphique représentent les ppas calculées à partir d’une ANOVA et d’un test de Newman-Keuls avec un risque $\alpha=0,05$. Un * au dessus de la barre d’erreur signale une interaction entre modalité et position par rapport à la pente.

θ_{PFP} : la teneur en eau volumique au point de flétrissement permanent

c : le taux de minéralisation pour une humidité au point de flétrissement permanent.

Ainsi, $f(\theta)$ est un facteur normalisé dont la valeur est considérée maximale pour une humidité à la capacité au champ. On considère donc que la minéralisation est maximale pour cette teneur en eau.

Une fois les facteurs $f(T)$ et $f(\theta)$ calculés, il est possible de calculer la vitesse de minéralisation potentielle (V_p) pour une température de référence de 15°C et une humidité de référence à la capacité au champ, grâce aux mesures directes de la vitesse de minéralisation réalisées sur les différentes modalités. Cette mesure ayant été impossible dans la modalité MF au printemps (surface trop sèche) et dans la modalité MR en fin d'hiver (risque de piétiner le semis d'orge), nous considérons finalement une V_p unique pour les deux modalités enherbées.

4. Résultats

4.1. Dynamique des stocks d'azote minéral dans le sol

4.1.1. Evolution du stock d'azote minéral du sol

Le stock d'azote minéral sur l'horizon 0-0.6 m témoigne d'une relative pauvreté du milieu en azote, en comparaison d'autres cultures fertilisées. Ceci s'explique par le fait que la principale source d'azote minéral est la minéralisation du sol, aucun apport de fertilisant n'étant réalisé. Pour les trois modalités d'entretien du sol, le stock d'azote minéral de ces 60 premiers centimètres est relativement stable au cours du temps et inférieur à 40 kg.ha⁻¹, à l'exception de la fin de l'été et de l'automne de l'année 2005 où les stocks d'azote minéral disponible augmentent sensiblement dans les trois modalités (*Figure 7.1*).

Le stock d'azote minéral de la modalité désherbée demeure systématiquement supérieur à celui de la modalité enherbée. Cette différence est d'ailleurs significative sur les trois années d'expérimentation. Seuls, les stocks mesurés au débourrement de l'année 2004 et à la récolte de l'année 2006 ne permettent pas de mettre en évidence une différence significative. Le stock de la modalité MR se maintient généralement à des valeurs intermédiaires et il est équivalent à celui de la modalité MF au printemps, lorsque la consommation de l'orge est maximale.

Si l'on considère le stock d'azote minéral moyen au cours de la période de croissance végétative de la vigne, on observe que celui-ci est relativement constant entre les trois années considérées dans la modalité désherbée (MD) avec une valeur moyenne comprise entre 30 et 40 kg.ha⁻¹. Dans la modalité enherbée toute l'année (MF), ces niveaux sont nettement inférieurs et différents entre les années avec un stock moyen d'environ 10 kg.ha⁻¹ en 2004, 15 à 20 kg.ha⁻¹ en 2005 et 20 kg.ha⁻¹ en 2006 (*Figure 7.1*). Les différences entre haut et bas de pente sont rarement significatives dans tous les traitements étudiés.

4.1.2. Dynamique spatiale des teneurs en azote minéral du sol

Une observation plus fine de la dynamique de l'azote dans les différents horizons de sol et entre le rang et l'inter-rang permettent d'affiner encore ces observations (*Figure 7.2*).

En situation désherbée (MD)

En l'absence de tout enherbement, il est difficile de distinguer les teneurs en azote minéral des horizons de sol compris sous le rang de celles sous l'inter-rang (*Figure 7.2*). On observe un appauvrissement modéré des horizons de sol en dessous des dix premiers

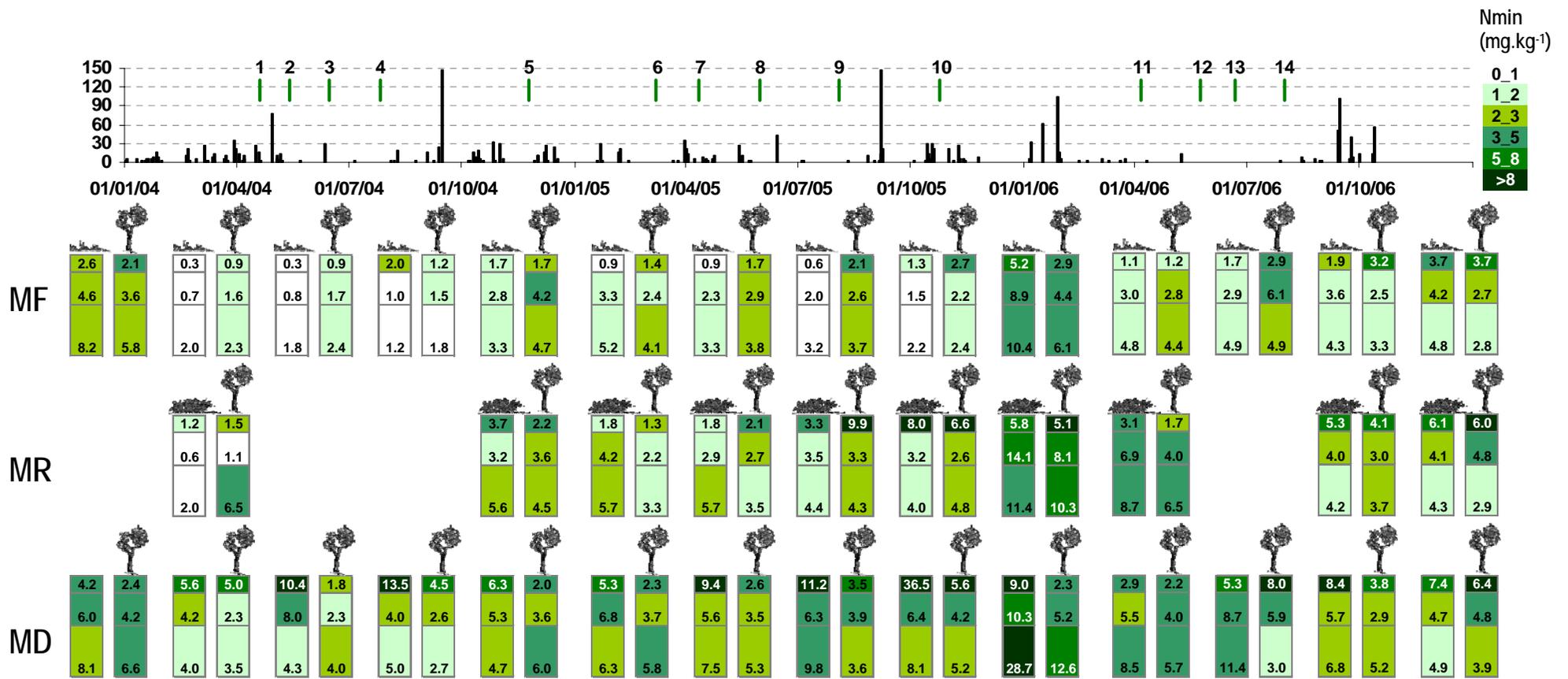


Figure 7.2 – Evolution des profils du stock d'azote minéral en fonction du traitement étudié. Rang et inter-rang sont différenciés. Les nombres représentent le stock d'azote minéral contenu dans chacun des compartiments étudiés (en kg.ha⁻¹). Les couleurs représentent les différences de teneurs en azote minéral pour chacun des compartiments (en mg N.kg⁻¹ de sol).

centimètres de sol au cours du printemps tandis que la vigne croît et que la minéralisation ralentit avec l'assèchement de ces horizons superficiels. Cet appauvrissement reste cependant très modéré et est rapidement compensé par la reprise de minéralisation à l'automne. L'horizon 0-0,1 m présente un comportement légèrement différent puisqu'il s'enrichit en azote, notamment sous l'inter-rang, au cours du printemps. Ceci peut s'expliquer par une minéralisation légèrement supérieure à cette profondeur et surtout par une quasi absence de racines de vigne dans cette zone (*Tableau 4.2*). Cet azote minéral est de plus inaccessible à la vigne lorsque l'évaporation du sol assèche cet horizon et diminue le potentiel hydrique du sol à des valeurs pour lesquelles toute consommation d'azote est rendue très difficile. En conséquence, une forte quantité d'azote se concentre dans cette zone au cours de l'été 2005 et la teneur en azote minéral observé sous l'inter-rang désherbé dans cet horizon dépasse même les 30 mg N.kg⁻¹ de sol. Au cours de l'automne qui suit, caractérisé par de fortes précipitations, une grande quantité d'azote présente dans tout le profil est observée. On peut cependant noter que la quantité d'azote présente dans l'horizon de surface sous l'inter-rang a fortement diminué, tandis que l'horizon le plus profond (0,3-0,6 m) se remplit rapidement (*Figure 7.2*). Cette observation suggère une lixiviation importante de l'azote au cours de cette période. Cependant, celle-ci n'est pas préjudiciable pour la vigne, puisque cet azote minéral descend dans des horizons encore explorés par son système racinaire. Le profil d'azote minéral suivant montre que ces horizons de surface ont été fortement appauvris au cours de l'hiver (*Figure 7.2*). La vigne n'étant pas active au cours de l'hiver, ces pertes d'azote minéral dans les horizons de surface sont probablement liées à une lixiviation importante de l'azote du fait des précipitations de cette période.

Dans la modalité enherbée toute l'année (MF)

Les horizons de sol compris sous l'inter-rang enherbé toute l'année (MF) sont fortement appauvris en azote minéral à partir du printemps de l'année 2004 et les teneurs en azote sont généralement inférieures dans ces horizons à 1mg d'azote par kg de sol au cours du cycle de la vigne. L'année 2006 présente cependant des teneurs légèrement supérieures dans cette zone mais toujours très faibles. Les horizons de sol situés sous le rang sont également plus pauvres dans la modalité MF que dans la partie désherbée (*Figure 7.2*). Ceci peut s'expliquer autant par une consommation, probablement modérée, de l'azote de cette zone par la fétuque élevée que par une consommation plus intensive de cette ressource par la vigne. Ceci explique que les teneurs en azote observées sont généralement inférieures à 3 mg N.kg⁻¹ de sol. Le profil observé à l'automne 2005 fait cependant exception avec des teneurs généralement supérieures à ce seuil. Ceci s'explique simplement par les précipitations régulières de cette période (*Figure 7.2*) qui permettent au sol de se recharger en eau et dynamisent la minéralisation de l'azote organique, les températures du sol étant encore favorables puisque nettement supérieures à 15°C. De plus, l'azote minéral produit n'est alors quasiment pas consommé puisque la vigne est en dormance et que la fétuque a une croissance modérée à ce moment là.

Avec un enherbement semi-permanent (MR)

Comme dans la modalité MF, un appauvrissement général des horizons de sol sous l'inter-rang est perceptible au printemps (*Figure 7.2*). Celui-ci demeure cependant plus modéré qu'avec un enherbement permanent. A partir de fin mai, les teneurs en azote minéral des horizons de surface remontent dans les horizons de surface sous l'inter-rang, particulièrement dans les premiers 10 cm de sol. Le phénomène contraire est observé dans les horizons de sol sous le rang de vigne avec un enrichissement en azote minéral des premiers 0,6 m de sol jusqu'à la fin du mois de mai, puis un appauvrissement important de ces mêmes couches de sol à la fin du printemps et au début de l'été (*Figure 7.2*). Les

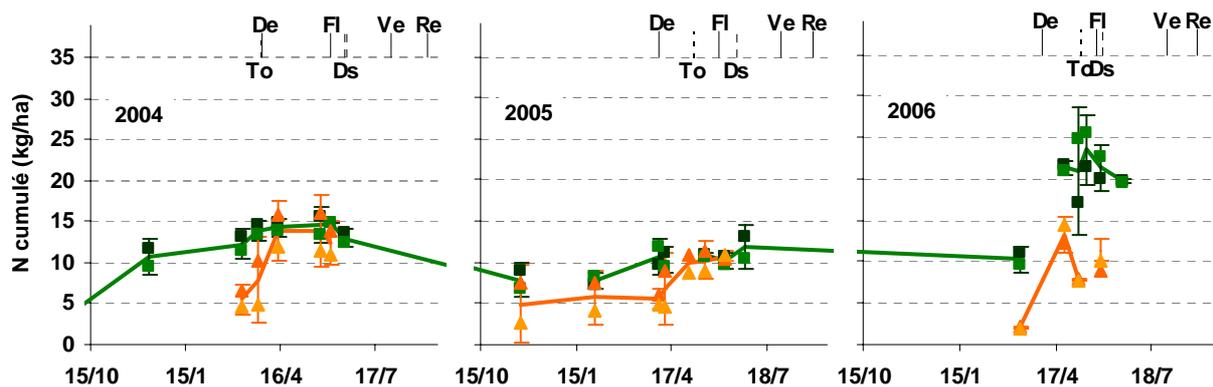


Figure 7.3 – Quantité d’azote accumulé dans les parties aériennes des enherbements pour les trois années étudiées. Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲) et MR2 (▲). Les barres verticales continues situées en haut du graphique représentent les principaux stades phénologiques de la vigne. Débourrement (De), Floraison (Fl), Véraison (Ve) et Récolte (Re). Les barres verticales en pointillé représentent les principaux travaux réalisés sur l’enherbement : la tonte (To) et la destruction de l’enherbement semi-permanent (Ds). Les intervalles de confiance des différentes modalités ont été calculés par un Test de Student avec $\alpha=0.05$. Ils sont représentés par des barres encadrant les courbes.

profils observés au cours de l'automne et de l'hiver montrent un fonctionnement assez comparable à ceux des deux autres modalités au cours de cette période avec un enrichissement important des horizons de surface au cours de l'automne, lorsque les conditions sont favorables à la minéralisation de l'azote organique du sol puis des pertes d'azote importantes avec les précipitations de l'hiver du fait, vraisemblablement, d'une importante lixiviation vers des horizons plus profonds.

4.2. Croissance des cultures intercalaires et consommation d'azote

La vigne et les cultures qui lui sont associées ont des cycles d'activité et une croissance décalés dans le temps (Cf. Chapitre III). Cette croissance dépend fortement des conditions du milieu, ce qui explique qu'elle a été très différente entre les trois années étudiées. L'observation des quantités d'azote accumulées (en cumulé au cours de l'année) dans les parties aériennes des deux enherbements témoignent d'une très faible quantité d'azote consommée par ces deux espèces (Figure 7.3). En effet, celles-ci ne dépassent jamais 20 à 25 kg.ha⁻¹ pour l'enherbement permanent et à peine une quinzaine de kg.ha⁻¹ pour l'orge. En 2004, la quantité d'azote cumulée dans les parties aériennes de l'enherbement permanent (MF) est supérieure à celle contenue dans l'enherbement semi-permanent (MR) jusqu'au débourrement de la vigne environ (fin mars). Cette différence est liée essentiellement à une plus grande consommation d'azote par l'enherbement permanent au cours de l'automne, au moment où l'orge commence seulement à s'installer. Au cours de l'année 2004, cette différence entre les deux enherbements disparaît au début du printemps tandis que l'orge consomme près de 10 kg N.ha⁻¹ en un mois environ (Figure 7.3). La tonte de l'enherbement permanent réalisée au même moment semble avoir tempéré la consommation d'azote par la fétuque élevée. Les quantités d'azote prélevées sur une année par les deux enherbements sont donc assez comparables (15 kg N.ha⁻¹) mais la dynamique est différente entre les deux modalités. Le même cas de figure se présente en 2005 avec une consommation automnale comparable entre les deux enherbements mais un redémarrage de l'enherbement permanent un peu plus précoce à la fin de l'hiver (Figure 7.3). La tonte de l'enherbement permanent réalisée peu après (début mai) stoppe plus ou moins l'accumulation d'azote minéral dans les parties aériennes de la fétuque et les conditions défavorables pour la croissance ont le même effet sur l'orge. En conséquence, la quantité d'azote consommée par les deux enherbements est à nouveau comparable et très faible (à peine 10 kg.ha⁻¹). En 2006, la croissance de l'enherbement permanent au cours de l'automne est très supérieure à celle de l'orge (Figure 3.2) du fait d'une levée difficile de cette dernière. En conséquence, l'enherbement permanent consomme significativement plus d'azote minéral au cours de cette période, ce qui explique une quantité d'azote accumulée dans ses parties aériennes supérieures à celle accumulée dans l'enherbement semi-permanent au début du printemps. Par la suite, les consommations des deux enherbements sont assez comparables et l'écart significatif qui existe pour les quantités d'azote accumulées dans les deux enherbements se maintient (Figure 7.3). En conséquence, l'enherbement permanent consomme significativement plus d'azote en 2006 que ne le fait l'enherbement semi-permanent.

Les différences de consommation de l'azote par les enherbements entre les blocs haut et bas ne sont jamais significatives avec un risque $\alpha=0,05$ (Figure 7.3).

4.3. Croissance de la vigne et consommation d'azote

La présence d'un enherbement affecte profondément la croissance de la vigne et des différences significatives ont ainsi pu être observées entre modalités (Figure 3.7). Ces différences de croissance induisent une accumulation d'azote variable dans les parties

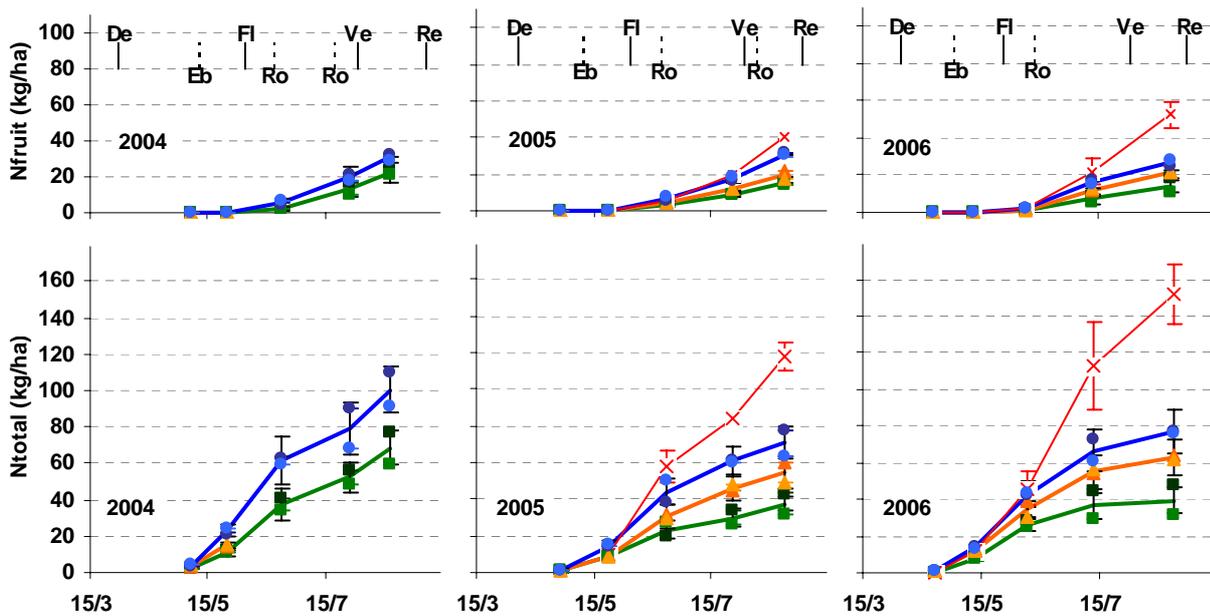


Figure 7.4 – Quantité d’azote accumulée dans les parties aériennes de l’année de la vigne en fonction de la modalité étudiée. Le panneau du bas représente la quantité totale d’azote accumulée et le panneau du haut la quantité d’azote cumulée dans le fruit. Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲), MR2 (▲), MD1 (●), MD2 (●) et MT (×). Les barres verticales continues situées en haut du graphique représentent les principaux stades phénologiques de la vigne. Débourrement (De), Floraison (Fl), Véraison (Ve) et Récolte (Re). Les barres verticales pointillées représentent les principaux travaux réalisés sur le feuillage : Ebourgeonnage (Eb) et Rognages (Ro). Les intervalles de confiance des différentes modalités ont été calculés par un Test de Student avec $\alpha=0.05$. Ils sont représentés par des barres encadrant les droites.

aériennes de la plante en fonction de la modalité étudiée. Globalement, les consommations d'azote par la vigne s'échelonnent, selon les modalités et l'année considérée, entre 35 et 100 kg.ha⁻¹ (hors MT) (*Figure 7.4*). Cet ordre de grandeur se situe dans la gamme de consommation d'azote par la vigne qui a pu être observée par d'autres auteurs sur différents cépages et dans diverses régions (Williams 1987; Williams et Biscay 1991; Tourné 2001; Thiebeau et al. 2005). La modalité enherbée toute l'année (MF), avec des consommations annuelles comprises entre 35 et 60 kg.ha⁻¹ se situe plutôt dans la gamme basse à moyenne, tandis que la modalité désherbée (MD) avec des consommations comprises entre 70 et 100 kg.ha⁻¹ correspond plutôt à des consommations élevées (*Figure 7.4*). La modalité avec un enherbement semi-permanent (MR) se caractérise par des valeurs intermédiaires (50 à 60 kg.ha⁻¹). La modalité témoin (MT) présente en revanche des consommations très supérieures à ce qui est généralement observé dans la littérature avec des accumulations d'azote comprises entre 120 et 150 kg.ha⁻¹ (*Figure 7.4*). Ces dernières valeurs, très élevées pour l'espèce, ont pu être obtenues avec une conduite inadaptée à la production d'une vendange de qualité (irrigation et fertilisation excessives). Ceci explique que de telles valeurs n'aient pas été déjà mesurées dans d'autres études.

Plusieurs auteurs ont montré que le départ en végétation de la vigne est assuré par les réserves azotées pérennes de la vigne (Conradie 1980; Conradie 1986; Wermelinger et al. 1991). L'accumulation d'azote dans les parties aériennes au tout début de la croissance de la vigne est donc encore faible. Ceci explique que l'accumulation d'azote observée dans les parties aériennes de l'année soit très modérée entre le débourrement et mi-mai. L'accumulation d'azote mesurée avant la floraison est comprise entre 10 et 20 kg.ha⁻¹ selon la modalité et l'année considérées (*Figure 7.4*). Ces valeurs sont plutôt supérieures à ce qui a pu être observé par d'autres auteurs (Conradie 1980; Thiebeau et al. 2005). Par la suite, la consommation d'azote semble s'accélérer fortement aux environs de la floraison de la vigne avant de ralentir à nouveau, fin juin, suite au rognage et à l'arrivée de conditions plus défavorables pour la croissance. L'accumulation d'azote dans les parties aériennes de la vigne est ensuite généralement faible au cours des deux mois d'été et l'essentiel de l'azote consommé à partir de la fin du mois de juin est accumulé dans les fruits (*Figure 7.4*). Cette dynamique de consommation de l'azote est valide dans toutes les situations étudiées. Pour autant, quelques différences apparaissent entre les années et suivant les traitements. Ainsi, l'accumulation d'azote se poursuit à un rythme relativement soutenu jusqu'à la récolte en 2004 pour les deux traitements suivis (MF et MD). Cet azote s'accumule, pour l'essentiel, dans le fruit (*Figure 7.4*). Pour autant, les années 2005 et 2006 se différencient de 2004 avec des consommations nettement plus faibles pour tous les traitements. Pour autant, l'azote accumulé dans les fruits en 2005 est généralement peu différent de celui accumulé en 2004. Il est en revanche plus faible en 2006, bien que les consommations totales de la vigne sur l'année aient été supérieures cette année là pour tous les traitements (*Figure 7.4*). Pour tous les traitements, il semble que la quantité d'azote accumulée par la vigne avant mi-juillet soit plus importante en 2006 qu'en 2005. En revanche, elle est assez nettement plus faible en 2006 qu'en 2005 de mi-juillet à la récolte. Cette deuxième période correspond à la période de forte croissance de la baie.

Comme pour la croissance en matière sèche (*Figure 3.7*), des différences significatives entre la quantité d'azote accumulée dans les parties aériennes des vignes de MF et celles des vignes en MD apparaissent très tôt dans le cycle. Ainsi, chaque année, ces différences sont perceptibles dès avant la floraison de la vigne (*Figure 7.4*). Ces différences significatives dans la consommation d'azote par la plante sont donc perceptibles bien avant que des différences significatives ne soient observées dans les matières sèches aériennes produites. La quantité d'azote accumulée dans la vigne de la modalité MR est généralement intermédiaire entre celles des modalités MF et MD. La consommation

Tableau 7.1 – Caractéristiques de la matière organique du sol en fonction de la modalité étudiée et de l'horizon considérée. Les résultats sont la moyenne de prélèvements réalisés sur le rang et l'inter-rang. Les lettres représentent un effet significatif de la modalité d'entretien. Un * signale une interaction entre modalité et position de la placette par rapport à la pente.

		Matière Organique			Carbone Organique			Azote Total			C/N		
		(% MS)			(% MS)			(g.kg ⁻¹ de sol)					
		2004	2005	2006	2004	2005	2006	2004	2005	2006	2004	2005	2006
<i>horizon</i>													
MF	0-0.1	1.65	1.73	1.74	0.96	1.00	1.01	0.90	0.93	0.92	10.5 b	10.8	10.7
	0.1-0.3	1.39 a	1.30	1.27	0.81 a	0.76	0.73	0.79 a	0.78	0.74	10.2 b	9.7 b	9.9
	0.3-0.6	0.88	0.87 b	0.98	0.51	0.50 b	0.57	0.52	0.56	0.59	9.8 b	9.0 b	9.7
	0.6-1.0	0.52	0.56 b		0.30	0.33 b		0.34	0.34		9.1 b*	9.7 b	
MR	0-0.1	1.60	1.82	1.76	0.93	1.06	1.02	0.72	0.93	0.94	12.6 a	11.5	11.0
	0.1-0.3	1.19 b	1.29	1.42	0.69 b	0.74	0.83	0.59 c	0.74	0.79	11.8 a	10.0 b	10.4
	0.3-0.6	1.01	1.10 a	1.16	0.59	0.64 a	0.67	0.45	0.62	0.60	12.7 a	10.4 a	11.2
	0.6-1.0	0.67	0.42 b		0.39	0.24 b		0.30	0.32		12.8 a*	7.6 c	
MD	0-0.1	1.45	1.79	1.87	0.84	1.04	1.09	0.78	0.89	0.91	10.7 b	11.6	11.9
	0.1-0.3	1.29 a	1.41	1.40	0.75 a	0.82	0.81	0.73 b	0.75	0.74	10.3 b	10.9 a	10.9
	0.3-0.6	0.89	1.15 a	1.15	0.52	0.67 a	0.66	0.55	0.62	0.59	9.3 b	10.9 a	11.2
	0.6-1.0	0.53	0.80 a		0.31	0.47 a		0.32	0.40		9.7 b*	12.0 a	

d'azote par les vignes de ces modalités est cependant peu différente de celle de la modalité MF jusqu'à mi-juillet environ, date à laquelle la consommation en MR augmente pour accumuler une quantité d'azote dans les parties aériennes significativement plus élevée que dans la modalité MF (*Figure 7.4*). Cette observation semble ainsi confirmer que l'enherbement semi-permanent concurrence la vigne pour l'accès à l'azote à peu près de la même manière que ne le fait l'enherbement permanent, jusqu'à ce que l'enherbement semi-permanent ne soit détruit. De son côté, la modalité MD maintient en 2005 et 2006 une quantité d'azote dans les parties aériennes peu différente de celle accumulée dans la vigne irriguée et fertilisée jusqu'aux environs du 15 juillet. Par la suite, la consommation d'azote de la vigne en MD se ralentit nettement tandis que celle de la modalité MT se maintient à un niveau élevé et quasiment constant (*Figure 7.4*).

4.4. Impact de l'enherbement sur la minéralisation de l'azote organique

4.4.1. Conséquences sur la matière organique

Les caractéristiques de la matière organique évoluent peu d'une année sur l'autre, quelle que soit la modalité considérée (*Tableau 7.1*). Le plus souvent, il semble que la variabilité spatiale observée soit plus importante que la variabilité interannuelle et aucune différence significative entre les années n'a ainsi pu être mise en évidence. Pour autant, entre 2004 et 2005 dans les modalités MR et MD, un enrichissement significatif en azote total a été observé pour l'horizon de surface (0-0,1 m) et en matières organiques dans l'horizon 0,3-0,6 m. Les teneurs en carbone organique et en azote total augmentent également sur cette même période. Si ces quelques variations d'une année sur l'autre peuvent s'expliquer dans la modalité MR par l'incorporation de matière organique dans le sol lors du retournement de l'orge, elle est plus surprenante en MD. Les teneurs en azote organique n'augmentent pas entre les trois années que dure l'expérimentation.

Cet enrichissement en carbone organique des horizons les plus profonds explique en partie que la teneur observée dans ces horizons soit significativement supérieure en MR et surtout MD, qu'en MF. Il s'agit là d'une des rares différences significatives observées entre les traitements pour les teneurs en carbone organique dosées. Une autre différence est observée avec une teneur en matière organique plus faible en MR que dans les deux autres traitements pour l'horizon 0,1-0,3 m en 2004. Cette teneur plus faible explique également que les teneurs en carbone organique et en azote total soient également significativement inférieures dans cette modalité enherbée une partie de l'année que dans les deux autres modalités étudiées. Cependant, cette différence n'est pas confirmée l'année suivante (*Tableau 7.1*). Si peu de différences significatives sont finalement observées entre les traitements pour les teneurs en carbone organique et en azote total, le rapport C/N permet bien souvent de distinguer les traitements pour tous les horizons considérés. Or, l'impact de celui-ci sur la minéralisation de la matière organique est connu (Dharmakeerthi et al. 2005). Ainsi, en 2004, le rapport C/N de la matière organique du sol est plus élevé dans la modalité MR que dans les deux autres modalités. Ceci s'explique probablement par l'enfouissement des pailles d'orge, alors plus riches en carbone que la matière organique du sol. Pourtant, ce phénomène ne se confirme pas l'année suivante puisque le C/N observé est plutôt plus faible cette année là dans la modalité MR. La moindre quantité de biomasse aérienne produite par l'orge la deuxième année, et donc la moindre quantité de matière sèche enfouie, pourrait expliquer que le C/N de la matière organique du sol soit plus faible l'année suivante.

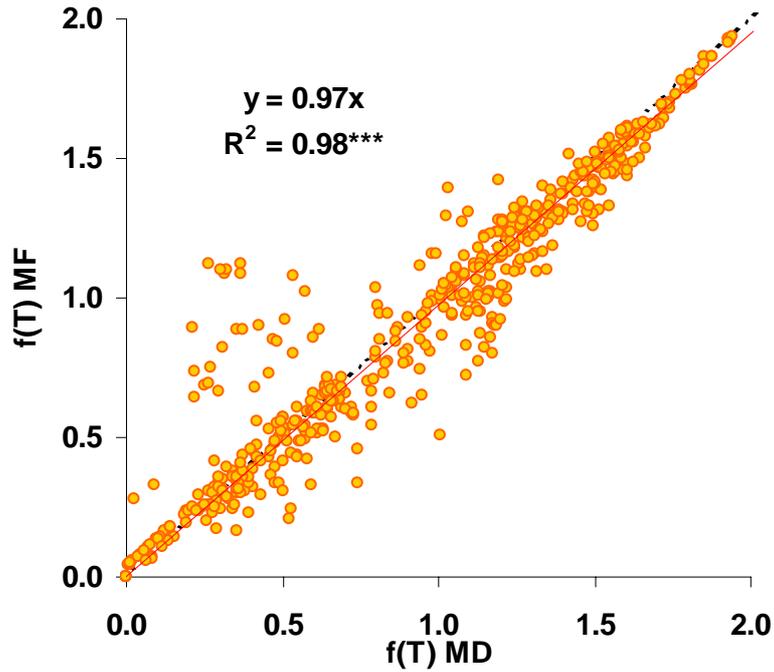


Figure 7.5 – Corrélation entre facteurs température calculés pour les traitements MD et MF. Les points représentent les points observés, la droite en pointillés représente la droite 1:1 et la droite pleine la droite de régression entre les deux séries.

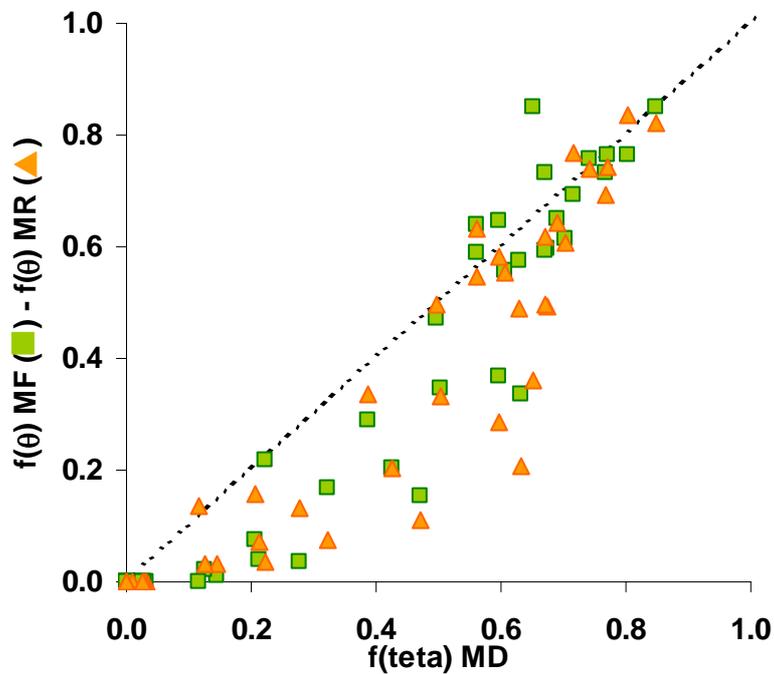


Figure 7.6 – Corrélation pour les $f(\theta)$ entre MD et MF et entre MD et MR. Les carrés (■) représentent les observés entre MD et MF et les triangles (▲) les observés entre MD et MR. La droite en pointillés représente la droite 1:1.

4.4.2. Impact sur la température du sol

Sur l'ensemble de l'année, les différences de température du sol observées entre les traitements désherbé et enherbé toute l'année sont assez faibles. En effet, les $f(T)$ calculées à partir des températures du sol moyennes journalières de la modalité MF et de la modalité MD sont linéairement corrélées ($R^2=0.98^{***}$) (Figure 7.5). En termes de dynamique, il semble que l'enherbement tamponne légèrement les variations de la température du sol à cette profondeur par rapport à la température de l'air. En effet, la température du sol de la modalité MF est légèrement inférieure à celui de MD à la sortie de l'hiver et au début du printemps, puis légèrement supérieure à l'automne (*données non présentées*). Ceci a déjà été observé dans d'autres situations enherbées (Pradel 1998). Il semble donc que la modalité d'entretien n'affecte que peu la température du sol de la couche de minéralisation dans notre cas.

4.4.3. Impact sur l'humidité de la couche de minéralisation

D'après Cassman et Munns (1980 cités dans (Payet 2005)), la minéralisation de la matière organique du sol est optimale pour un potentiel hydrique matriciel du sol de $-0,1$ MPa environ. Par rapport à la courbe de rétention établie pour le sol considéré (Annexe 4), cela correspond à une teneur en eau volumique de $0,30 \text{ cm}^3.\text{cm}^3$ environ. Cette valeur est donc considérée comme étant l'HCC pour le calcul du facteur $f(\theta)$. Cette valeur est d'ailleurs confirmée par les observations neutroniques (Annexe 3). L'HPFP a également été fixée en rapport aux observations neutroniques et aux propriétés hydrodynamiques. Elle est fixée dans toutes les modalités à $0,135 \text{ cm}^3.\text{cm}^3$. La valeur du taux de minéralisation au point de flétrissement permanent (c) a été établie à $0,2$ comme le proposent Mary et al. (1999). Cette valeur signifie que la minéralisation se poursuit potentiellement en dessous de l'HPFP. En effet, certains auteurs ont montré que l'activité microbienne ne cesse que pour un potentiel hydrique du sol de l'ordre de $-7,5$ MPa (Andren et al. 1992; Garnier et al. 2001), soit bien moins que le point de flétrissement permanent qui est considéré atteint pour un potentiel hydrique du sol de l'ordre de $-1,5$ MPa. Valé (2006) estime d'ailleurs que la minéralisation est encore de l'ordre de 50% de celle mesurée dans les conditions optimales pour l'HPFP, soit bien plus que les 20% considérés par d'autres auteurs. Pour autant, ces résultats nécessitent encore d'être vérifiés sur une plus large gamme de sols (Valé 2006). C'est pourquoi le choix est fait de conserver la valeur de $c=0,2$. Avec de tels paramètres pour la fonction $f(\theta)$, la minéralisation de l'azote organique du sol est stoppée pour $\theta < 0,107$.

La corrélation établie entre les facteurs $f(\theta)$ calculés pour la modalité désherbée et pour les deux modalités enherbées (MR et MF) montre peu de différences pour les valeurs élevées ($>0,6$) (Figure 7.6). Il semble donc que pour les périodes où l'horizon de surface est à des teneurs en eau proches de la capacité au champ, les traitements se différencient peu. Cette situation se présente essentiellement au cours de l'automne et de l'hiver, voire au début du printemps, soit la période où la vigne est peu active et où ses besoins en azote sont limités à inexistantes. En dessous de ce seuil de $f(\theta) \cong 0,6$, les $f(\theta)$ calculés pour les modalités enherbées sont presque systématiquement inférieures à celles calculées en MD (Figure 7.6). L'assèchement du sol est plus rapide dans ces modalités enherbées, ce qui s'explique par les consommations précoces de l'enherbement (Cf. Chapitre V). Ainsi, les $f(\theta)$ des modalités MF et MR tombent à des valeurs nulles tandis que le $f(\theta)$ en MD est encore de l'ordre de $0,1$. Ceci signifie que la minéralisation de l'azote organique du sol est ralentie et stoppée plus précocement par l'assèchement de l'horizon de minéralisation dans les modalités enherbées que dans les modalités non enherbées.

4.4.4. Une minéralisation de l'azote du sol affectée par la présence d'un enherbement

Une vitesse potentielle (V_p) de minéralisation de l'azote organique identique pour tous les traitements étudiés

Les vitesses de minéralisation mesurées in situ avec la méthode des cylindres s'avèrent extrêmement variables. Ainsi, en sortie d'hiver, elles varient entre 0,2 et 0,7 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ dans les différents traitements et semblent très légèrement supérieures dans la modalité dés herbée que dans la modalité MF. A la fin du printemps, ces valeurs mesurées oscillent entre 0,2 et 0,5 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ pour tous les traitements et sont peu différentes entre MD et MR. Le coefficient de variation de toutes ces mesures est également de l'ordre de 80% malgré les répétitions réalisées. Ainsi, pour le calcul de la vitesse potentielle de minéralisation, ceci justifie en partie qu'une valeur unique soit finalement considérée pour les deux situations enherbées, différenciée d'une autre V_p pour la situation dés herbée. Finalement, les V_p déterminées pour une température de référence de 15°C se révèlent assez proches pour les deux situations considérées (enherbée ou dés herbée) avec des valeurs de 0,59 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ dans la modalité MD et de 0,61 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ dans les modalités MF et MR. Les valeurs calculées ici sont légèrement supérieures à ce qui a pu être observé dans d'autres études. Ainsi, des valeurs de V_p comprises entre 0,3 et 0,5 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ pour un témoin sans apport et de l'ordre de 0,55 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ pour une vigne enherbée en Champagne (Thiebeau et al. 2005). Ceci peut laisser craindre une légère surestimation des V_p calculées dans cette étude. Pour autant, les valeurs trouvées dans la littérature ont été mesurées dans des incubations en conditions contrôlées. Or, dans cette même étude, les mêmes estimations réalisées au champ montre une sous-estimation possible des V_p obtenues au laboratoire. L'intervalle de confiance calculé à partir d'un test de Student avec un risque $\alpha=0,05$ est encore très large puisqu'il est égal à 0,52 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ pour les deux traitements. Une telle dispersion a déjà été observée auparavant (Thiebeau et al. 2005). Il n'est donc pas possible de distinguer significativement la vitesse de minéralisation potentielle des trois traitements étudiés.

Des quantités d'azote minéralisées au cours de l'année conformes à celle d'un sol argileux en conditions méditerranéennes

A partir de ces valeurs, il est possible de calculer la vitesse de minéralisation journalière (V_m) d'après l'équation [7.3.3. a]. Ainsi, la quantité d'azote minéralisé au cours d'une année varie sensiblement en fonction du traitement considéré. Dans la modalité dés herbée, elle est estimée entre 70 et 80 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ environ. Cette quantité est comprise entre 35 et 50 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ dans la modalité enherbée une partie de l'année et entre 45 et 60 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ dans la modalité enherbée toute l'année. Ces valeurs sont relativement faibles (Valé 2006) mais peuvent s'expliquer par la faible teneur en matière organique du sol ainsi que par un climat aride en été qui ralentit fortement la minéralisation. De plus, la minéralisation de l'azote et du carbone est plus faible dans un sol argileux (Cabrera et Kissel 1988; Hassink 1997; Zinn et al. 2005; McLauchlan 2006). Ceci est dû à l'association qui se crée entre particules de matière organique et argiles qui stabilise la matière organique et protège en partie celle-ci de la dégradation par les micro-organismes. Ainsi, les valeurs estimées sont tout à fait conformes à ce qu'observent Lopez-Bellido et al. (2005) dans une culture céréalière en conditions pluviales et méditerranéennes et pour un sol avec des teneurs en argiles proches de celles observées ici (environ 40%). Ces auteurs mesurent en effet une minéralisation comprise entre 40 et 75 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$.

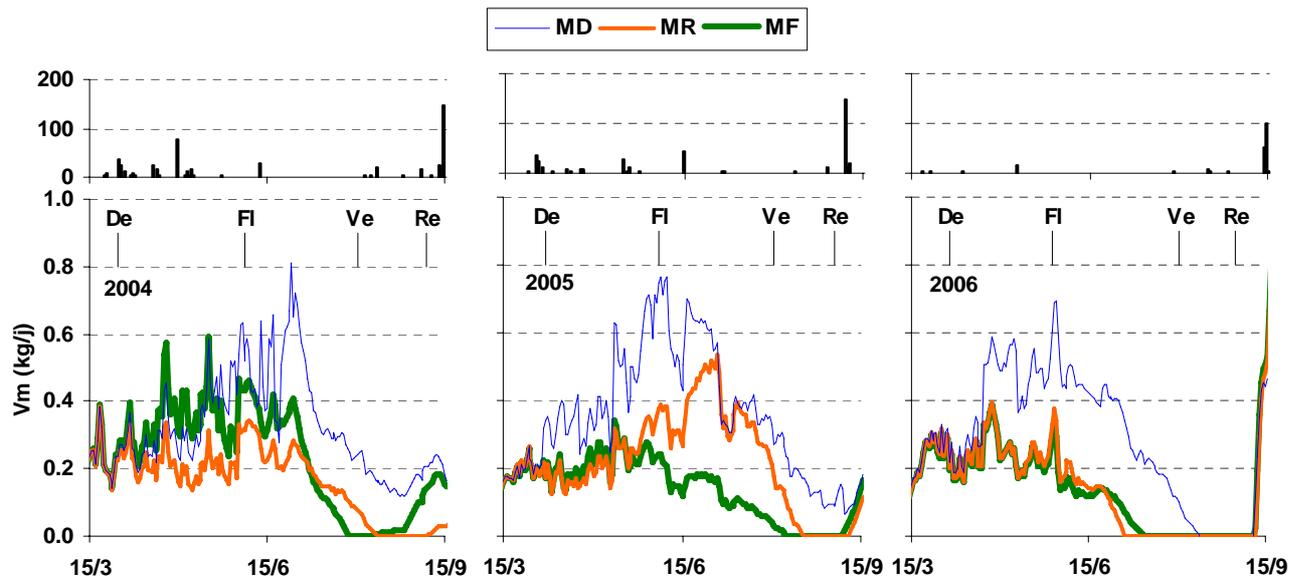


Figure 7.7 – Evolution de la vitesse calculée de minéralisation journalière (V_m) de l'azote organique du sol en fonction de la modalité d'entretien étudiée. Le panneau du haut montre les précipitations journalières (mm) pour chaque période considérée. Les barres verticales continues situées en haut du graphique représentent les principaux stades phénologiques de la vigne. Débourrement (De), Floraison (FI), Véraison (Ve) et Récolte (Re).

Des vitesses de minéralisation (V_m) différentes selon la modalité d'entretien du sol

Globalement, les grandeurs obtenues pour la minéralisation journalière de l'azote organique du sol sont de l'ordre de 0 à $0,6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ en fonction du traitement et de la période considérés (*Figure 7.7*). Le calcul de cette vitesse a mis en évidence quelques pics de minéralisation supérieurs à $0,6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ mais ils sont très rares. Généralement, la V_m est sensiblement inférieure dans les parcelles de vigne enherbées que dans celles désherbées. En effet, dans le calcul de cette vitesse de minéralisation journalière, c'est essentiellement le facteur lié à l'humidité de l'horizon de sol dans lequel se produit la minéralisation de l'azote organique qui explique les variations entre modalités. Ainsi, comme attendu, les vitesses de minéralisation sont identiques au moment du débourrement pour tous les traitements et toutes les années considérés (*Figure 7.7*). Suite au débourrement, l'évolution de la vitesse de minéralisation varie en fonction des traitements et de l'année. En 2004 par exemple, les précipitations assez nombreuses après le débourrement rechargent le profil de sol en surface. Ainsi, combinée à une augmentation des températures du sol, cette recharge permet à la minéralisation de l'azote organique de s'accélérer. Cette augmentation de V_m est surtout sensible en MF et, dans une moindre mesure en MD. Elle est en revanche peu sensible en MR. Ceci peut s'expliquer par la croissance importante de l'orge au cours de cette période (*Figure 3.2*) qui s'accompagne d'une transpiration plus importante du couvert et donc d'un assèchement de la surface du sol. La transpiration du couvert permanent a pu également être compensée par une meilleure infiltration des pluies au cours de cette période. Par la suite, tandis que V_m augmente dans la modalité MD, du fait de l'augmentation de la température du sol, elle diminue sensiblement dans la modalité MF et devient inférieure à celle de la modalité désherbée avant la floraison de la vigne. Dans la modalité MR, V_m demeure relativement constante jusqu'à la destruction du couvert d'orge. A partir de fin juin, la V_m de toutes les modalités diminue fortement du fait de l'absence de précipitations et devient nulle dès mi-juillet dans les deux modalités enherbées. La minéralisation se poursuit en revanche dans la modalité désherbée tout au long de l'été même si elle atteint des valeurs très faibles ($<0,02 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$) peu avant la récolte. Suite à la récolte, l'arrivée des précipitations automnales permet à la minéralisation de l'azote organique de redémarrer dans tous les traitements étudiés (*Figure 7.7*). Au cours de l'année 2005, la V_m de la modalité MD présente sensiblement la même évolution qu'en 2004. Cependant, à la différence de 2004, elle finit par s'arrêter, peu avant la vendange mais pour une courte période (2 semaines environ). La V_m dans les deux autres modalités se distingue en revanche de celles observées en 2004 puisqu'on n'observe pas d'augmentation peu après le débourrement. En effet, le printemps se révèle beaucoup plus aride et l'augmentation de la température du sol est totalement compensée par l'assèchement de l'horizon de surface par les consommations des deux enherbements (*Figure 7.7*). La V_m se maintient ainsi tout le printemps à une valeur de $0,2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ environ avant de chuter à partir de la floraison de la vigne dans la modalité enherbée toute l'année. La destruction de l'enherbement semi-permanent à ce stade permet en revanche de maintenir la V_m à ce niveau et un dernier orage tombé le 15 juin permet même à la minéralisation de s'accélérer légèrement dans cette modalité jusqu'à atteindre un niveau équivalent à celui de la modalité désherbée. Si fin juin, la V_m de la modalité MF est déjà nulle, elle est encore proche de $0,4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ dans les deux autres traitements étudiés (*Figure 7.7*). Par la suite, l'absence de précipitations au cours des deux mois qui suivent font que la minéralisation se ralentit fortement dans ces deux traitements jusqu'à se stopper à la véraison pour la modalité MR et peu après dans la modalité désherbée. L'arrivée de précipitations importantes peu après les vendanges recharge l'horizon de sol en surface et induit un redémarrage rapide de la minéralisation dans toutes les modalités, du fait d'une température du sol encore élevée. L'année 2006 présente une

évolution des V_m très proches dans chacun des traitements étudiés. Pour autant, l'hiver et le printemps de cette année là s'étant révélés beaucoup plus arides, la chute de la V_m est plus précoce encore qu'en 2005 (*Figure 7.7*). En conséquence, la minéralisation de l'azote organique est stoppée peu après la floraison dans les deux traitements enherbés. Ainsi, la destruction de l'enherbement semi-permanent intervient trop tard pour préserver une minéralisation de la matière organique et ce flux est annulé pendant la majeure partie du cycle de la vigne et jusqu'aux premières pluies de l'automne qui interviennent peu après la récolte. Dans la modalité désherbée, l'assèchement de l'horizon de surface est plus lent et la minéralisation se poursuit jusque peu avant la véraison de la vigne.

En conclusion, outre le fait que la vitesse calculée de minéralisation de l'azote organique est souvent plus faible dans les modalités enherbées, il ressort que cette minéralisation est généralement stoppée au cours d'une plus longue période dans ces modalités. Ceci s'explique par l'assèchement des horizons de surface par les consommations des deux enherbements au cours du printemps.

4.5. Impact de l'enherbement sur les stocks pérennes d'azote dans la culture

Globalement, la concurrence pour les ressources qu'impose la présence d'un enherbement peut réduire de manière sensible les réserves en azote des parties pérennes de la vigne (*Tableau 3.4*). Ceci dépend toutefois de l'importance de la compétition imposée par l'enherbement.

Ainsi, les teneurs en azote des bois de taille à la fin de l'année 2003 ne sont pas significativement différentes entre les traitements (*Tableau 3.4*). Ces niveaux sont globalement assez faibles (environ 0,5% MS) et plutôt inférieurs à d'autres observations réalisées sur vigne (autour de 0,6 à 0,7% MS) (Williams 1987; Conradie et Saayman 1989; Zapata et al. 2004). L'absence de différences entre les traitements peut s'expliquer par une année climatique assez contraignante (année de la « canicule ») qui entraîne une chute des feuilles précoce dans tous les traitements et des enherbements dans leur première année d'installation qui sont encore peu concurrentiels. On peut donc penser que les réserves d'azote mobilisables au début de l'année 2004 sont sensiblement les mêmes pour tous les traitements étudiés. Par la suite, si la teneur en azote des bois de la modalité désherbée remonte à une teneur plus conforme à ce qui est généralement observé sur la vigne, les teneurs en azote des deux modalités enherbées restent stables et sont ainsi significativement plus faibles (*Tableau 3.4*). Ceci s'explique vraisemblablement par la concurrence pour les ressources imposées par la présence des enherbements. En conséquence, les vignes des deux modalités enherbées débutent l'année 2005 avec des réserves en azote inférieures à celle de la modalité MD. A la fin de cette même année, la teneur des bois des modalités MD, MT et MR augmentent et sont conformes aux moyennes observées sur vigne. En revanche, elle demeure faible dans la modalité enherbée toute l'année et significativement inférieure (*Tableau 3.4*). La concurrence pour les ressources semble donc s'être maintenue dans la modalité MF mais pas dans la modalité avec un enherbement non permanent. Ceci s'explique probablement par la faible croissance de l'orge cette année là, qui induit une compétition pour les ressources réduite (*Figure 3.2*). Ainsi, seule la modalité sous enherbement permanent débute l'année 2006 avec des réserves en azote mobilisables réduites.

5. Discussion

5.1. Implantation d'un enherbement et modification de la disponibilité de l'azote pour la vigne

L'implantation d'un enherbement diminue la demande d'azote de la vigne

La croissance de la vigne et sa production sont clairement affectées par la présence d'un enherbement, qu'il soit permanent ou non. L'enherbement permanent (MF) diminue tout de même plus fortement l'expression végétative de la vigne que ne le fait l'enherbement temporaire (MR). Cette diminution de la croissance est la conséquence d'une concurrence pour l'eau comme pour l'azote. Elle induit une diminution significative des consommations de la vigne et de l'accumulation d'azote dans ses parties aériennes de l'année. Cette diminution est également très variable d'une année et fortement diminuée les années sèches. Ceci suggère que l'eau disponible en est, en partie au moins, responsable. Certains auteurs ont d'ailleurs observé une diminution notable de la teneur en azote des parties aériennes en cas de sécheresse significative (Onillon et al. 1995; Volaire et al. 1998). Cependant, la concurrence pour l'eau ne peut suffire à expliquer ces différences. En effet, la différence dans les quantités d'azote accumulées entre les différentes modalités est sensible très tôt dans le cycle puisque la modalité avec un enherbement se distingue des autres traitements bien avant la floraison. Or, à cette période, la disponibilité en eau est, en 2004 au moins, suffisante pour ne pas contraindre significativement la croissance de la vigne (Cf. Chapitre V). Ceci suggère un impact de l'enherbement sur la mise en réserve d'azote dans ses parties pérennes.

Une mise en réserve de l'azote par la vigne généralement moins favorable en présence d'un enherbement permanent

Les réserves nutritives jouent un rôle primordial dans le débourrement et le début de la croissance aérienne de l'année, d'autant que la consommation d'azote minéral par le système racinaire de la vigne est très limitée avant la floraison (Yang et Hori 1979; Conradie 1980; Conradie 1986; Wermelinger et al. 1991; Zapata et al. 2004). La forme principale utilisée par la vigne pour être mobilisée en cas de besoin est l'arginine (Habib 1984; Gaudillère 1997). Seul l'azote total a été dosé ici et pourtant des teneurs en azote des bois significativement plus faibles ont été observées chaque année pour les vignes avec un enherbement permanent. L'effet de l'enherbement temporaire sur cette mise en réserve est en revanche moins claire et surtout très variable d'une année sur l'autre.

Une fois la floraison passée et l'absorption racinaire suffisante pour alimenter la vigne, les réserves pérennes sont susceptibles de se remplir tout au long du cycle de la vigne. Elles sont en effet un puits végétatif comme les autres et sont donc en concurrence avec les autres puits de la vigne (Gaudillère 1997; Castelan-Estrada 2001). Pour autant, une fois les vendanges passées, la mise en réserve ne subit plus de concurrence significative de la part d'autres puits végétatifs. C'est pourquoi, la période entre la vendange et la chute des feuilles est souvent considérée comme la période au cours de laquelle les réserves de la vigne se reforment (Millard et Thomson 1989). Or, dans le climat de cette étude, cette période concorde généralement avec d'importantes précipitations et une recharge des horizons de surface susceptibles de relancer la minéralisation de l'azote organique du sol et donc d'augmenter la fourniture du sol en azote minéral. La présence de l'enherbement, comme le travail du sol superficiel qui accompagne le semis de l'enherbement temporaire, diminuent le ruissellement et améliore cette recharge (Cf. Chapitres V et VI) (Leonard et Andrieux 1998). Cependant, à l'automne, la levée de l'enherbement semi-permanent n'est pas encore réalisée et cette nouvelle offre d'azote minéral du sol est donc entièrement mise

à profit par la vigne. Dans la modalité enherbée toute l'année en revanche, l'enherbement reprend également sa croissance avec l'arrivée de conditions plus favorables et consomme donc l'azote minéral nouvellement formé. Il concurrence donc la mise en réserve d'azote pour la vigne. Certains auteurs ont également mis en évidence que l'azote contenu dans les feuilles est souvent mobilisé avant la sénescence de celle-ci et transféré dans les réserves (Millard et Thomson 1989). Ainsi, la quantité d'azote accumulé au cours de l'année dans les parties aériennes de la vigne affecte la quantité d'azote mise en réserve. Or, celle-ci est, comme déjà vu précédemment, sensiblement plus faible pour une vigne enherbée que pour une vigne désherbée. L'enherbement permanent de la vigne concurrence donc la mise en réserve de l'azote dans les parties pérennes de la vigne tout au long du cycle de la vigne.

L'enherbement prive la vigne de l'azote minéral disponible sous l'inter-rang et accentue l'exploitation du rang par la vigne

L'évolution des stocks d'azote minéral dans les 60 premiers centimètres de sol met en évidence un appauvrissement important du profil de sol sous l'inter-rang enherbé. Celui observé avec un enherbement semi-permanent est moindre du fait d'une croissance, et une consommation de l'azote du sol, parfois inférieures mais surtout réduites à une période plus courte. Dans la modalité avec un enherbement permanent, l'appauvrissement des horizons de sol sous l'inter-rang est assez homogène sur la profondeur considérée, ce qui suggère que l'enherbement consomme de l'azote sur toute cette profondeur. C'est moins net sous l'enherbement semi-permanent. Pour autant, même dans la modalité avec un enherbement permanent, le stock d'azote minéral estimé dans la couche de sol considérée ne tombe jamais en dessous de $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ et se maintient même à près de $20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 2006. Mais, bien que des racines de vigne soient encore situées dans cette zone, cet azote est inaccessible pour la vigne. En effet, la disponibilité de cet azote dépendra à la fois de l'exploration de cette zone par le système racinaire de la vigne, de la teneur en azote minéral mais aussi de la teneur en eau de cet horizon (Barber 1995; Unkovich et al. 1998; Dunbabin et al. 2002; Vamerali et al. 2003; Guswa 2005). Ainsi, l'enherbement limite la disponibilité de l'azote également en asséchant rapidement ces horizons de surface où est minéralisé l'azote organique (Thiebeau et al. 2005). Différentes études ont ainsi montré une diminution de l'absorption d'azote en cas de sécheresse (Pandey et al. 2000b; Pirmoradian et al. 2004). Outre que la mobilité du nitrate est réduite par l'aridité du sol, ce déficit hydrique est également à l'origine d'une assimilation de la plante perturbée du fait d'une diminution de l'activité des nitrates réductases (Larsson 1992; Azedo-Silva et al. 2004; Correia et al. 2005).

Il est également intéressant de noter l'appauvrissement plus rapide des horizons de sol situé sous le rang. Ceci peut être la conséquence d'une consommation de l'enherbement mais leur système racinaire y est réduit (Cf. *Chapitre V*). Il est en revanche probable que cet appauvrissement accéléré par rapport aux autres modalités soit la conséquence de consommations de la vigne plus fortes sous le rang comme cela a déjà été mis en évidence pour l'eau (Cf. *Chapitre V*) (Celette et al. 2005). En effet, l'inter-rang étant fortement appauvri par la présence de la fétuque élevée, la ressource azotée disponible pour la vigne est alors concentrée sous le rang. Ce phénomène n'est pas observé aussi clairement sous le rang de la modalité avec un enherbement temporaire. Ceci peut être lié à la plus faible croissance de l'enherbement temporaire mais aussi à sa destruction dès la floraison de la vigne (Cf. *Chapitre III*).

Une consommation de l'azote par l'enherbement modérée mais significative

Les quantités estimées d'azote consommé par les enherbements sont comprises entre 15 et $25 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ selon la modalité considérée et selon l'année. Ces consommations sont ainsi très inférieures à celles observées dans des conditions plus favorables. Par exemple,

des consommations d'azote 5 à 10 fois supérieures ont pu être observés pour une production fourragère de fétuque élevée (Lemaire et Salette 1984a; 1984b) ou de ray-grass anglais (Marino et al. 2004) et jusqu'à 15 fois supérieures dans le cadre d'une production céréalières d'orge (Justes et al. 1997; Montemurro et al. 2006). Elles sont également deux fois moindres que la quantité d'azote consommée estimée par un enherbement comparable dans une situation proche de cette étude (Celette et al. 2005). Les tontes régulières de l'enherbement permanent contribuent également à limiter les quantités d'azote consommées par l'enherbement puisqu'il a été montré que l'absorption d'azote était fortement diminuée après une coupe (Mackie-Dawson 1999). Ainsi, les quantités d'azote minéral prélevées par l'enherbement sont finalement modérées mais elles représentent déjà une part importante de l'azote minéralisé au cours de l'année (entre un tiers et la moitié) du fait de la relative pauvreté du milieu. Pour autant, l'azote est toujours présent dans le système bien qu'il soit sous une forme organique, moins immédiatement accessible pour la vigne que celle du nitrate. Dans les systèmes de conduite étudiés ici, l'azote organique formé par les enherbements n'est pas exporté hors de la parcelle. En effet, dans la modalité avec un enherbement permanent, l'enherbement est tondu régulièrement et les résidus de fauche laissés sur place. Dans la modalité MR, l'enherbement est détruit et incorporé dans le sol par un travail du sol superficiel. Cette différence entre les deux traitements est a priori importante vis-à-vis du devenir de l'azote organique. En effet, la matière organique formée par les enherbements est ensuite décomposée et l'azote organique peut être transformé en azote minéral au travers de la minéralisation. Cependant, cette décomposition de la matière organique et la minéralisation de l'azote organique sont très variables selon que la matière organique est enfouie ou laissée en surface. Ainsi, la décomposition de la matière organique est plus lente lorsque le résidu est laissé en surface (Coppens et al. 2006). A l'inverse, une fois cette matière organique décomposée, l'immobilisation de l'azote est supérieure lorsque le résidu est enfoui (Corbeels et al. 2003). En conséquence, l'azote est dans un premier temps moins disponible dans la situation avec un enherbement temporaire détruit et enfoui. Corbeels et al. (2003) estiment ainsi que l'azote peut être immobilisé jusqu'à une centaine de jours dans le cadre d'un enfouissement de résidus de légumineuses et de feuilles d'eucalyptus. En revanche, par la suite, l'azote minéralisé libéré peut être très supérieur à celui libéré par un résidu laissé en surface (Corbeels et al. 2003; Coppens et al. 2006). De plus, dans le cas de la modalité enherbée toute l'année, les résidus de fauche laissés en surface sont susceptibles d'être entraînés par le vent ou le ruissellement et l'azote organique contenu dans ceux-ci peut ainsi être perdu par le système.

L'enherbement ralentit fortement la minéralisation de l'azote organique du sol

Contrairement à ce qui a pu être observé dans d'autres études (Maigre et Murisier 1992; Morlat et Jacquet 2003), la présence de l'enherbement permanent n'a pas fait varier significativement la teneur en matière organique du sol. Cependant, ce type d'observation avait été réalisé sur des essais de plus longue durée et l'impact de l'enherbement sur cette variable n'est peut être pas encore perceptible. Les variations dans les caractéristiques de la matière organique de la modalité MR sont également limitées au cours de cette étude mais le même argument peut être avancé. La présence de l'enherbement ne semble pas affecter fortement l'évolution de la température du sol en surface malgré une température observée très légèrement inférieure. Ces résultats vont dans le sens d'observations réalisées sur d'autres vignobles enherbés (Drury et al. 1999; Pradel et Pieri 2000). En fait, l'essentiel des différences estimées dans les quantités d'azote minéralisées en fonction de la modalité provient apparemment de la dynamique de l'eau dans l'horizon de minéralisation. En effet, l'enherbement permanent, mais aussi l'enherbement temporaire, dessèchent les horizons de

surface situés sous l'inter-rang du fait de leur transpiration. La présence de l'enherbement permanent pousse également la vigne à exploiter plus rapidement l'eau présente dans les horizons de surface sous le rang (Cf. *Chapitre V*) (Celette et al. 2005). Les différences d'humidité des horizons de surface sont peu significatives entre les modalités étudiées en dehors du cycle de la vigne. Cependant, la minéralisation est relativement faible au cours de l'hiver du fait d'une température du sol basse (Rodrigo et al. 1997). En revanche, la teneur en eau observée dans cet horizon est sensiblement plus faible au printemps et en été lorsque la minéralisation est potentiellement la plus forte en absence de précipitations régulières qui compenseraient les consommations de l'enherbement. Ainsi, l'enherbement diminue fortement la minéralisation de l'azote organique du sol dès le début du printemps sous l'inter-rang enherbé les années où les précipitations sur cette période sont faibles, ce qui est fréquent dans le climat méditerranéen. Il provoque également un arrêt de cette minéralisation sensiblement plus précoce que dans la modalité désherbée les années sèches. A l'inverse, la meilleure infiltration des pluies obtenue en présence du couvert herbacé (Cf. *Chapitre V*) (Battany et Grismer 2000; Le Bissonais et al. 2004) est susceptible d'entraîner une augmentation significative de la minéralisation de l'azote organique en cas de précipitations suffisantes. Cette situation est obtenue au début du printemps 2004 et chaque année après les premiers orages de l'automne. En 2004 cependant, cette vitesse de minéralisation devient inférieure dans la modalité enherbée à celle de la modalité désherbée dès la floraison, ce qui correspond au moment où la consommation d'azote par la vigne et ses besoins sont maximaux (Conradie 1986; Williams 1987; Keller et al. 1995; Zapata et al. 2004; Thiebeau et al. 2005). De plus, des conditions favorables à une meilleure minéralisation de l'azote organique le sont également pour la croissance de l'enherbement et augmentent donc les quantités d'azote prélevées par celui-ci. En conséquence, il est apparaît évident que l'enherbement permanent diminue fortement l'offre d'azote minéral disponible pour la vigne.

Qu'en est-il des pertes par lixiviation ?

Une diminution du stock d'azote minéral du sol est observée chaque hiver. Celle-ci est particulièrement claire au cours de l'hiver entre 2005 et 2006. Cette diminution étant systématiquement précédée d'une période de précipitations importantes, l'hypothèse d'une lixiviation de l'azote des horizons de surface est la plus vraisemblable. Celle-ci est encore renforcée par l'existence d'un gradient de potentiel hydrique du sol décroissant avec la profondeur qui témoigne de flux d'eau orientés vers le bas. Des pertes d'azote sont notamment observées dans le premier mètre de sol au début de l'année 2006. Or, les prélèvements réalisés au début du printemps de l'année 2006 jusqu'à une profondeur de 2m ont permis de mettre en évidence une quantité importante d'azote minéral entre 1 et 2m de profondeur à cette date (*données non présentées*). Ceci représente une quantité d'azote minéral importante de l'ordre de 35 kg N.ha^{-1} , soit à peu près la quantité d'azote minéral perdue dans le premier mètre de sol suivi. Or, cet azote est encore à une profondeur accessible pour la vigne et la lixiviation de cet azote vers des horizons plus profonds n'a pas été préjudiciable à la vigne. Cependant, l'hiver 2006 a été exceptionnellement aride et la lixiviation a donc probablement été limitée. Il est donc possible qu'au cours d'hivers aux précipitations plus conformes à la normale, la lixiviation soit supérieure et que l'azote sous forme nitrique soit entraîné dans des horizons plus profonds finalement inaccessibles pour la vigne.

La teneur en nitrates de la solution de sol calculée est très variable au cours du temps et selon la modalité d'entretien du sol (*données non présentées*). Ainsi, cette teneur est assez constante et faible tout au long de l'année dans la modalité avec un enherbement permanent. Elle n'est jamais supérieure à 20 mg.L^{-1} dans les premiers trente centimètres de

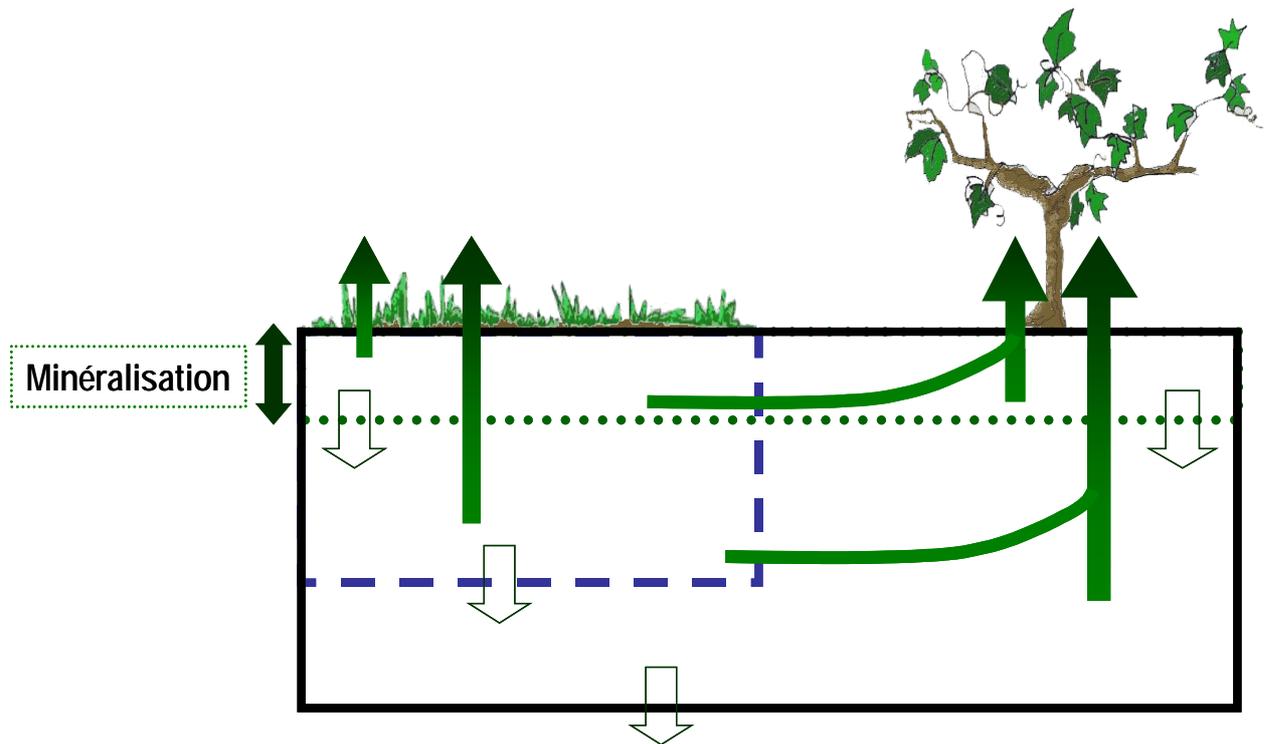


Figure 7.8 – Compartimentation pour représenter le partage des ressources azotées au sein d’une vigne enherbée. Le compartiment supérieur représente la zone de minéralisation de l’azote organique. Les flèches verticales ascendantes représentent les consommations des deux espèces tandis que les flèches descendantes représentent la lixiviation d’un compartiment à celui en dessous.

sol et généralement inférieure à 10 mg.L^{-1} dans l'horizon 0,6-1 m. Ces teneurs assez faibles suggèrent une lixiviation très faible dans cette modalité malgré une infiltration des pluies plus élevée et un flux d'eau descendant supérieur dans le profil. Ce drainage plus important des horizons de surface pourrait cependant entraîner une quantité modérée de nitrates vers des horizons plus profonds comme cela a été observé dans la modalité désherbée. Cependant, ces quantités sont probablement faibles et ont peu de chance d'être perdues par le système. Elles peuvent en revanche être soustraites à la zone exploitée par l'enherbement permanent et amenées dans des horizons que seule la vigne explore. Ce phénomène est donc susceptible d'augmenter légèrement l'azote minéral disponible pour la vigne et d'ainsi limiter la concurrence azotée subie. Il apparaît donc que les pertes par lixiviation dans le système enherbé sont probablement très faibles, voire nulles (Maigre et Murisier 1992; Rupp 1997; Ryser et Pittet 2002; Schnebelen et al. 2004). Cette hypothèse est encore confortée par le fait que l'enherbement consomme 1/3 à la moitié de l'azote minéralisé au cours de l'année. Dans la modalité avec un enherbement semi-permanent, malgré l'enfouissement des résidus du couvert intercalaire et la possible libération d'une plus grande quantité d'azote minérale, les teneurs en nitrate de la solution du sol sont peu différentes de celles observées dans la modalité enherbée toute l'année. Ceci confirme que la pratique de l'enherbement limite fortement les pertes d'azote par lixiviation et la pollution possible des nappes qui l'accompagne (Tournebize 2001; Ryser et Pittet 2002; Schnebelen et al. 2004).

En revanche, les teneurs en nitrate de la solution de sol de la modalité désherbée sont très variables au cours de l'année et des pics importants sont observés à l'automne et pendant l'hiver dans l'horizon de surface (jusqu'à 160 mg.L^{-1}). Cette teneur diminue en revanche fortement avec la profondeur et les teneurs observées ne sont jamais supérieures à 20 mg.L^{-1} à 1m de profondeur (*données non présentées*). Il est donc probable que la lixiviation de l'azote soit relativement faible dans les différents systèmes étudiés ici. Cependant, même faiblement chargé en azote, l'eau infiltrée au cours de l'hiver dans une vigne désherbée n'est pas consommée par la vigne et l'eau en excès est donc drainée. Il est donc possible que lors d'hiver plus pluvieux que ceux connus dans cette étude, les pertes par lixiviation soient plus importantes. De plus, la remontée importante de la nappe observée au cours de l'hiver 2003 à 2004 (*Cf. Chapitre V*) est susceptible d'induire une lixiviation importante de l'azote du sol lors de la descente de la nappe.

5.2. Quelle compartimentation pour une modélisation simple ?

Les deux espèces (ou mélange) associées au sein d'une vigne enherbée se caractérisent par d'importants décalages spatiaux et temporels dans leurs activités et consommations (*Cf. Chapitre III*) (Willey 1990). Cette observation a conduit à proposer une compartimentation du sol pour représenter simplement le partage de la ressource hydrique entre les deux espèces (*Cf. Chapitre V*). Cette compartimentation a fait ses preuves et permet de représenter simplement le fonctionnement hydrique du système (*Cf. Chapitre VI*). Ce chapitre apporte les éléments nécessaires à son évaluation pour représenter également le fonctionnement azoté d'une vigne enherbée. Il permet notamment d'observer à quel point les deux dynamiques, hydrique et azotée, sont intimement liées (Gonzalez Dugo 2006). Ainsi, une première compartimentation verticale est indispensable afin de représenter la couche de minéralisation de l'azote organique (*Figure 7.8*). L'humidité de cet horizon doit être correctement simulée pour représenter son impact sur l'activité des micro-organismes responsables de la minéralisation. Ainsi, cette compartimentation supplémentaire porte le nombre de compartiments pour représenter simplement les dynamiques des ressources hydrique et azotée à quatre. Les deux

compartiments situés en surface sous l'inter-rang sont accessibles pour l'enherbement tandis que la vigne est susceptible, a priori, de consommer dans tous les compartiments représentés. Une telle compartimentation est également capable de représenter les pertes d'azote nitrique pour l'enherbement par lixiviation au cours de l'hiver. Pour peu que le drainage ne soit alors pas trop important, cet azote minéral peut être encore disponible pour la vigne dans le compartiment plus profond. Cette représentation montre également comment le pouvoir concurrentiel de l'enherbement se trouve essentiellement dans la précocité de ses consommations. Ainsi, l'enherbement appauvrit des compartiments qui sont accessibles pour la vigne avant que celle-ci ne commence à consommer les ressources du sol. Cette compartimentation nécessite encore d'être testée au travers d'une modélisation simple des fonctionnements hydriques et azotés du système et de leur interactions.

6. Conclusion

L'implantation d'un enherbement et la concurrence pour les ressources minérales du sol qu'elle induit affecte à la fois la croissance et la production de l'année mais aussi le potentiel de croissance l'année suivante au travers d'une diminution de l'azote dans les réserves pérennes. La concurrence de l'enherbement est essentiellement la conséquence du décalage qui existe entre les cycles des deux espèces (ou mélange) associées. Ainsi, l'enherbement appauvrit fortement la zone de sol sous l'inter-rang avant que la vigne ne débouffe et prive ainsi la vigne de ressources azotées. La redistribution du système racinaire de la vigne face à la présence de l'enherbement permet, dans un sol profond notamment, d'atténuer fortement la concurrence pour l'eau. Cependant, elle exclut en partie la vigne et son système racinaire de la zone de minéralisation de l'azote organique du sol. Or, cette transformation est la principale source d'azote minéral de ce système, en l'absence de fertilisation. La concurrence pour l'azote est donc totale. Pour autant, la meilleure infiltration observée dans la modalité enherbée pourrait induire une lixiviation légère de l'azote nitrique vers des horizons plus profonds, inaccessibles pour l'enherbement mais pas pour la vigne. Ce phénomène pourrait ainsi atténuer légèrement la contrainte azotée subie par cette dernière. Les connaissances acquises dans ce chapitre ont ainsi permis de proposer une représentation simple du système avec quatre compartiments. Cette représentation doit cependant être encore évaluée au travers d'une modélisation du système. Ce chapitre met en évidence l'importance de l'azote dans l'impact de l'enherbement sur les contraintes subies par la vigne. Il confirme ainsi que les ressources hydrique et azotée doivent être considérées ensemble pour bien comprendre l'impact de l'enherbement sur la vigne, sa croissance et sa production.

Chapitre VIII - Interactions entre les fonctionnements hydrique et azoté au sein d'une culture associée. Cas d'une vigne enherbée en zone méditerranéenne

1. Mots clés

Compétition ; contrainte ; dynamique ; enherbement ; *Festuca arundinacea* Shreb. ; FTSW ; *Hordeum vulgare* L. ; indicateurs ; INN ; interactions eau-azote ; milieu méditerranéen ; *Vitis vinifera* L.

2. Introduction

L'enherbement des vignobles est la pratique qui consiste à introduire un couvert herbacé sur les inter-rangs inoccupés. Cet enherbement peut être naturel ou semé. Cette pratique a été très étudiée au cours des trois dernières décennies (Soyer et al. 1984; Maigre et Murisier 1992; Morlat et al. 1993; Moulis 1994; Chantelot et al. 2004) car elle apporte une réponse intéressante à de nombreux problèmes connus par la viticulture moderne comme, par exemple, l'érosion (Battany et Grismer 2000; Le Bissonais et al. 2004), une vigueur excessive des plantes (Delas 1996) ou encore l'utilisation excessive de pesticides. Cependant, ces études ont également montré que la concurrence pour les ressources qu'elle induit pouvait être à l'origine d'une diminution notable des rendements et d'une modification de la qualité (Morlat 1987; Maigre et Murisier 1992; Maigre 1996; Rodriguez-Lovelle et al. 2000a). Si la compétition pour l'eau est souvent mise en avant (Morlat 1987; Moulis 1994), des études récentes suggèrent également que la compétition pour les ressources minérales, et l'azote en particulier, pourrait être à l'origine des contraintes subies par la vigne (Rodriguez-Lovelle et al. 2000b; Chantelot et al. 2004; Celette et al. 2005). Ainsi, les dynamiques de contraintes subies par la vigne pour l'eau et l'azote méritent d'être approfondies en sachant que ces deux ressources sont intimement liées et les interactions nombreuses (Gonzalez Dugo 2006).

La concurrence pour les ressources du sol induite par la présence d'un enherbement s'accompagne d'un impact clair sur la croissance de la vigne (*Figures 3.5, 3.6 et 3.7*; *Tableau 3.3*) ainsi que sur son rendement (*Tableau 3.4*). De plus, la production de biomasse observée pour les cultures intercalaires est très inférieure à ce que ces mêmes espèces sont capables de produire dans des conditions fourragères par exemple (Lemaire et Denoix 1987a). Il est donc vraisemblable que le milieu est très carencé en ressources et cette carence touche autant la culture intercalaire que la vigne elle-même (*Cf. Chapitres V et VI*). Pour bien comprendre le fonctionnement d'une vigne enherbée, il est intéressant d'étudier la dynamique de chacune des contraintes hydrique et azotée et d'évaluer leur intensité respective en fonction de la période considérée. Le décrochement rapide de la croissance aérienne de la vigne enherbée par rapport à une témoin désherbée montre que la contrainte induite par la présence de l'enherbement est rapide. Malheureusement, la plupart des indicateurs utilisés au champ pour évaluer l'état hydrique ou azoté de la vigne ne peuvent être mesurés avant la floraison. Il est donc utile de déterminer dans un premier temps des indicateurs précoces et pertinents qui permettent d'évaluer l'état hydrique et azoté de la plante.

Ainsi, la FTSW est une variable d'état hydrique du sol qui permet d'évaluer la contrainte hydrique que subit une plante. Elle est définie comme le rapport entre l'eau disponible pour la plante au jour j (ASW $_j$) et le stock total maximal disponible pour la

plante (FTSW) (Sinclair et Ludlow 1986). Cette définition prenant en compte la répartition du système racinaire, deux espèces, voire deux plantes différentes, n'ont pas nécessairement la même FTSW pour un même sol. Cet indicateur de contrainte hydrique a déjà été testé et validé sur la vigne (Pellegrino et al. 2004). Il présente l'avantage d'être mesurable toute l'année et permet donc de détecter une contrainte hydrique précoce. De plus, une relation a pu être établie entre FTSW et Ψ_b qui est l'indicateur le plus utilisé en viticulture pour évaluer la contrainte hydrique de la plante (Lebon et al. 2003; Pellegrino et al. 2004) (*Figure 6.4*).

La caractérisation de l'état de nutrition azotée d'une plante est plus difficile que celle de l'état hydrique. La contrainte azotée apparaît lorsque la demande en azote de la plante ne peut pas être satisfaite par l'offre du milieu. Or, cette demande est pilotée par la croissance en matière sèche et la relation entre ces deux variables n'est pas linéaire. Il a été démontré que la teneur en azote maximale diminuait au cours du cycle, du fait d'une dilution de l'azote dans le volume de la plante (Salette et Lemaire 1981). C'est en s'appuyant sur ce constat que la théorie de la courbe de dilution et la définition d'une teneur en azote critique a été développée. Cette teneur critique se définit comme la teneur en azote minimale nécessaire à une vitesse de croissance en biomasse maximale (Greenwood et al. 1991). Elle a conduit à produire un indice de nutrition azotée qui renseigne sur la contrainte azotée subie par la plante (Lemaire et al. 1997). Cet indice de nutrition azoté (INN) a déjà été testé sur de nombreuses espèces et a prouvé sa robustesse (Lemaire et Salette 1984a; 1984b; Greenwood et al. 1991; Justes et al. 1994; Colnenne et al. 1998; Sheehy et al. 1998). Il ressort que cette théorie est valide pour un grand nombre d'espèces et que les relations établies sont très stables entre les espèces. En fait, seule la différence de type métabolique semble introduire une différence significative entre les espèces (Greenwood et al. 1990). S'il a déjà été testé et validé sur fétuque élevée et sur orge, il n'a cependant jamais été utilisé sur une plante pérenne et plantée en rang telle que la vigne. Le Bot et al. (1997) ont en revanche expérimenté cette méthode sur la tomate est une plante à croissance indéterminée et cultivée en rang.

La production de raisin de cuve se déroule généralement dans un milieu contraignant, plus favorable à une production de qualité (*Cf. Chapitre IV*). En conséquence, il est a priori difficile d'observer une teneur en azote critique dans les conditions normales de production de raisin de cuve. De plus, chez la vigne, une partie de l'offre de l'azote peut également être proposée par la mobilisation d'une partie des réserves de la plante, tamponnant ainsi un éventuel manque de fourniture d'azote par le sol (Conradie 1980; Glad et al. 1994; Gaudillère 1997). Cette possibilité de mobiliser de l'azote de réserve pour la production de matière sèche est notamment très importante en début de cycle (Yang et Hori 1979; Zapata et al. 2004). Celle-ci rend difficile, voire impossible, l'observation dans les parties aériennes produites d'une consommation de luxe de la plante comme cela a déjà été observé sur d'autres espèces (Justes et al. 1994). Plus vraisemblablement, l'azote éventuellement en excès est rapidement mobilisé vers les réserves pérennes contenues dans le bois et dans les racines.

Ce chapitre se propose donc d'utiliser ces deux indicateurs que sont la FTSW et l'INN pour essayer de déterminer les dynamiques de contraintes hydrique et azotée subies par les deux espèces associées au sein d'une vigne enherbée. Ce travail devrait ainsi permettre de savoir qui de l'eau et/ou de l'azote est le facteur limitant de la production au sein d'une vigne enherbée. L'utilisation de l'INN comme indicateur de l'état de nutrition azotée de la plante nécessite, dans un premier temps, la construction d'une courbe de teneur en azote critique pour la vigne et son évaluation. Le suivi dynamique de ces indicateurs permet également de mettre en évidence les interactions qui existent entre ces deux facteurs et comment elles affectent la vigne en particulier. Ce chapitre s'appuie pour cela sur les

résultats récoltés sur une expérimentation de trois ans réalisée dans la zone viticole méditerranéenne. Trois modes d'entretien du sol ont pour cela été testés.

3. Matériel et Méthodes

3.1. Site expérimental

L'expérimentation a été menée entre 2004 et 2006 sur une parcelle du Domaine du Chapitre situé près de Montpellier (43°31' N-3°51' E). Ce site se situe donc dans l'arc méditerranéen du vignoble français. La région se caractérise par un climat méditerranéen avec des précipitations moyennes annuelles d'environ 750 mm et un déficit moyen sur l'année de 174mm pour la période 1975-2005. Ce déficit hydrique moyen est d'ailleurs très supérieur au cours du cycle végétatif de la vigne. Les conditions climatiques de l'expérimentation sont représentées dans la *figure 2.3*.

Le sol de la parcelle d'étude est un sol brun calcaire, profond et homogène. Sa texture est argileuse selon le diagramme modifié de classification des textures de Jamagne (1967). Les vignes (*Vitis vinifera* L. cv. Aranel/Fercal) ont été plantées en 1998 à une densité de 3333 souches.ha⁻¹ (2,5 m x 1,2 m). Elles sont conduites selon une taille en double cordons de Royat et rognées à une hauteur de canopée de 1 m environ. Les rangs de vignes sont orientés W-NW/E-SE. Les modalités d'entretien du sol considérées sont les modalités enherbées (MR et MF), la modalité désherbée (MD), ainsi que, pour certains éléments, la modalité Témoin (MT) présente pour les années 2005 et 2006. Comme nous l'avons déjà vu, chaque traitement étudié (hors MT) contiennent deux placettes situées dans la parcelle en fonction de la position par rapport à la pente.

3.2. Expérimentation de terrain

3.2.1. Croissance végétative et élaboration du rendement de la vigne

Surface foliaire de la vigne

La surface foliaire de la vigne a été évaluée *in situ* pour chacune des placettes à l'aide d'un LAI-2000 (Plant canopy analyser, Li-Cor Inc.). Cette mesure a été réalisée du débourrement de la vigne à la vendange à raison d'une mesure tous les 15-20 jours (*Cf. Chapitre III –4.4.*). L'indice mesuré par l'appareil est ensuite transformé en LAI à l'aide d'une relation établie avec des mesures de surfaces foliaires en laboratoire (*Annexe 2*).

Biomasse aérienne produite par la vigne

Une fois par mois environ, entre le débourrement et la vendange, la matière sèche de 16 rameaux par placette d'étude a été pesée. Les biomasses représentées par le bois, les feuilles et le fruit ont été distinguées (*Cf. Chapitre III –4.4.*).

Rendement en raisin produit à la vendange

Chaque année, le rendement a été mesuré au moment de la vendange pour une douzaine de souches par placette (*Cf. Chapitre IV –4.3.*).

Poids de bois de taille de la vigne

Chaque hiver, le poids de bois de taille a été mesuré sur ces mêmes souches (*Cf. Chapitre III –4.4.*).

3.2.2. Croissance de la culture intercalaire

La croissance de la culture intercalaire renseigne sur l'importance de la compétition pour les ressources. Elle a donc été suivie au cours des 3 années d'expérimentation. Deux types de mesures ont été réalisées : la production de biomasse aérienne cumulée sur l'année et le taux de couverture de la surface enherbée pour chacun des enherbements étudiés (Cf. Chapitre III –4.2.). Les prélèvements sont réalisés une fois à l'automne puis à partir du mois de mars tous les 15-20 jours environ. Huit prélèvements par placette sont réalisés à chaque fois.

3.2.3. Indicateurs de contraintes hydriques subies par les espèces associées

La FTSW a été utilisée pour servir d'indicateur du statut hydrique de chacun des systèmes étudiés. Elle est calculée à partir des mesures neutroniques (Cf. Chapitre V – 4.2.1.) réalisées entre 2004 et 2006. Les potentiels de base (Ψ_b) ont également été mesurés au cours des 3 années étudiées (Cf. Chapitre III –4.2.) et peuvent être transformés en FTSW selon la relation proposée par Lebon et al. (2003) et Pellegrino et al. (2004). Enfin, la mesure du rapport isotopique $\Delta^{13}C$ sur les produits carbonés du jus de raisin nous renseigne sur la contrainte hydrique subie par la vigne au cours de la période de maturation du raisin. Il a été mesuré chaque année (Cf. Chapitre III –4.2.).

3.2.4. Indicateurs de contraintes azotées

Mesure au champ des indicateurs de contrainte azotée subie par la vigne

Chaque année, l'indice chlorophyllien des vignes de chacune des placettes d'étude a été suivi à l'aide d'un chlorophylle-mètre (Cf. Chapitre III –4.2.). Cet indice, bien corrélé au statut azoté de la plante (Ercoli et al. 1993; Baret et Fourty 1997; Spring et Zufferey 2000), a été suivi chaque année entre le mois de juin et la vendange.

Comme nous l'avons déjà vu, les teneurs en azote massiques des feuilles de vigne sont dosées régulièrement pour chacune des placettes de suivi (Cf. Chapitre III –4.2.). Ces teneurs en azote peuvent ensuite être transformées en teneur en azote surfacique à l'aide des mesures de surfaces foliaires réalisées (Cf. Chapitre III –4.4.).

La teneur en azote des moûts a été également mesurée pour chacune des placettes (Cf. Chapitre III –4.2.).

Détermination de l'état de nutrition azotée des enherbements

Afin de déterminer l'état de nutrition azotée des enherbements, la courbe de teneur en azote critique établie précédemment sur la fétuque élevée a été utilisée (Lemaire et Salette 1984a; 1984b). Pour l'orge, ce sont les paramètres de la courbe de dilution établie sur le blé d'hiver qui ont été utilisés (Justes et al. 1994; Justes et al. 1997). Par conséquent, les courbes d'évolution de la teneur en azote critique ($N_c\%$) obtenues pour les deux enherbements sont de la forme :

$$\text{Pour la fétuque élevée : } N_c\% = 4,8 \cdot MS^{-0,32} \quad [8.3.2. a]$$

$$\text{Pour l'orge : } N_c\% = 5,3 \cdot MS^{-0,44} \quad [8.3.2. b]$$

A partir de ces deux relations, les indices de nutrition azotée des deux enherbements (INN_h) peuvent être calculés.

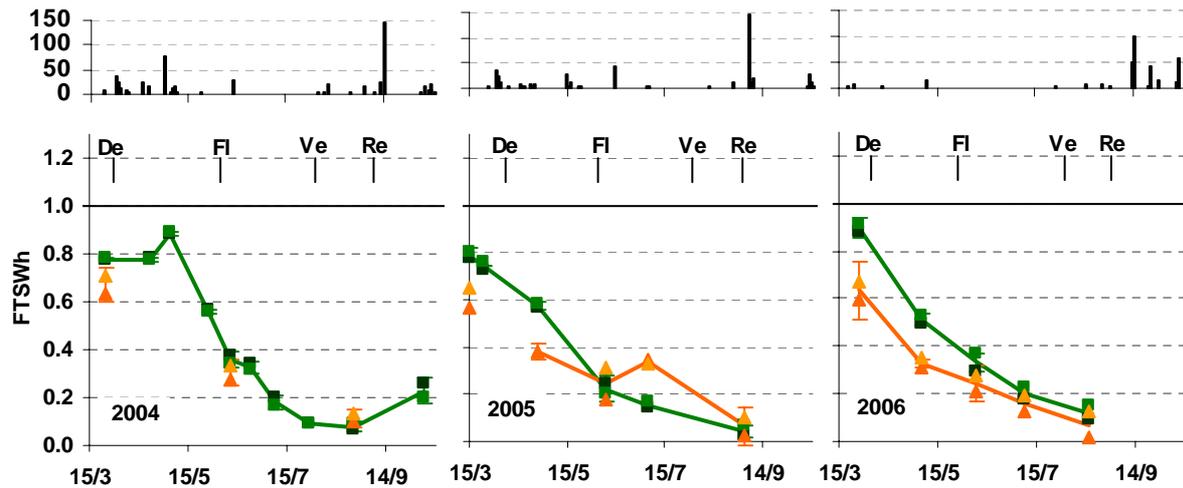


Figure 8.1 – FTSW de l’enherbement déterminée par la méthode neutronique pour chacune des modalités enherbées étudiées. Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲) et MR2 (▲). Les barres verticales continues situées en haut du graphique représentent les principaux stades phénologiques de la vigne. Débourrement (De), Floraison (Fl), Véraison (Ve) et Récolte (Re). Les intervalles de confiance des différentes modalités ont été calculés par un Test de Student avec $\alpha=0.05$. Ils sont représentés par des barres encadrant les droites. Le panneau du haut représente les précipitations journalières observées sur la parcelle expérimentale.

Construction d'une courbe de teneur en azote critique pour la vigne

Pour la vigne, l'évolution de la teneur en azote critique en fonction de la matière sèche aérienne produite a été considérée selon une première phase en plante isolée et une deuxième en peuplement dense (Lemaire et al. 1997). Au cours de cette deuxième phase, la croissance de la plante est affectée par la présence des autres plantes qui l'entourent et la concurrence pour le rayonnement qu'elle entraîne. Les feuilles les plus âgées, situées à l'intérieur de la canopée du peuplement sont par conséquent moins riches en azote que les feuilles jeunes situées à la surface de la canopée (Williams 1987). Ces différences seraient liées à la quantité de lumière interceptée par chacun des types de feuilles (Gastal et Lemaire 2002).

Cette deuxième phase correspond ainsi à la loi de dilution classique de l'azote en fonction de la matière sèche produite. La teneur en azote critique correspondant à cette phase en peuplement est donc de la forme :

$$Nc\%_p = a_p \cdot MS^{-b_p} \quad [8.3.2. c]$$

La première est également considérée sous la forme :

$$Nc\%_i = a_i \cdot MS^{-b_i} \quad [8.3.2. d]$$

On a également :

$$Nm\% = a_i \cdot MSm^{-b_i} \quad [8.3.2. e]$$

La teneur en azote métabolique (Nm%) n'est censée pouvoir être observée que pour une plante n'ayant que des organes fonctionnels. L'état le plus approchant sera probablement celui des pointes vertes au moment du débourrement. Des prélèvements ont par conséquent été réalisés à ce stade en 2005 et en 2006.

4. Résultats

4.1. Période et intensité des contraintes hydriques subies par chacune des espèces associées

Dynamique de l'état hydrique des enherbements

Chaque année, au moment du débourrement de la vigne, le statut hydrique de l'enherbement permanent (MF) est légèrement supérieur à celui de l'enherbement semi-permanent (MR) (*Figure 8.1*). En effet, tandis que la FTSW de la zone explorée par la système racinaire de l'enherbement (FTSW_h) de la modalité MF est à un niveau compris entre 0,8 et 0,9 selon les années, celle de la modalité MR est plutôt comprise entre 0,6 et 0,7. Il a déjà été montré que l'élongation des feuilles d'une fétuque élevée est déjà affectée pour de telles valeurs de FTSW (Volaire et Lelièvre 2001). Par la suite, l'assèchement du profil de sol exploré par la fétuque élevée est sensiblement plus rapide que celui de l'orge. Ainsi, l'état hydrique de l'enherbement permanent reste significativement plus favorable que celui de l'enherbement semi-permanent jusqu'à la floraison de la vigne environ (*Figure 8.1*). Peu après ce stade, l'enherbement semi-permanent est détruit. De son côté, le sol sous l'enherbement permanent s'assèche peu à peu et limite ainsi sa transpiration. En effet, Volaire et Lelièvre (2001) observent que la sénescence des feuilles et l'assèchement des limbes de la fétuque élevée augmentent fortement en dessous d'une FTSW_h de 0,3 environ. Ce seuil est atteint chaque année dans la quinzaine de jours qui suit la floraison de la vigne. Ceci explique que, mis à part en 2005 où la FTSW_h pour la modalité MR remonte légèrement début juillet, l'évolution des FTSW_h soit sensiblement la même dans les deux modalités enherbées (*Figure 8.1*).

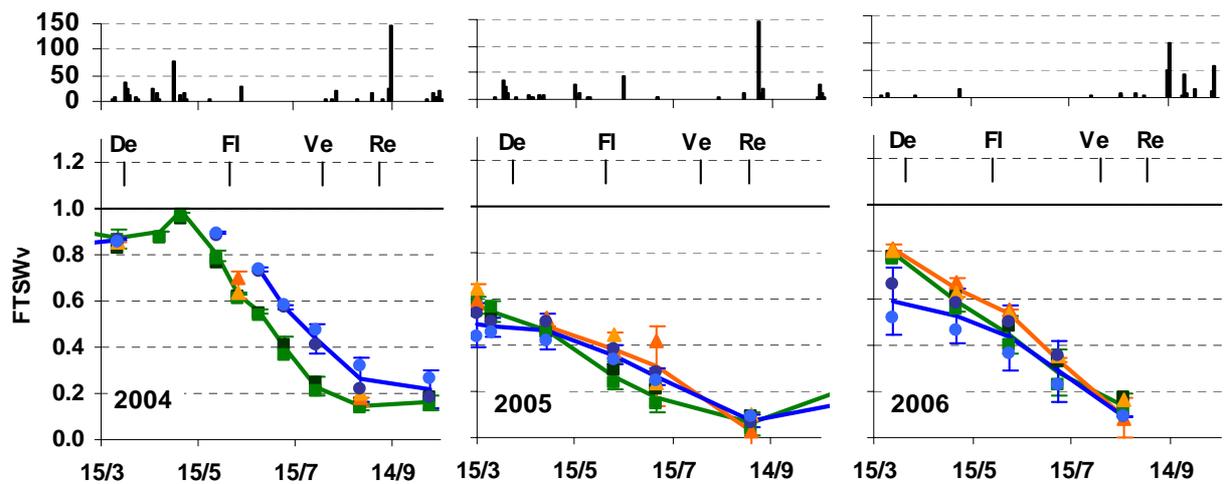


Figure 8.2 – FTSW de la vigne déterminée par la méthode neutronique pour chacune des modalités étudiées. Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲), MR2 (▲), MD1 (●) et MD2 (●). Les barres verticales continues situées en haut du graphique représentent les principaux stades phénologiques de la vigne. Débourrement (De), Floraison (Fl), Véraison (Ve) et Récolte (Re). Les intervalles de confiance des différentes modalités ont été calculés par un Test de Student avec $\alpha=0.05$. Ils sont représentés par des barres encadrant les droites. Le panneau du haut représente les précipitations journalières observées sur la parcelle expérimentale.

Evolution de l'état hydrique de la vigne en fonction de la modalité d'entretien du sol

L'évaluation de la FTSW de la zone explorée par le système racinaire de la vigne (FTSW_v) montre combien le taux de remplissage du profil de sol est variable d'une année sur l'autre et en fonction des traitements considérés (*Figure 8.2*). Ainsi, si en 2004, l'ensemble des profils des trois modalités étudiées sont proches de la capacité au champ au moment du débourrement de la vigne, le taux de remplissage de ce profil est d'à peine 50 à 60% en 2005. Il est intermédiaire en 2006.

En 2004, l'état hydrique de la vigne n'est pas différent entre les traitements jusqu'à la deuxième quinzaine de mai (*Figure 8.2*). A partir de cette date, la faible importance des précipitations ajoutée à une transpiration de la fétuque qui s'accélère font que le statut hydrique de la vigne enherbée toute l'année (MF) se dégrade plus rapidement que celui de la vigne désherbée (MD). La FTSW_v de la modalité enherbée une partie de l'année (MR) semble connaître une évolution similaire à la modalité MF. La différence entre traitements enherbés et désherbé devient significative peu avant la floraison de la vigne. A partir de cette date, les FTSW_v de chacun des traitements semblent diminuer à peu près à la même vitesse tandis qu'on entre dans la période sèche. Ainsi, la différence de statut hydrique entre les vignes enherbées et la vigne désherbée se maintient à un niveau significatif (*Figure 8.2*). Peu après la véraison, la FTSW_v de la modalité enherbée toute l'année ralentit sa décroissance pour se maintenir à un niveau de FTSW_v de l'ordre de 0,2. La décroissance de la FTSW_v de la modalité MD se poursuit dans le même temps et l'écart entre les deux traitements diminue pour ne plus être significatif peu avant la récolte. En 2005, la recharge hivernale ayant été très inférieure à celle de 2004, les trois traitements présentent des FTSW_v déjà peu élevées dès le débourrement (*Figure 8.2*). Par la suite, la FTSW_v de la modalité MF diminue plus rapidement que celles des deux autres modalités et devient significativement inférieure à celle de la modalité désherbée entre la floraison et la véraison. Elle n'est en revanche pas significativement différente de celle mesurée dans la modalité MR, bien qu'inférieure, car la grande variabilité observée entre les deux placettes ne permet pas de mettre en évidence une différence significative (*Figure 8.2*). Au débourrement de la vigne pour l'année 2006, la recharge des modalités enherbées est significativement supérieure à celle de la modalité MD. Cependant, la grande aridité du printemps qui suit et la transpiration des enherbements fait que ces différences disparaissent rapidement entre les trois traitements. En conséquence, la contrainte hydrique subie par la vigne semble être sensiblement la même pour les trois traitements suivis au cours de cette année là (*Figure 8.2*). En revanche, il semble que l'année 2006 ait surtout différencié les placettes situées en haut de la pente de celles en bas de pente. En effet, quel que soit le traitement considéré, les vignes du bloc bas subissent une contrainte hydrique inférieure tout au long de l'année du fait d'une meilleure recharge du profil en bas de pente. Ces différences s'expliquent probablement en partie par un ruissellement supérieur en haut de pente et, par conséquent, une infiltration moindre des eaux de pluies au cours de l'hiver.

4.2. Quelle contrainte azotée pour la vigne et l'herbe ?

4.2.1. Statut azoté des enherbements

Les INN_h observés mettent en évidence que les deux enherbements subissent, tout au long de l'expérimentation, une contrainte azotée très forte (*Figure 8.3*). En effet, que ce soit pour l'enherbement permanent ou l'enherbement semi-permanent, les INN_h sont généralement inférieurs à 0,4 tout au long de l'année et tombent même à des valeurs de 0,2 au début de la saison sèche. Ces valeurs témoignent de la relative pauvreté du milieu et de son incapacité à fournir par la simple minéralisation suffisamment d'azote minéral pour

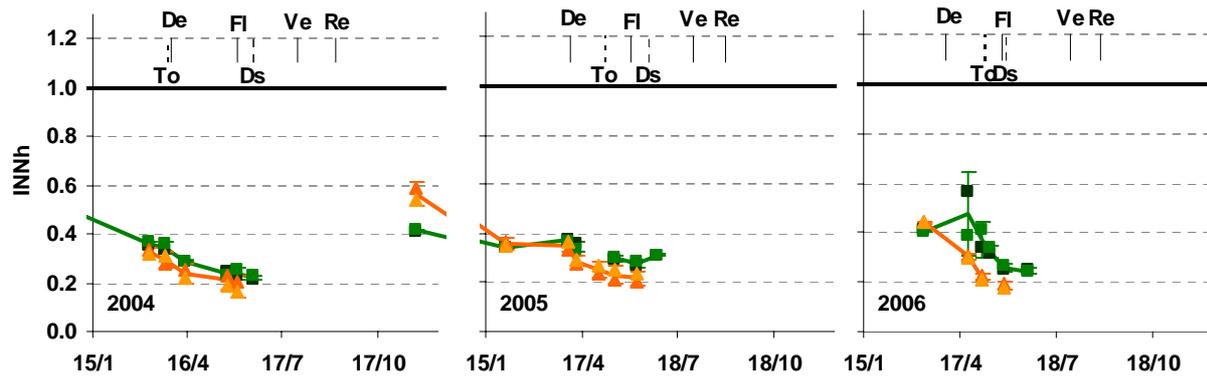


Figure 8.3 – Evolution des indices de nutrition azotée des enherbements (INN_h) en fonction de la modalité d’entretien du sol. Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲) et MR2 (▲). Les barres verticales continues situées en haut du graphique représentent les principaux stades phénologiques de la vigne. Débourrement (De), Floraison (Fl), Véraison (Ve) et Récolte (Re). Les barres verticales en pointillé représentent les principaux travaux réalisés sur l’enherbement : la tonte (To) et la destruction de l’enherbement semi-permanent (Ds). Les intervalles de confiances des différentes modalités ont été calculés par un Test de Student avec $\alpha=0,05$. Ils sont représentés par des barres encadrant les droites.

subvenir aux besoins des deux enherbements. Gonzalez Dugo (2006) observe ainsi que l'état de nutrition azotée de la fétuque élevée est profondément lié à l'offre du sol en azote. Ceci explique également la très faible croissance aérienne de ceux-ci en comparaison à la biomasse produite dans des conditions plus favorables. Globalement, les niveaux de nutrition azotée des deux enherbements ne sont pas significativement différents et les évolutions d'INN_h pour les deux couverts se font en parallèle. Une différence significative apparaît tout de même dans les INN_h des deux espèces pour le prélèvement réalisé quelques temps après la levée de l'orge au cours de l'automne 2004. A cette date, l'INN_h en MR est supérieur à celui de MF (Figure 8.3). Ceci s'explique probablement par le fait que le couvert d'orge est encore en phase juvénile de croissance. Ses besoins en azote sont donc encore modérés. De plus, l'automne ayant été pluvieux (Figure 2.3), la minéralisation de l'azote organique du sol a pu reprendre quelques temps auparavant. Ceci ajouté au fait que les consommations d'azote minéral par les deux cultures au cours de la période qui précède la levée de l'enherbement sont faibles, la fourniture d'azote par le sol est finalement meilleure à ce moment là. Pour finir, le niveau de nutrition azotée est significativement plus faible en MR qu'en MF au cours du printemps 2006 (Figure 8.3). Ceci s'explique par la forte croissance de l'orge au cours de cette période (Figure 3.1) qui induit une forte demande en azote et par l'aridité de l'hiver et du printemps de cette année là qui ont entraîné une minéralisation de l'azote limitée (Figure 7.7). En conséquence, le rapport offre/demande devient très défavorable pour le couvert d'orge. De plus, certains auteurs ont montré qu'une contrainte hydrique pouvait être à l'origine d'une dégradation de l'état azoté de la plante (Lemaire et Denoix 1987b; Volaire et al. 1998; Cantero-Martinez et al. 2003; Gonzalez Dugo 2006). Ainsi, Volaire et al. (1998) observent une diminution de la teneur en nitrate des parties aériennes chez le dactyle et le ray-grass allant jusqu'à 90% en cas de sécheresse importante. D'autres ont également montré une diminution de l'absorption d'azote en cas de sécheresse (Larsson 1992; Pirmoradian et al. 2004). Ainsi, la contrainte hydrique importante subie par l'orge au début du printemps (Figure 8.1) peut avoir contribué à diminuer l'INN de l'orge.

4.2.2. Statut azoté de la vigne

4.2.2.1. Elaboration d'une courbe de teneur en azote critique pour la vigne

Les teneurs en azote les plus élevées mesurées peu après le débourrement, au stade « pointe verte », sont de l'ordre de $Nm\% = 0,051 \text{ g N.g}^{-1}\text{MS}$ environ. Ceci correspond à une matière sèche aérienne produite de $MSm = 0,01 \text{ T.ha}^{-1}$ approximativement. Cette valeur est assez nettement inférieure aux $0,065 \text{ gN.g}^{-1}\text{MS}$, valeur proposée pour le blé, autre plante en C3 (Justes et al. 1997).

Si on considère :

$$a_p \cdot MS^{-b_p} = a_i \cdot MS^{-b_i} \quad [8.4.2. a]$$

La résolution du système composé des équations [8.3.2. e] et [8.4.2. a] donne :

$$b_i = \frac{b_p \cdot \log(MS) - \log\left(\frac{a_p}{Nm}\right)}{\log\left(\frac{MS}{MSm}\right)} \quad [8.4.2. b]$$

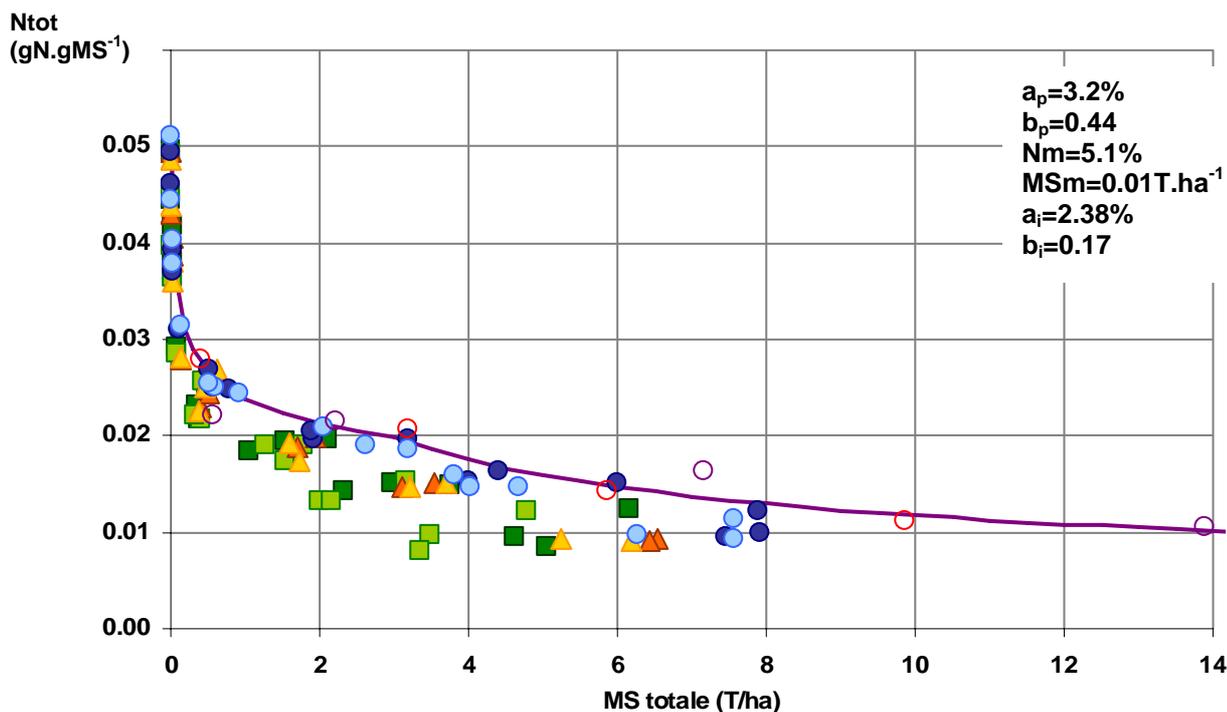


Figure 8.4 – Relation entre teneur en azote et matière sèche aérienne produite. Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲), MR2 (▲), MD1 (●), MD2 (●) et MT en 2005 et 2006 (○, ○).

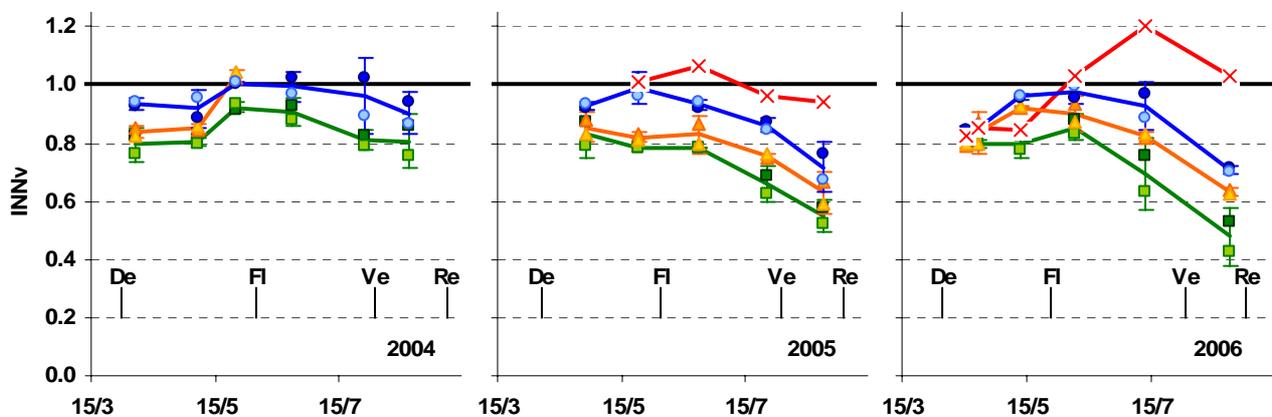


Figure 8.5 – Evolution des indices de nutrition azotée de la vigne (INN_v) en fonction de la modalité d'entretien du sol. Les barres verticales continues situées en bas du graphique représentent les principaux stades phénologiques de la vigne. Débourrement (De), Floraison (Fl), Véraison (Ve) et Récolte (Re). Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲), MR2 (▲), MD1 (●), MD2 (●) et MT (×). Les intervalles de confiance des différentes modalités ont été calculés par un Test de Student avec $\alpha=0,05$. Ils sont représentés par des barres encadrant les droites.

Et :
$$a_i = \frac{Nm}{MSm^{-b_i}} \quad [8.4.2. c]$$

Par conséquent, les paramètres a_i et b_i sont obtenus au travers de la mesure de $Nm\%$ et MSm et seuls les paramètres a_p et b_p doivent encore être déterminés.

Les plantations de vignes se différencient d'un couvert herbacé homogène de par la structure de plantation en rangs qui induit une phase de croissance en plante isolée plus longue. Le passage d'un peuplement en plante isolé à un peuplement dense est donc plus tardif que le seuil généralement considéré de $1T.ha^{-1}$ (Lemaire et Brisson 2005; García de Cortázar 2006).

Les paramètres de la courbe de dilution de l'azote a_p et b_p ont finalement été optimisés d'après les points observés pour une vigne bien alimentée en azote (MT). Considérant l'hypothèse qu'il est difficile d'observer une consommation de luxe d'azote dans les traitements autres que la modalité irriguée et fertilisée (MT), la courbe de dilution de l'azote obtenue ne peut en théorie pas être dépassée (*Figure 8.4*). Cette hypothèse nous permet ainsi d'obtenir une première estimation de la courbe de teneur en azote critique.

4.2.2.2. Entretien du sol et évolution de l'état de nutrition azotée de la vigne.

Une modalité suffisamment irriguée et fertilisée pour ne pas subir de contrainte azotée ?

La modalité MT a été créée pour observer le comportement d'une vigne sans contrainte hydrique ou azotée forte. En 2005, malgré un très léger fléchissement en fin de cycle, l'indice de nutrition azotée de la vigne (INN_v) de cette modalité se maintient à un niveau proche de 1 qui témoigne d'une absence de contrainte azotée significative (*Figure 8.5*). En 2006 en revanche, l' INN_v de la vigne irriguée et fertilisée est, dans un premier temps, au même niveau que celui de la vigne enherbée toute l'année et très inférieur à celui des deux autres modalités. Ceci suggère donc une possible contrainte azotée au début du cycle. En revanche, cet INN_v remonte rapidement peu avant la floraison et se maintient par la suite à un niveau égal voire supérieur à 1 (*Figure 8.5*). Il semble donc bien que la fertilisation et l'irrigation pratiquées sur cette modalité aient permis à la vigne de ne pas subir de contrainte azotée significative, à l'exception éventuelle d'une contrainte azotée peu après le débourrement en 2006.

Des différences de niveau de nutrition azotée perceptibles entre les modalités dès le débourrement

Les INN_v calculés témoignent d'un niveau de nutrition azotée peu après le débourrement assez constant d'une année sur l'autre pour une même modalité (*Figure 8.5*). Ainsi, les INN_v pour les vignes enherbées (MR et MF) sont généralement compris entre 0,75 et 0,85, tandis que ceux de la modalité désherbée sont généralement supérieurs à 0,9. En 2006 cependant, l' INN_v de la modalité MD est au même niveau que ceux des modalités enherbées (environ 0,85). Ainsi, à l'exception de 2006, une différence sensible apparaît dans les niveaux de nutrition azotée entre les vignes enherbées et celles qui ne le sont pas.

Un gradient de contrainte azotée subie par la vigne lié à l'intensité de la concurrence induite par la modalité d'entretien du sol

Sur l'ensemble du cycle, les INN_v calculés ne tombent quasiment jamais en dessous de 0,5. On observe cependant, que l'indice calculé se maintient à un niveau élevé pour toutes les modalités en 2004 ($>0,8$) tandis qu'il chute après la floraison en 2005 et 2006, pour toutes les modalités observées en dehors de la modalité irriguée et fertilisée (MT)

(Figure 8.5). En règle générale, quelle que soit la modalité considérée, l'indice calculé remonte après le débourrement jusqu'à atteindre un maximum à la floraison de la vigne. Par la suite, l' INN_v diminue dans tous les traitements jusqu'à un minimum au moment de la récolte. Globalement, le calcul de l' INN_v met en évidence une contrainte azotée subie par les vignes enherbées. Un gradient de contrainte apparaît généralement parmi les modalités non irriguées entre la modalité MD, qui est la moins contrainte et a un statut azoté le plus souvent satisfaisant et la modalité MF qui est la plus contrainte pour l'azote. Ce gradient suit donc le gradient de concurrence déjà observée pour les différentes ressources (Cf. Chapitres V, VI et VII).

Un effet de la modalité d'entretien du sol accentué par les conditions de l'année

L'année climatique joue un rôle important dans l'évolution de l'état de nutrition azotée de la vigne en fonction des modalités d'entretien du sol. Ainsi, les vignes semblent généralement plus contraintes à la récolte en 2006 (INN_v compris entre 0,4 et 0,7 selon la modalité), qu'en 2005 (entre 0,5 et 0,8). L'année 2004 ressort comme étant l'année de loin la moins contraignante avec des INN_v à la récolte compris entre 0,8 et 1,0 (Figure 8.5).

Généralement, le niveau de nutrition azotée de chacune des modalités (hors irriguée) est comparable peu après le débourrement. Cependant, l' INN_v remonte le plus souvent tandis que la plante approche du stade de la floraison. Ainsi, la plupart des traitements ont un INN_v proche de 1 à ce stade. Seule la modalité avec un enherbement permanent ne permet pas de remontée sensible de cet INN_v à ce stade. En effet, celui-ci demeure généralement stable entre le débourrement et la floraison en présence d'un enherbement permanent. C'est aussi le cas avec un enherbement semi-permanent au cours de l'année 2005, particulièrement contraignante. Conséquence de cette remontée, l' INN_v de la modalité MD est significativement supérieur à celui de la modalité enherbée toute l'année avant la floraison. Celui de la modalité enherbée une partie de l'année est équivalent à celui de MD en 2004 et en 2006 mais plus proche de MF en 2005 (Figure 8.5).

Par la suite, l' INN_v des différentes modalités a tendance à se dégrader. La diminution de cet indicateur est ainsi plus ou moins précoce selon la modalité mais aussi selon l'année. Ainsi, l'année 2004 semble avoir été l'année la moins contraignante et les INN_v calculés sont assez stables après la floraison malgré une légère diminution entre la floraison et la véraison dans la modalité MF et plus tardive en MD (Figure 8.5). En 2005, année plus contraignante, la chute de l' INN_v est marquée dans toutes les modalités étudiées. Elle est cependant rapide dès le mois de juillet en MF tandis qu'elle baisse d'abord lentement dans les deux autres modalités jusqu'à la véraison avant de s'accélérer par la suite (Figure 8.5). D'ailleurs, du fait que la chute est plus rapide en MD qu'en MR avant la véraison, la différence entre ces deux traitements n'est plus significative peu après ce stade. En 2006 enfin, l'évolution de l' INN_v en MF est proche de celle déjà observée en 2005 avec un INN_v stable jusqu'à la floraison et une diminution rapide par la suite. L' INN_v de la modalité MR, après une remontée entre le débourrement et la floraison, suit une évolution similaire avec une diminution de celui-ci à partir de la floraison qui s'accélère à la véraison. Enfin, la modalité désherbée maintient un INN_v assez constant un peu plus longtemps mais suit ensuite une trajectoire proche. Cependant, cette chute ayant eu lieu plus tard dans le cycle, le niveau de nutrition azotée de la vigne désherbée demeure supérieur à celui des modalités enherbées jusqu'à la fin du cycle (Figure 8.5).

Des différences entre blocs qui se creusent au cours de l'été

Chaque année, une différence dans les INN_v des blocs haut et bas est observée au moment de la récolte. Généralement, celle-ci n'est pas perceptible en début de cycle mais l'écart entre les deux blocs se creuse au cours du cycle de la vigne. Cette différence entre

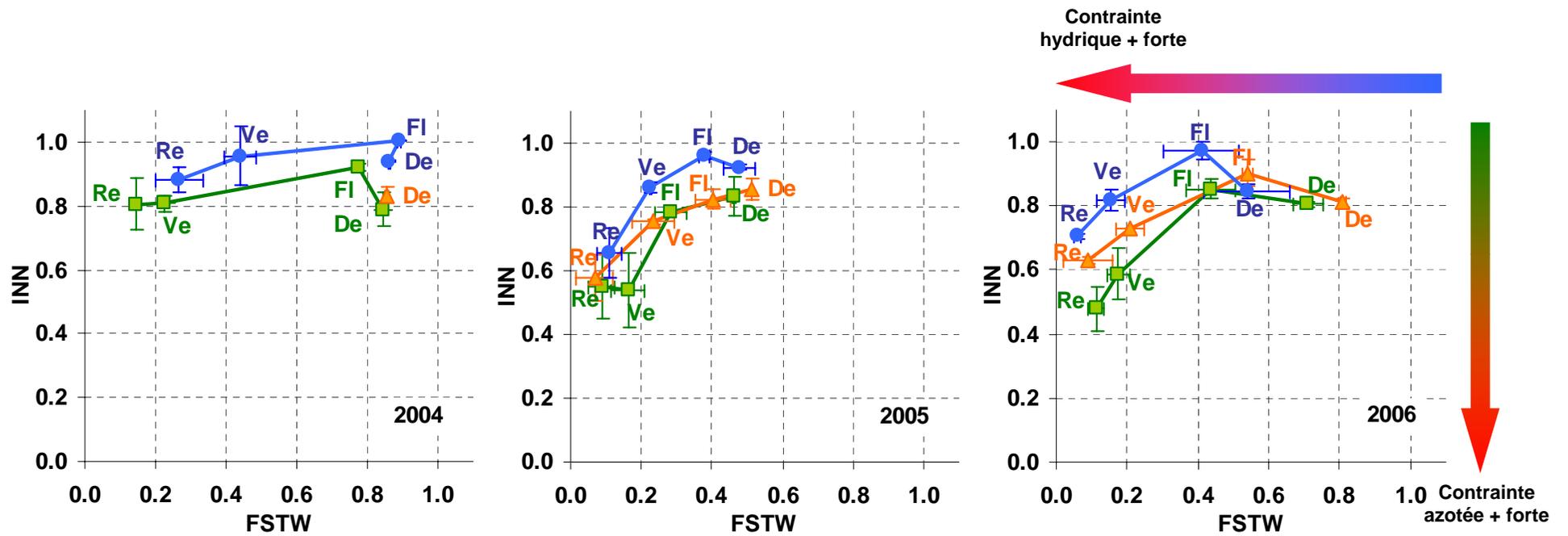


Figure 8.6 – Trajectoire des niveaux de nutrition azotée (INN) en fonction du niveau de contrainte hydrique (FSTW) de la vigne et de la modalité d’entretien du sol. Les INN et FSTW sont représentés pour chacun des grands stades phénologiques qui sont le débourrement (De), la floraison (FI), la véraison (Ve) et maturité technologique (Re). Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des modalités MF (■), MR (▲) et MD (●). Les intervalles de confiance des différentes modalités ont été calculés par un Test de Student avec $\alpha=0,05$. Ils sont représentés par des barres encadrant les points.

blocs entraîne une variabilité parfois importante des INN_v calculés qui rendent difficiles la distinction entre les différentes modalités en fin de cycle (*Figure 8.5*).

4.3. Dynamique et intensité de la concurrence pour les ressources du sol entre vigne et enherbement

Des trajectoires de contraintes hydrique et azotée comparables pour le chemin parcouru

Différents auteurs ont montré qu'une contrainte hydrique ou azotée entraîne une réaction de la plante d'intensité différente selon le stade de développement auquel celle-ci se trouve (Hardie et Considine 1976; Candolfi-Vasconcelos et al. 1994; Hilbert 2002; Ojeda et al. 2002; Rodriguez-Lovelle et Gaudillère 2002; dos Santos et al. 2003; Ferreyra et al. 2004; Pellegrino et al. 2006). Or, si la concurrence pour les ressources entre vigne et culture intercalaire est indéniable, il est intéressant d'observer à quel moment et avec quelle intensité la vigne subit des contraintes hydrique ou azotée du fait de cette compétition. Ainsi, répartir chacun des traitements étudiés dans un plan composé du niveau de nutrition azotée de la vigne et du niveau d'eau disponible permet de distinguer différentes trajectoires en fonction du traitement mais aussi de l'année climatique en cours et précédente (*Figure 8.6*). Si les trajectoires de contraintes obtenues pour chacun des traitements sont assez comparables dans le chemin parcouru, elles se différencient en revanche par le moment où les différents niveaux de contraintes sont finalement atteints et par leur intensité maximale.

Des années climatiques bien différenciées en terme de trajectoire de contraintes

L'année 2004 se caractérise par des trajectoires très horizontales qui représentent des vignes peu contraintes pour l'azote mais avec des niveaux de contrainte hydrique très variables au cours de l'année (*Figure 8.6*). Au cours de l'année 2005, les trajectoires sont plus compactes et diagonales. Les vignes connaissent donc tout au long de leur cycle une contrainte hydrique modérée à forte et leur statut azoté se dégrade au cours du cycle. Enfin, l'année 2006 présente des trajectoires intermédiaires entre les deux années, d'abord horizontales puis diagonales après la floraison. Celles-ci montrent donc une dégradation de l'état hydrique de la plante assez rapide avant la floraison. Par la suite, la vigne connaît à la fois une augmentation de la contrainte hydrique et de la contrainte azotée. Seule la modalité dés herbée présente une trajectoire plutôt similaire à celle connue en 2005 (*Figure 8.6*). Chaque millésime est donc bien différencié en terme de trajectoires de contrainte observées et cet effet millésime est modifié par la modalité d'entretien du sol.

Un niveau de contrainte hydrique au cours de l'année très dépendant de la recharge hivernale

Globalement, le niveau de $FTSW_v$ au débourrement dépend de l'importance des précipitations au cours de l'automne et de l'hiver qui le précèdent et de la recharge du profil qui leur est associée. En climat méditerranéen, la contrainte hydrique subie par la vigne tout au long du cycle est ensuite très dépendante de cette recharge hivernale. En effet, suite au débourrement, la $FTSW_v$ diminue progressivement du fait des consommations des différentes espèces cultivées et de la faiblesse, voire l'absence, des précipitations au cours de la période de croissance et de production de la vigne. Ainsi, l'année 2004 se différencie des deux autres années climatiques étudiées par l'importance des précipitations connues par la parcelle au cours de l'automne et de l'hiver précédent (*Figure 2.3*). En conséquence, le niveau de $FTSW_v$ est comparable au débourrement de la vigne pour l'année 2004 et il correspond à un sol presque parfaitement rechargé (*Figure 8.6*). De plus, les précipitations régulières entre le débourrement et la floraison au

cours de cette année permettent à chacune des modalités de maintenir un niveau de contrainte assez constant sur cette période. Au cours des années plus sèches (2005 et 2006), la recharge du profil au cours de l'hiver est moins favorable et la modalité d'entretien du sol prend alors de l'importance. En effet, le ruissellement étant diminué par la présence de l'enherbement (particulièrement le permanent) (Cf. *Chapitre V*) (Battany et Grismer 2000; Le Bissonais et al. 2004), la recharge est alors meilleure dans ces traitements enherbés. Le niveau de $FTSW_v$ au débourrement est alors égal, du fait des consommations de l'enherbement avant ce stade, à supérieur à celui de la modalité désherbée (MD) (*Figure 8.6*). Si l'on prend le seuil de $FTSW_v = 0,5$ comme celui définissant l'apparition d'une contrainte hydrique encore modérée (Pellegrino et al. 2005), on observe que ce seuil n'est dépassé pour tous les traitements qu'après la floraison en 2004. Il est en revanche atteint un peu avant la floraison dans la plupart des traitements en 2006 et dès le débourrement en 2005 (*Figure 8.6*). Ainsi, au moment de la récolte de l'année 2005, à la fois le niveau de contrainte hydrique et l'état de nutrition azotée sont très dégradés dans chacune des modalités. L'année 2006 présente également de fortes contraintes hydriques au moment de la récolte dans tous les traitements mais les niveaux de nutrition azotée les distinguent (*Figure 8.6*).

Des enherbements qui accélèrent l'apparition de contraintes et en accentuent l'importance

Si la recharge est parfois meilleure dans les modalités enherbées, la transpiration de l'enherbement accélère l'assèchement du profil, au moins en surface. Par conséquent, chaque année, le niveau de contrainte hydrique est comparable entre toutes les modalités et est parfois même plus défavorable dans les modalités enherbées (*Figure 8.6*). Par la suite, l'apparition de contrainte est plus précoce dans les modalités enherbées et les contraintes obtenues sont plus intenses. L'augmentation du niveau de contrainte hydrique connue par la vigne au cours de l'année est plus rapide dans la modalité avec un enherbement permanent en 2005. Elle est en revanche assez comparable en 2006. La différence entre les modalités MR et MF au cours de cette année là en terme de contrainte hydrique est essentiellement le fait d'une $FTSW_v$ légèrement supérieure au débourrement avec un enherbement semi-permanent. Cette différence est probablement la conséquence d'une consommation d'eau beaucoup plus importante par l'enherbement permanent avant ce stade. Les vignes des deux modalités enherbées se distinguent en revanche systématiquement par leur niveau de nutrition azotée. En effet, après la floraison, la dégradation de celui-ci est souvent plus rapide dans la modalité avec un enherbement permanent qu'avec un enherbement semi-permanent (*Figure 8.6*), détruit après ce stade.

Des différences entre modalités plus liées, en début de cycle, à l'état azoté de la vigne

En début de cycle, les niveaux de contrainte hydrique sont souvent peu différents d'une modalité à l'autre. Pour autant, les vignes des différentes modalités se distinguent l'une de l'autre comme le montre des différences de croissance très précoces (Cf. *Chapitre III*). Ainsi, ce sont plutôt les niveaux de nutrition azotée qui différencient les modalités entre elles sur la période entre le débourrement et la floraison de la vigne. Ainsi, les INN_v sont généralement inférieurs dans les modalités enherbées au débourrement. Entre le débourrement et la floraison cependant, l'amélioration du niveau de nutrition azotée généralement observé (*Figure 8.5*) différencie bien souvent la modalité avec un enherbement temporaire de la modalité avec un enherbement permanent plus contrainte (*Figure 8.6*).

Un niveau de contrainte azotée en fin de cycle liée à la contrainte hydrique ?

Cette dégradation de l'état de nutrition azotée de la vigne, notamment dans les modalités enherbées, semble également très liée à la contrainte hydrique connue par la vigne dans le même temps. En effet, cette chute de l'INN_v est généralement obtenue en fin de cycle, lorsque la contrainte hydrique subie par la vigne augmente sensiblement (*Figure 8.6*). Elle est également plus forte dans la modalité avec un enherbement permanent qui connaît également les contraintes hydriques les plus précoces et les plus intenses. Pour autant, cette contrainte hydrique ne suffit pas à expliquer entièrement le niveau de nutrition azotée puisque une FTSW_v faible à la véraison dans la modalité MF en 2004 n'a pas entraîné de chute de l'INN_v par la suite (*Figure 8.6*).

5. Discussion

5.1. L'INN est-il un indicateur pertinent pour évaluer la contrainte azotée subie par la vigne ?

La théorie de la teneur en azote critique a été établie à partir des caractéristiques de teneur en azote et de biomasse des organes végétatifs aériens. Ainsi, divers auteurs déconseillent l'utilisation de cette méthode sur des espèces pérennes car l'existence d'organes de stockage notamment peut conduire à des déviations importantes par rapport aux courbes de référence (Gastal et Lemaire 1997). En effet, ces organes ont souvent des teneurs en azote différentes de la partie végétative de la plante et la dynamique d'évolution de cette teneur n'est pas forcément la même que celle des tissus végétatifs.

Au cours du cycle de la vigne, les organes de stockage de la vigne contenus dans les parties pérennes (racines surtout et tronc) se conduisent comme un puit à part entière et concurrencent donc les autres organes pour l'azote (Habib 1984; Gaudillère 1997). Ainsi, tout azote inutile pour la croissance des parties aériennes est stocké dans ces organes. En conséquence, il est normal que l'INN_v calculé ici ne permette pas d'observer une consommation d'azote de luxe, comme observée sur d'autres espèces (Justes et al. 1994). A l'inverse, une éventuelle contrainte azotée sera en partie tamponnée par la mobilisation de l'azote de réserve. En effet, en conditions limitantes en azote, l'azote de stockage contenu dans les parties pérennes peut être mobilisé par la plante pour subvenir à ses besoins (Wermelinger et al. 1991; Gaudillère 1997; Zapata et al. 2004). Pour autant, dans le cas d'une contrainte importante, ce tamponnement ne peut suffire à annuler la baisse de l'INN_v calculé. En effet, cette mobilisation est limitée par la quantité totale contenue dans les réserves mais aussi par le flux qu'est capable de mobiliser la plante. Cependant, ce tamponnement des variations d'INN_v par l'existence de la mobilisation des réserves azotées explique que les INN_v calculés ne soient jamais très faibles. Ce tamponnement est encore accentué par le calcul de l'INN qui prend en compte la biomasse aérienne produite cumulée et définit donc un indicateur de contrainte intégré sur tout la période de production de cette biomasse. Le calcul d'un INN instantané qui serait le rapport entre l'accumulation d'azote instantanée et la production de biomasse aérienne instantanée pourrait atténuer ce problème.

Ainsi, il ressort que la teneur définie ici comme la teneur en azote critique pourrait correspondre à la définition de la teneur en azote critique (Greenwood et al. 1991). En effet, il s'agit bien de la quantité d'azote pour laquelle la vitesse de croissance aérienne de la plante est maximale. Au dessus de cette teneur, l'azote en excès n'est pas stocké dans les parties aériennes, comme cela a été observée sur d'autres espèces (Justes et al. 1994), mais dans les parties pérennes non prises en compte dans les bilans biomasses de cette étude. Ainsi, en appliquant une fertilisation et une irrigation, a priori en excès, comme cela a été le cas dans la modalité MT, la teneur en azote des tissus produits dans l'année procure une

teneur en azote critique. Il apparaît que l'indicateur calculé permet de différencier les niveaux de nutrition azotée de la vigne en fonction du traitement. Malheureusement, aucune référence n'existe pour le moment quant à l'impact sur la physiologie et le fonctionnement de la plante des différents niveaux d'INN_v observés.

5.2. Eau et/ou Azote ? Quelle concurrence entre la vigne et la culture intercalaire ?

Une contrainte azotée modérée mais précoce en présence d'un enherbement

Divers auteurs ont montré l'importance des réserves pérennes dans l'alimentation azotée de la vigne, notamment en début de cycle (Yang et Hori 1979; Zapata et al. 2004). Ces réserves sont, au moment du débourrement, la principale source d'azote minéral pour la plante. Elles restent une source importante d'azote pour la vigne jusqu'à la floraison en général. Par conséquent, les différences observées entre les modalités sur cette période sont, en partie au moins, liées à la capacité de ces réserves à fournir l'azote nécessaire pour la croissance. Pour autant, si le classement obtenu entre les modalités avec l'INN_v de la vigne sur cette période est cohérent avec celui obtenu par rapport à l'azote contenu dans les bois, aucune relation claire n'a pu être établie sur l'ensemble des années et modalités. Ceci est également à relativiser car la teneur en azote total mesurée dans les bois de taille n'est pas directement celle des réserves essentiellement contenues dans les racines (Conradie 1980; Williams 1987; Kliewer 1991; Williams et Biscay 1991; Zapata et al. 2004). De plus, la teneur mesurée (azote total) n'est pas directement celle de la forme mobilisable (arginine) (Gaudillère 1997). Suite au débourrement, le prélèvement d'azote minéral par les racines augmente jusqu'à atteindre un maximum autour de la floraison. La part relative des réserves dans l'alimentation azotée de la plante diminue dans le même temps. Ce phénomène est vraisemblablement à l'origine de la remontée de l'INN_v observée entre le débourrement et la floraison dans la plupart des modalités. Ainsi, la stabilité de cet indicateur généralement observé au cours de cette période dans la modalité avec un enherbement permanent suggère que cet enherbement concurrence significativement la vigne pour la ressource azotée dès le débourrement et ne permet pas à la vigne de satisfaire totalement ces besoins. Ce phénomène semble également confirmé par des stocks d'azote minéral mesurés dans le sol très faibles dès le débourrement (*Cf. Chapitre VII*). Au cours de cette même période, l'eau est rarement limitante et la FTSW_v généralement supérieur au seuil de 0,5 qui entraîne une diminution de la croissance végétative de la vigne (Pellegrino et al. 2005). Par conséquent, il semble bien que la diminution de croissance observée dans la modalité enherbée toute l'année bien avant la floraison (*Cf. Chapitre III*) soit plutôt la conséquence d'une contrainte azotée que d'une contrainte hydrique. Cette diminution de croissance ne permet d'ailleurs pas de faire remonter l'INN_v de la vigne enherbée. Cette différence entre les modalités avec un enherbement et la modalité désherbée semble autant due à une concurrence de l'enherbement pour la mise en réserve d'azote (*Cf. Chapitre VII*) que pour la fourniture d'azote minéral par le milieu au cours de la période débourrement-floraison (*Cf. Chapitre VII*).

Une concurrence pour l'eau plus marquée après la floraison

Par la suite, si des différences d'état de nutrition azotée persistent généralement entre les modalités enherbées (principalement MF) et la modalité désherbée, la concurrence pour l'eau induit des contraintes hydriques plus précoces et importantes chez la vigne enherbée que pour une vigne désherbée. La concurrence pour l'eau a dans un premier temps été compensée par une meilleure recharge du profil au cours de l'hiver (*Cf. Chapitre V*) mais la transpiration de l'enherbement induit finalement une quantité d'eau disponible pour la

vigne bien inférieure de celle d'une vigne dés herbée à partir de la floraison ou avant (Cf. *Chapitre V*). La chute de la $FTSW_v$ est ainsi plus rapide dans une vigne enherbée que dans une vigne dés herbée jusqu' avant la véraison. Par la suite, le niveau de $FTSW_v$ de la vigne dés herbée se dégrade généralement aussi vite, voire plus rapidement, que ne le fait celui de la vigne enherbée. Ceci s'explique à la fois par la réduction de la surface foliaire de la vigne enherbée induite par une contrainte précoce et par une régulation de la transpiration de celle-ci plus forte du fait d'une contrainte hydrique supérieure (Cf. *Chapitre III*). Au cours de cette même période, le niveau de nutrition azotée se dégrade généralement. Cette dégradation est cependant très limitée en 2004 et il semble que ce soit donc principalement l'eau qui soit le facteur explicatif de la différence de croissance et de production observée entre une vigne enherbée et une vigne dés herbée (Cf. *Chapitres III et IV*). Au cours des deux autres années, cette dégradation est plus précoce dans les modalités enherbées mais d'une intensité comparable à celle connue dans la modalité dés herbée. Il semble donc que l'enherbement, par sa consommation d'azote minéral dans le sol, ne fait qu'accélérer l'apparition d'une contrainte azotée forte amenée à apparaître au cours d'une année sèche. Il est également probable que la diminution de croissance induite par la contrainte hydrique subie par la vigne enherbée et une contrainte azotée précoce maîtrise la demande en azote de la plante et limite ainsi la contrainte azotée en présence d'un enherbement (Keller 2005; Gonzalez Dugo 2006). Ainsi, au cours de cette deuxième période, l'eau semble être le facteur limitant expliquant l'essentiel des différences entre vignes enherbées et dés herbées.

5.3. Interactions eau/azote : une contrainte azotée dépendante de la contrainte hydrique en zone méditerranéenne ?

En climat méditerranéen, les précipitations généralement faibles au cours du cycle de la vigne donnent une grande importance à la recharge du profil au cours des saisons plus humides que sont l'automne et l'hiver. Ainsi, le niveau de contrainte hydrique subi par la vigne est en grande partie déterminé par cette recharge et par la transpiration de l'enherbement. Si la recharge apparaît meilleure au sein d'une vigne enherbée (Cf. *Chapitre V*) (Battany et Grismer 2000), ce gain est en effet rapidement annihilé par les consommations de l'enherbement (Cf. *Chapitre V*) (Celette et al. 2005). D'autant plus que meilleure est la recharge en hiver et plus la croissance de l'enherbement est importante et sa transpiration sont élevées (Cf. *Chapitre III*). Ce fonctionnement hydrique particulier a de nombreuses interactions avec le fonctionnement azoté du système. Les études mettant en avant les interactions existantes entre alimentation hydrique et nutrition azotée sont nombreuses (Lemaire et Denoix 1987b; Larsson 1992; Onillon et al. 1995; Volaire et al. 1998; Cantero-Martinez et al. 2003; Gonzalez Dugo 2006). Dans cette étude, une interaction entre l'importance de la contrainte hydrique et celle de la contrainte azotée subie par les espèces associées semble évidente, notamment en fin de cycle. Il a toutefois été montré que l'effet de la contrainte hydrique sur la statut azoté de la plante est supérieur dans un milieu riche en azote que dans un milieu pauvre (Gonzalez Dugo 2006). Plusieurs phénomènes peuvent expliquer ces interactions et aider à comprendre le fonctionnement du système.

La concurrence pour l'eau réduit la demande en azote de la vigne

Pour commencer, l'état de nutrition azotée est la résultante du rapport entre l'offre du milieu et la demande de la plante. Le prélèvement d'azote par la plante est en premier lieu déterminé par la demande de la plante (Touraine et Gojon 1997) et donc par la croissance en biomasse et en surface foliaire de la plante (Lemaire et al. 2007). Or, la contrainte hydrique imposée à la vigne par la concurrence avec l'enherbement diminue sa croissance

(Cf. *Chapitre III*) et donc sa demande en azote (Keller 2005). Ce phénomène est plutôt à l'origine d'une diminution de la contrainte azotée, notamment dans une vigne enherbée. Il a été clairement observé dans les situations enherbées et les années sèches mais il ne suffit pas à expliquer les quantités d'azote consommées par la vigne, qui sont nettement plus faibles que dans les situations plus favorables (Cf. *Chapitre VII*).

La contrainte hydrique diminue l'absorption racinaire de l'azote

Plusieurs études ont montré que l'absorption racinaire de l'azote était rendue moins efficace par une contrainte hydrique, même modérée (Larsson 1992; Pandey et al. 2000a; Azedo-Silva et al. 2004; Pirmoradian et al. 2004; Correia et al. 2005). Cette diminution de l'absorption racinaire pourrait être la résultante d'un moins bon fonctionnement de certaines enzymes engagées dans le processus d'assimilation de l'azote comme les nitrates réductases. Il a également été observé chez certaines espèces une forte accumulation d'azote dans les racines en cas de contrainte hydrique. Cette accumulation augmente ainsi la concentration d'azote dans les racines, ce qui a un effet inhibiteur sur l'absorption d'azote (King et al. 1993; Touraine et Gojon 1997). Enfin, la contrainte hydrique que subit la vigne entraîne une diminution de l'activité photosynthétique (Chaves 1991; Angelopoulos et al. 1996; Escalona et al. 2002; Gomez-del-Campo et al. 2002; Medrano et al. 2002; Souza (de) et al. 2003; Souza (de) et al. 2005). Or, les processus d'absorption et d'assimilation de l'azote par la racine est un processus coûteux en énergie (Bloom et al. 1992) et donc influencé par l'assimilation de carbone (Imsande et Touraine 1994). Cette diminution de l'efficacité d'absorption de l'azote par le système racinaire pourrait expliquer notamment la diminution de l'INN_v observée en fin de cycle pour une vigne désherbée qui n'est pas concurrencée pour l'azote par un enherbement.

La sécheresse affecte la minéralisation et la disponibilité de l'azote minéral du sol

La teneur en eau du sol est profondément liée à la disponibilité de l'azote dans le sol. Ainsi, la sécheresse diminue l'activité des micro-organismes responsables de la minéralisation de l'azote organique et donc la production d'azote minéral par le sol (Cf. *Chapitre VII*) (Rodrigo et al. 1997; Garnier et al. 2001; Mikha et al. 2004; Coppens et al. 2006). Une sécheresse de plusieurs mois peut également aller jusqu'à détruire en partie la flore microbienne minéralisatrice (Smolander et al. 2005). Ainsi, la transpiration de l'enherbement assèche fortement les horizons de surface, plus rapidement que ne le font l'évaporation du sol et la transpiration de la vigne dans une vigne désherbée. En conséquence, la minéralisation de l'azote organique du sol est diminuée, et même stoppée, plus rapidement au sein d'une vigne enherbée (Cf. *Chapitre VII*). Elle peut également avoir été légèrement augmentée dans le cas d'une recharge plus importante en situation enherbée mais cette humidité supplémentaire est rapidement consommée par l'enherbement et l'azote minéralisé avec elle (Cf. *Chapitre VII*). En conséquence, la vigne ne profite pas de ce phénomène et la présence de l'enherbement diminue fortement l'offre du sol en azote minéral. Cette offre est d'autant plus diminuée que la disponibilité de cet azote pour la vigne est conditionnée également par l'eau présente dans l'horizon qui joue le rôle de solvant. Ainsi, la sécheresse de l'horizon diminue également la mobilité de cet azote et donc sa disponibilité pour la vigne (Barber 1995; Unkovich et al. 1998; Dunbabin et al. 2002; Vamerali et al. 2003; Guswa 2005). Enfin, une sécheresse importante et longue peut être à l'origine d'une destruction d'une partie du système racinaire et ainsi diminuer la capacité de la vigne à prélever l'azote dans ces horizons (Huang et Gao 1999). Par conséquent, la sécheresse du milieu, accentuée par la transpiration de l'enherbement, est responsable d'une contrainte azotée très forte du fait de l'inadéquation qu'elle crée entre les besoins de la plante et l'offre du milieu. Ce phénomène est probablement à l'origine de

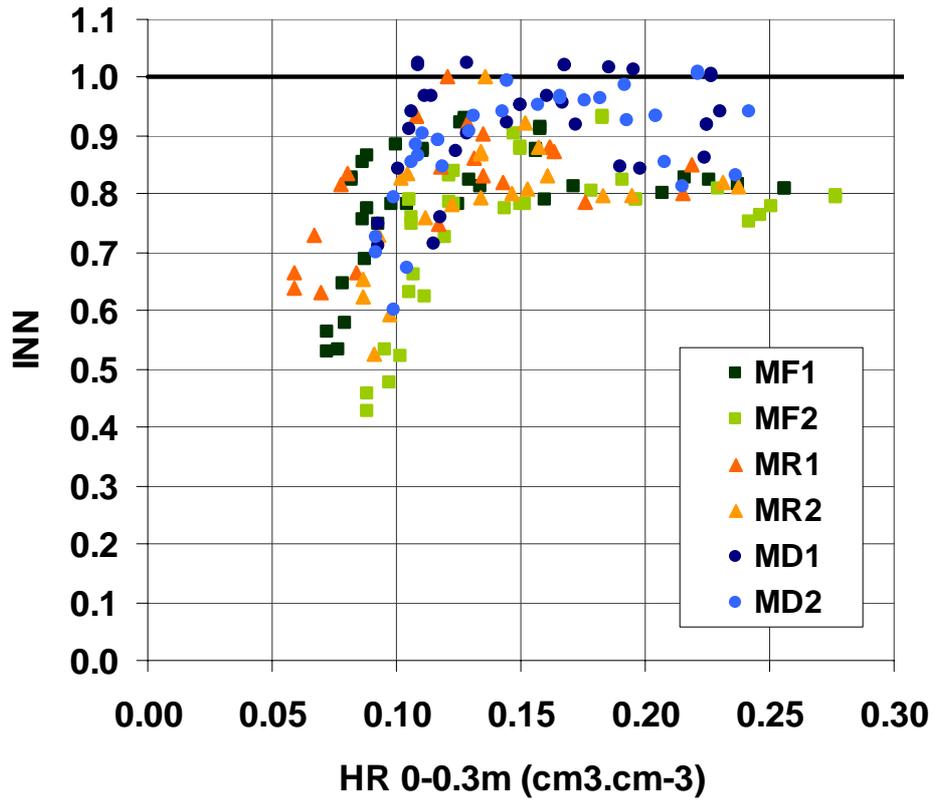


Figure 8.7 – Niveau de nutrition azotée de la vigne (INN) en fonction de la teneur en eau de l’horizon de surface du sol (HR).

l'importante dégradation de l'INN_v dans toutes les modalités en fin de cycle. Ce phénomène est particulièrement flagrant dans les modalités enherbées où les horizons de surface sont asséchés plus rapidement (Cf. Chapitre V) et où l'azote disponible est consommé en partie par l'enherbement (Cf. Chapitre VII). Ainsi, l'évolution de cet INN_v en fonction de la teneur en eau de l'horizon de surface où se déroule l'essentiel de la minéralisation de l'azote organique permet d'observer une humidité seuil à partir de laquelle l'état de nutrition azotée de la vigne se dégrade brusquement (Figure 8.7). Il est intéressant de noter que ce seuil se situe à une humidité volumique comprise entre 12 et 15 cm³.cm⁻³. Ce seuil est donc peu différent, bien qu'un peu inférieur, à l'humidité au point de flétrissement permanent estimé et donc au seuil d'humidité à partir duquel la minéralisation de l'azote organique est quasiment stoppée (Cf. Chapitre VII). Il semble donc que ce brusque déclin de l'INN_v soit intimement lié à l'arrêt de la production d'azote minéral dans l'horizon de surface. Ce flux est en effet la principale source d'azote minéral dans un milieu naturellement très pauvre.

Une meilleure recharge automnale en situation enherbée qui ne profite pas à la mise en réserve d'azote par la vigne

Si l'offre d'azote pour la vigne est essentiellement fournie par le sol et la minéralisation, une part non négligeable est également apportée par la mobilisation de l'azote des réserves pérennes de la vigne. Cette mobilisation pouvait suffire à établir la totalité de la surface foliaire de la vigne au cours d'un cycle (Glad et al. 1994). Ces réserves pérennes jouent un rôle primordial dans l'alimentation de la vigne en tout début de cycle et sont probablement à l'origine de la croissance plus faible observée en début de cycle au sein d'une vigne enherbée. Ces réserves se comportant comme un puit à part entière au cours du cycle de la vigne, la contrainte azotée provoquée au cours du cycle de la vigne par la concurrence pour l'eau entre vigne et enherbement est également à l'origine d'une moins bonne recharge de ces réserves. De plus, la période post récolte est importante car elle représente une période favorable à la mise en réserve d'azote par la vigne (Millard et Thomson 1989). Or, le milieu redevient favorable avec les précipitations automnales, particulièrement dans une vigne enherbée où la recharge est meilleure (Cf. Chapitre V). Cependant, cette réhumectation des horizons de surface est également favorable à la croissance de la culture intercalaire. Il a ainsi été observé que la fétuque élevée avait besoin d'à peine une dizaine de jours pour retrouver un niveau de nutrition azotée plus favorable après une réhumectation des horizons riches en azote minéral ou une fertilisation (Gonzalez Dugo 2006). Un phénomène comparable est observé après qu'une contrainte hydrique longue ait été imposée à de l'orge avant d'être finalement levée (Jamieson et al. 1995). Ainsi, la meilleure recharge dans le milieu enherbé aurait pu entraîner une offre du sol en azote minéral supérieure et donc un meilleur remplissage des réserves azotées au sein d'une vigne enherbée. Cependant, cette humidité et cette offre en azote supplémentaires sont surtout mises à profit par l'enherbement pour une pousse automnale. Ceci explique que cette mise en réserve soit plutôt moins favorable en situation enherbée et ce phénomène est à l'origine d'une contrainte azotée précoce dans ce cas de figure.

La contrainte azotée a peu d'effet sur le fonctionnement hydrique de la vigne

La contrainte azotée ainsi subie par la vigne affecte peu le fonctionnement hydrique de la plante. Elle le modifie tout de même en cela que la croissance de la surface foliaire est influencée par la nutrition azotée (Gastal et Lemaire 2002; Gonzalez Dugo 2006). Or, cette surface foliaire détermine en partie la demande en eau de la plante. Ainsi, la diminution de la croissance foliaire induite au sein d'une vigne enherbée par la contrainte azotée en début de cycle réduit les besoins en eau de la vigne et limite ainsi une éventuelle contrainte hydrique. A l'inverse, un effet positif de la disponibilité en azote sur la croissance racinaire

a été observé (Carbonneau 1984). La disponibilité en azote détermine ainsi en partie la capacité d'absorption de l'eau par la vigne et peut être à l'origine d'une contrainte hydrique plus précoce et intense. La forte diminution observée de l'azote disponible dans les horizons de surface en présence d'un enherbement (*Cf. Chapitre VII*) peut expliquer l'abandon partiel de cet horizon par le système racinaire de la vigne (*Cf. Chapitre V*).

6. Conclusion

L'implantation d'un enherbement au sein du vignoble modifie profondément les fonctionnements hydrique et azoté de celui-ci (*Cf. Chapitres V et VII*). Les interactions entre eau et azote sont nombreuses mais globalement, il apparaît qu'en zone méditerranéenne, la dynamique de l'eau dans le système contraint fortement celle de l'azote. Ce type de phénomène a déjà été observé dans d'autres systèmes comme les systèmes fourragers (Gonzalez Dugo 2006). Si les deux fonctionnements, hydrique et azoté, sont ainsi profondément liés, cela ne signifie pas nécessairement que contraintes hydrique et azotée le sont également. En effet, la contrainte hydrique subie par la vigne est pour beaucoup la conséquence d'une disponibilité en eau insuffisante dans l'ensemble du profil de sol exploité par son système racinaire. Or, il a été observé qu'en présence d'un enherbement, la vigne approfondit cette zone explorée lorsqu'elle en a la possibilité (*Cf. Chapitre V*) (Morlat et Jacquet 2003; Celette et al. 2005) et limite ainsi l'impact de cette concurrence pour l'eau qui s'établit avec l'enherbement. La contrainte azotée subie par la vigne est, quant à elle, la conséquence du rapport entre fourniture du sol et des réserves de la vigne et demande de la plante. Les réserves sont utiles essentiellement pour tamponner les variations du rapport entre offre du sol et demande de la plante. Cette offre du sol est elle aussi liée à l'ensemble du profil exploré par le système racinaire. Cependant, dans ce type de système, le stock d'azote est généralement faible et l'essentiel de l'azote minéral proposé est en conséquence composé de l'azote organique minéralisé (*Cf. Chapitre VII*). Ainsi, c'est surtout l'humidité des horizons de surface qui détermine l'offre en azote du système. Par conséquent, si la contrainte azotée subie par la vigne est fortement influencée par la dynamique hydrique du système, contraintes hydrique et azotée sont en partie découplées par le décalage qui existe entre les deux zones concernées. Une lixiviation du nitrate des horizons de surface vers des horizons plus profonds encore accessibles par la vigne peut en partie augmenter ce couplage en augmentant le profil de sol concerné pour l'offre en azote minéral (*Cf. Chapitre VII*). Ce découplage entre les deux contraintes n'est en revanche possible que dans un système où un décalage vertical important existe entre les systèmes racinaires des deux espèces (ou mélange) associées. Il est donc difficile dans un sol superficiel notamment.

La dynamique de l'eau pilote donc bien pour une bonne partie celle de l'azote. La compartimentation proposée précédemment (*Cf. Chapitre VII*) est également susceptible de représenter correctement ce fonctionnement. Pour autant, il est difficile de vouloir étudier l'impact d'un enherbement sur la vigne en ne s'intéressant qu'à la dynamique de l'eau. Ainsi, les différences de croissance observées en début de cycle entre une vigne enherbée et une vigne désenherbée sont essentiellement la conséquence d'une contrainte azotée précoce. Cette contrainte est d'ailleurs autant le résultat d'une moindre disponibilité de l'azote, à ce moment du cycle, en présence d'un enherbement que de la concurrence pour cette ressource à la fin du cycle précédent.

Chapitre IX - Pour aller plus loin...

1. Un fonctionnement général hydrique et azoté mieux compris mais quelle est la généralité de ce travail ?

Ce travail a permis de mettre en évidence que l'implantation d'un enherbement au sein d'un vignoble modifie sensiblement les fonctionnements hydrique et azoté du système. Ces observations ont été réalisées sur une situation unique et méritent que l'on s'interroge sur leur généralité et leur portée.

Une croissance végétative en début de cycle diminuée par la concurrence pour les ressources de l'année précédente

Pour commencer, la diminution de la croissance et des rendements de la vigne du fait de la concurrence pour les ressources du sol a été mise en évidence et confirme ce qui a déjà été observé dans d'autres régions viticoles (Soyer et al. 1984; Morlat 1987; Maigre et Murisier 1992). Celle-ci est autant la conséquence d'une contrainte hydrique que d'une contrainte azotée. Cependant, la diminution très précoce de la croissance végétative semble très liée au niveau de contrainte azotée subie par la vigne enherbée en début de cycle. Celle-ci est essentiellement la conséquence de la capacité qu'ont les réserves pérennes à fournir de l'azote à la plante en début de cycle (Conradie 1980; Zapata et al. 2004). Elle est donc pour beaucoup la conséquence d'une concurrence pour ces ressources azotées l'année précédente, notamment après la vendange. Aussi, un enherbement moins concurrentiel tout au long du cycle de la vigne et potentiellement moins actif au début de l'automne permettrait à la vigne de consommer suffisamment d'azote pour la mise en réserve et permettrait une vigueur végétative plus élevée en début de cycle. Une fertilisation bien raisonnée pourrait amener aux mêmes résultats. Cependant, une vigueur végétative excessive en début de cycle n'est pas forcément recherchée car elle est souvent source d'une expression végétative trop importante et d'une canopée dense plus sensible aux maladies cryptogamiques notamment (Emmett et al. 1998; Valdés et al. soumis).

L'enherbement semi-permanent affecte plus la croissance végétative que l'élaboration du rendement de la vigne

Un bon équilibre entre croissances végétative et reproductive est recherché par le vigneron. Une diminution plus importante de la croissance végétative relativement à la croissance reproductive est souvent désirée. L'enherbement semi-permanent entraîne ce genre de phénomène. Ceci est pour beaucoup l'effet d'une concurrence modérée au cours de la première partie du cycle qui disparaît ensuite lors de la croissance du fruit avec la destruction de l'enherbement (Schultz et Matthews 1988; Ussahatanonta et al. 1996; Ojeda et al. 2001). Ce phénomène est toutefois bien moins marqué au cours des années de sécheresse du fait qu'une contrainte précoce, notamment hydrique, subie par la vigne s'accroît au cours du cycle malgré la destruction de l'enherbement semi-permanent. Aucune précipitation significative ne vient en effet compenser l'assèchement du sol par la transpiration de l'enherbement. Ce phénomène est très spécifique du climat méditerranéen caractérisé par une sécheresse estivale importante. On peut donc penser que dans un climat avec une pluviométrie plus régulière, l'impact de cet enherbement semi-permanent serait essentiellement porté sur la mise en place du feuillage. Toutefois, croissances végétative et reproductive ne sont pas totalement indépendantes et une diminution trop importante de l'expression végétative en début de cycle peut être limitante pour l'élaboration du rendement (Pellegrino et al. 2005).

La qualité de la production est essentiellement la conséquence de la concurrence pour l'eau

L'impact de l'enherbement sur le rendement est assez net mais peut être atténué par une gestion raisonnée du couvert herbacé. En revanche, les conséquences de l'implantation d'un enherbement sur la qualité des moûts obtenus sont moins claires. Ainsi, en année humide, la présence de l'enherbement et la concurrence pour les ressources qu'elle implique semblent favoriser une teneur en sucres légèrement supérieure et une acidité moindre des moûts. Ceci confirme ce qui est généralement observé dans d'autres études (McCarthy et Coombe 1985; Morlat 1987; Maigre et Murisier 1992; Maigre et al. 1995; Koundouras et al. 1999; Chantelot et al. 2004). En revanche, les fortes contraintes, notamment hydriques, imposées par cet enherbement à la vigne au cours des années de forte sécheresse a eu l'impact inverse avec des teneurs en sucres des moûts plus faibles et une acidité plus forte que dans une vigne désherbée. Ceci a déjà été observé lorsqu'une contrainte hydrique sévère s'installe très tôt dans le cycle (dès la floraison) et que la photosynthèse est ainsi perturbée (Morlat et al. 1992; Maigre 1996). L'état de nutrition azotée de la plante conditionne essentiellement la teneur en azote assimilable des moûts et ne doit donc pas être négligé puisque l'enherbement diminue généralement cette teneur (Rodriguez-Lovelle et Gaudillère 2002; Chantelot et al. 2004). Cependant, cette faible teneur en azote assimilable semble être la conséquence de la sécheresse estivale (Gaudillère et al. 2003). Ainsi, la qualité finale de la production est essentiellement corrélée à la contrainte hydrique subie au cours de la période de remplissage de la baie et donc à la concurrence pour l'eau imposée par l'enherbement.

L'amélioration de l'infiltration par l'enherbement est susceptible d'atténuer la concurrence pour l'eau

L'infiltration des eaux de pluie est sensiblement améliorée par la présence d'un enherbement sur l'inter-rang (Leonard et Andrieux 1998; Le Bissonais et al. 2004; Odhiambo et Bomke 2007). Cependant, l'impact de l'enherbement sur les forts orages de l'automne connus en région méditerranéenne est limité à cause de l'état de surface du sol lorsque ces orages arrivent. Un sol très sec en surface et un enherbement dégradé par la sécheresse estivale induisent en effet une infiltration moins efficace, de toutes façons limitée par la violence de ces orages (Mapfumo et al. 2004; Merz et al. 2006). Sous un régime de précipitations plus régulières et d'une intensité moindre, cette meilleure infiltration du fait de la présence de l'enherbement est susceptible d'atténuer fortement la concurrence pour l'eau entre la vigne et l'enherbement. Cependant, le choix de l'enherbement et sa gestion sont alors cruciales car elles déterminent la couverture du sol par cet enherbement et l'importance de sa transpiration. En effet, cette meilleure infiltration des eaux de pluies en présence d'un enherbement n'est perceptible que pour une taux de couverture significatif (Leonard et Andrieux 1998). De plus, une réhumectation régulière des horizons de surface peut signifier que l'enherbement maintient une croissance plus importante et stable tout au long de l'année. La croissance limitée de l'enherbement dans la situation étudiée et son arrêt au cours de l'été sont pour beaucoup la conséquence de cette aridité du milieu (Volaire et Norton 2006). De plus, d'autres études ont montré à quel point ces enherbements étaient susceptibles de reprendre très rapidement une activité normale après une réhumectation des horizons de surface (Volaire et al. 1998; Gonzalez Dugo 2006; Norton et al. 2006b; Volaire et Norton 2006). Ainsi, la croissance de cet enherbement dans des conditions plus favorables est probablement plus importante et la concurrence pour les ressources avec elle.

Une redistribution racinaire possible uniquement dans un sol profond

La vigne redistribue son système racinaire afin d'éviter partiellement la concurrence de l'enherbement pour la ressource en eau. Ce phénomène a déjà été observé dans de nombreuses situations (Lehmann et al. 1998; Schroth 1999; Smith et al. 1999; Fetene 2003; Morlat et Jacquet 2003; Schaller et al. 2003; Celette et al. 2005; Hauggaard-Nielsen et Jensen 2005; Collet et al. 2006). Dans un sol superficiel cependant, la présence de l'enracinement de l'enherbement et la concurrence pour les ressources induit une diminution de la densité racinaire de la vigne en surface sans que celle-ci puisse être compenser par une croissance en profondeur (Odhiambo et al. 2001). Ainsi, la plasticité du système racinaire de la vigne lui permet d'accentuer le décalage vertical qui existe entre les deux espèces mais ce décalage dépend à la fois de la capacité d'exploration du système racinaire de l'enherbement, très variable d'une espèce à l'autre, et de la profondeur du sol. Fort logiquement, la compétition pour les ressources du sol est d'autant plus forte que le sol est superficiel. En revanche, un sol profond atténue peu la concurrence pour la ressource azotée puisque l'essentiel de l'azote est contenu en surface. La meilleure infiltration des eaux de pluies avec un enherbement pourrait cependant induire une lixiviation d'une partie de l'azote vers des horizons plus profonds auxquels seule la vigne aurait accès. Ce flux serait malgré tout limité au regard des concentrations très faibles des profils de sol en nitrate. Pour autant, une contrainte azotée plus grande serait vraisemblablement observée en sol superficiel du fait de la diminution de densité racinaire de la vigne et des prélèvements de l'enherbement.

Une contrainte azotée très liée à la concurrence pour l'eau en climat méditerranéen

La contrainte azotée subie par la vigne lorsqu'elle est associée avec un enherbement est fortement affectée par la concurrence pour l'eau entre les deux composantes de l'association. Ainsi, l'assèchement des horizons de sol explorés par l'enherbement diminue la mobilité de l'azote nitrique (Barber 1995), et donc sa disponibilité, ainsi que l'efficacité de l'absorption de cet azote (Larsson 1992; Azedo-Silva et al. 2004; Correia et al. 2005). L'assèchement des horizons de surface ralentit et stoppe rapidement la minéralisation de l'azote organique du sol (Rodrigo et al. 1997). Ainsi, la consommation d'eau par l'enherbement diminue très fortement la disponibilité en azote du milieu du fait que les précipitations au cours du cycle de la vigne sont peu importantes et irrégulières dans le climat méditerranéen. Cependant, les consommations directes des enherbements, si elles sont peu importantes par rapport à ce que peuvent consommer ces mêmes espèces en situations plus favorables, représentent une part non négligeable de ce que produit un milieu naturellement pauvre. Ainsi, la concurrence pour l'azote entre la vigne et l'enherbement est avant tout indirecte mais également directe. Avec un climat aux précipitations plus régulières, cette concurrence directe pourrait prendre de l'importance si la croissance de l'enherbement venait à augmenter. La gestion de celui-ci et le choix de l'espèce (ou mélange d'espèces) peuvent s'avérer primordiaux dans le raisonnement de cette concurrence. Les besoins de la vigne étant les plus importants à partir de la floraison (Conradie 1980), c'est à partir de ce stade que la disponibilité de l'azote dans le milieu doit être raisonnée.

Et si on apportait de l'eau ou de l'azote ?

Une carence en eau ou en azote peut être facilement corrigée par un apport sous forme d'irrigation ou de fertilisation. Cependant, ces deux pratiques sont rares dans le vignoble méditerranéen. L'irrigation est autorisée depuis peu en France pour les vins de table et de pays mais demeure très encadrée dans les AOC (décret du 4 décembre 2006). Cependant, il serait possible d'imaginer irriguer et fertiliser afin de limiter la concurrence pour les

ressources entre la vigne et l'enherbement tout en conservant les avantages (érosion, portance, réduction des herbicides) de la présence d'un couvert végétal sur l'inter-rang. Dans ce cas de figure, le raisonnement des contraintes hydrique et azotée nécessaire à une qualité supérieure de la production peut ne plus dépendre de la gestion de l'enherbement mais uniquement du raisonnement de ces apports. Toutefois l'enherbement jouerait un rôle dans la maîtrise de l'accès aux ressources par la vigne puisqu'il continuerait à assécher l'inter-rang et à consommer les nutriments de cette zone et inciterait ainsi la vigne à concentrer son système racinaire sous le rang, dans la zone irriguée. L'importance des ressources accessibles par la vigne serait alors cantonnée dans un volume donné plus facilement maîtrisable. Une irrigation sans fertilisation pourrait en revanche faire de l'azote le facteur limitant. La minéralisation de l'azote organique serait cependant fortement augmentée dans le bulbe d'irrigation mais il est difficile, a priori, de savoir si cet azote supplémentaire serait suffisant pour combler les besoins de la vigne. Les données recueillies dans ce travail devraient alors être complétées *in situ* et/ou *in silico*.

2. Peut-on définir des idéotypes d'enherbement adaptés aux conditions méditerranéennes ?

La meilleure compréhension du fonctionnement d'une vigne enherbée permet d'envisager l'identification d'idéotypes d'enherbement en région méditerranéenne.

Globalement, un enherbement non permanent paraît séduisant. Cependant, cette stratégie d'enherbement présente au moins deux inconvénients majeurs puisqu'elle ne crée pas de couverture significative au cours de l'hiver, période sensible pour le ruissellement et l'érosion, et parce qu'un nouveau semis chaque année induit un coût important. Cette dernière contrainte pour l'adoption de cette pratique par les professionnels peut être contournée en réalisant cet enherbement semi-permanent avec un « enherbement naturel maîtrisé » qui serait détruit plus ou moins tôt dans l'année en fonction des conditions de recharge hivernale et de sécheresse printanière notamment. Cependant, cette technique ne permet pas toujours d'obtenir un couvert suffisant pour maîtriser ruissellement et érosion au cours de l'hiver. Il est de plus difficile de prévoir le niveau de concurrence qu'entraîne un enherbement naturel puisque celui-ci dépend fortement de la flore autochtone.

Ainsi, un autre type d'enherbement est possible avec un enherbement permanent choisi. Cet idéotype proposerait une croissance modérée mais suffisante qui cesserait au cours de l'été notamment, que les ressources soient encore suffisantes ou non. Le Dactyle Kasbah, par exemple, présente ce genre de caractéristiques (Volaire et Lelièvre 2001; Norton et al. 2006a). Il entre en dormance chaque année à la fin du printemps, ne consomme donc pas de ressources du sol au cours de l'été, quelles que soient les conditions, et sa survie aux conditions difficiles de l'été méditerranéen est supérieure. Une légumineuse annuelle (type trèfle souterrain) peut également avoir des caractéristiques intéressantes à condition que sa mise à graine ne soit pas perturbée. L'état du couvert l'année suivante dépend toutefois des conditions de levée à l'automne.

Cependant, cette définition d'un idéotype d'enherbement dépend beaucoup des attentes du viticulteur quant à l'enherbement et des objectifs de production qu'il se donne. Ainsi, la définition d'indicateurs d'évaluation des stratégies d'enherbement et des domaines de préférences pour chacun d'entre eux est une étape préliminaire indispensable.

3. Modéliser et évaluer des stratégies d'enherbement

Le projet dans lequel s'insère ce travail de thèse vise à construire un outil d'évaluation et de gestion de stratégies d'enherbement du vignoble. Mieux comprendre les relations de concurrence existant entre vigne et enherbement pour l'eau et pour l'azote est une première étape vers la construction de cet outil. Celui-ci doit s'appuyer sur un outil de simulation du

fonctionnement biophysique d'une vigne enherbée et sur un modèle de décisions de gestion des stratégies d'enherbement (Aubry et al. 1998; Girard et Hubert 1999; McCown 2002). Quelques éléments ont été proposés dans cette thèse pour construire un modèle de fonctionnement de la vigne mais celui-ci doit encore être complété. En revanche, le modèle de gestion des stratégies doit faire l'objet d'un travail complémentaire.

Modéliser simplement le fonctionnement hydrique et azoté d'une vigne enherbée

Un modèle simple de simulation du fonctionnement hydrique d'une vigne enherbée a été évalué et s'est révélé relativement performant malgré quelques lacunes à corriger. Le principal problème réside pour le moment dans la prise en compte de l'évolution de l'état de surface du sol pour une meilleure simulation du ruissellement. Ce modèle est basé sur une compartimentation sommaire qui vise à représenter le partage des ressources. Une telle compartimentation a également été proposée pour représenter simplement la dynamique de l'azote dans le système mais doit encore être testée. La modélisation de la minéralisation de l'azote organique doit pouvoir faire l'objet d'une simulation simple, même si elle nécessite quelques paramètres supplémentaires (teneur en matière organique...) (Delphin 1988; Mary et al. 1999). La température de l'horizon de surface peut être approchée à partir de la température de l'air. Une fois la minéralisation correctement simulée, l'offre du milieu en azote est évaluée. Il reste encore à estimer la demande de chacune des plantes associées et celle-ci nécessite une simulation de la production de matière sèche aérienne de chaque espèce. Un INN instantané peut être évalué en considérant l'offre du milieu au jour j et la demande en azote de la vigne le même jour. La courbe de teneur en azote critique définie dans ce travail peut permettre d'évaluer la contrainte azotée de la vigne par cette approche. Le tampon des réserves pérennes est un peu plus difficile à considérer car il oblige à prendre en compte la répartition du carbone et de l'azote dans la plante.

Définir des critères d'évaluation des stratégies d'enherbement

L'évaluation des stratégies d'enherbement doit être réalisée par rapport à des critères de quantité et de qualité de la production, des critères environnementaux et des critères économiques. La quantité de biomasse sèche aérienne et la part de la biomasse de fruit doivent donc être simulées. La qualité de la production est fortement liée à une trajectoire de contraintes (surtout hydriques) optimales et une telle trajectoire peut être définie en fonction des objectifs du producteur (Gary et al. 2005; Gary et al. 2006; Pellegrino et al. 2006). Cependant, si les relations entre niveau de FTSW et conséquences sur la physiologie de la plante ont été établies (Pellegrino et al. 2005), de telles relations n'existent pas avec l'INN. De plus, les objectifs du viticulteur peuvent varier en fonction des conditions du milieu, des résultats antérieurs ou de l'environnement socio-économique. Or, la prise en compte de cette capacité d'adaptation du viticulteur dans l'évaluation des stratégies améliore la robustesse des résultats obtenus. Cette flexibilité peut être modélisée en s'appuyant sur des règles de décision (Hofmann 2006). L'écriture de ces règles de décision permet ainsi d'explicitier les indicateurs associés aux choix techniques et de rendre les recommandations plus transmissibles (Loyce et Wery 2006). Des critères environnementaux peuvent être facilement modélisés (ruissellement, lixiviation...) mais la définition des zones d'acceptabilité de cet indicateur par rapport à des critères formels est difficile. Enfin, une fois la production et les flux d'importance pour l'évaluation environnementale correctement simulés, l'évaluation économique de chaque stratégie peut être réalisée. Certains travaux ont déjà été réalisés pour évaluer le coût économique et en temps de tous les travaux réalisés pour la gestion d'un enherbement (Hofmann 2006). Cependant, les valeurs seuils d'acceptabilité de ces critères dépendent fortement du viticulteur et sont difficiles à fixer a priori. De plus, une telle évaluation économique

nécessiterait la prise en compte, au moins partiellement, de l'échelle de l'exploitation agricole à laquelle la stratégie du vigneron est définie.

Références Bibliographiques

- Acevedo Opazo C and Ortega-Farías S (2004) Effect of Three Levels of Water Application during Post-Setting and Post-Veraison over Vegetative Development, Productivity and Grape Quality on cv. Cabernet Sauvignon. *Acta Horticulturae*: 646, 143-146.
- Allen R G, Pereira L S, Raes D and Smith M (1998) Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *In FAO Irrigation and Drainage Paper n°56*. p xxvi + 300 pp.
- Altieri M A (1995) Agroecology: the science of sustainable agriculture. xii + 433 p.
- Alvenas G and Jansson P-E (1997) Model for evaporation, moisture and temperature of bare soil: calibration and sensitivity analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*. 88(1-4), 47-56.
- Améglio T and Archer P (1996) Représentativité du potentiel de base sur sols à humidité hétérogène. *Agronomie*: 16, 493-503.
- Améglio T, Archer P, Cohen M, Valancogne C, Daudet F A, Dayau S and Cruiziat P (1999) Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant and Soil*: 207, 155-167.
- Améziiane R, Limami M A, Noctor G and Morot-Gaudry J F (1995) Effect of nitrate concentration during growth on carbon partitioning and sink strength in chicory. *Journal of experimental botany*. 46, 1423-1428.
- Anderson B E, Ward J M and Schroeder J I (1994) Evidence for an extracellular reception site for abscisic acid in Commelina guard cells. *Plant Physiology*: 104(4), 1177-1183.
- Andren O, steen E and Rajkai K (1992) Modelling the effects of moisture on barley straw and root decomposition in the field. *Soil Biology and Biochemistry*: 24(8), 727-736.
- Angelopoulos K, Dichio B and Xiloyannis C (1996) Inhibition of photosynthesis in olive trees (*Olea europea* L.) during water stress and rewatering. *Journal of experimental botany*: 47(301), 1093-1100.
- Archer E and Strauss H C (1985) Effect of plant density on root distribution of three-year-old grafted 99 Richter grapevines. *South African Journal for Enology and Viticulture*: 6(2), 25-30.
- Assmann S M and Shimazaki K-I (1999) The Multisensory Guard Cell. Stomatal Responses to Blue Light and Abscisic Acid. *Plant Physiology*: 119, 809-815.
- Aubry C, Biarnès A, Maxime F and Papy F (1998) Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'entreprise agricole : la constitution de systèmes de cultures du Bassin Parisien. *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*: 31, 25-43.
- Azedo-Silva J, Osorio J, Fonseca F and Correia M J (2004) Effects of soil drying and subsequent rewatering on the activity of nitrate reductase in roots and leaves of *Helianthus annuus*. *Functional Plant Biology*: 31(6), 611-621.
- Balasubrahmanyam V R, Eifert J and Diofasi L (1978) Nutrient reserves in grapevine canes as influenced by cropping levels. *Vitis*: 17(1), 23-29.
- Ballif J-L (1999) Ruissellement et érosion en Champagnes sur sols de vignes et de cultures. Edition Johanet, Paris - France. 158 p.
- Barber S A (1995) Soil nutrient bioavailability : a mechanistic approach. Wiley, New York. 398 p.
- Baret F and Fourty T (1997) Radiometric estimates of nitrogen status of leaves and canopies. *In Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Ed G Lemaire. pp 201-227. Springer-Verlag, Berlin.
- Bates T R, Dunst R M and Joy P (2002) Seasonal dry matter, starch, and nutrient distribution in 'Concord' grapevine roots. *HortScience*: 37(2), 313-316.
- Battany M C and Grismer M E (2000) Rainfall runoff and erosion in Napa Valley vineyards : effects of slope, cover and surface roughness. *Hydrological processes*: 14, 1289-1304.

- Baumann D T, Bastiaans L and Kropff M J (2001) Competition and crop performance in a leek-celery intercropping system. *Crop Science*: 41, 764-774.
- Bavaresco L and Eibach R (1987) Investigations on the influence of N fertilizer on resistance to powdery mildew (*Oidium tuckeri*), downy mildew (*Plasmopara viticola*) and on phytoalexin synthesis in different grapevine varieties. *Vitis*: 26(4), 192-200.
- Bavaresco L, Fregoni M and Petegolli D (1994) Effect of nitrogen and potassium fertilizer on induced resveratrol synthesis in two grapevine genotypes. *Vitis*: 33(3), 175-176.
- Bavaresco L (1995) Utilization of a non-destructive chlorophyll meter to assess chlorophyll concentration in grapevine leaves. *Bulletin de l'OIV*: 68(771/772).
- Bayala J, Teklehaimanot Z and Ouedraogo S J (2004) Fine root distribution of pruned trees and associated crops in a parkland system in Burkina Faso. *Agroforestry Systems*: 60, 13-26.
- Bengough A G, Mackenzie C J and Diggle A J (1992) Relations between root length densities and root intersections with horizontal and vertical planes using root growth modelling in 3 dimensions. *Plant and Soil*: 145, 245-252.
- Berntsen J, Hauggard-Nielsen H, Olesen J E, Petersen B M, Jensen E S and Thomsen A (2004) Modelling dry matter production and resource use in intercrops of pea and barley. *Field crops research*: 88, 69-83.
- Besset J, Genard M, Girard T, Serra V and Bussi C (2001) Effect of water stress applied during the final stage of rapid growth on peach trees (cv. Big-Top). *Scientia Horticulturae*: 91(3/4), 289-303.
- Black C and Ong C K (2000) Utilisation of light and water in tropical agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*: 104(1), 25-47.
- Bloom A J, Sukrapanna S S and Warner R L (1992) Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. *Plant Physiology*: 99(4), 1294-1301.
- Bonachela S, Orgaz F, Villalobos F J and Fereres E (1999) Measurement and simulation of evaporation from soil in olive orchards. *Irrigation Science*: 18(4), 205-211.
- Bravdo B, Hepner Y, Loinger C, Cohen S and Tabacman H (1984) Effect of crop level on growth, yield and wine quality of a high yielding Carignane vineyard. *American Journal of Enology and Viticulture*: 35(4), 247-252.
- Bravdo B, Hepner Y, Loinger C, Cohen S and Tabacman H (1985) Effect of crop level and crop load on growth, yield, must and wine composition and quality of Cabernet Sauvignon. *American Journal of Enology and Viticulture*: 36(2), 125-131.
- Brisson N and Perrier A (1991) A semiempirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. *Water Resources Research*: 27(5), 719-727.
- Bruckler L, Bertuzzi P, Angulo-Jaramillo R and Ruy S (2002) Testing an infiltration method for estimating soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Science Society of America Journal*: 66, 384-395.
- Budelman A (1989) The performance of selected leaf mulches in temperature reduction and moisture conservation in the upper soil stratum. *Agroforestry Systems*: 8(1), 53-66.
- Bundy L G and Andraski T W (2004) Diagnostic Tests for Site-Specific Nitrogen Recommendations for Winter Wheat. *Agronomy journal*: 96(3), 608-614.
- Buresh R J, Rowe E C, Livesley S J, Cadisch G and Mafongoya P (2004) Opportunities for capture of deep soil nutrients. In *Below-ground interactions in tropical agroecosystems: concepts and models with multiple plant components*. pp 109-125.
- Burgess S S O, Adams M A, Turner N C and Ong C K (1998) The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia*: 115(3), 306-311.
- Burgess S S O, Adams M A, Turner N C, White D A and Ong C K (2001) Tree roots: conduits for deep recharge of soil water. *Oecologia*: 126(2), 158-165.
- Buttrose M S (1969) Vegetative growth of grapevines varieties under controlled temperature and light intensity. *Vitis*: 8, 280-285.

- Cabelguenne M and Debaeke P (1998) Experimental determination and modelling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soya bean, sorghum and wheat. *Plant and Soil*. 202(2), 175-192.
- Cabrera M L and Kissel D E (1988) Potentially mineralizable nitrogen in disturbed and undisturbed soil samples. *Soil Science Society of America Journal*. 52, 1010-1015.
- Cadisch G, Willigen P d, Suprayogo D, Mobbs D C, Noordwijk M v and Rowe E C (2004) Catching and competing for mobile nutrients in soils. In *Below-ground interactions in tropical agroecosystems: concepts and models with multiple plant components*. pp 171-191.
- Caldwell M M, Dawson T E and Richards J H (1998) Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. *Oecologia*. 113(2), 151-161.
- Caldwell R M and Richards J H (1986) Competing root systems: morphology and models of absorption. In *On the Economy of Plant Form and Function.*, Ed T Givnish. pp 251-273. Cambridge University Press.
- Calonnet A, Cartolaro P, Poupot C, Dubourdiou D and Darriet P (2004) Effects of *Uncinula necator* on the yield and quality of grapes (*Vitis vinifera*) and wine. *Plant Pathology*. 53(4), 434-445.
- Candolfi-Vasconcelos M C, Candolfi M P and Koblet W (1994) Retranslocation of carbon reserves from the woody storage tissues into the fruit as a response to defoliation stress during the ripening period in *Vitis vinifera* L. *Planta*. 192(4), 567-573.
- Cantero-Martinez C, Angas P and Lampurlanés J (2003) Growth, yield and water productivity of barley (*Hordeum vulgare* L.) affected by tillage and N fertilization in Mediterranean semiarid, rainfed conditions of Spain. *Field crops research*. 84(3), 341-357.
- Carbonneau A (1984) Effect of nutrient solution concentration on some physiological and technological characteristics in *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon. III. Water flow, gross photosynthesis and between-plant correlations. *Agronomie*. 4(6), 535-541.
- Carbonneau A (1985) The early selection of grapevine rootstock for resistance to drought conditions. *American Journal of Enology and Viticulture*. 36, 195-198.
- Carbonneau A and Ollat N (1991) The instability of late leaf hydration at the initiation of transpiration under drought conditions. The example of *Vitis vinifera* L. cv. Semillon. *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*. 25(3), 75-83, 117.
- Carbonneau A (1998) Aspects qualitatifs. In *Traité d'irrigation*, Ed J R Tiercelin. pp 258-276. Tec & Doc - Lavoisier.
- Carsouille J (1996) Enherbement permanent du vignoble. Influence sur la production viticole. *Progrès agricole et viticole*. 114(4), 87-91.
- Castelan-Estrada M (2001) Répartition de la biomasse chez *Vitis vinifera* L. ; Rendement de conversion du rayonnement solaire global et coûts énergétiques. PhD thesis, INAPG, Paris, 121 p.
- Celette F (2003) Evaluation d'un modèle à réservoirs pour simuler le bilan hydrique d'une vigne enherbée en climat méditerranéen. MSc thesis, Agro.M., Montpellier, 23 p.
- Celette F, Wery J, Chantelot E, Celette J and Gary C (2005) Belowground interactions in a vine (*Vitis vinifera* L.)-tall fescue (*Festuca arundinacea* Shreb.) intercropping system: water relations and growth. *Plant and Soil*. 276(1-2), 205-217.
- Celette F and Gary C (2006) Cover cropping as a way to manage water and nitrogen deficits in relation with grapevine (*Vitis vinifera* L.) vegetative growth and yield. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica*. 11(2), 515-516.
- Celette J and Celette F (2002) Etude de la dynamique de l'eau et de l'azote dans le système vigne-enherbement-sol. MSc thesis, ENSA-M, INRA, ESA, ISARAlyon, Montpellier, 84 p.
- Champagnol F (1984) Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale. 351 p.
- Champigny M L, Brauer M, Bismuth E, Cao Thi M, Siegl G, Le Van Q and Stitt M (1991) The short-term effect of NO₃⁻ and NH₃ assimilation on sucrose synthesis in leaves. *Journal of Plant Physiology*. 139(3), 361-368.

- Chanasyk D S, Mapfumo E and Willms W (2003) Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds. *Agricultural Water Management*: 59, 137-153.
- Chantelot E (2002) L'enherbement permanent : une technique permettant d'obtenir une concurrence bénéfique. In *Les entretiens viti-vinicoles Rhône-Méditerranée*, 2002. pp 10-12.
- Chantelot E, Celette F and Wery J (2004) Concurrence pour les ressources hydriques et azotées entre vigne et enherbement en milieu méditerranéen. In *Qualitätsmanagement im Obst- und Weinbau - International symposium in Quality management in viticulture and enology*, Stuttgart - Germany, 10-11 May, 2004. Eds H R Schultz and A Achilles. pp 171-184.
- Chaves M M (1991) Effects of water deficits on carbon assimilation. *Journal of experimental botany*: 42(234), 1-16.
- Chaves M M, Maroco J P and Pereira J S (2003) Understanding plant responses to drought - from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*: 30(3).
- Chevalier-Gerard C, Denis J B and Meynard J M (1994) Estimation of yield loss caused by fungal diseases on winter wheat: construction and validation of a model taking into account the effects of the cropping system. *Agronomie*: 14(5), 305-318.
- Chiffot V, Bertoni G, Cabanettes A and Gavaland A (2006) Beneficial Effects of Intercropping on the Growth and Nitrogen Status of Young Wild Cherry and Hybrid Walnut Trees. *Agroforestry Systems*: 66(1), 13-21.
- Chone X, Van Leeuwen C, Dubourdieu D and Gaudillère J-P (2001) Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of botany*: 87, 477-483.
- Chopart J-L and Siband P (1999) Development and validation of a model to describe root length density of maize from root counts on soil profiles. *Plant and Soil*: 214(1-2), 61-74.
- Clarkson D T (1991) Root structure and sites of ion uptake. In *Plant Roots, the Hidden Half.*, Eds Y Wasiel, A Eshel and U Kafkafi. pp 417-454. Marcel Dekker Inc., New York - U.S.A.
- Cock G J (1985) Soil structural conditions of vineyards under two soil management systems. *Australian Journal of Experimental Agriculture*: 25, 450-454.
- Colbach N, Maurin N and Huet P (1996) Influence of cropping system on foot rot of winter wheat in France. *Crop Protection*: 15(3), 295-305.
- Collet C, Löf M and Pagès L (2006) Root System Development of Oak Seedlings Analysed using an Architectural Model. Effects of Competition with Grass. *Plant and Soil*: 279(1 - 2), 367-383.
- Colnenne C, Meynard J M, Reau R, Justes E and Merrien A (1998) Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Annals of botany*: 81(2), 311-317.
- Comas L H, Anderson L J, Dunst R M, Lakso A N and Eissenstat D M (2005) Canopy and environmental control of root dynamics in a long-term study of Concord grape. *New Phytologist*: 167(3), 829-840.
- Conradie W J (1980) Seasonal uptake of nutrients by Chenin Blanc in sand culture. I. Nitrogen. *South African Journal for Enology and Viticulture*: 1(1), 59-65.
- Conradie W J (1986) Utilisation of nitrogen by the grape-vine as affected by time application and soil type. *South african journal of Enology and Viticulture*: 2, 76-82.
- Conradie W J and Saayman D (1989) Effects of long-term nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization on Chenin blanc vines. I. Nutrient demand and vine performance. *American Journal of Enology and Viticulture*: 40(2), 85-90.
- Conradie W J (1992) Partitioning of nitrogen in grapevines during autumn and the utilisation of nitrogen reserves during the following growing season. *South african journal of Enology and Viticulture*: 13(1), 45-51.
- Considine J A (2004) Grapevine productivity and yield components: a case study using field vines of Zante currant. *Australian journal of grape and wine research*: 10(2), 108-115.
- Coombe B G and Bishop G R (1980) Development of the grape berry. II. Changes in diameter and deformability during veraison. *Australian Journal of Agricultural Research*: 31(3), 499-509.

- Coombe B G (1992) Research on development and ripening of the grape berry. *American Journal of Enology and Viticulture*: 43(1), 101-110.
- Coombe B G (1995) Adoption of a system for identifying grapevine growth stages. *Australian journal of grape and wine research*: 1, 104-110.
- Coombe B G and McCarthy M G (1997) Identification and naming of the inception of aroma development in ripening grape berries. *Australian journal of grape and wine research*: 3(1), 18-20.
- Coombe B G and McCarthy M G (2000) Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening. *Australian journal of grape and wine research*: 6(2), 131-135.
- Coombe B G and Iland P (2005) Chapter 11 - Grapevine Phenology. In *Viticulture - Volume 1: Resources*, Eds P R Dry and B G Coombe. pp 210-248. Winetitles, Ashford - Australia.
- Coppens F, Garnier P, De Gryze S, Merckx R and Recous S (2006) Soil moisture, carbon and nitrogen dynamics following incorporation and surface application of labelled crop residues in soil columns. *European journal of soil science*: 57(6), 894-905.
- Corbeels M, O'Connell A M, Grove T S, Mendham D S and Rance S J (2003) Nitrogen release from eucalypt leaves and legume residues as influenced by their biochemical quality and degree of contact with soil. *Plant and Soil*: 250(1), 15-28.
- Corino L, Lavezzi A, Sansone L, Storchi P, Antonacci D and Coletta A (2003) L'entretien des sols viticoles: l'enherbement. *Progrès Agricole et Viticole*: 120 (6), 134-138.
- Corlett J E, Black C, Ong C K and Monteith J L (1992) Above- and below-ground interactions in a leucaena/millet alley cropping system. II. Light interception and dry matter production. *Agricultural and Forest Meteorology*: 15(1-2), 73-91.
- Cornish K and Zeevaart J A D (1985) Abscisic acid accumulation by roots of *Xanthium strumarium* L. and *Lycopersicon esculentum* Mill. in relation to water stress. *Plant Physiology*: 79(3), 653-658.
- Corre-Hellou G, Fustec J and Crozat Y (2006) Interspecific Competition for Soil N and its Interaction with N₂ Fixation, Leaf Expansion and Crop Growth in Pea-Barley Intercrops. *Plant and Soil*: 282(1 - 2), 195-208.
- Correia M J, Fonseca F, Azedo-Silva J, Dias C, David M M, Barrote I, Osorio M L and Osorio J (2005) Effects of water deficit on the activity of nitrate reductase and content of sugars, nitrate and free amino acids in the leaves and roots of sunflower and white lupin plants growing under two nutrient supply regimes. *Physiologia plantarum*: 124(1), 61-70.
- Cosandey C and Robinson M (2000) Hydrologie continentale. Colin, Paris - France. 368 p.
- Costantini E A C, Campostrini F, Arcara P G, Cherubini P, Storchi P and Pietrucci M (1996) Soil and climate functional characters for grape ripening and wine quality of *Vino Nobile du Montepulciano*. *Acta Horticulturae*: 427, 45-57.
- Creasy G L and Lombard P B (1993) Vine water stress and peduncle girdling. Effects on pre- and post-Veraison grape berry growth and deformability. *American Journal of Enology and Viticulture*: 44(2), 193-197.
- Cruiziat P (1997) Les relations plante-eau, de la cellule a la plante entiere. . In *L'eau dans l'espace rural: production vegetale et qualite de l'eau*, Eds C Riou, R Bonhomme, P Chassin, A Neveu and F Papy. pp 11-40.
- Cruz P (1997) Effect of shade on the growth and mineral nutrition of a C4 perennial grass under field conditions. *Plant and Soil*: 188(2), 227-237.
- Cudney D W, Jordan L S and Hall A E (1991) Effect of wild oat (*Avena fatua*) infestations on light interception and growth rate of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Weed Science*: 39, 175-179.
- Dalland A, Vaje P I, Matthews R B and Singh B R (1993) The potential of alley cropping in improvement of cultivation systems in the high rainfall areas of Zambia. III. Effects on soil chemical and physical properties. *Agroforestry Systems*: 21(2), 117-132.

- De Costa W A J M and Surethran P (2005) Tree-crop interactions in hedgerow intercropping with different tree species and tea in Sri Lanka: 1. Production and resource competition. *Agroforestry Systems*: 63(3), 199-209.
- De Costa W A J M, Surethran P and Attanayake K B (2005) Tree-crop interactions in hedgerow intercropping with different tree species and tea in Sri Lanka: 2. Soil and plant nutrients. *Agroforestry Systems*: 63(3), 211-218.
- De la Hera M L, Romero P, Gomez-Plaza E and Martinez A (In Press) Is partial root-zone drying an effective irrigation technique to improve water use efficiency and fruit quality in field-grown wine grapes under semiarid conditions? *Agricultural Water Management*: In Press, Corrected Proof.
- Delas J and Pouget R (1984) Action de la concentration de la solution nutritive sur quelques caractéristiques physiologiques et technologiques chez *Vitis vinifera* L. cv "Cabernet Sauvignon". 1.- Vigueur, rendement, qualité du moût et du vin. *Agronomie*: 4(5), 437-442.
- Delas J (1996) L'excès de vigueur, problème majeur des vignobles d'aujourd'hui. *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*. Special issue, 25-27.
- Delas J (2000) La fertilisation de la vigne. Editions Feret, Paris - France. 159 p.
- Deloire A, Carbonneau A, Wang Z and Ojeda H (2004) Vine and water: a short review. *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*: 38(1), 1-13.
- Deloire A, Ojeda H, Zebic O, Bernard N, Hunter J J and Carbonneau A (2005) Influence de l'état hydrique de la vigne sur le style de vin. *Progress agricole et viticole*: 122(21), 455-462.
- Delphin J E (1988) Use of first-order kinetics describing the mineralization in some cultivated soils. *Agronomie*: 8(4), 289-294.
- Delphin J E, Chapot J Y and Schoellen A (1991) Relationship between N mineralization capacity and net nitrogen mineralization in field conditions. *Agronomie*: 11(6), 439-445.
- Derby N E, Steele D D, Terpstra J, Knighton R E and Casey F X M (2005) Interactions of Nitrogen, Weather, Soil, and Irrigation on Corn Yield. *Agronomy journal*: 97(5), 1342-1351.
- Desaeger J, Rao M R and Bridge J (2004) Nematodes and other soilborne pathogens in agroforestry. In *Below-ground interactions in tropical agroecosystems: concepts and models with multiple plant components*. pp 263-283.
- Dharmakeerthi R S, Kay B D and Beauchamp E G (2005) Factors Contributing to Changes in Plant Available Nitrogen across a Variable Landscape. *Soil Sci Soc Am J*: 69(2), 453-462.
- Dion R (1993) Histoire de la Vigne et du Vin en France, des origines au XIXe siècle. Flammarion. 768 p.
- Dokoozlian N K and Kliewer W M (1995) The light environment within grapevine canopies. II. Influence of Leaf Area Density on fruit zone light environment and some canopy assessment parameters. *American Journal of Enology and Viticulture*: 46(2), 219-226.
- Donovan, Linton and Richards (2001) Predawn plant water potential does not necessarily equilibrate with soil water potential under well-watered conditions. *Oecologia*: 129(3), 328-335.
- Dorji K, Behboudian M H and Zegbe-Dominguez J A (2005) Water relations, growth, yield, and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial rootzone drying. *Scientia Horticulturae*: 104(2), 137-149.
- dos Santos T P, Lopes C M, Rodrigues M L, de Souza C R, Maroco J P, Pereira J S, Silva J R and Chaves M M (2003) Partial rootzone drying : effects on growth and fruit quality of field-grown grapevines (*Vitis vinifera*). *Functional Plant Biology*: 30(6), 663-671.
- Droogers P (2000) Estimating actual evapotranspiration using a detailed agro-hydrological model. *Journal of hydrology*: 229, 50-58.
- Drury C F, Tan C, Welacky T W, Oloya T O, Hamill A S and Weaver S E (1999) Red clover and tillage influence on soil temperature, water content, and corn emergence. *Agron J*: 91(1), 101-108.

- Dry P R and Loveys B R (1998) Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying. *Australian journal of grape and wine research*: 4, 140-148.
- Duchaufour P (2001) Introduction à la Science du Sol. Dunod, Paris - France. 331 p.
- Dulormne M, Sierra J, Bonhomme R and Cabidoche Y M (2004) Seasonal changes in tree-grass complementarity and competition for water in a subhumid tropical silvopastoral system. *European Journal of Agronomy*: 21(3), 311-322.
- Dunbabin V M, Diggle A J, Rengel Z and van Hugten R (2002) Modelling the interactions between water and nutrient uptake and root growth. *Plant and Soil*: 239, 19-38.
- Dupraz C, Simorte V, Dauzat M, Bertoni G, Bernadac A and Masson P (1998) Growth and nitrogen status of young walnuts as affected by intercropped legumes in Mediterranean climate. *Agroforestry Systems*: 43(1-3), 71-80.
- Durand J L, Gary C, Bariac T, Doussan C, Picon-Cochard C, Gonzalez Dugo V, Celette F and Vauclin M (2005) Couplage de l'eau et de l'azote dans les peuplements cultivés. *In Séminaire STICS*, Carry-le-Rouet, 17-18 March, 2005. Ed INRA. pp 35-37.
- During H (1987) Stomatal responses to alterations of soil and air humidity in grapevine. *Vitis*: 26(1), 9-18.
- Egelkraut T M, Kissel D E, Cabrera M L and Adkins W (2003) Predicting N mineralized in a Georgia Coastal Plain field. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*: 66(1), 1-12.
- Ellert B H and Bettany J R (1992) Temperature dependence of net nitrogen and sulfur mineralization. *Soil Science Society of America Journal*: 56(4), 1133-1141.
- Elliott J A and Jong E d (1993) Prediction of field denitrification rates: a boundary-line approach. *Soil Science Society of America Journal*: 57(1), 82-87.
- Emmett R W, Harris A R, Taylor R H and McGechan J K (1998) Chapter eleven - Grape diseases and vineyard protection. *In Viticulture - Practices*, Eds B G Coombe and P R Dry. pp 232-278. Winetitles, Adelaide - Australia.
- Ercoli L, Mariotti M, Masoni A and Massantini F (1993) Relationships between nitrogen and chlorophyll content and spectral properties in maize leaves. *European Journal of Agronomy*: 2(2), 113-117.
- Escalona J M, Flexas J and Medrano H (2002) Drought effects on water flow, photosynthesis and growth of potted grapevines. *Vitis*: 41(2), 57-62.
- Evans J R (1983) Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology*: 72(2), 297-302.
- Fermaud M, Pieri P and Liminana J M (2001a) Botrytis and micro-climates: propagation of *Botrytis cinerea* in grapes in controlled climatic conditions. *Phytoma*: 543, 40-43.
- Fermaud M, Liminana J M, Froidefond G and Pieri P (2001b) Grape cluster microclimate and architecture affect severity of Botrytis rot of ripening berries. *Bulletin OILB/SROP*: 24(7), 7-9.
- Ferrari G (2002) Bibliographic review: influence of must nitrogen composition on wine and spirit quality. Relations to aromatic factors and defects. *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*: 36(1), 1-10.
- Ferrario S, Foyer C H and Morot-Gaudry J-F (1997) Coordination entre métabolismes azoté, photosynthétique et respiratoire. *In Assimilation de l'azote chez les plantes*, Ed J-F Morot-Gaudry. pp 235-248. INRA Editions, Paris - France.
- Ferreira R, Sellés G, Ruiz R and Sellés I (2004) Effect of water stress induced at different growth stages on grapevine cv. Chardonnay on production and wine quality. *Acta Horticulturae*: 664, 233-236.
- Fetene M (2003) Intra- and inter-specific competition between seedlings of *Acacia etbaica* and a perennial grass (*Hyparrhenia hirta*). *Journal of Arid Environments*: 55, 441-451.
- Foyer C H, Lescure J C, Lefebvre C, Morot-Gaudry J F, Vincentz M and Vaucheret H (1994) Adaptations of photosynthetic electron transport, carbon assimilation, and carbon

- partitioning in transgenic *Nicotiana plumbaginifolia* plants to changes in nitrate reductase activity. *Plant Physiology*. 104(1), 171-178.
- Freeman B M, Lee T H and Turkington C R (1980) Interaction of irrigation and pruning level on grape and wine quality of shiraz vines. *American Journal of Enology and Viticulture*: 31(2), 124-135.
- Freeman B M, Tassie E and Rebbechi M D (1998) Chapter Three - Training and trellising. *In Viticulture - Practices*, Eds B G Coombe and P R Dry. pp 42-65. Winetitles, Adelaide - Australia.
- Gadoury D M, Seem R C, Ficke A and Wilcox W F (2003) Ontogenic resistance to powdery mildew in grape berries. *Phytopathology*. 93(5), 547-555.
- Galet P (1991) Précis d'ampélographie pratique, Montpellier - France. 256 p.
- García de Cortázar I (2006) Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France. PhD thesis, Sup-Agro, Montpellier - France, 276 p.
- Garnier P, Neel C, Mary B and Lafolie F (2001) Evaluation of a nitrogen transport and transformation model in a bare soil. *European journal of soil science*: 52(2), 253-268.
- Garnier P, Neel C, Aita C, Recous S, Lafolie F and Mary B (2003) Modelling carbon and nitrogen dynamics in a bare soil with and without straw incorporation. *European journal of soil science*: 54(3), 555-568.
- Gary C, Payan J-C, Kansou K, Pellegrino A and Wery J (2005) A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by vine in relation with production and quality objectives. *In XIV International GESCO Viticulture Congress, Geisenheim, Germany, 23-27 August, 2005*, 2005. pp 449-456.
- Gary C, Cinna J-P and Celette F (2006) Multiple criteria design of cover crop management plans in vineyards. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica*: 11(2), 529-530.
- Gastal F and Lemaire G (1997) Nutrition azotée et croissance des peuplements végétaux cultivés. *In Assimilation de l'azote chez les plantes*, Ed J-F Morot-Gaudry. pp 355-367. INRA Editions, Paris - France.
- Gastal F and Lemaire G (2002) N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of experimental botany*. 53(370), 789-799.
- Gaudel M (2002) Enquête sur les pratiques d'enherbement des viticulteurs adhérant à la charte Terra Vitis dans le Languedoc-Roussillon. BSc thesis, ENSA-M, Montpellier, 38 p.
- Gaudillère J-P (1997) Gestion de l'azote chez les espèces ligneuses. *In Assimilation de l'azote chez les plantes*, Ed J-F Morot-Gaudry. pp 295-305. INRA Editions, Paris - France.
- Gaudillère J-P, Van Leeuwen C and Ollat N (2002) Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard status. *Journal of experimental botany*. 53(369), 757-763.
- Gaudillère J-P, Chantelot E, Soyer J-P, Molot C and Milin S (2003) L'azote des feuilles et des moûts, deux indicateurs complémentaires pour évaluer le statut azoté de la vigne. *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*. 37(2), 91-101.
- Gelly M, Marsal J, Mata M, Arbones A, Rufat J and Girona J (2004) Fruit water potential: a comparative study with other water potential parameters. *Acta Horticulturae*(No.646), 35-40.
- Ghosh P K (2004) Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India. *Field crops research*: 88(2-3), 227-237.
- Girard N and Hubert B (1999) Modelling expert knowledge-based systems to design decision aids. The exemple of a knowledge-based model on grazing management. *Agricultural Systems*: 59, 123-144.
- Glad C, Farineau J, Regnard J L and Morot-Gaudry J F (1994) The relative contribution of nitrogen originating from two seasonal ¹⁵N supplies to the total nitrogen pool present in the bleeding

- sap and in whole *Vitis vinifera* cv. Pinot Noir grapevines at bloom time. *American Journal of Enology and Viticulture*: 45(3), 327-332.
- Gladstone E A and Dokoozlian N K (2003) Influence of leaf area density and trellis/training system on the light microclimate within grapevine canopies. *Vitis*: 42(3), 123-131.
- Gladstones J S (2005) Chapter Four - Climate and Australian Viticulture. In *Viticulture - Resources*, Eds P R Dry and B G Coombe. pp 90-118. Winetitles, Adelaide - Australia.
- Goldhamer D, Viveros M and Salinas M (2006) Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water and stress timing on yield and yield components. *Irrigation Science*: 24(2), 101-114.
- Goma-Fortin N (2002) L'engazonnement permanent des vignes : Une démarche nouvelle en vignoble méditerranéen aux multiples avantages. In *Trajectoires. Références techniques viticoles*. 6 p.
- Gomez-del-Campo M, Ruiz C and Lissarague J R (2002) Effect of water stress on leaf area development, photosynthesis, and productivity in Chardonnay and Airén grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*: 53(2), 138-143.
- Gonzalez Dugo V (2006) Effet du déficit hydrique sur l'état de nutrition azotée chez les graminées fourragères. PhD thesis, Université de Poitiers, Poitiers-France, 189 p.
- Greenwood D J, Lemaire G, Gosse G, Cruz P, Draycott A and Neeteson J J (1990) Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of botany*: 66(4), 425-436.
- Greenwood D J, Gastal F, Lemaire G, Draycott A, Millard P and Neeteson J J (1991) Growth rate and %N of field grown crops: Theory and experiments. *Annals of botany*: 67, 181-190.
- Grimes D W, Miller R J and Wiley P L (1975) Cotton and corn root development in two field soils of different strength characteristics. *Agronomy journal*: 67(4), 519-523.
- Grundmann G L and Rolston D E (1987) A water function approximation to degree of anaerobiosis associated with denitrification. *Soil science*: 144(6), 437-441.
- Guerrero J, Moriana A, Pérez-López D, Couceiro J F, Olmedilla N and Gijón M C (2006) Regulated deficit irrigation and the recovery of water relations in pistachio trees. *Tree Physiology*: 26(1), 87-92.
- Guix N (2005) Prise en compte des nappes superficielles pour spatialiser le bilan hydrique à l'échelle sub-régionale - Cas de la vigne en basse vallée de la Peyne - Hérault, France. PhD thesis, AgroM, Montpellier - France, 204 p.
- Guswa A J (2005) Soil-moisture limits on plant uptake: An upscaled relationship for water-limited ecosystems. *Advances in water resources*: 28(6), 543-552.
- Habib R (1984) La formation des réserves azotées chez les arbres fruitiers. *Revue bibliographique. Fruits*: 39(10), 623-635.
- Habib R, Pages L, Jordan M O, Simmonneau T and Sebillotte M (1991) Water and mineral uptake by the root system of plants, with special regard to modelling absorption by the roots. *Agronomie*: 11(8), 623-643.
- Haines R and Lee H C (1999) Competition between autumn and spring planted grain intercrops of wheat (*Triticum aestivum* L.) and field bean (*Vicia faba*). *Field crops research*: 62, 167-176.
- Hale C R and Buttrose M S (1974) Effect of temperature on ontogeny of berries of *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon. *Journal of the American Society for Horticultural Science*: 99(5), 390-394.
- Halleen F and Holz G (2001) An overview of the biology, epidemiology and control of *Uncinula necator* (powdery mildew) on grapevine, with reference to South Africa. *South african journal of Enology and Viticulture*: 22(2), 111-121.
- Hardie W J and Considine J A (1976) Response of grape to water-deficit stress in particular stages of development. *American Journal of Enology and Viticulture*: 27(2), 55-61.

- Hassink J (1997) The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*: 191(1), 77-87.
- Hauggaard-Nielsen H and Jensen E (2005) Facilitative Root Interactions in Intercrops. *Plant and Soil*: 274(1 - 2), 237-250.
- Hauggaard-Nielsen H, Andersen M K, Jornsgaard B and Jensen E S (2006) Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea-barley intercrops. *Field crops research*: 95, 256-267.
- Haynes R J (1980) Competitive aspects of the grass-legume association *Advances in Agronomy*: 33, 227-261.
- Heilman J L, McInnes K J, Savage M J, Gesch R W and Lascano R J (1994) Soil and canopy energy balances in a west Texas vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*: 71, 99-114.
- Heller R, Esnault R and Lance C (1997) Physiologie végétale. 1. Nutrition. 294 p.
- Hilbert G (2002) Effets de la nutrition azotée et du stress hydrique sur la maturation et la composition en anthocyanes des baies de *Vitis vinifera* L. au vignoble et en conditions contrôlées. PhD thesis, Université Victor Segalen Bordeaux 2, Bordeaux, 189 p.
- Hilbert G, Soyer J-P, Molot C, Giraudon J, Milin S and Gaudillère J-P (2003) Effects of nitrogen supply on must quality and anthocyanin accumulation in berries of cv. Merlot. *Vitis*: 42(2), 69-76.
- Hofmann A (2006) Conception multicritère d'itinéraires techniques d'enherbement des parcelles viticoles : construction d'un prototype d'outil. MSc thesis, INAPG, Paris - France, 43 p.
- Howard S B, Ong C K, Rao M R, Mathuva M and Black C (1995) The partitioning of light and water in Leucaena-maize agroforestry systems. In *Ecophysiology of tropical intercropping*, Eds H Sinoquet and P Cruz. pp 123-136. INRA, Paris.
- Howell G S (2001) Sustainable grape productivity and the growth-yield relationship: A review. *American Journal of Enology and Viticulture*: 52(3), 165-174.
- Hsiao T C (1973) Plant responses to water stress. *Annual review of plant physiology*: 24, 519-570.
- Hsiao T C and Xu L-K (2000) Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. *Journal of experimental botany*: 51(350), 1595-1616.
- Huang B and Gao H (1999) Physiological responses of diverse tall fescue cultivars to drought stress. *HortScience*: 34(5), 897-901.
- Huppe H C and Turpin D H (1994) Integration of carbon and nitrogen metabolism in plant and algal cells. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*: 45, 577-607.
- Huxley P, Pinney A, Akunda E and Muraya P (1994) A tree/crop interface orientation experiment with a *Grevillea robusta* hedgerow and maize. *Agroforestry Systems*: 26, 23-45.
- Huxley P (1996) Biological factors affecting form and function in woody-non-woody plant mixtures. In *Tree-Crop interactions : a physiological approach*, Eds C K Ong and P Huxley. pp 235-299. CAB Abstract, Wallingford - UK.
- Iland P, Ewart A, Sitters J, Markides A and Bruer N (2000) Techniques for chemical analysis and quality monitoring during winemaking. Patrick Iland Wine promotions, Campbelltown, South Australia.
- Imsande J and Touraine B (1994) N demand and the regulation of nitrate uptake. *Plant Physiology*: 105(1), 3-7.
- Inman-Bamber N G and Smith D M (2005) Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field crops research*: 92(2-3), 185-202.
- Ionescu E M, Budan C, Calistru G H, Pomohaci N, Pituc P, Popa V G H and Vladu C R (1978) Particularités du développement de l'appareil racinaire de la vigne, induites par le spécifique écologique du sol. In *1er symposium international sur l'écologie de la vigne*, 1978. pp 209-217.

- Jackson D I and Lombard P B (1993) Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality - a review. *American Journal of Enology and Viticulture*: 44(4), 409-430.
- Jamieson P D, Francis G S, Wilson D R and Martin R J (1995) Effects of water deficits on evapotranspiration from barley. *Agricultural and Forest Meteorology*: 76(1), 41-58.
- Janick J (1986) Horticultural Science. In *Horticultural Science*. p 746pp.
- Jarvis S C, Stockdale E A, Shepherd M A and Powlson D S (1996) Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: processes and measurement. *Advances in Agronomy*: 57, 187-235.
- Jayakrishnan R, Srinivasan R, Santhi G and Arnold J G (2005) Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrological processes*: 19(3), 749-762.
- Jeuffroy M H and Meynard J-M (1997) Azote : production agricole et environnement. In *Assimilation de l'azote chez les plantes*, Ed J-F Morot-Gaudry. pp 369-380. INRA Editions, Paris - France.
- Jeuffroy M H and Sebillotte M (1997) The end of flowering in pea: influence of plant nitrogen nutrition. *European Journal of Agronomy*: 6(1/2), 15-24.
- Jones H G (1983) Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge University Press, Cambridge - UK. 323 pp. p.
- Jose S, Gillespie A R, Seifert J R, Mengel D B and Pope P E (2000) Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA. 3. Competition for nitrogen and litter decomposition dynamics. *Agroforestry Systems*: 48, 61-77.
- Jose S, Gillespie A R and Pallardy S G (2004) Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*: 61, 237-255.
- Ju X T, Kou C L, Zhang F S and Christie P (2006) Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environmental Pollution*: 143(1), 117-125.
- Justes E, Mary B, Meynard J M, Machet J M and Thelier-Huche L (1994) Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of botany*: 74(4), 397-407.
- Justes E, Jeuffroy M H and Mary B (1997) Chapter 4 - Wheat, Barley, and Durum Wheat. In *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*, Ed G Lemaire. pp 73-91. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg - Germany.
- Kang B T, Reynolds L and Atta-Krah A N (1990) Alley farming. *Advances in Agronomy*: 43, 315-359.
- Kaps M L and Cahoon G A (1992) Growth and fruiting of container-grown Seyval blanc grapevines modified by changes in crop level, leaf number and position, and light exposure. *American Journal of Enology and Viticulture*: 43(2), 191-199.
- Keller M, Hess B, Schwager H, Schärer H and Koblet W (1995) Carbon and nitrogen partitioning in *Vitis vinifera* L. : response to nitrogen supply and limiting irradiance. *Vitis*: 34(1), 19-26.
- Keller M, Kummer M and Vasconcelos M C (2001) Reproductive growth of grapevines in response to nitrogen supply and rootstock. *Australian journal of grape and wine research*: 7(1), 12-18.
- Keller M (2005) Deficit irrigation and vine mineral nutrition. *American Journal of Enology and Viticulture*: 56(3), 267-283.
- Kemanian A R, Stockle C O and Huggins D R (2005) Transpiration-use efficiency of barley. *Agricultural and Forest Meteorology*: 130(1-2), 1-11.
- Kho R M (2000) A general tree-environment-crop interaction equation for predictive understanding of agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*: 80(1/2), 87-100.
- Kinama J M, Stigter C J, Ong C K, Ng'ang'a J K and Gichuki F N (2005) Evaporation from soils below sparse crops in contour hedgerow agroforestry in semi-arid Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*: 130(3-4), 149-162.
- King B J, Siddiqi M Y, Ruth T J, Warner R L and Glass A D M (1993) Feedback regulation of nitrate influx in barley roots by nitrate, nitrite, and ammonium. *Plant Physiology*: 102(4), 1279-1286.

- Kirschbaum M U F (1995) The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic storage. *Soil Biology & Biochemistry*: 27(6), 753-760.
- Kirschbaum M U F (2006) The temperature dependence of organic-matter decomposition--still a topic of debate. *Soil Biology and Biochemistry*: 38(9), 2510-2518.
- Kliewer W M (1991) Methods for determining the nitrogen status of vineyards. *International symposium on nitrogen in grapes and wine*, 133-147.
- Kliewer W M and Dokoozlian N K (2005) Leaf Area/Crop Weight Ratios of Grapevines: Influence on Fruit Composition and Wine Quality. *American Journal of Enology and Viticulture*: 56(2), 170-181.
- Klik A (1991) Effets de diverses mesures d'entretien du sol sur le ruissellement et l'érosion pluviale dans le vignoble. In *IIIe symposium international sur la non culture de la vigne et les autres techniques d'entretien des sols viticoles*, Montpellier, 18-20 Novembre 1991, 1991. pp 367-374.
- Klik A, Rosner J and Loiskandl W (1998) Effects of temporary and permanent soil cover on grape yield and soil chemical and physical properties. *Journal of soil and water conservation*:(3), 249-253.
- Koblet W, Candolfi-Vasconcelos M C and Keller M (1997) How do grapevines respond to altered source/sink ratios and unfavorable environmental conditions? In *Proceedings of the fourth international symposium on cool climate viticulture & enology, Rochester, New York, USA, 16-20 July 1996*. pp II-1-II-8.
- Koundouras S, Van Leeuwen C, Seguin G and Glories Y (1999) Influence de l'alimentation en eau sur la croissance de la vigne, la maturation des raisins et les caractéristiques des vins en zone méditerranéenne (exemple de Némée, Grèce, Cépage Saint Georges, 1997). *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*: 33(4), 149-160.
- Lacape M J, Wery J and Annerose D J M (1998) Relationships between Plant and Soil water status in five field-grown cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars. *Field crops research*: 57, 29-43.
- Laffosse E (2001) Analyse systémique d'une parcelle de vigne enherbée. MSc thesis, ENSA-M-ENSA-R, Montpellier, 45 p.
- Lafolie F (1995) Modélisation des transferts d'azote et possibilités d'application grâce à l'utilisation des données de lysimétrie. *Comptes rendus de l'académie d'agriculture de France*: 81(4), 101-119.
- Lafolie F, Bruckler L, Ozier-Lafontaine H, Tournebize R and Mollier A (1999) Modeling soil-root water transport and competition for single and mixed crop. *Plant and Soil*: 210, 127-143.
- Lal R (1989a) Agroforestry systems and soil surface management of a tropical alfisol: I- Soil moisture and crop yields. *Agroforestry Systems*: 8(1), 7-29.
- Lal R (1989b) Agroforestry systems and soil surface management of a tropical alfisol: II- water runoff, soil erosion and nutrient loss. *Agroforestry Systems*: 8(2), 97-111.
- Lal R (1989c) Agroforestry systems and soil surface management of a tropical alfisol: III- Changes in soil chemical properties. *Agroforestry Systems*: 8(2), 113-132.
- Lal R, Regnier E, Eckert D J, Edwards W M and Hammond R (1991) Expectations of covers crops for sustainable agriculture. In *Covers crops for clean water*, Ed W L Hargrove. pp 1-10. Soil and water Conservation Society, Aukeny (Iowa).
- Lambers H, Simpson R J, Beilharz V C and Dalling M J (1982) Growth and translocation of C and N in wheat (*Triticum aestivum*) grown with a split root system. *Physiologia plantarum*: 56(4), 421-429.
- Lang A and Düring H (1991) Partitioning control by water potential gradient: evidence for compartmentation breakdown in grape berries. *Journal of experimental botany*: 40, 1117-1122.

- Larsson M (1992) Translocation of nitrogen in osmotically stressed wheat seedlings. *Plant, Cell & Environment*: 15(4), 447-453.
- Lascano R J, R.L. B and Lipe W N (1992) Measurements of water flow in young grapevines using the stem heat balance method. *American Journal of Enology and Viticulture*: 43(2), 159-165.
- Lavee S and May P (1997) Dormancy of grapevine buds - facts and speculation. *Australian journal of grape and wine research*: 3(1), 31-46.
- Le Bissonais Y, Montier C, Jamagne M, Daroussin J and King D (2001) Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena*: 46, 207-220.
- Le Bissonais Y, Lecomte V and Cerdan O (2004) Grass strip effects on runoff and soil loss. *Agronomie*: 24(3), 129-136.
- Le Bot J, Andriolo J L, Gary C, Adamowicz S and Robin P (1997) Dynamics of N accumulation and growth of tomato plants in hydroponics : an analysis of vegetative and fruit compartment. In *Diagnostic procedures for crop N management, Poitiers*, Eds G Lemaire and I G Burns. pp 37-51. INRA Ed., Paris - France.
- Le Goff-Guillou I, Marsault J and Riou C (2000) Impact de l'enherbement sur le fonctionnement de la vigne. La composition des moûts, les durées de fermentation et la qualité des vins. synthèse d'un essai de 5 ans mené sur les principaux terroirs du saumurois. *Progrès agricole et viticole*: 117(5), 103-110.
- Lebon E (1993) De l'influence des facteurs pédo- et mésoclimatiques sur le comportement de la vigne et les caractéristiques du raisin. PhD thesis, Université de Bourgogne, Dijon - France, 165 p.
- Lebon E, Dumas V, Pieri P and Schultz H R (2003) Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology*: 30, 699-710.
- Lebon G, Duchene E, Brun O, Magne C and Clement C (2004) Flower abscission and inflorescence carbohydrates in sensitive and non-sensitive cultivars of grapevine. *Sexual Plant Reproduction*: 17(2), 71-79.
- Lecoeur J and Sinclair T R (1996) Field pea transpiration and leaf growth in response to soil water deficits. *Crop Science*: 36(2), 331-335.
- Lehmann J, Peter I, Steglich C, Gebauer G, Huwe B and Zech W (1998) Below-ground interactions in dryland agroforestry. *Forest Ecology and Management*: 111, 157-169.
- Lemaire G and Salette J (1981) Analyse de l'influence de la température sur la croissance au printemps de graminées fourragères. *Comptes rendus de l'académie des Sciences de Paris*: 292, 843-846.
- Lemaire G and Salette J (1984a) Relations entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote par un peuplement de graminées fourragères. 1. Etude de l'effet du milieu. *Agronomie*: 4(5), 423-430.
- Lemaire G and Salette J (1984b) Relations entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote par un peuplement de graminées fourragères. 2. Etude de la variabilité entre génotypes. *Agronomie*: 4(5), 431-436.
- Lemaire G and Denoix A (1987a) Croissance estivale en matière sèche de peuplements de fétuque élevée (*Festuca arundinacea* Shreb.) et de dactyle (*Dactylis glomerata* L.). I. Etude en conditions de nutrition azotée et d'alimentation hydrique non limitantes. *Agronomie*: 7(6), 373-380.
- Lemaire G and Denoix A (1987b) Croissance estivale en matière sèche de peuplements de fétuque élevée (*Festuca arundinacea* Shreb.) et de dactyle (*Dactylis glomerata* L.). II. Interactions entre les niveaux d'alimentation hydrique et de nutrition azotée. *Agronomie*: 7(6), 381-389.
- Lemaire G (1995) Ecophysiological approaches to intercropping. In *Ecophysiology of tropical intercropping*, Eds H Sinoquet and P Cruz. pp 9-25. INRA, Paris - France.

- Lemaire G, Gastal F and Plenet D (1997) Dynamics of N uptake and N distribution in plant canopies. Use of crop N status index in crop modelling. *In Diagnostic procedures for crop N management, Poitiers*, Eds G Lemaire and I G Burns. pp 15-29. INRA Ed., Paris - France.
- Lemaire G and Brisson N (2005) Courbes de dilution de l'azote: Formalisation du passage de la plante isolée au peuplement dense. *In Séminaire STICS Carry le Rouet - France, March, 2005*. pp 15-30.
- Lemaire G, Oosterom E v, Sheehy J, Jeuffroy M H, Massignam A and Rossato L (2007) Is crop N demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth? *Field crops research*: 100(1), 91-106.
- Leonard J and Andrieux P (1998) Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena*: 32, 209-223.
- Li W, Li L, Sun J, Guo T, Zhang F, Bao X, Peng A and Tang C (2005) Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic anthrosol in northwest China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*: 105, 483-491.
- Limami A and Améziane R (1997) Nutrition azotée (NO₃) et distribution du carbone dans la plante. *In Assimilation de l'azote chez les plantes*, Ed J-F Morot-Gaudry. pp 249-259. INRA Editions, Paris - France.
- Lindhard P H and Hansen P (1997) Effect of timing of nitrogen supply on growth, bud, flower and fruit development of young sour cherries (*Prunus cerasus* L.). *Scientia Horticulturae*: 69(3-4), 181-188.
- Lisa L, Parena S and Lisa L (2001) Erosion in traditionally cultivated or grass-established piedmontese hillside vineyards. *Compte Rendu GESCO*, 193-200.
- Lopez-Bellido L, Lopez-Bellido R J and Redondo R (2005) Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field crops research*: 94(1), 86-97.
- Lopez-Zamora I, Falcão N, Comerford N B and Barros N F (2002) Root isotropy and an evaluation of a method for measuring root distribution in soil trenches. *Forest Ecology and Management*: 166(1-3), 303-310.
- Louchart X, Voltz M, Andrieux P and Moussa R (2001) Herbicides runoff at field and watershed scales in a Mediterranean vineyard area. *Journal of environmental quality*: 30, 982-991.
- Loyce C and Wery J (2006) Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception des systèmes de culture. *In L'agronomie aujourd'hui*, Eds T Doré, M Le Bail, P Martin, B Ney and J Roger-Estrade. pp 77-100. Quae, Paris - France.
- Ludvigsen R K (1987) Vineyard soil management : use of cover crops. *Australian Grapegrower and Winemaker (the)*, 102-108.
- Luo J, Tillman R W and Ball P R (2000) Nitrogen loss through denitrification in a soil under pasture in New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry*: 32(4), 497-509.
- Mackie-Dawson L A (1999) Nitrogen uptake and root morphological responses of defoliated Lolium perenne (L.) to a heterogeneous nitrogen supply *Plant and Soil*: 209(1), 111-118.
- Mafongoya P L, Giller K E, Odee D, Gathumbi S, Ndufa S K and Sitompul S M (2004) Benefiting from N₂-fixation and managing rhizobia. *In Below-ground interactions in tropical agroecosystems: concepts and models with multiple plant components*. pp 227-242.
- Maigre D and Murisier F (1992) Comparaison de techniques d'entretien des sols viticoles dans trois sites pédoclimatiques différents de Suisse romande. *Revue suisse viticole, horticole et arboricole*: 24(3), 173-177.
- Maigre D, Aerny J and Murisier F (1995) Entretien des sols viticoles et qualité des vins de Chasselas : influence de l'enherbement permanent et de la fumure azotée. *Revue suisse viticole, horticole et arboricole*: 27(4), 237-251.
- Maigre D (1996) Influence de l'enherbement et de la fumure azotée sur la qualité des vins de Chasselas. *Progrès agricole et viticole*: 114(11), 255-258.

- Mapfumo E, Chanasyk D S and Willms W D (2004) Simulating daily soil water under foothills fescue grazing with the soil and water assessment tool model (Alberta, Canada). *Hydrological processes*: 18(15), 2787-2800.
- Marino M A, Mazzanti A, Assuero S G, Gastal F, Echeverria H E and Andrade F (2004) Nitrogen Dilution Curves and Nitrogen Use Efficiency During Winter-Spring Growth of Annual Ryegrass. *Agronomy journal*: 96(3), 601-607.
- Marschner H (1995) Mineral nutrition of higher plants. In *Mineral nutrition of higher plants*. p xv + 889 pp.
- Marshall B and Willey R W (1983) Radiation interception and growth in an intercrop of pearl millet/groundnut. *Field crops research*: 7, 141-160.
- Martinez-Casasnovas J A, Ramos M C and Ribes-Dasi M (2005) On-site effects of concentrated flow erosion in vineyard fields: some economic implications. *Catena*: 60(2), 129-146.
- Martinez-Casasnovas J A and Ramos M C (2006) The cost of soil erosion in vineyard fields in the Penedes-Anoia Region (NE Spain). *Catena*: 68(2-3), 194-199.
- Mary B, Beaudoin N, Justes E and Machel J-M (1999) Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European journal of soil science*: 50, 549-566.
- Masson P and Bertoni G (1996) Essai d'enherbement d'un vignoble méridional à base de trèfle souterrain. Synthèse de 6 années d'expérimentation. (version provisoire). In *XI Kolloquium bregrünung, Weinbau, 1996*. pp 16.
- Matthews M A, Anderson M M and Schultz H R (1987) Phenologic and growth responses to early and late season water deficits in Cabernet franc. *Vitis*: 26, 147-160.
- Matthews M A and Anderson M M (1988) Fruit ripening in *Vitis vinifera* L.: Responses to seasonal water deficits. *American Journal of Enology and Viticulture*: 39(4), 313-320.
- Matthews M A and Anderson M M (1989) Reproductive development in grape (*Vitis vinifera*): Responses to a seasonal water deficit. *American Journal of Enology and Viticulture*: 40, 52-60.
- Mazzarino M J, Szott L and Jimenez M (1993) Dynamics of soil total C and N, microbial biomass, and water-soluble C in tropical agroecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*: 25(2), 205-214.
- McCarthy M G and Coombe B G (1985) Water status and winegrape quality. *Acta Horticulturae*: 171, 447-456.
- McCarthy M G, Jones L D and Due G (1998) Chapter Six - Irrigation - Principles and Practices. In *Viticulture - Practices*, Eds B G Coombe and P R Dry. pp 104-128. Winetitles, Adelaide - Australia.
- McCown R L (2002) Changing systems for supporting farmers' decisions : problems, paradigms, and prospects. *Agricultural Systems*: 74, 179-220.
- McIntyre B D, Riha S J and Ong C K (1996) Light interception and evapotranspiration in hedgerow agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology*: 81, 31-40.
- McLauchlan K K (2006) Effects of soil texture on soil carbon and nitrogen dynamics after cessation of agriculture. *Geoderma*: 136(1-2), 289-299.
- Medrano H, Escalona J M, Bota J, Gulias J and Flexas J (2002) Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of botany*: 89, 895-905.
- Medrano H, Escalona J M, Cifre J, Bota J and Flexas J (2003) A ten-years study on the physiology of two Spanish grapevine cultivars under field conditions : effect of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality. *Functional Plant Biology*: 30(6), 607-619.
- Merz R, Bloschl G and Parajka J (2006) Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. *Journal of hydrology*: 331(3-4), 591-604.

- Mikha M M, Rice G A and Milliken G A (2004) Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles. *Soil Biology and Biochemistry*: 37(2), 339-347.
- Millard P and Thomson C M (1989) The effect of the autumn senescence of leaves on the internal cycling of nitrogen for the spring growth of apple trees. *Journal of experimental botany*: 40(220), 1285-1289.
- Miller D E (1986) Root systems in relation to stress tolerance. *HortScience*: 21, 963-970.
- Montard (de) F X, Rapey H, Delpy R and Massey P (1998) Competition for light, water and nitrogen in an association of hazel (*Corylus avellana* L.) and cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.). *Agroforestry Systems*: 43(1-3), 135-150.
- Monteith J L (1965) Evaporation and environment. In *XIXth Symposia of the Society for Experimental Biology*, 1965. pp 205-234.
- Montemurro F, Maiorana M, Ferri D and Convertini G (2006) Nitrogen indicators, uptake and utilization efficiency in a maize and barley rotation cropped at different levels and sources of N fertilization. *Field crops research*: 99(2-3), 114-124.
- Moret D, Arrue J L, Lopez M V and Gracia R (2006) Influence of fallowing practices on soil water and precipitation storage efficiency in semiarid Aragon (NE Spain). *Agricultural Water Management*: 82(1-2), 161-176.
- Morlat R (1981) Effets comparés de deux techniques d'entretien du sol sur l'enracinement de la vigne et sur le milieu édaphique. *Agronomie*: 1(10), 887-896.
- Morlat R, Remoué M and 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(5), 485-491.
- Morlat R (1987) Influence du mode d'entretien du sol sur l'alimentation en eau de la vigne en Anjou. Conséquences agronomiques. *Agronomie*: 7, 183-191.
- Morlat R, Penavayre M, Jacquet A, Asselin C and 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. *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*: 26(4), 197-220.
- Morlat R, Jacquet A and Asselin C (1993) Principaux effets de l'enherbement permanent contrôlé du sol, dans un essai de longue durée en Anjou. *Progrès agricole et viticole*: 110(9), 406-410.
- Morlat R and Jacquet A (1993) The soil effects on the grapevine root system in several vineyards of the Loire valley (France). *Vitis*: 32(1), 35-42.
- Morlat R and Jacquet A (2003) Grapevine root system and soil characteristics in a vineyard maintained long-term with or without interrow sward. *American Journal of Enology and Viticulture*: 54(1), 8.
- Morlat R and Bodin F (2006) Characterization of Viticultural Terroirs using a Simple Field Model Based on Soil Depth - II. Validation of the Grape Yield and Berry Quality in the Anjou Vineyard (France). *Plant and Soil*: 281(1 - 2), 55-69.
- Moulis I and Guillerm J-L (1994) Efficacité des plantes de couverture pour le contrôle des adventices dans les vignobles méditerranéens du sud de la France. 8 p.
- Moulis I (1994) L'enherbement des vignobles méditerranéens : importance de la compétition hydrique vigne / culture intercalaire herbacée en vue d'une maîtrise de la production viticole. PhD thesis, ENSA-M, Montpellier, 106 p.
- Mualem Y (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*: 12(3), 513-522.
- Mulia R and Dupraz C (2006) Unusual Fine Root Distributions of Two Deciduous Tree Species in Southern France: What Consequences for Modelling of Tree Root Dynamics? *Plant and Soil*: 281(1 - 2), 71-85.
- Murisier F and Beuret E (1986) L'enherbement des sols viticoles. *Revue suisse viticole, horticole et arboricole*: 18(5), 291-294.

- Murisier F and Zufferey V (1997) Leaf/fruit ratio of the vine and grape quality. *Revue Suisse de Viticulture, d'Arboriculture et d'Horticulture*: 29(6), 355-362.
- Murisier F and Zufferey V (1999) Influence of the row orientation on performance of grapevines. *Revue Suisse de Viticulture, d'Arboriculture et d'Horticulture*: 31(5), 235-239.
- Myers R J K, Campbell C A and Weier K L (1982) Quantitative relationship between net nitrogen mineralization and moisture content of soils. *Canadian Journal of Soil Science*: 62(1), 111-124.
- Nashimoto N and Fujisaki M (1995) Chilling requirements of buds of some deciduous fruits grown in southern Japan and the means to break dormancy. *Acta Horticulturae*: 395, 153-160.
- Nelson P, Banabas M, Scotter D and Webb M (2006) Using Soil Water Depletion to Measure Spatial Distribution of Root Activity in Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) Plantations. *Plant and Soil*: 286(1), 109-121.
- Nendel C and Kersebaum K C (2004) A simple model approach to simulate nitrogen dynamics in vineyard soils. *Ecological Modelling*: 177(1-2), 1-15.
- Nicolardot B, Mary B, Houot S and Recous S (1997) La dynamique de l'azote dans les sols cultivés. *In Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes.*, Reims - France, 19-20 november, 1997. Ed INRA. pp 87-103. Les Colloques.
- Norton M R, Lelievre F and Volaire F (2006a) Summer dormancy in *Dactylis glomerata* L.: the influence of season of sowing and a simulated mid-summer storm on two contrasting cultivars. *Australian Journal of Agricultural Research*: 57(5), 565-575.
- Norton M R, Lelievre F and Volaire F (2006b) Summer dormancy in *Festuca arundinacea* Schreb.: the influence of season of sowing and a simulated mid-summer storm on two contrasting cultivars. *Australian Journal of Agricultural Research*: 57(5), 1267-1277.
- Odhiambo H O, Ong C K, Deans J D, Wilson J, Khan A A H and Sprent J I (2001) Roots, soil water and crop yield: tree crop interactions in a semi-arid agroforestry system in Kenya. *Plant and Soil*: 235(2), 221-233.
- Odhiambo J J O and Bomke A A (2007) Cover crop effects on spring soil water content and the implications for cover crop management in south coastal British Columbia. *Agricultural Water Management*: 88(1-3), 92-98.
- Ojeda H, Deloire A and Carbonneau A (2001) Influence of water deficits on grape berry growth. *Vitis*: 40(3), 141-145.
- Ojeda H, Andary C, Kraera E, Carbonneau A and Deloire A (2002) Influence of pre- and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *American Journal of Enology and Viticulture*: 53(4), 261-267.
- Ollat N, Fermaud M, Tandonnet J P and Neveux M (1998) Evaluation of an indirect method for leaf area index determination in the vineyard: Combined effects of cultivar, year and training system. *Vitis*: 37(2), 73-78.
- Ollat N, Diakou-Verdin P, Carde J P, Barrieu F, Gaudillère J-P and Moing A (2002) Grape berry development : a review. *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*: 36(3), 109-131.
- Ong C K (1995) The "dark side" of intercropping : manipulation of soil resources. *In Ecophysiology of tropical intercropping*, Eds H Sinoquet and P Cruz. pp 45-66. INRA, Paris.
- Ong C K, Black C, Marshall F M and Corlett J E (1996) Principles of resource capture and utilization of light and water. *In Tree-Crop Interactions : a physiological approach*, Eds C K Ong and P Huxley. pp 73-158. CAB International, Oxon.
- Ong C K and Huxley P (1996) *Tree-Crop Interactions : a physiological approach*. CAB International, Oxon. 386 p.

- Ong C K, Wilson J, Deans J D, Mulayta J, Raussen T and Wajja-Musukwe N (2002) Tree-crop interactions : manipulation of water use and root function. *Agricultural Water Management*: 53(1-3), 171-186.
- O'Neill B, Durand J-L, Gastal F and Tournebize R (1995) Drought effects on growth and carbon partitioning in a tall fescue sward grown at different rates of nitrogen fertilization. *European Journal of Agronomy*: 4(1), 91-99.
- Owino J O, Owido S F O and Chemelil M C (2006) Nutrients in runoff from a clay loam soil protected by narrow grass strips. *Soil & Tillage Research*: 88(1/2), 116-122.
- Ozier-Lafontaine H, Bruckler L, Lafolie F and Cabidoche Y M (1995) Modelling root competition for water in mixed crops: a basic approach. In *Ecophysiology of tropical intercropping*, Eds H Sinoquet and P Cruz. pp 175-187. INRA, Paris.
- Ozier-Lafontaine H, Vercambre G and Tournebize R (1997) Radiation and transpiration partitioning in a maize-sorghum intercrop : test and evaluation of two models. *Field crops research*: 49, 127-145.
- Ozier-Lafontaine H, Lafolie F, Bruckler L, Tournebize R and Mollier A (1998) Modelling competition for water in intercrops : theory and comparison with field experiments. *Plant and Soil*: 204, 183-201.
- Ozier-Lafontaine H, Lafolie F, Bruckler L, Tournebize R and Mollier A (2000) Modélisation de la compétition pour l'eau dans une association culturale : influence de la distribution des racines, des propriétés physiques du sol et de la répartition de la demande climatique. In *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*, Eds P Maillard and R Bonhomme. pp 459-479. INRA, Paris.
- Padgett-Johnson M, Williams L E and Walker M A (2003) Vine water relations, gas exchange, and vegetative growth of seventeen Vitis species grown under irrigated and nonirrigated conditions in California. *Journal of American society in horticultural science*: 128(2), 269-276.
- Pagès L, Bruckler L, Pellerin S and Lafolie F (1997) Architecture racinaire et absorption hydrique. In *L'eau dans l'espace rural: production végétale et qualité de l'eau.*, Eds C Riou, R Bonhomme, P Chassin, A Neveu and F Papy. pp 61-84.
- Pandey R K, Maranville J W and Admou A (2000a) Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment: I. Grain yield and yield components. *Agricultural Water Management*: 46(1), 1-13.
- Pandey R K, Maranville J W and Chetima M M (2000b) Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment: II. Shoot growth, nitrogen uptake and water extraction. *Agricultural Water Management*: 46(1), 15-27.
- Parry S, Renault P, Chenu C and Lensi R (1999) Denitrification in pasture and cropped soil clods as affected by pore space structure. *Soil Biology and Biochemistry*: 31(4), 493-501.
- Paul K I, Polglase P J, O'Connell A M, Carlyle J C, Smethurst P J and Khanna P K (2003) Defining the relation between soil water content and net nitrogen mineralization. *European journal of soil science*: 54(1), 39-48.
- Payet N (2005) Impact des apports de lisier sur un sol cultivé de La Réunion : Étude expérimentale et modélisation des flux d'eau et de nitrate dans la zone non saturée. PhD thesis, Université de la Réunion, Saint-Denis de la Réunion-France, 256 p.
- Pearce I and Coombe B G (2005) Chapter 7 - Grapevine Phenology. In *Viticulture - Volume 1: Resources*, Eds P R Dry and B G Coombe. pp 150-166. Winetitles, Ashford - Australia.
- Pearson R C and Goheen A C (1988) Compendium of grape diseases. In *Compendium of grape diseases*. p 93 pp. American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota USA.
- Pellegrino A (2003) Elaboration d'un outil de diagnostic du stress hydrique utilisable sur la vigne en parcelle agricole par couplage d'un modèle de bilan hydrique et d'indicateurs de fonctionnement de la plante. PhD thesis, ENSAM-INRA SYSTEM, Montpellier, 138 p.

- Pellegrino A, Lebon E, Voltz M and Wery J (2004) Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant and Soil*: 266(1-2), 129-142.
- Pellegrino A, Lebon E, Simonneau T and Wery J (2005) Towards a simple indicator of water stress in grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on the differential sensitivities of vegetative growth components. *Australian journal of grape and wine research*: 11(3), 306-315.
- Pellegrino A, Gozé E, Lebon E and Wery J (2006) A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. *European Journal of Agronomy*: 25(1), 49-59.
- Penman H L (1948) Natural evaporation from open water bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society A*: 193, 120-145.
- Percival D C, Fisher K H and Sullivan J A (1994a) Use of fruit zone leaf removal with *Vitis vinifera* L. cv. Riesling grapevines. I. Effects on canopy structure, microclimate, bud survival, shoot density and vine vigor. *American Journal of Enology and Viticulture*: 45(2), 123-132.
- Percival D C, Fisher K H and Sullivan J A (1994b) Use of Fruit Zone Leaf Removal With *Vitis vinifera* L. cv. Riesling Grapevines. II. Effect on Fruit Composition, Yield, and Occurrence of Bunch Rot (*Botrytis cinerea* Pers.:Fr.). *American Journal of Enology and Viticulture*: 45(2), 133-140.
- Pieri P, Fermaud M and Mimiague F (2001a) Analyse du microclimat des grappes. Effets de la compacité et de l'effeuillage. *Actes des Journées GESCO*: Xlle journées, 71-76.
- Pieri P, Fermaud M and Mimiague F (2001b) Analysis of cluster microclimate. Effects of compactness and defoliation. In *Actes des 12e journées GESCO*, Montpellier - France, 3-7 July, 2001b. pp 71-76.
- Pieri P and Fermaud M (2005) Effects of defoliation on temperature and wetness of grapevine berries. *Acta Horticulturae*:(No.689), 109-116.
- Pirmoradian N, Sepaskhah A R and Maftoun M (2004) Deficit irrigation and nitrogen effects on nitrogen-use efficiency and grain protein of rice. *Agronomie*: 24(3), 143-153.
- Pool R M, Pearson R C, Welser M J, Lakso A N and Seem R C (1984) Influence of powdery mildew on yield and growth of Rosette grapevines. *Plant Disease*: 68(7), 590-593.
- Porqueddu C, Fiori P P and Nieddu S (2000) Use of subterranean clover and burr medic as cover crops in vineyards. *Cahiers Options Méditerranéennes*: 45, 445-448.
- Pouget R (1972) General considerations on vegetative rhythm and bud dormancy in the vine. *Vitis*: 11(3), 198-217.
- Pouget R (1988) Budburst of grapevine buds: method of forecasting and principles of establishing a scale of budburst earliness. *Connaissance de la Vigne et du Vin*: 22(2), 105-123.
- Pradel E (1998) Analyse et modélisation des transferts thermiques dans un sol de vignoble. Effets de l'enherbement. PhD thesis, Bordeaux, 178 p.
- Pradel E and Pieri P (2000) Influence of grass layer on vineyard soil temperature. *Australian journal of grape and wine research*: 6(1), 59-67.
- Qadir M, Boers T M, Schubert S, Ghafoor A and Murtaza G (2003) Agricultural water management in water-starved countries : challenges and opportunities. *Agricultural Water Management*: 62(3), 165-185.
- Radersma S and de Ridder N (1996) Computed evapotranspiration of annual and perennial crops at different temporal and spatial scales using published parameter values. *Agricultural Water Management*: 31(1-2), 17-34.
- Radersma S and Ong C K (2004) Spatial distribution of root length density and soil water of linear agroforestry systems in sub-humid Kenya : implications for agroforestry models. *Forest Ecology and Management*: 188(1), 77-89.
- Raison R J, Connell M J and Khanna P K (1987) Methodology for studying fluxes of soil mineral-N in situ. *Soil Biology and Biochemistry*: 19(5), 521-530.

- Rao M R, Schroth G, Williams S E, Namirembe S, Schaller M and Wilson J (2004) Managing below-ground interactions in agroecosystems. *In Below-ground interactions in tropical agroecosystems: concepts and models with multiple plant components*. pp 309-328.
- Recous S, Robin D, Darwis D and Mary B (1995) Soil inorganic N availability: Effect on maize residue decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*. 27(12), 1529-1538.
- Reeleder R D, Miller J J, Ball Coelho B R and Roy R C (2006) Impacts of tillage, cover crop, and nitrogen on populations of earthworms, microarthropods, and soil fungi in a cultivated fragile soil. *Applied Soil Ecology*. 33(3), 243-257.
- Reicosky D C and Richie J T (1976) Relative importance of soil resistance and plant resistance in root water absorption. *Soil Science Society of America Journal*. 40(2), 293-297.
- Reuter D J and Robinson J B (1997) Plant analysis: an interpretation manual. 572 p.
- Riou C, Valancogne C and Pieri P (1989) Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne - vérification expérimentale. *Agronomie*. 9, 441-450.
- Riou C, Pieri P and 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 and Lebon E (2000) Application d'un modèle de bilan hydrique et de la mesure de la température de couvert au diagnostic du stress hydrique de la vigne à la parcelle. *Bulletins de l'OIV*. 73(837-838), 755-764.
- Ritchie J T (1972) Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*. 8(5), 1204-1213.
- Rives M (2000) vigour, pruning, cropping in grapevine (*Vitis vinifera* L.). I. a literature review. *Agronomie*. 20, 79-91.
- Robinson J B (1998) Chapter Nine - Grapevine Nutrition. *In Viticulture - Practices*, Eds B G Coombe and P R Dry. pp 178-208. Winetitles, Adelaide - Australia.
- Rodrigo A, Recous S, Neel C and Mary B (1997) Modelling temperature and moisture effects on C-N transformations in soils: comparison of nine models. *Ecological Modelling*. 102(2-3), 325-339.
- Rodriguez-Lovelle B, Soyer J P and Molot C (2000a) Incidence of permanent grass cover on grapevine phenological evolution and grape berry ripening. *Acta Horticulturae*. 526, 241-248.
- Rodriguez-Lovelle B, Soyer J-P and Molot C (2000b) Nitrogen availability in vineyard soils according to soil management practices. Effects on vine. *Acta Horticulturae*. 526, 277-285.
- Rodriguez-Lovelle B and Gaudillère J-P (2002) Carbon and nitrogen partitioning in either fruiting and non-fruiting grapevines: effect of nitrogen limitation before and after veraison. *Australian journal of grape and wine research*. 8(2), 86-94.
- Rozier J, Meyer E and Planas R (1989) Les techniques d'entretien des sols viticoles. *Progrès agricole et viticole*. 106(12), 287-290.
- Rufty T W, Jr., Huber S C and Volk R J (1988) Alterations in leaf carbohydrate metabolism in response to nitrogen stress. *Plant Physiology*. 88(3), 725-730.
- Rupp D (1997) Green cover management to optimize the nitrogen supply of grapevines. *Acta Horticulturae*. 427, 57-62.
- Russow R and Böhme F (2005) Determination of the total nitrogen deposition by the ¹⁵N isotope dilution method and problems in extrapolating results to field scale. *Geoderma*. 127(1-2), 62-70.
- Ryser J P and Pittet J P (2002) Risques de pertes d'azote dans le sol par lixiviation, résultats d'essai en lysimètres. *Revue suisse viticole, horticole et arboricole*. 34(2), 67-71.
- Sadras V O and Milroy S P (1996) Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. *Field crops research*. 47(2/3), 253-266.
- Salette J and Lemaire G (1981) The variation of nitrogen content during growth of forage grasses: a dilution equation. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences, III*. 292(14), 875-878.

- Schaller K, Berthold G and Löhnertz O (1991) Investigations on the nitrogen turnover in permanent grass cover vineyards as a tool for better fertilization practices. *In 3rd international symposium on no-tillage and other management techniques in vines*, 1991. pp 173-180.
- Schaller M, Schroth G, Beer J and Jiménez F (2003) Root interactions between young Eucalyptus deglupta trees and competitive grass species in contour strips. *Forest Ecology and Management*: 179, 429-440.
- Schlemmer M R, Francis D D, Shanahan J F and Schepers J S (2005) Remotely Measuring Chlorophyll Content in Corn Leaves with Differing Nitrogen Levels and Relative Water Content. *Agronomy journal*: 97(1), 106-112.
- Schnebelen N, Nicoulaud B, Bourennane H, Couturier A, Verbeque B, Revalier C, Bruand A and Ledoux E (2004) The STICS model to predict nitrate leaching following agricultural practices. *Agronomie*: 24, 423-435.
- Scholander (1965) Sap pressure in vascular plants. *Science*: 148, 339-346.
- Schroth G (1999) A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options. *Agroforestry Systems*: 43(1-3), 5-34.
- Schultz H R and Matthews M A (1988) Vegetative growth distribution during water deficits in *Vitis vinifera* L. *Australian journal of plant physiology*: 15, 641-656.
- Schultz H R (2003) Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant Cell and Environment*: 26(8), 1393-1405.
- Seguin G (1972) Répartition dans l'espace du système racinaire de la vigne. *Comptes rendus de l'académie des Sciences de Paris*: 274, 2178-2180.
- Seguin G (1983) Influence des terroirs viticoles sur la constitution de la qualité des vendanges. *Bulletin de l'OIV*: 56, 3-18.
- Senaratne R, Liyanage N D L and Soper R J (1995) Nitrogen fixation of and N transfer from cowpea, mungbean and groundnut when intercropped with maize. *Fertilizer research*: 40, 41-48.
- Sheehy J E, Dionora M J A, Mitchell P L, Peng S, Cassman K G, Lemaire G and Williams R L (1998) Critical nitrogen concentrations: implications for high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics. *Field crops research*: 59(1), 31-41.
- Sillon J F, Ozier-Lafontaine H and Brisson N (2000) Modelling daily root interactions for water in a tropical shrub and grass alley cropping systems. *Agroforestry Systems*: 49, 131-152.
- Sinclair F L and Ludlow M M (1986) Influence of soil water supply on the plant water balance for four tropical grain legumes. *Australian journal of plant physiology*: 13, 329-341.
- Singh R, Saharan N and Ong C (1989) Above and below ground interactions in alley-cropping in semi-arid India. *Agroforestry Systems*: 9(3), 259-274.
- Singh S, Ladha J K, Gupta R K, Bhushan L, Rao A N, Sivaprasad B and Singh P P (2007) Evaluation of mulching, intercropping with *Sesbania* and herbicide use for weed management in dry-seeded rice (*Oryza sativa* L.). *Crop Protection*: 26(4), 518-524.
- Sinoquet H and Caldwell R M (1995) Estimation of light capture and partitioning in intercropping systems. *In Ecophysiology of tropical intercropping*, Eds H Sinoquet and P Cruz. pp 79-98. INRA, Paris.
- Skopp J, Jawson M D and Doran J W (1990) Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. *Soil Science Society of America Journal*: 54(6), 1619-1625.
- Smart D R, Carlisle E, Goebel M and Nunez B A (2005) Transverse hydraulic redistribution by a grapevine. *Plant Cell and Environment*. Sous Presse.
- Smart R E and Sinclair T R (1976) Solar heating of grape berries and other spherical fruits. *Agricultural Meteorology*: 17(4), 241-259.
- Smart R E and Coombe B G (1983) Water relations of grapevines. *In Water deficits and plant growth. Volume VII. Additional woody crop plants*. pp 138-196.

- Smart R E (1985) Principles of grapevine canopy microclimate manipulation with implications for yield and quality. A review. *American Journal of Enology and Viticulture*: 36, 230-239.
- Smart R E (1987) Influence of light on composition and quality of grapes. *Acta Horticulturae*:(No. 206), 37-47.
- Smart R E, Smith S M and Winchester R V (1988) Light quality and quantity effects on fruit ripening for Cabernet Sauvignon. *American Journal of Enology and Viticulture*: 39(3), 250-258.
- Smart R E, Dick J K, Gravett I M and Fisher B M (1990) Canopy management to improve grape yield and wine quality Principles and practices. *South african journal of Enology and Viticulture*: 11(1), 3-17.
- Smart R E, Dick J K, Gravett I M and Fisher B M (1991) Canopy management to improve grape yield and wine quality: Principles and practices. *South african journal of Enology and Viticulture*: 11(1), 3-17.
- Smart R E (1998) Chapter Five - Canopy Management. In *Viticulture - Practices*, Eds B G Coombe and P R Dry. pp 85-103. Winetitles, Adelaide - Australia.
- Smith D M, Jackson N A, Roberts J M and Ong C K (1999) Root distributions in *Grevillea robusta*-maize agroforestry system in semi-arid Kenya. *Plant and Soil*: 211, 191-205.
- Smolander A, Barnette L, Kitunen V and Lumme I (2005) N and C transformations in long-term N-fertilized forest soils in response to seasonal drought. *Applied Soil Ecology*: 29(3), 225-235.
- Soar C J, Speirs J, Maffei S M, Penrose A B, McCarthy M G and Loveys B R (2006) Grape vine varieties Shiraz and Grenache differ in their stomatal response to VPD: apparent links with ABA physiology and gene expression in leaf tissue. *Australian journal of grape and wine research*: 12(1), 2-12.
- Souza (de) C R, Maroco J P, Santos (dos) T P, Rodrigues M L, Lopes C M, Pereira J S and Chaves M M (2003) Partial rootzone drying : regulation of stomatal aperture and carbon assimilation in field-grown grapevines (*Vitis vinifera* cv. Moscatel). *Functional Plant Biology*: 30(6), 653-662.
- Souza (de) C R, Maroco J P, dos Santos T P, Rodrigues M L, Lopes C, Pereira J S and Chaves M M (2005) Control of stomatal aperture and carbon uptake by deficit irrigation in two grapevine cultivars. *Agriculture, Ecosystems and Environment*: 106(2-3), 261-274.
- Soyer J-P, Delas J, Molot C, Andral P and Casteran P (1984) Techniques d'entretien du sol en vignoble bordelais. Consequences sur la vigne (production, vigueur, enracinement, nutrition) et sur le sol apres 20 ans d'experimentation. *Progrès agricole et viticole*: 101(12), 315-320.
- Spayd S E, Wample R L, Evans R G, Stevens R G, Seymour B J and Nagel C W (1994) Nitrogen Fertilization of White Riesling Grapes in Washington. Must and Wine Composition. *American Journal of Enology and Viticulture*: 45(1), 34-42.
- Spitters C J T and Aerts R (1983) Simulation of competition for light and water in crop-weed associations. *Aspects of Applied Biology*: 4, 467-483.
- Spring J-L (1999) Indice chlorophyllien du feuillage et nutrition azotée du cepage Chasselas. Premières expériences en Suisse romande. *Revue suisse viticole, horticole et arboricole*: 31(3), 141-145.
- Spring J-L and Zufferey V (2000) Intérêt de la détermination de l'indice chlorophyllien du feuillage en viticulture. *Revue suisse viticole, horticole et arboricole*: 32(6), 323-328.
- Spring J-L (2002) Valorisation de la fumure azotée en vignes enherbées. Résultats d'un essai sur Chasselas dans le bassin lémanique. *Revue suisse viticole, horticole et arboricole*: 34(5), 289-296.
- Steer B T and Hocking P J (1983) leaf and floret production in sunflower (*Helianthus annuus* L.) as affected by nitrogen supply. *Annals of botany*: 52(3), 267-277.
- Stern W R (1993) Nitrogen fixation and transfer in intercrop systems. *Field crops research*: 34(3-4), 335-356.

- Stevens R M and Nicholas P R (1994) Root length and mass densities of *Vitis vinifera* L. cultivars 'Muscat Gordo Blanco' and 'Shiraz'. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Sciences*. 22, 381-385.
- Stevens R M, Harvey G and Aspinall D (1995) Grapevine growth of shoots and fruit linearly correlate with water stress indices based on root-weighted soil matric potential. *Australian journal of grape and wine research*. 1, 58-66.
- Stirling C M, Williams J H, Black C and Ong C K (1990) The effect of timing of shade on development, dry matter production and light use efficiency in groundnut (*Arachis hypogaea* L.) under field conditions. *Australian Journal of Agricultural Research*. 41, 633-644.
- Stocking M A (1988) Assessing vegetative cover and management effects. In *Soil erosion research method*, Ed R Sal. pp 163-186. Soil Water Conservation Society, Ankeny - Iowa - USA.
- Stoll M, Loveys B and Dry P (2000) Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine. *Journal of experimental botany*. 51(350), 1627-1634.
- Swanepoel J J and Southey J M (1989) The influence of rootstock on the rooting pattern of the grapevine. *South African Journal for Enology and Viticulture*. 10(1), 23-28.
- Swartzendruber D and Hillel D (1973) The physics of infiltration. In *Ecological Studies. IV. Physical Aspects of Soil Water and Salts in Ecosystems*. pp 3-15.
- Tamari S, Bruckler L, Halbertsma J and Chadoeuf J (1993) A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Science Society of America Journal*. 57(3), 642-651.
- Tanaka A, Fujita K and Kikuchi K (1974a) Nutro-physiological studies on the tomato plant. III-Photosynthetic rate of individual leaves in relation to the dry matter production of plant. *Soil Science and Plant Nutrition*. 20, 173-183.
- Tanaka A, Fujita K and Kikuchi K (1974b) Nutro-physiological studies on the tomato plant. IV-Source-sink relationship and structure of the source-sink unit. *Soil Science and Plant Nutrition*. 20, 305-315.
- Tardieu F (1988) Conséquences de la disposition spatiale des racines au champ sur les transferts d'eau sol-plante. In *Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère*, Ed R Calvet. pp 181-211. INRA, Paris.
- Tardieu F, Katerji N and Bethenod O (1990) Relations entre l'état hydrique du sol, le potentiel de base et d'autres indicateurs de la contrainte hydrique chez le maïs. *Agronomie*. 10, 617-626.
- Tardieu F and Katerji N (1991) Plant response to the soil water reserve : consequences of the root system environment. *Irrigation Science*. 12, 145-152.
- Tardieu F, Bruckler L and Lafolie F (1992) Root clumping may affect the root water potential and the resistance to soil-root water transport. *Plant and Soil*. 140(2), 291-301.
- Tardieu F and Davies W J (1993) Integration of hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and water status of droughted plants. *Plant, Cell and Environment*. 16(4), 341-349.
- Tardieu F and Dreyer E (1997) Régulation des échanges gazeux par les plantes soumises à la sécheresse. In *L'eau dans l'espace rural: production végétale et qualité de l'eau.*, Eds C Riou, R Bonhomme, P Chassin, A Neveu and F Papy. pp 41-59.
- Tardieu F and Simonneau T (1998) Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. *Journal of experimental botany*. 49, 419-432.
- Taylor H M and Klepper B (1974) Water relations of cotton. 1. Root growth and water use as related to top growth and soil water content. *Agronomy journal*. 66(4), 584-588.
- Tesic D (2001) Environmental effects on Cabernet Sauvignon (*Vitis vinifera* L.) when grown in different sub-regions within Hawke's Bay (New Zealand). PhD thesis, Massey University, Palmerston north - New Zealand, 290 p.

- Thiebeau P, Herre C, Doledec A-F, Perraud A, Panigai L, Mary B and Nicolardot B (2005) Incidence du mode de couverture du sol sur la fourniture en azote des sols de vigne en Champagne. *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*. 39(4), 163-177.
- Thorsted M D, Weiner J and Olesen J E (2006) Above- and below-ground competition between intercropped winter wheat *Triticum aestivum* and white clover *Trifolium repens*. *Journal of Applied Ecology*. 43(2), 237-245.
- Tolley-Henry L and Raper C D, Jr. (1986) Expansion and photosynthetic rate of leaves of soybean plants during onset of and recovery from nitrogen stress. *Botanical Gazette*: 147(4), 400-406.
- Tolley-Henry L and Raper C D, Jr. (1991) Solute carbohydrate allocation to roots, photosynthetic rate of leaves and nitrate stress and irradiance. *Botanical Gazette*: 147(4), 400-406.
- Touraine B and Gojon A (1997) Intégration de l'absorption du nitrate dans la plante. In *Assimilation de l'azote chez les plantes*, Ed J-F Morot-Gaudry. pp 109-128. INRA Editions, Paris - France.
- Tournebize J (2001) Impact de l'enherbement du vignoble alsacien sur le transfert des nitrates. PhD thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 306 p.
- Tournebize R and Sinoquet H (1995) Light interception and partitioning in a shrub/grass mixture. *Agricultural and Forest Meteorology*. 72(3-4), 277-294.
- Tournebize R, Sinoquet H and Bussièrè F (1996) Modelling evapotranspiration partitioning in a shrub/grass alley crop. *Agricultural and Forest Meteorology*: 81, 255-272.
- Trambouze W, Voltz M, Bertuzzi P and Huttel O (1994) Variabilité spatio-temporelle des prélèvements d'eau au sein d'une vigne en rangs. *Comptes-rendus journées scientifiques du GFHN*, 31-36.
- Trambouze W (1996) Caractérisation et éléments de modélisation de l'évapotranspiration réelle de la vigne à l'échelle de la parcelle. PhD thesis, ENSA-M, Montpellier, 175 p.
- Trambouze W, Bertuzzi P and Voltz M (1998) Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a row-cropped vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*: 91, 193-208.
- Trambouze W and Voltz M (2001) Measurement and modelling of the transpiration of a mediterranean vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*: 107, 153-166.
- Trenbath B R (1993) Intercropping for the management of pests and diseases. *Field crops research*: 34(3-4), 381-405.
- Tripathi M P, Panda R K and Raghuwanshi N S (2003) Calibration and validation of SWAT model for predicting runoff and sediment yield of small watershed in India. *Agricultural Engineering Journal*: 12(1-2), 95-118.
- Tripathi M P, Raghuwanshi N S and Rao G P (2006) Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrological processes*: 20(5), 1137-1156.
- Unkovich M, Jamieson N, Monaghan R and Barraclough D (1998) Nitrogen mineralisation and plant nitrogen acquisition in a nitrogen-limited calcareous grassland. *Environmental and Experimental Botany*: 40, 209-219.
- USDA (2004a) Chapter 9 - Hydrologic Soil-Cover Complexes. In *National Soil Conservation Service: National Engineering Handbook*, Washington D.C. - USA.
- USDA (2004b) Chapter 10 - Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. In *National Soil Conservation Service: National Engineering Handbook*, Washington D.C. - USA.
- Ussahatanonta S, Jackson D I and Rowe R N (1996) Effect of nutrient and water stress on vegetative and reproductive growth in *Vitis vinifera* L. *Australian journal of grape and wine research*: 2, 64-69.
- Valancogne C and Nasr Z (1989) Une méthode de mesure du débit de sève brute dans de petits arbres par bilan de chaleur. *Agronomie*: 9, 609-617.

- Valdés H, Fermaud M, Calonnec A and Gary C (2006) Relationships between vine vigour and the incidence of grey mold and powdery mildew in Aranel grapevines. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica*: 11(2), 489-490.
- Valdés H, Fermaud M, Roudet J, Calonnec A and Gary C (soumis) Lower vegetative and reproductive growth in grapevine correlates to reduced grey mold incidence. *Australian journal of grape and wine research*.
- Valé M (2006) Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol in situ, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français. PhD thesis, Institut National Polytechnique, Toulouse, 208 p.
- Vamerali T, Saccomani M, Bona S, Mosca G, Guarise M and Ganis A (2003) A comparison of root characteristics in relation to nutrient and water stress in two maize hybrids. *Plant and Soil*: 255, 157-167.
- Van Genuchten M T (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*: 44, 892-898.
- Van Leeuwen C and Seguin G (1994a) Effect of the water supply to vines, determined by measuring leaf water potential, on vegetative development and the ripening of the grape (*Vitis vinifera* cv. Cabernet Franc, Saint-Emilion 1990). *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*: 28(2), 81-110, 181-112.
- Van Leeuwen C and Seguin G (1994b) Incidence de l'alimentation en eau de la vigne appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint Emilion 1990). *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*: 28(2), 81-110, 181-112.
- Van Leeuwen C, Friant P, Soyer J-P, Molot C, Chone X and Dubourdieu D (2000a) L'intérêt du dosage de l'azote total et de l'azote assimilable dans le moût comme indicateur de la nutrition azotée de la vigne. *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*: 34(2), 75-82.
- Van Leeuwen C, Lerich O, Renard R, Tregoat O and Alla P L (2000b) Micromorphometric changes in trunk diameter in relation to mild water stress in field grown vines. *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*: 34(2), 41-47.
- Van Leeuwen C, Gaudillère J-P and Tregoat O (2001) Evaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*: 35(4), 195-205.
- Van Noordwijk M, Lawson G J, Soumare A, Groot J J R and Hairiah K (1996) Root distribution of tree and crops : competition and/or complementarity. In *Tree-Crop interactions : a physiological approach*, Eds C K Ong and P Huxley. pp 319-365. CAB International, Wallingford - UK.
- Van Noordwijk M, Brower G, Meijboom F, do Rosario G O M and Bengough A G (2000) Chapter 7 - Trench profile techniques and core break methods. In *Root methods*, Eds A L Smit, A G Bengough, C Engels, M Van Noordwijk, S Pellerin and S C Van de Geijn. pp 113-145. Springer.
- Van Zyl J L (1987) Diurnal variation in grapevine water stress as a function of changing soil water status and meteorological conditions. *South african journal of Enology and Viticulture*: 8(2), 45-52.
- Vandermeer J (1989) The ecology of intercropping. 237 p.
- Verchot L V, Franklin E C and Gilliam J W (1997) Nitrogen cycling in Piedmont vegetated filter zones: II. Subsurface nitrate removal. *Journal of environmental quality*: 26(2), 337-347.
- Villalobos F J, Orgaz F, Testi L and Fereres E (2000) Measurement and modeling of evapotranspiration of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *European Journal of Agronomy*: 13(2-3), 155-163.

- Voltaire F, Thomas H and Lelievre F (1998) Survival and recovery of perennial forage grasses under prolonged Mediterranean drought: I. Growth, death, water relations and solute content in herbage and stubble. *New Phytologist*. 140(3), 439-449.
- Voltaire F and Lelièvre F (2001) Drought survival in *Dactylis glomerata* and *Festuca arundinacea* under similar rooting conditions in tubes. *Plant and Soil*. 229(2), 225-234.
- Voltaire F and Norton M (2006) Summer Dormancy in Perennial Temperate Grasses. *Ann Bot*. 98(5), 927-933.
- Wallace J S (1995) Towards a coupled light partitioning and transpiration model for use in intercrops and agroforestry. In *Ecophysiology of tropical intercropping*, Eds H Sinoquet and P Cruz. pp 153-162. INRA, Paris.
- Wallace J S and Holwill C J (1997) Soil evaporation from tiger-bush in south-west Niger. *Journal of hydrology*. 188-189, 426-442.
- Wassenaar T, Andrieux P, Baret F and Robbez-Masson J M (2005) Soil surface infiltration capacity classification based on the bi-directional reflectance distribution function sampled by aerial photographs. The case of vineyards in a Mediterranean area. *Catena*. 62(2-3), 94-110.
- Wermelinger B and Koblet W (1990) Seasonal growth and nitrogen distribution in grapevines leaves, shoots and grapes. *Vitis*. 29, 15-26.
- Wermelinger B, Baumgartner J and Gutierrez A P (1991) A demographic model of assimilation and allocation of carbon and nitrogen in grapevines. *Ecological Modelling*. 53, 1-26.
- Wery J (2005) Differential effects of soil water deficit on the basic plant functions and their significance to analyse crop responses to water deficit in indeterminate plants. *Australian Journal of Agricultural Research*. 56(11), 1201-1209.
- Willey R W (1990) Resource use in intercropping systems. *Agricultural Water Management*. 17, 215-231.
- Williams D W, Andris H L, Beede R H, Luvisi D A, Norton M V K and Williams L E (1985) Validation of a model for the growth and development of the Thompson Seedless grapevine. II. Phenology. *American Journal of Enology and Viticulture*. 36(4), 283-289.
- Williams L E (1987) Growth of 'Thompson Seedless' grapevines: II. Nitrogen distribution. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 112(2), 330-333.
- Williams L E and Biscay P J (1991) Partitioning of dry weight, nitrogen, and potassium in cabernet sauvignon grapevines from anthesis until harvest. *American Journal of Enology and Viticulture*. 42, 113-117.
- Winkel T and Rambal S (1990) Stomatal conductance of some grapevines growing in the field under a Mediterranean environment. *Agricultural and Forest Meteorology*. 51(2), 107-121.
- Yamoah C F, Agboola A A, Wilson G F and Mulongoy K (1986) Soil properties as affected by the use of leguminous shrubs for alley cropping with maize. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 18(2), 167-177.
- Yang Y S and Hori Y (1979) Studies on retranslocation of accumulated assimilates in Delaware grapevines. I. Retranslocation of ¹⁴C-assimilates in the spring following ¹⁴C feeding in summer and autumn. *Tohoku Journal of Agricultural Research*. 30(2), 43-56.
- Young A (1991) Soil fertility. In *Biophysical research in Asian agroforestry*, Eds M Avery, M G R Cannell and C K Ong. pp 187-207. Winrock International, U.S.A.
- Zahavi T, Reuveni M, Scheglov D and Lavee S (2001) Effect of Grapevine Training Systems on Development of Powdery Mildew. *European Journal of Plant Pathology*. 107(5), 495-501.
- Zapata C, Deleens E, Chaillou S and Magne C (2004) Partitioning and mobilization of starch and N reserves in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Journal of Plant Physiology*. 161(9), 1031-1040.
- Zinn Y L, Lal R and Resck D V S (2005) Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. *Geoderma*. 127(1-2), 168-173.

ANNEXES



Annexe 1 - Stades repères de la phénologie de la vigne

- 3 -

FICHE PHYTOSANITAIRE



STADES REPERES DE LA VIGNE

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA FORÊT - SERVICES DE LA PROTECTION DES VÉGÉTAUX



01 - Repos d'hiver



03 - Bourgeon dans le coton



05 - Pointe verte de la pousse visible



06 - Eclatement des bourgeons



09 - 2 ou 3 feuilles étalées



12 - 5 ou 6 feuilles étalées
inflorescences visibles



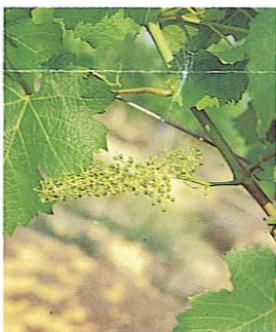
15 - Boutons floraux encore agglomérés



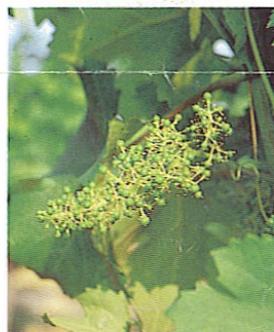
17 - Boutons floraux séparés



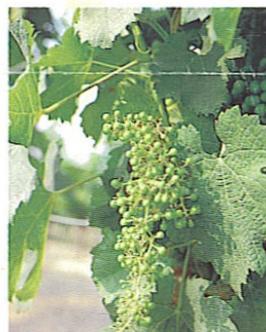
23 - Pleine floraison



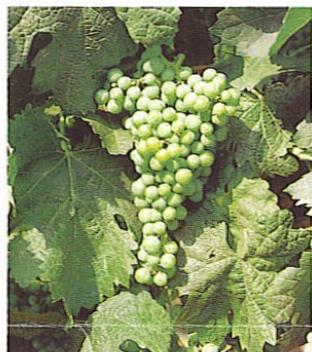
27 - Nouaison



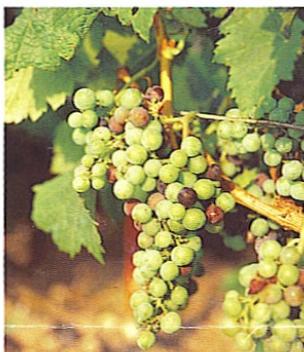
29 - Baies à taille de grains de plomb



31 - Baies à taille de pois



33 - Fermeture de la grappe



35 - Début véraison



37 - Fin véraison

photos - S.R.P.V. Aquitaine

Janvier 1992

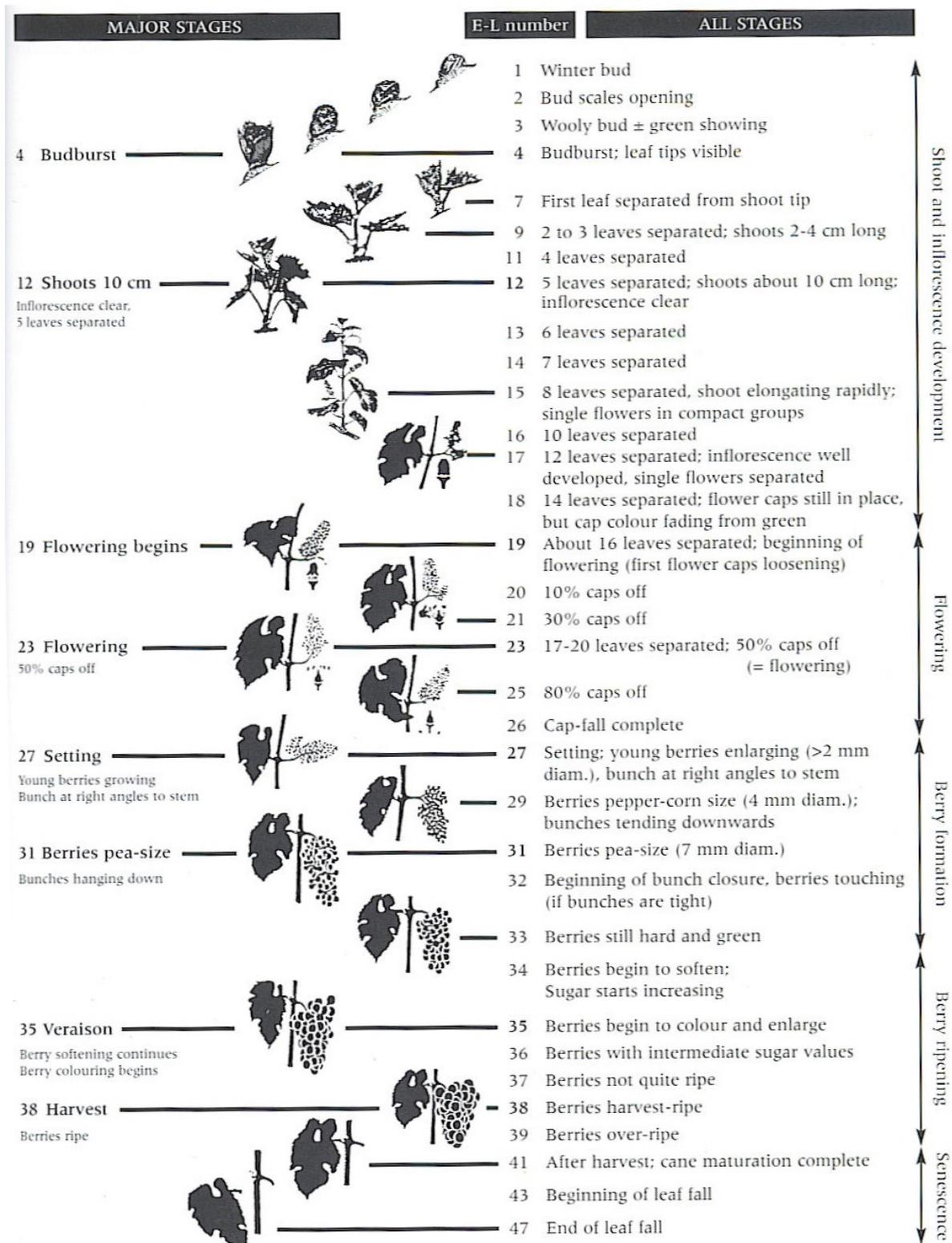


Figure – Echelle d'identification du stade phénologique d'après Eichorn et Lorentz révisée par Coombe (2005).

Annexe 2 - Etalonnage de la mesure avec le LAI2000 de la surface foliaire

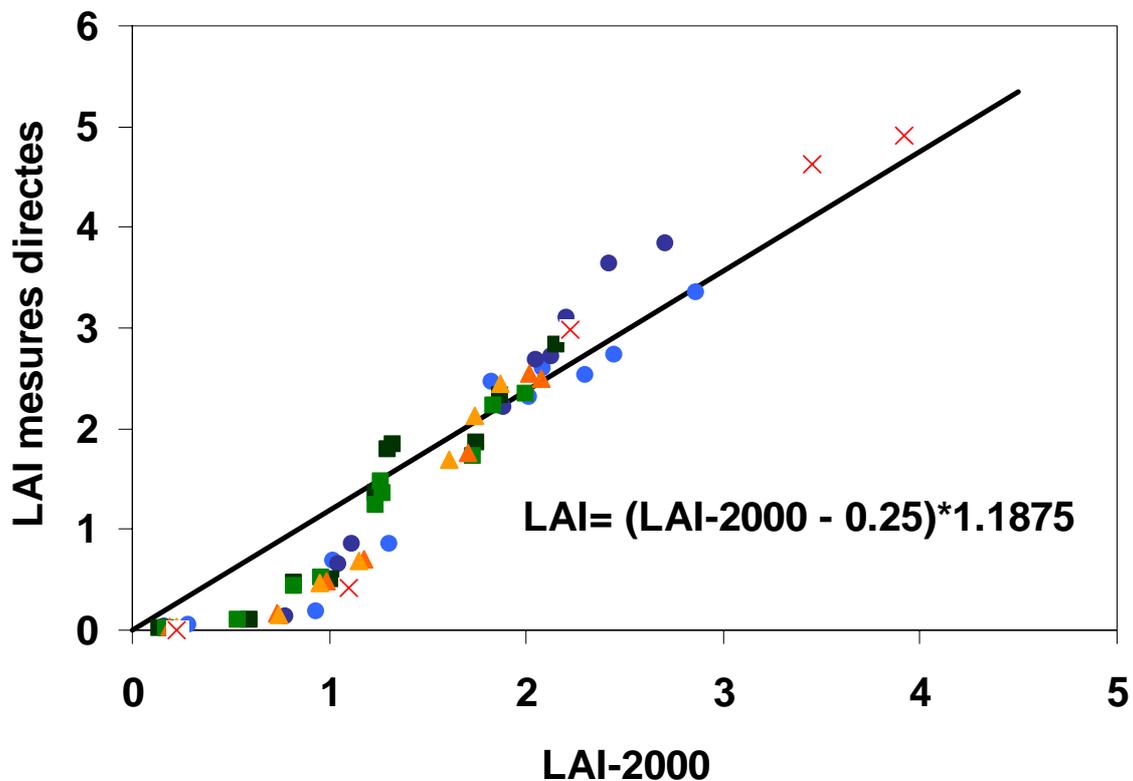


Figure – Etalonnage des valeurs de LAI-2000 avec les mesures directes (destructives) produites par la vigne en fonction du traitement. Les points représentent les moyennes mesurées sur chacune des placettes MF1 (■), MF2 (■), MR1 (▲), MR2 (▲), MD1 (●), MD2 (●) et MT (×).

Annexe 3 - Mesure de l'humidité du sol par la méthode neutronique

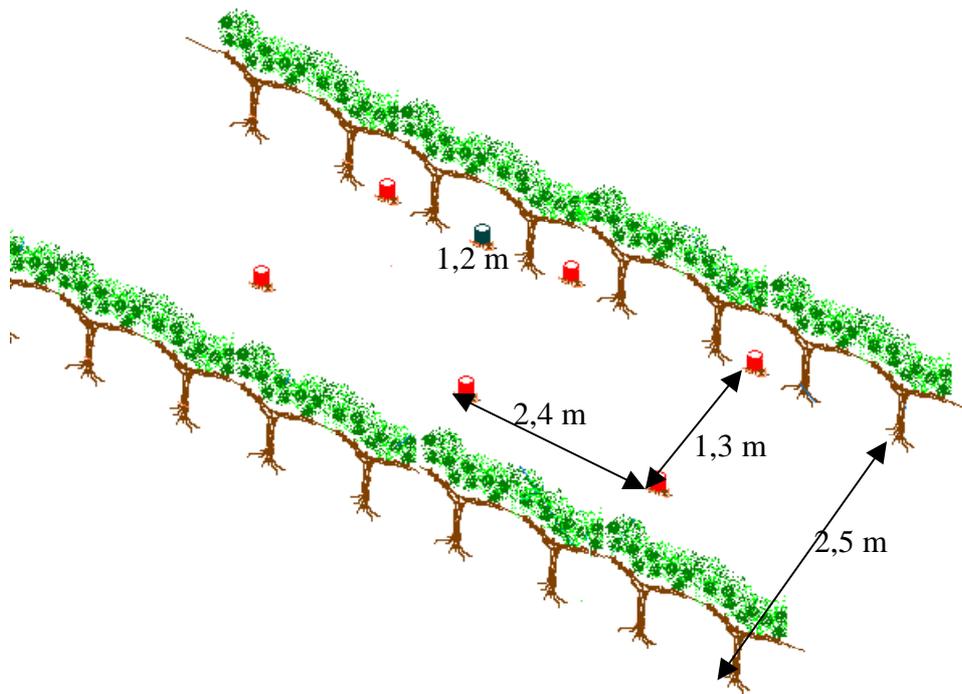
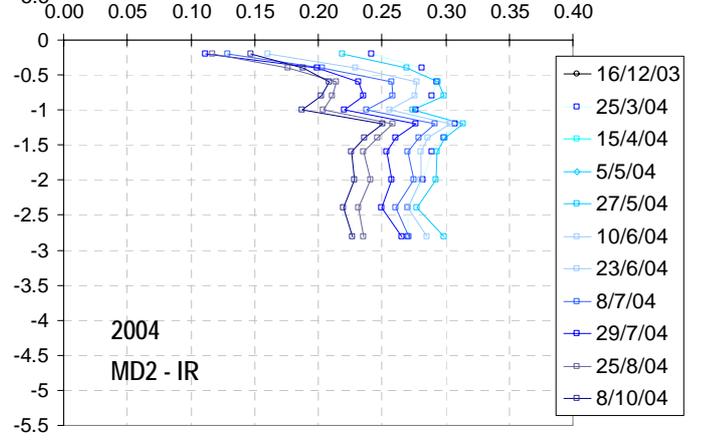
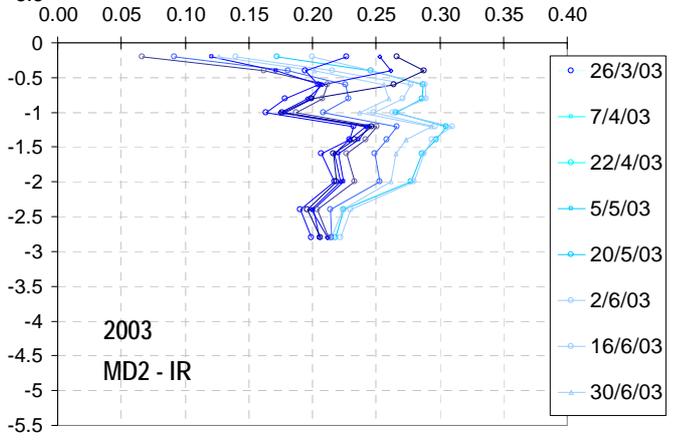
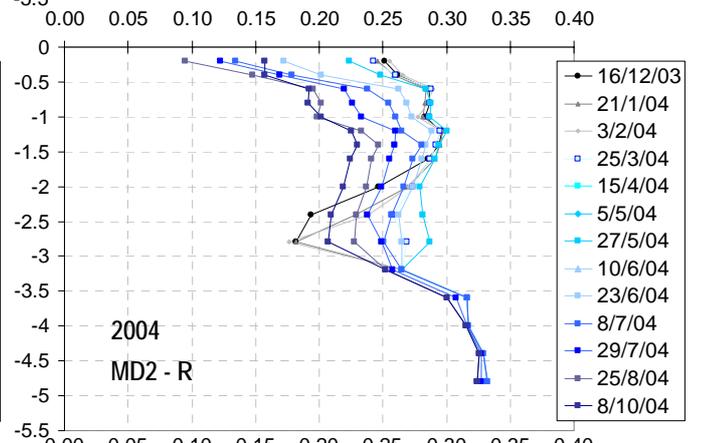
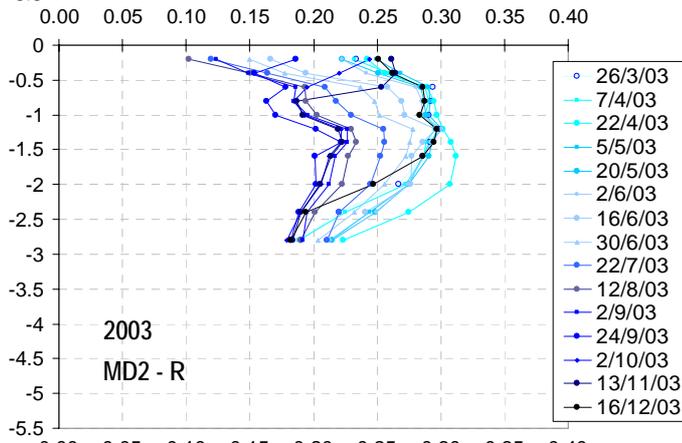
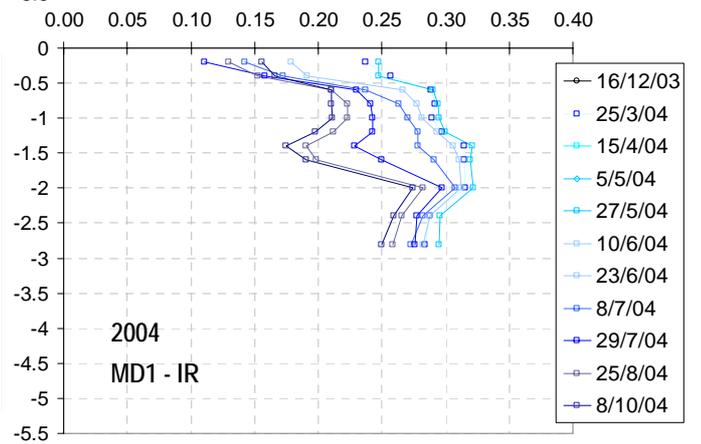
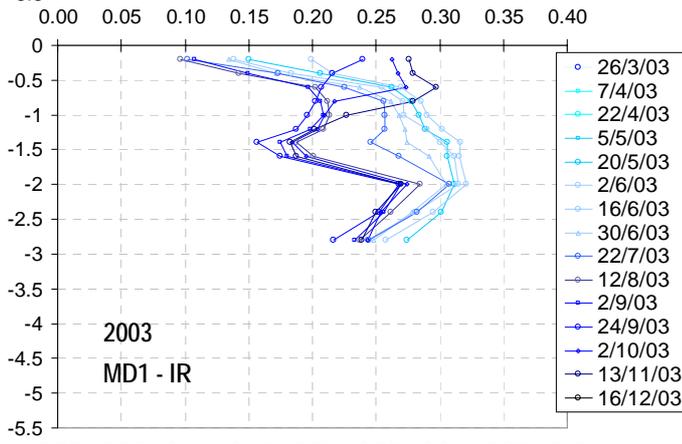
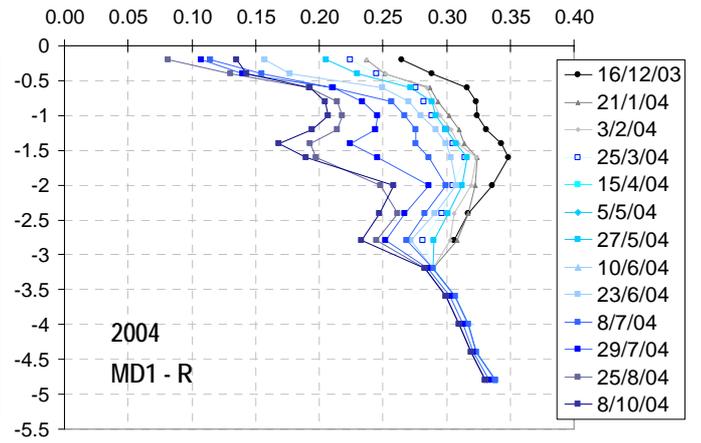
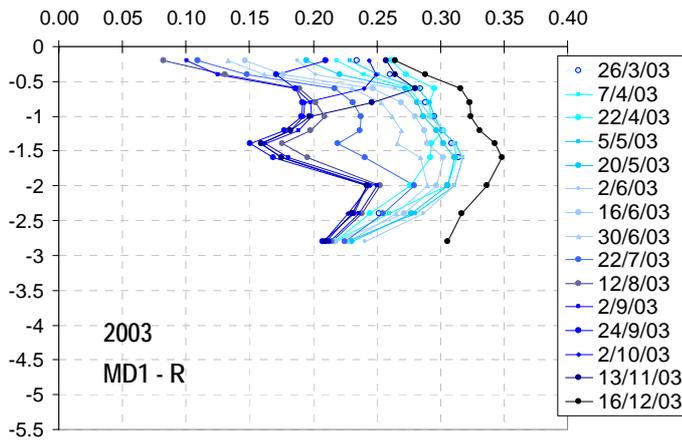
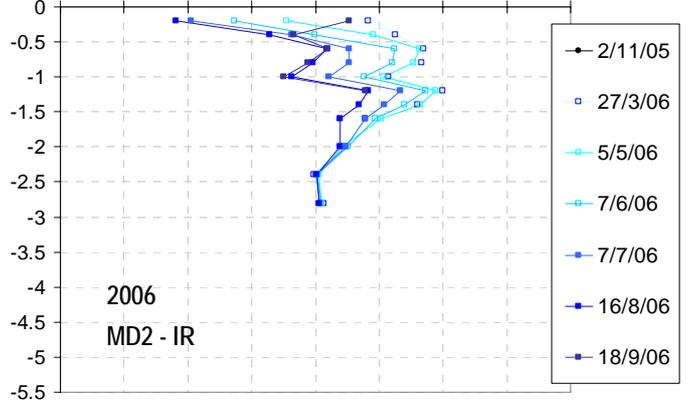
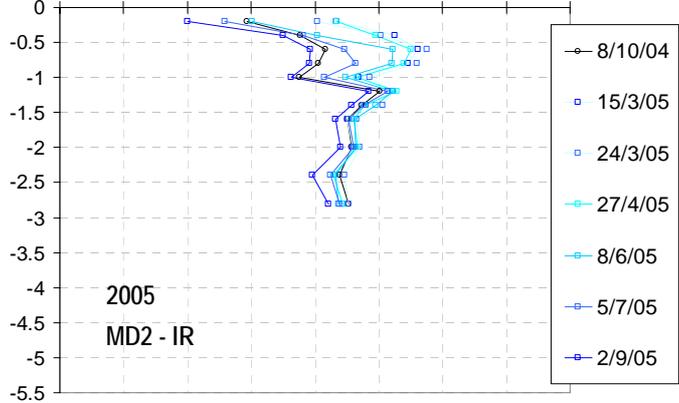
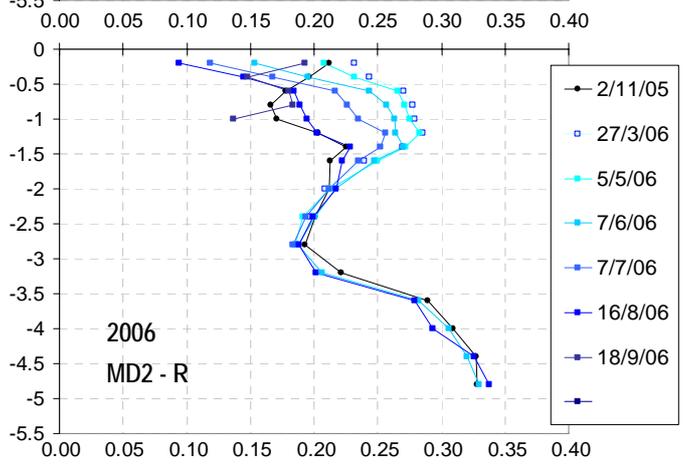
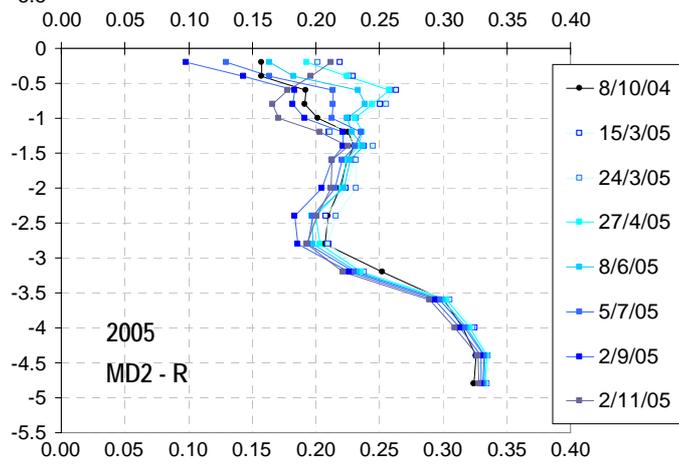
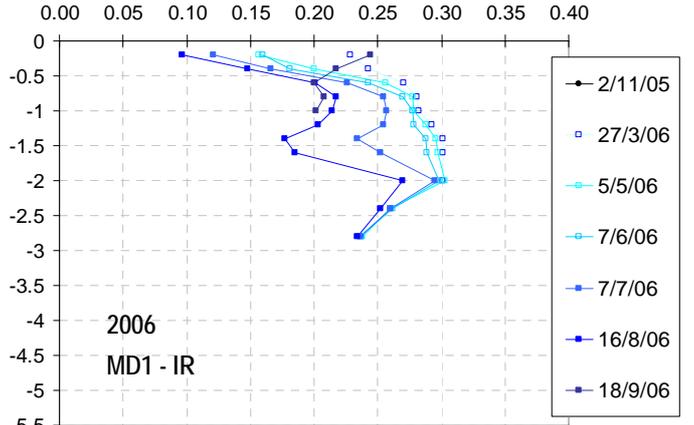
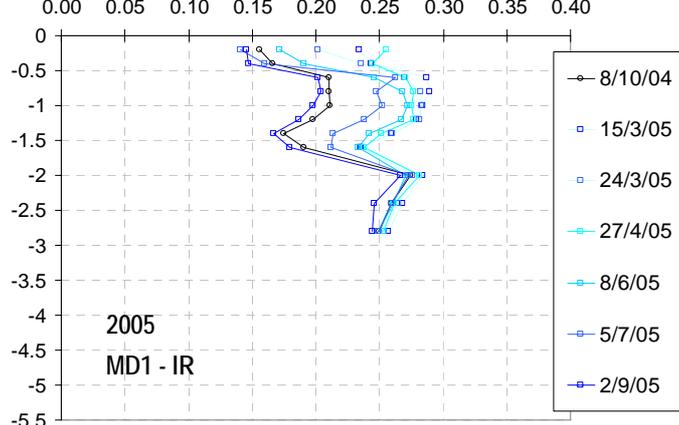
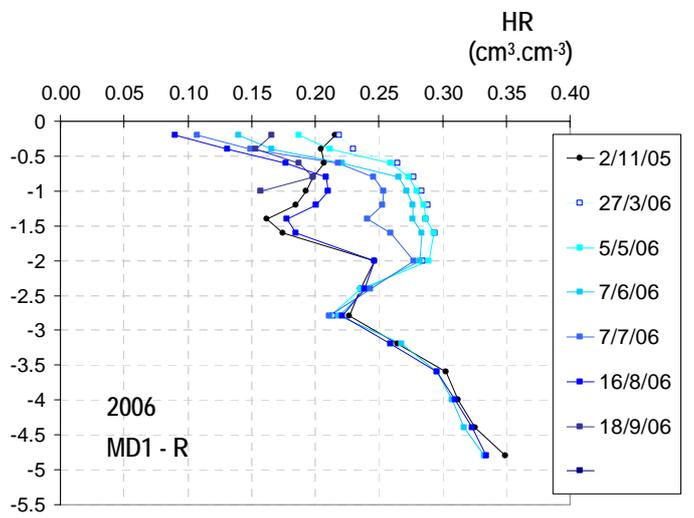
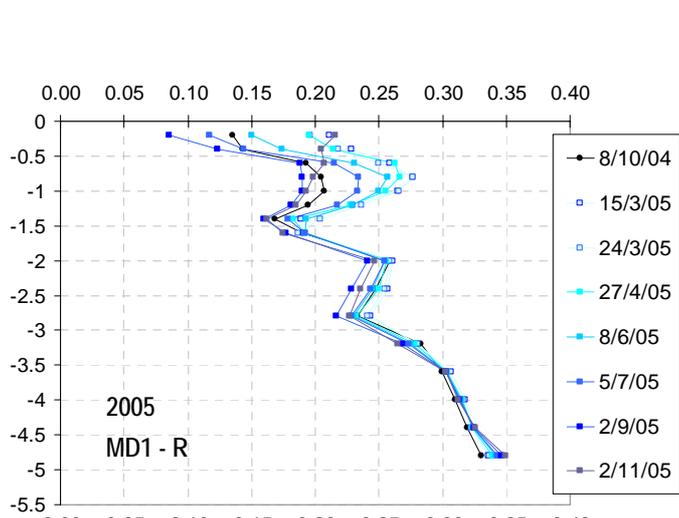


Figure – Dispositif de suivi de l'humidité du sol par mesure neutronique. Schéma d'une placette de suivi.

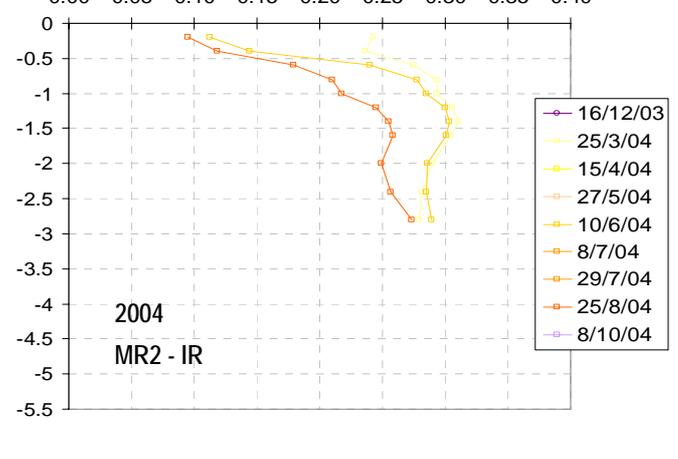
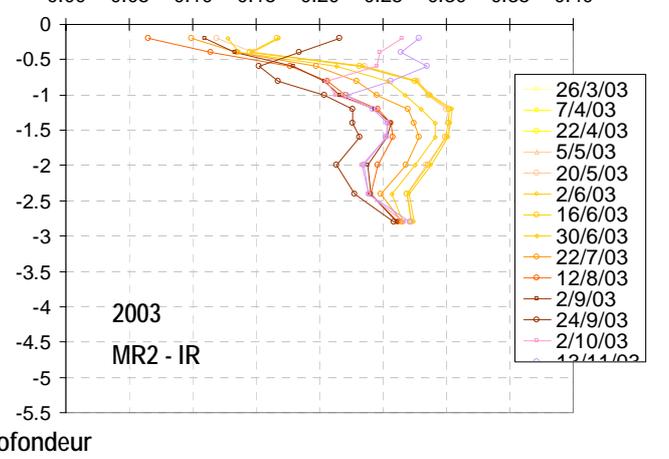
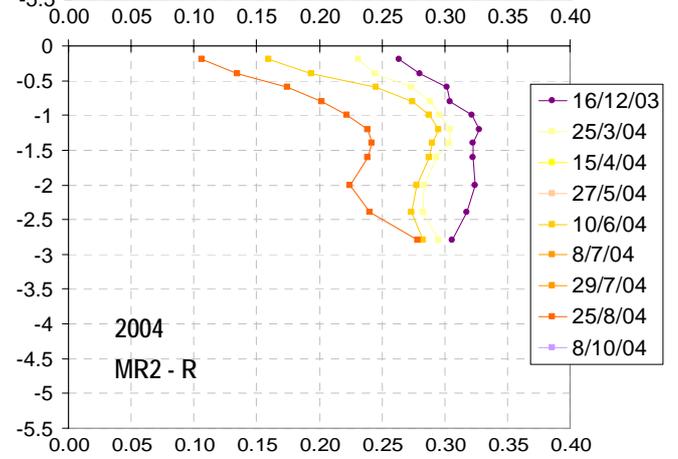
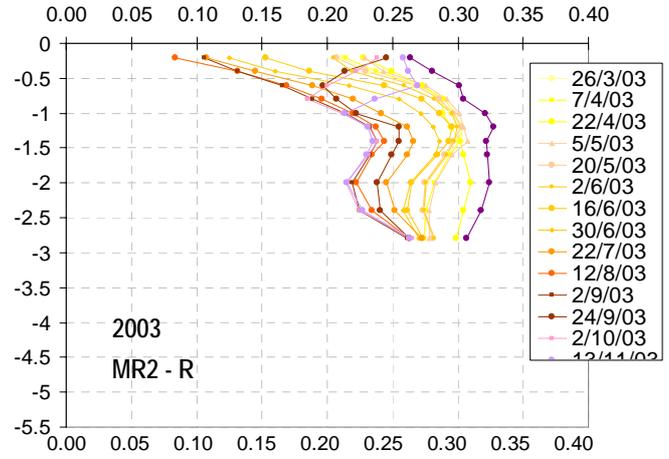
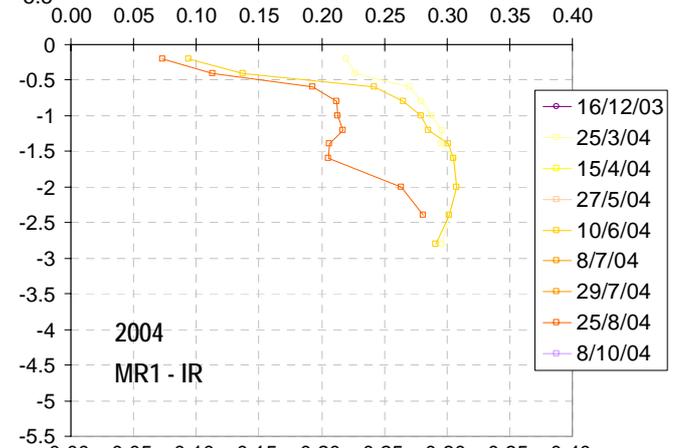
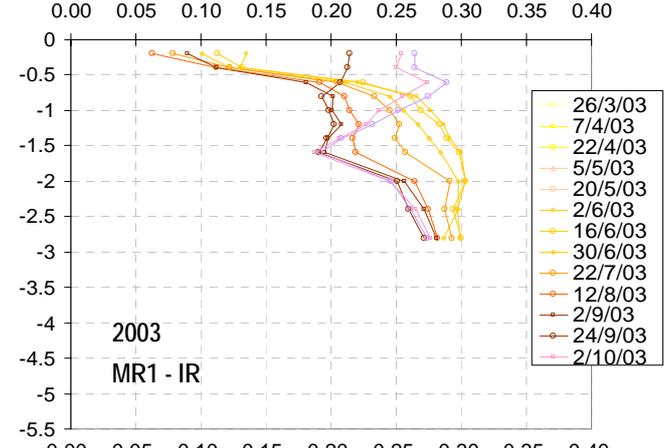
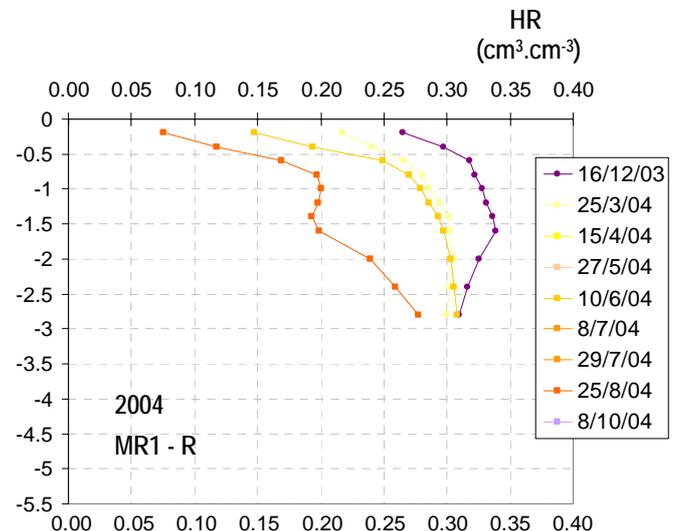
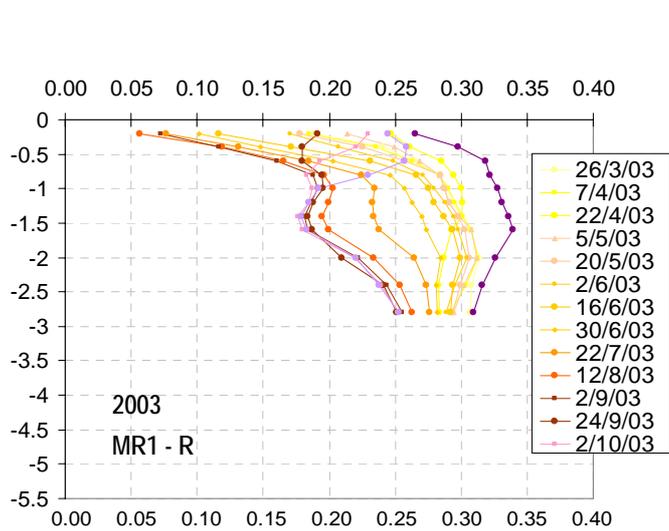
HR
($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)



Profondeur
(m)

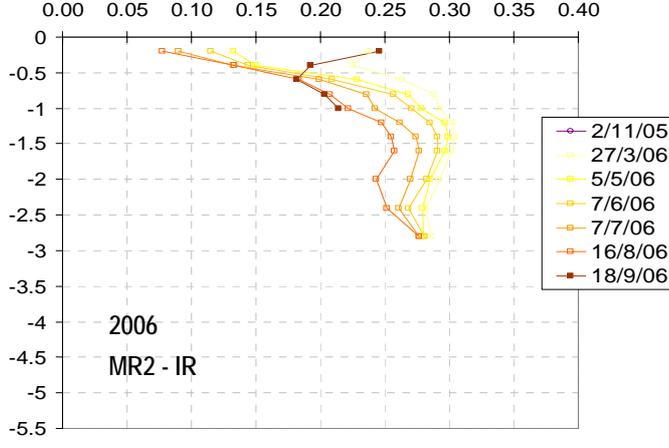
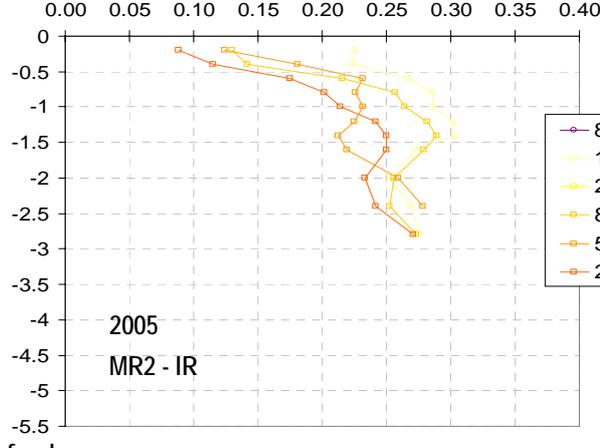
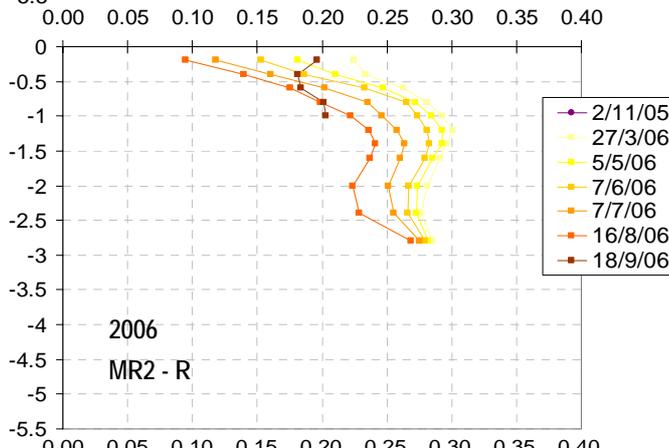
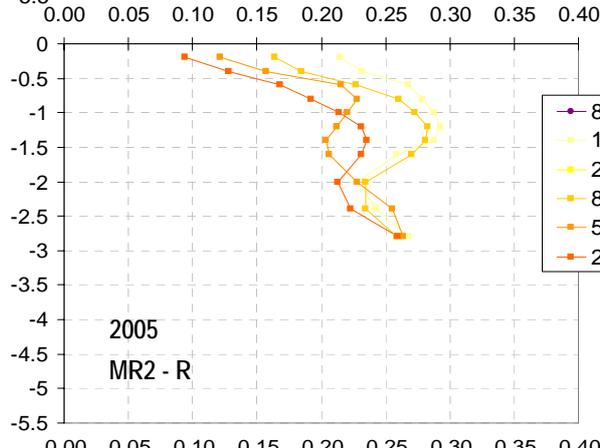
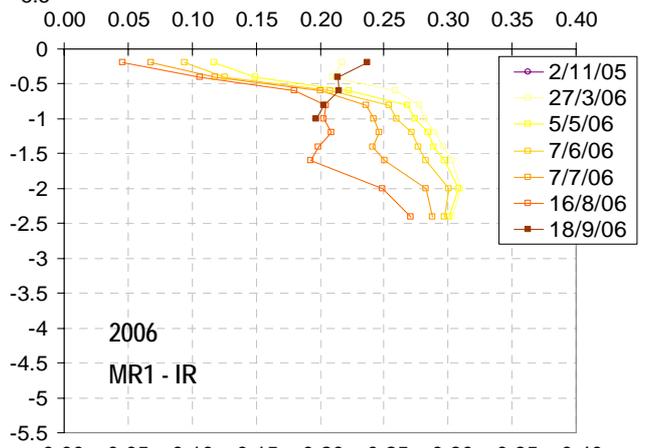
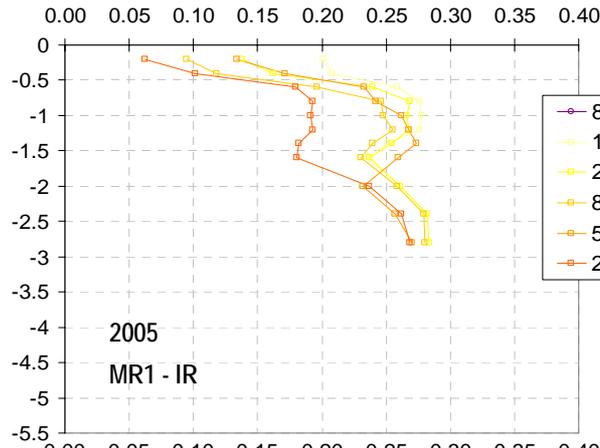
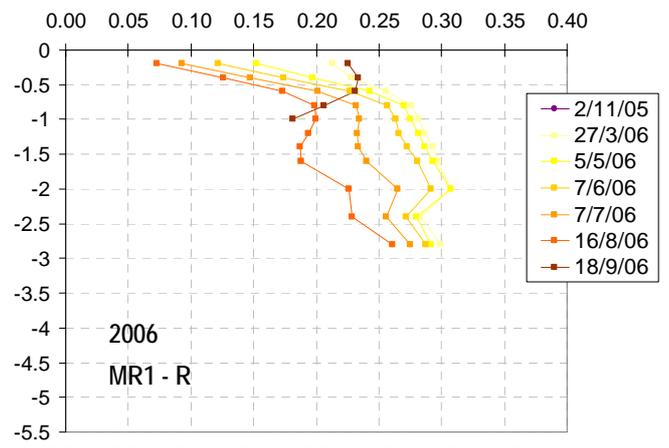
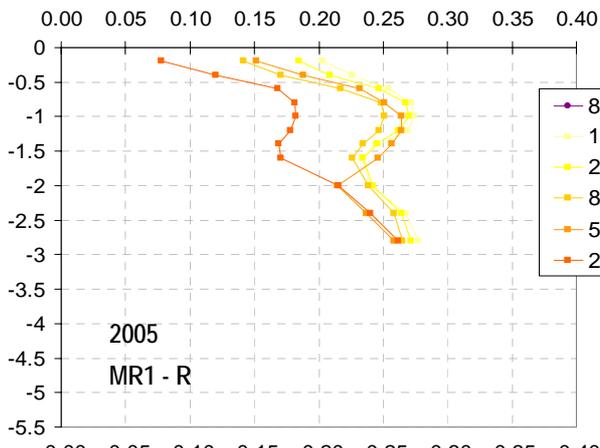


Profondeur
(m)

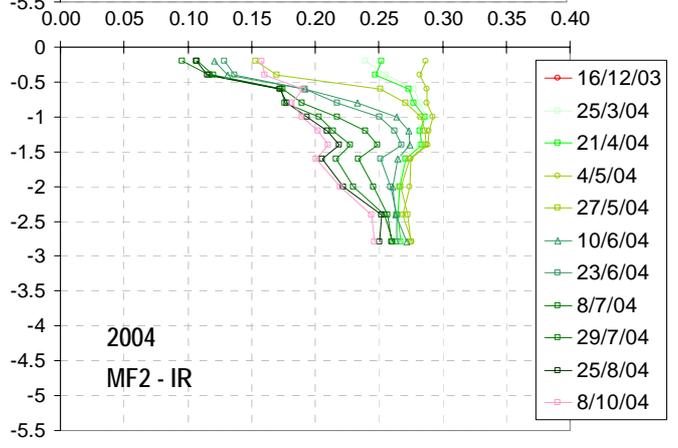
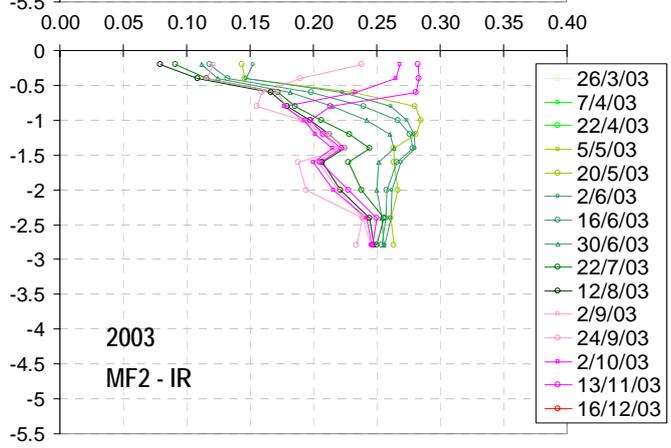
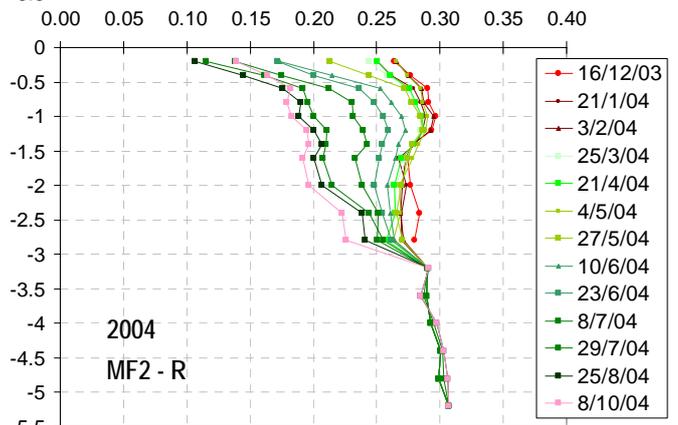
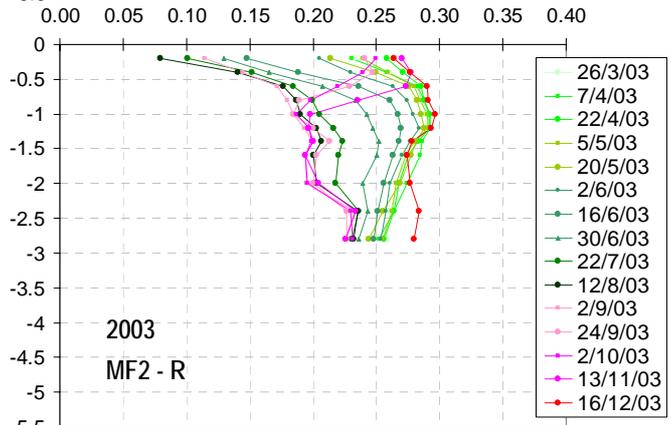
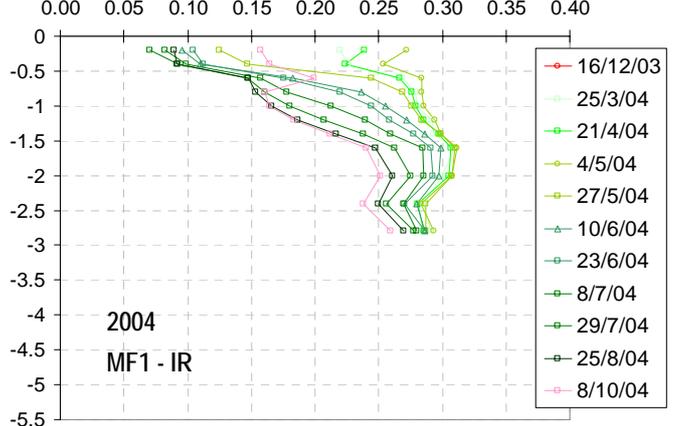
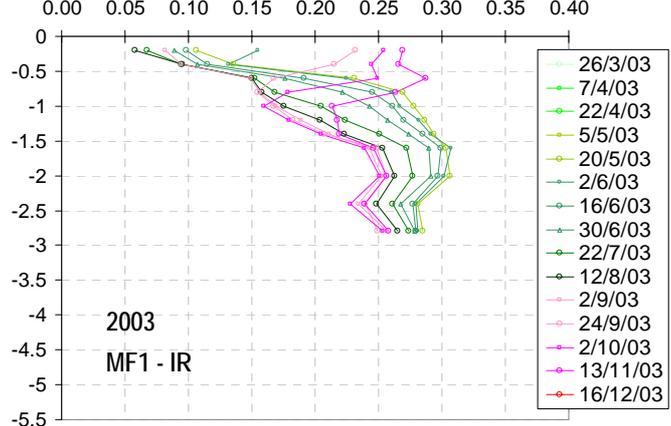
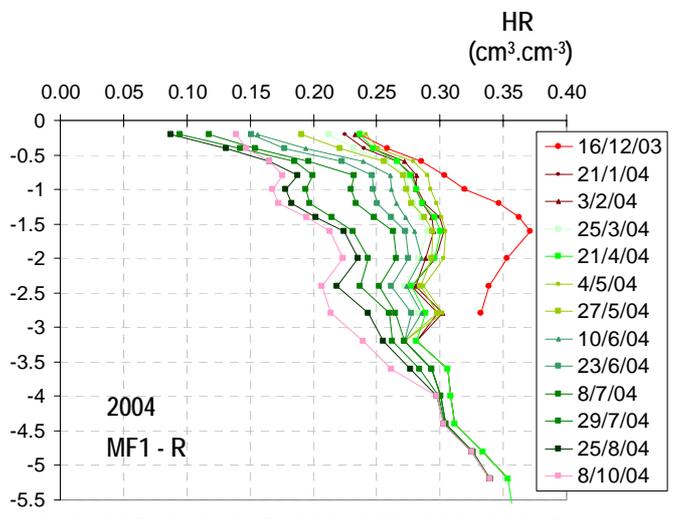
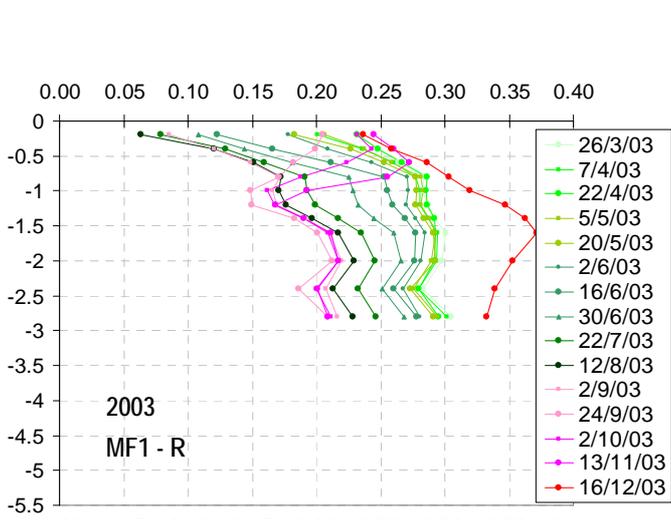


Profondeur (m)

HR
($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)

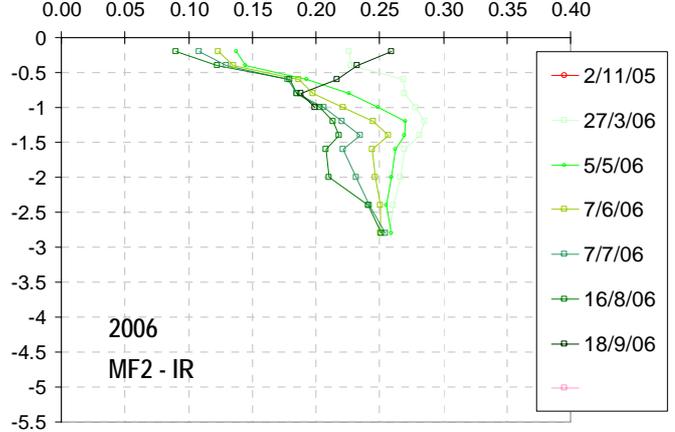
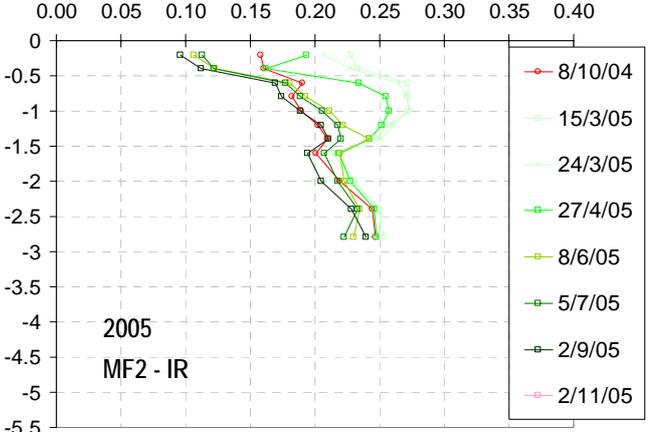
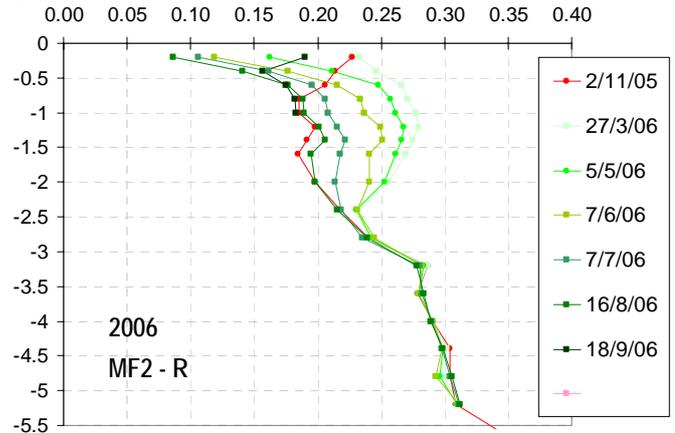
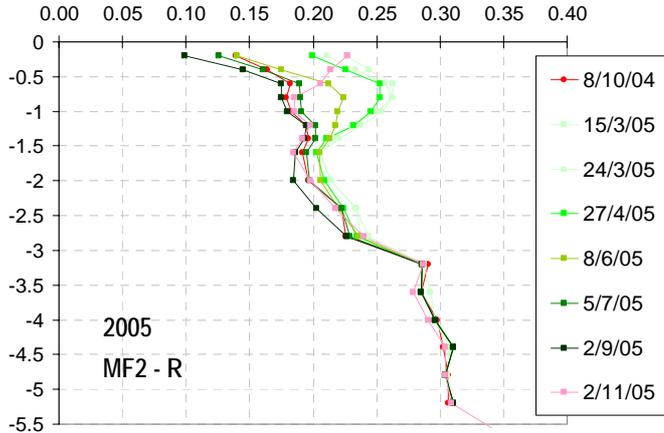
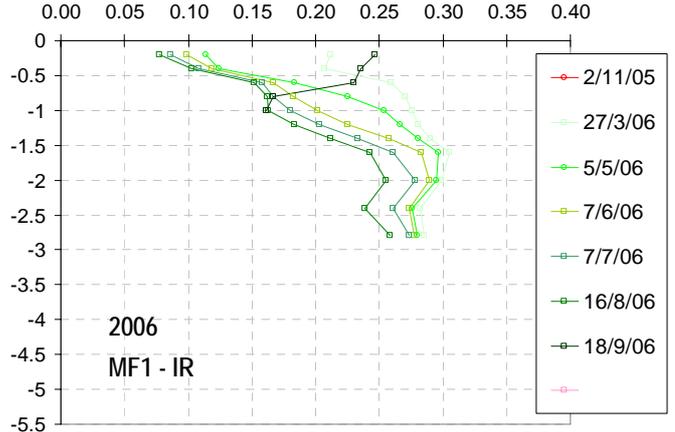
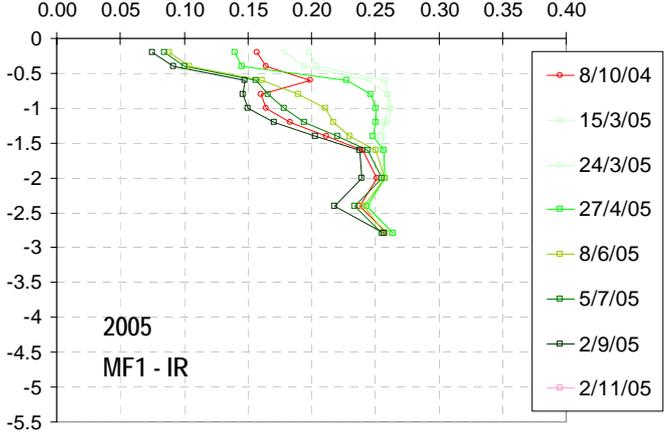
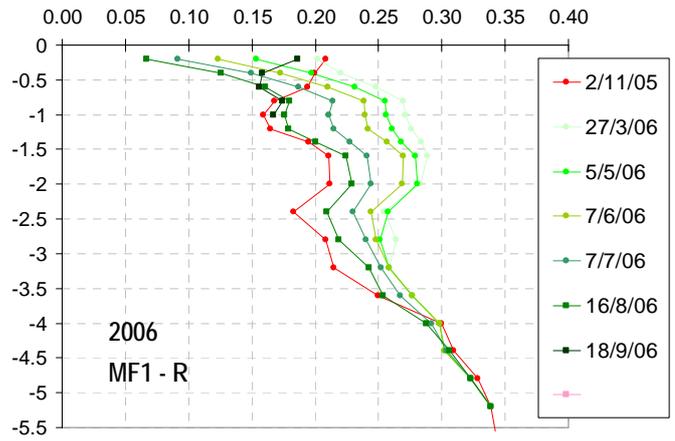
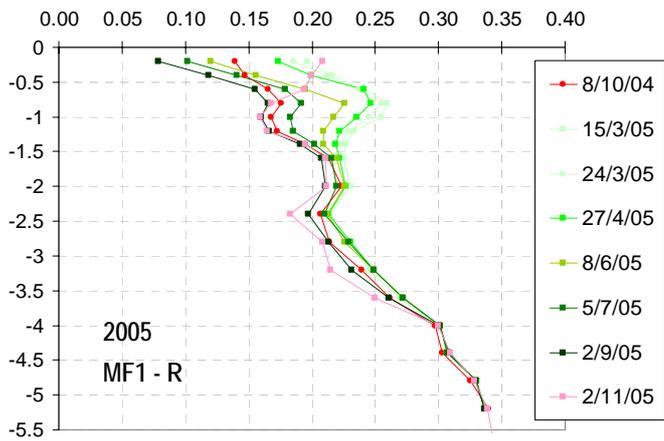


Profondeur
(m)



Profondeur (m)

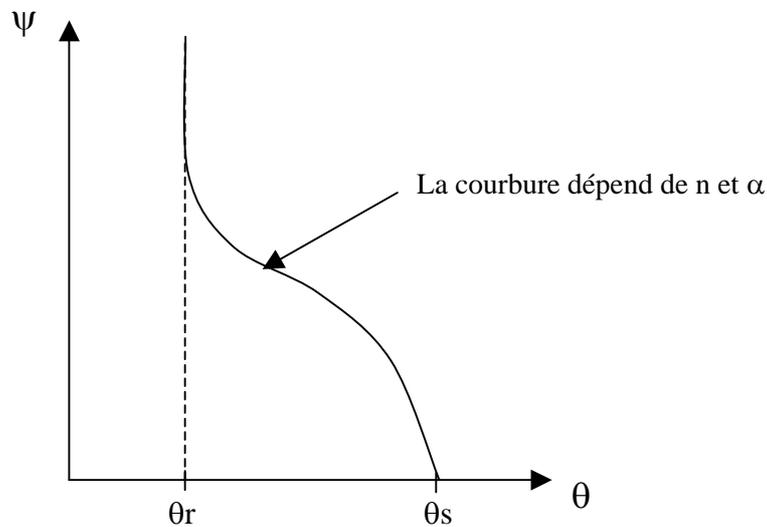
HR
($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)



Profondeur
(m)

Annexe 4 La méthode de Wind (1965)

Les formules



Van Genuchten (1980)

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + \alpha h} \right]^{1 - \frac{1}{n}}$$

et

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - S_e^{1/m}]^2$$

Avec :

θ_s : teneur en eau à saturation

θ_r : teneur en eau résiduelle

α , m , l et n : paramètres empiriques

S_e : teneur en eau effective

K_s : Conductivité hydraulique à saturation

h : potentiel matriciel

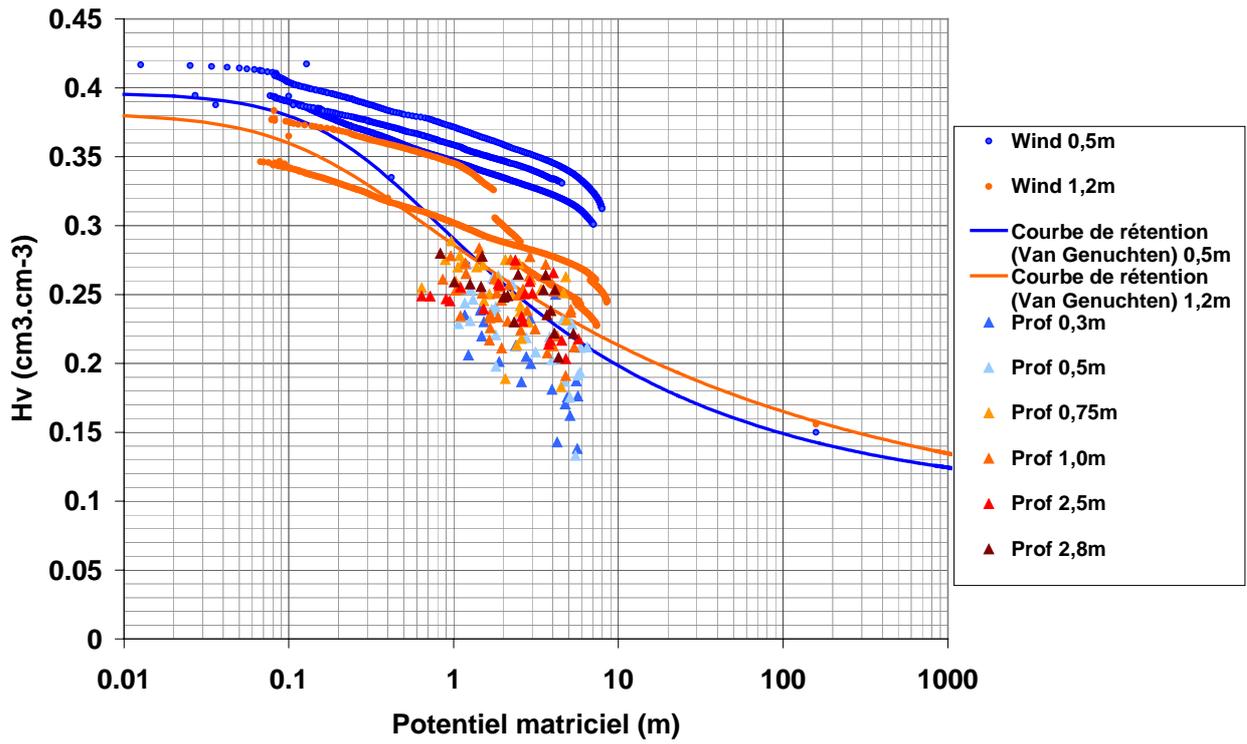


Figure – Courbes de rétention établies à partir des échantillons de WIND et des mesures tensiométriques et neutroniques.

Annexe 5 - Principaux algorithmes du modèle de bilan hydrique

- Le ruissellement est calculé comme suit (USDA 2004) :

$$Ruiss_{hj} = \frac{(P-0,2s)^2}{(P+0,8s)} \cdot p_{ir} \quad [a]$$

et

$$Ruiss_{vj} = \frac{(P-0,2s)^2}{(P+0,8s)} \cdot 1 - p_{ir} \quad [b]$$

Avec

$$s = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad [c]$$

- L'évaporation du sol nu se déroule selon deux phases déjà décrites précédemment (Brisson et Perrier 1991). L'évapotranspiration potentielle (ETP) est calculée à partir de la formule de Penman-Monteith (Monteith 1965). Pour le calcul de E_{shj} , l'évapotranspiration considérée est $ETP \times p_{ir} \times (1-couv)$. Dans le calcul de E_{svj} , l'ETP est $ETP \times (1-p_{ir})$.
- La transpiration de chacun des couverts est calculée comme suit :

$$T_{hj} = k_h \cdot ETP_j \cdot p_{ir} \cdot couv (1-k_v) k_{hyd} \quad [d]$$

Avec

$$k_{ir} = 0,0127 + 0,0028 \sum_1^j \min(T^{\circ}C_j; 0) - 0,0000008 \left(\sum_1^j \min(T^{\circ}C_j; 0) \right)^2 \quad [e]$$

Et k_{hyd} représente le coefficient de contrainte hydrique qui décroît linéairement pour un seuil de $FTSW_h$ inférieur à 0,9 et jusqu'à une $FTSW_h$ égale à 0,1 (Volaire et Lelièvre 1998).

$$T_{vj} = k_v \cdot ETP \cdot S_{hyd} \quad [f]$$

Avec k_v le coefficient d'interception de la lumière qui évolue linéairement entre 0, au débourrement, et K_m , au moment du premier rognage. S_{hyd} représente le coefficient de réduction de la transpiration de la vigne avec la contrainte hydrique. Il est considéré diminuer linéairement entre une valeur de 1 jusqu'à un seuil de $FTSW_v$ égal à 0,4 et une valeur de 0 pour une $FTSW_v$ nulle.

- Le drainage de chacun des compartiments est composé de la différence entre les précipitations entrant dans le compartiment et la quantité nécessaire pour le remplir totalement.

Annexe 6 - Evaporation du sol nu mesurée *in situ*

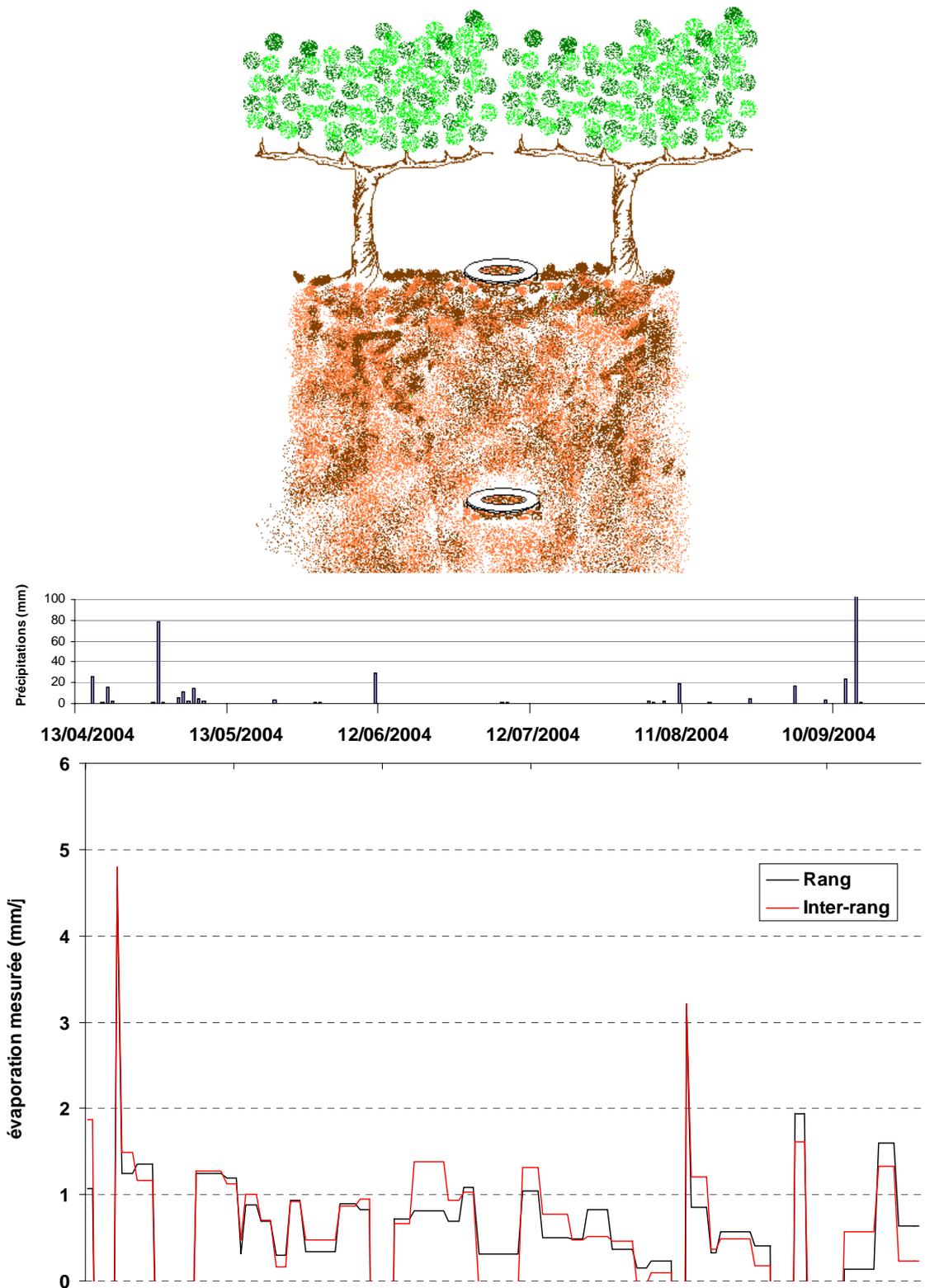
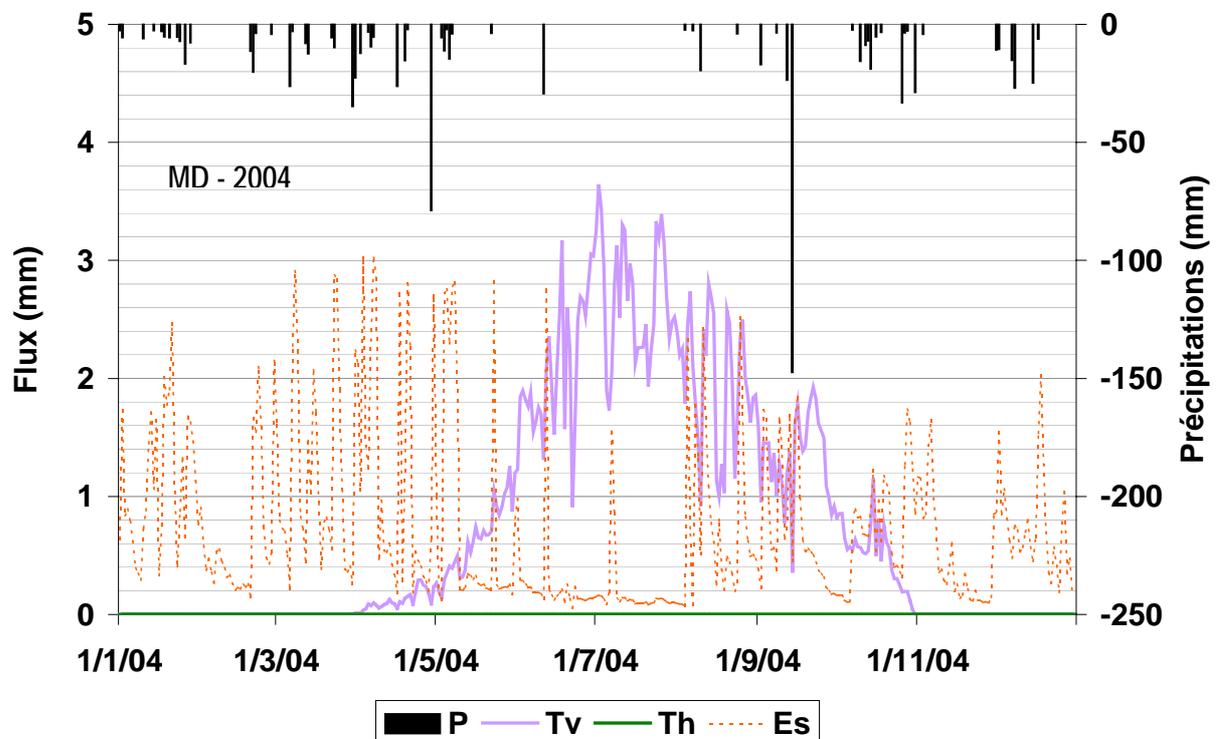
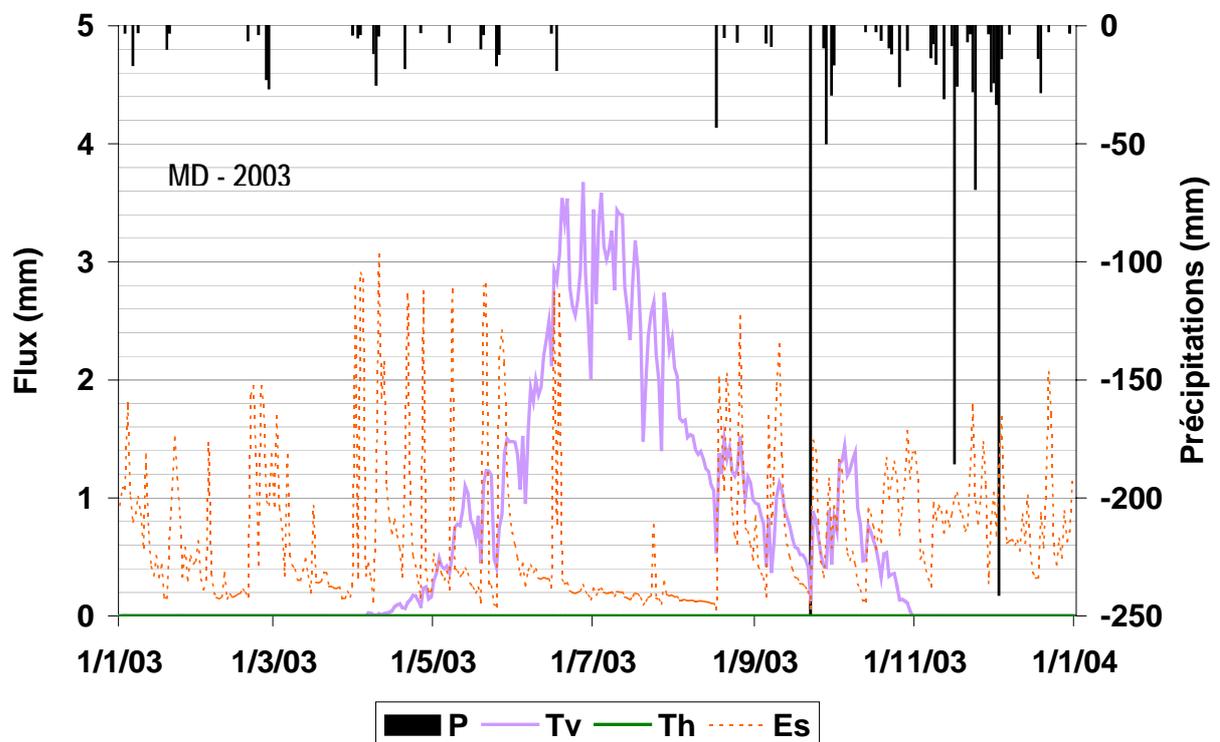
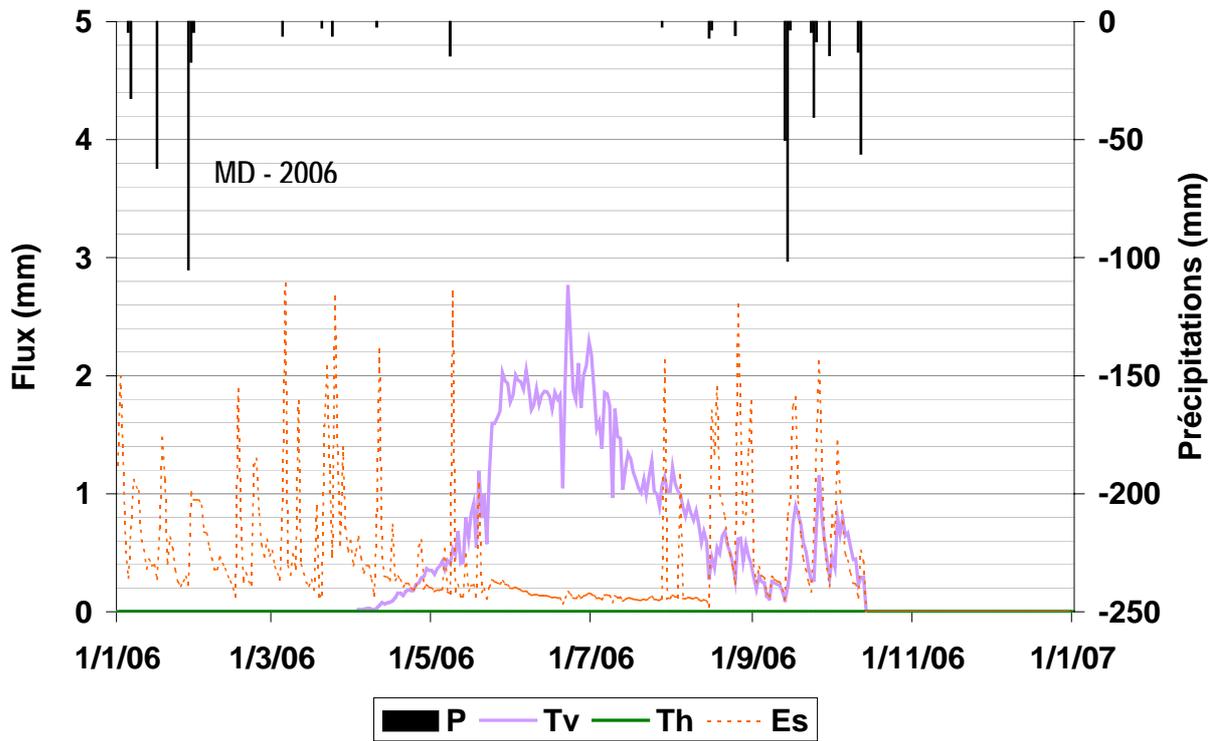
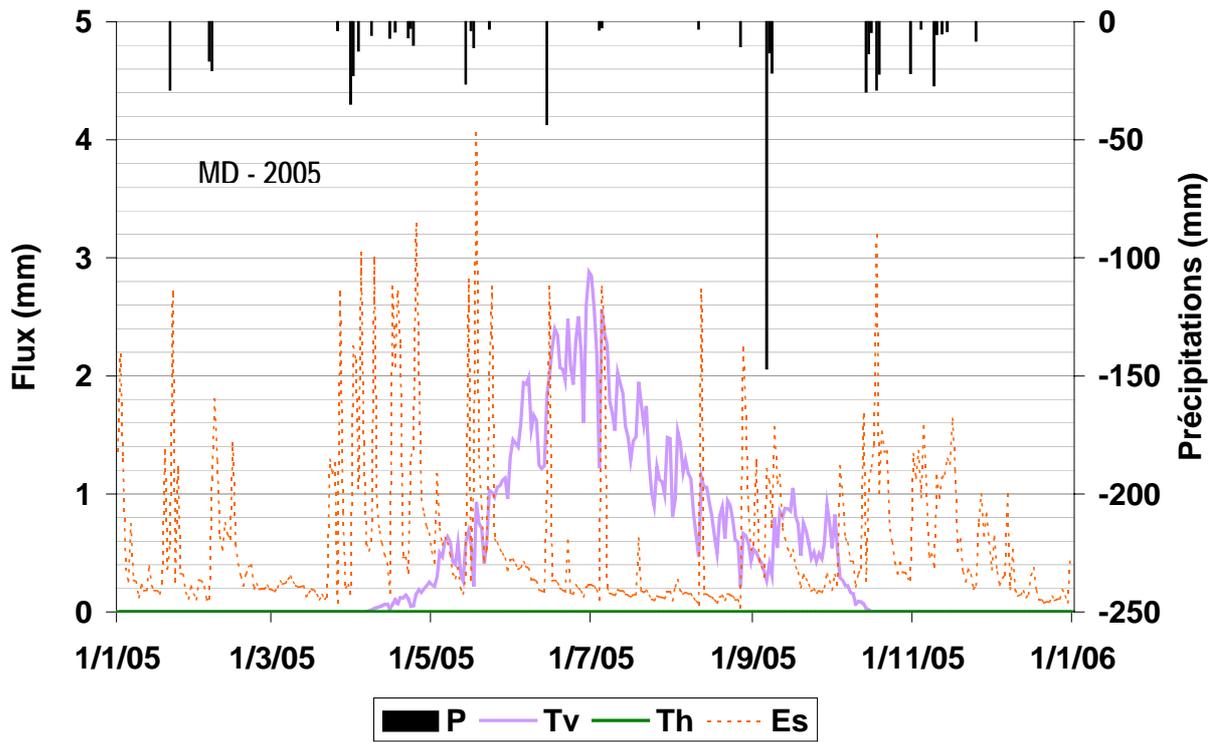
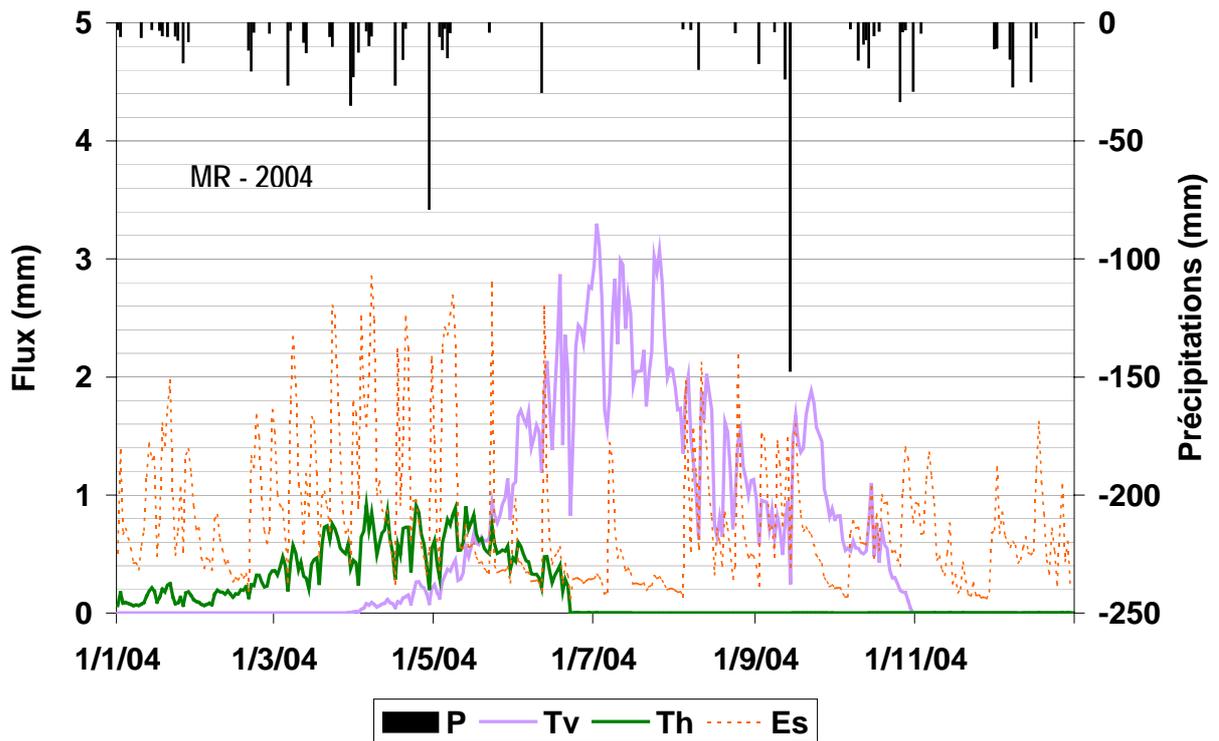
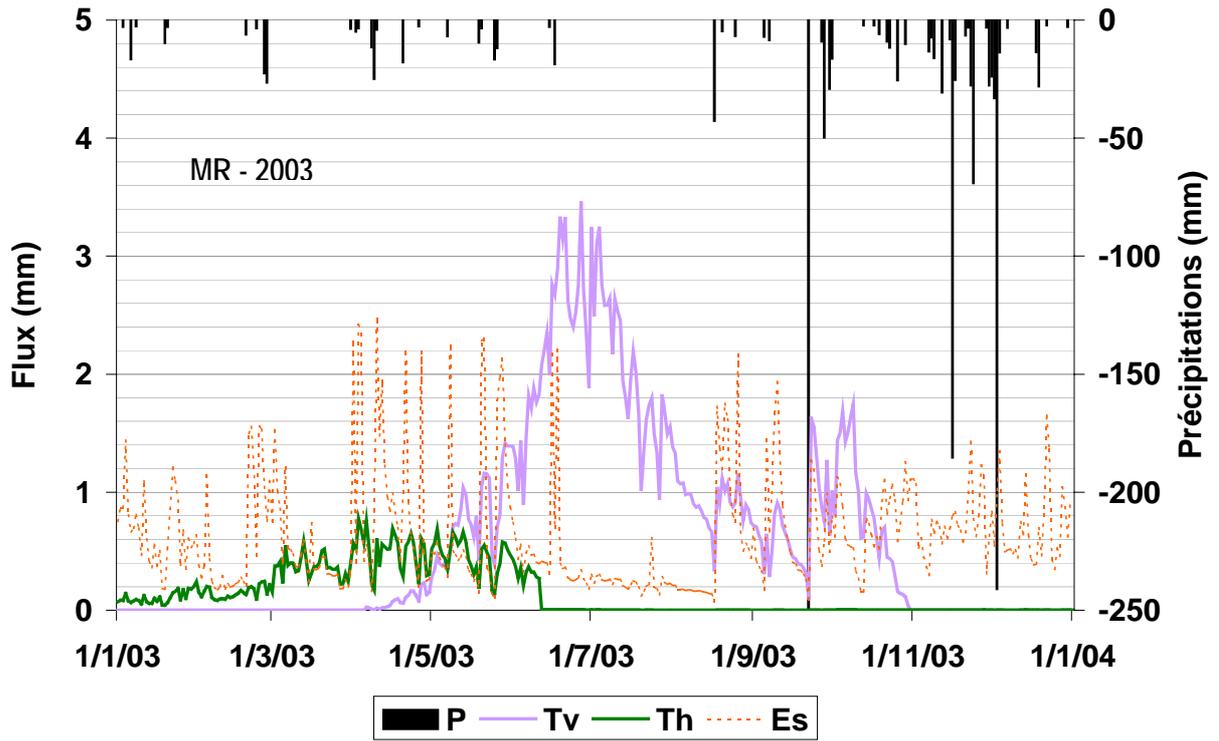


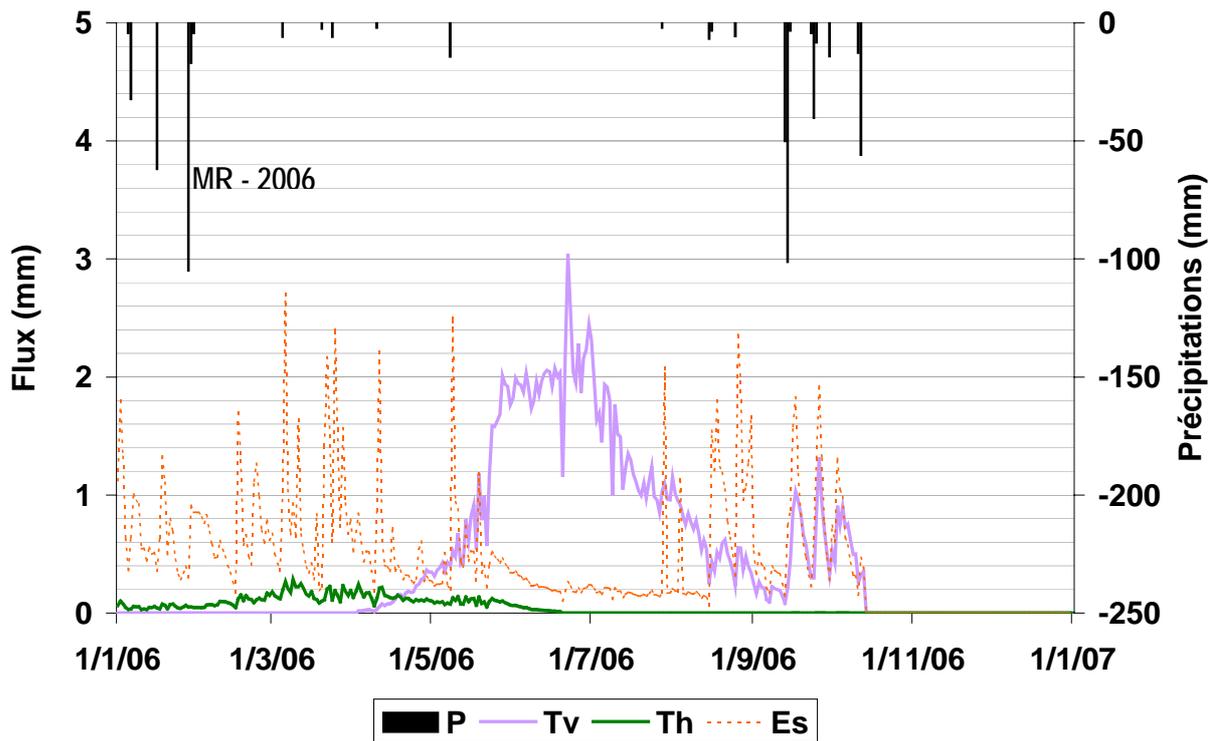
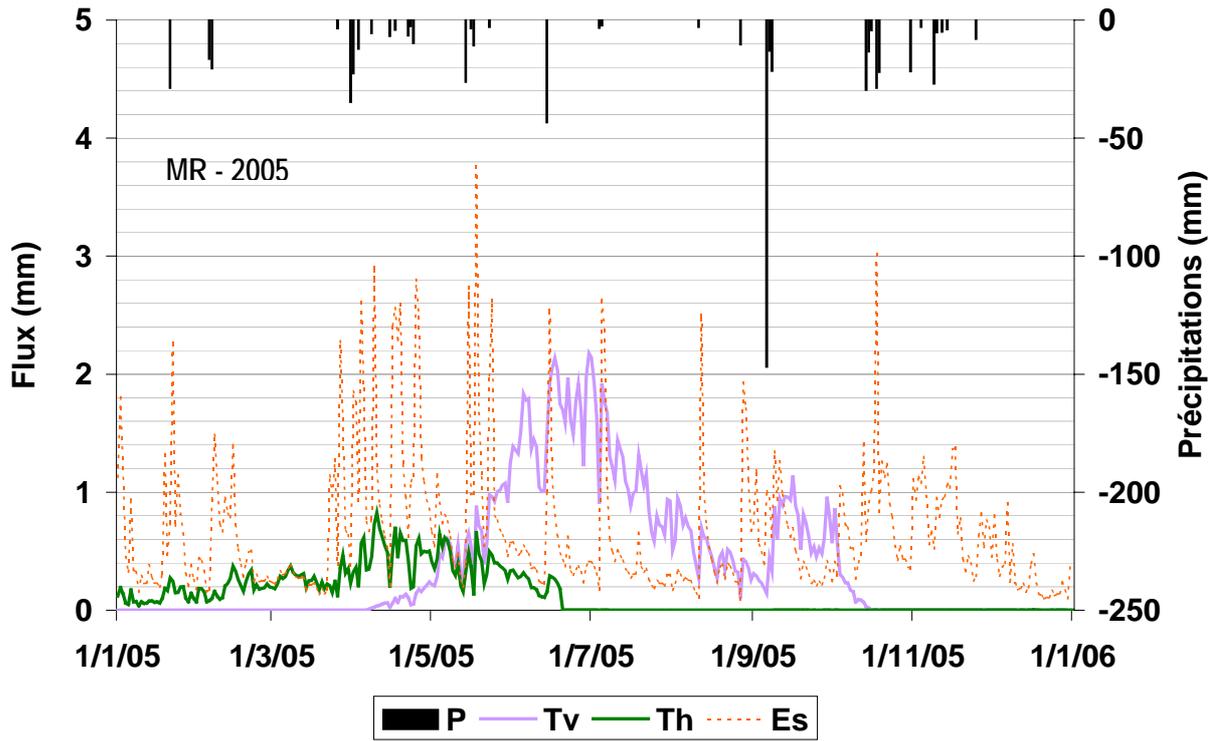
Figure – Evolution de l'évaporation du sol nu journalière mesurée *in situ* à l'aide des minilysimètres.

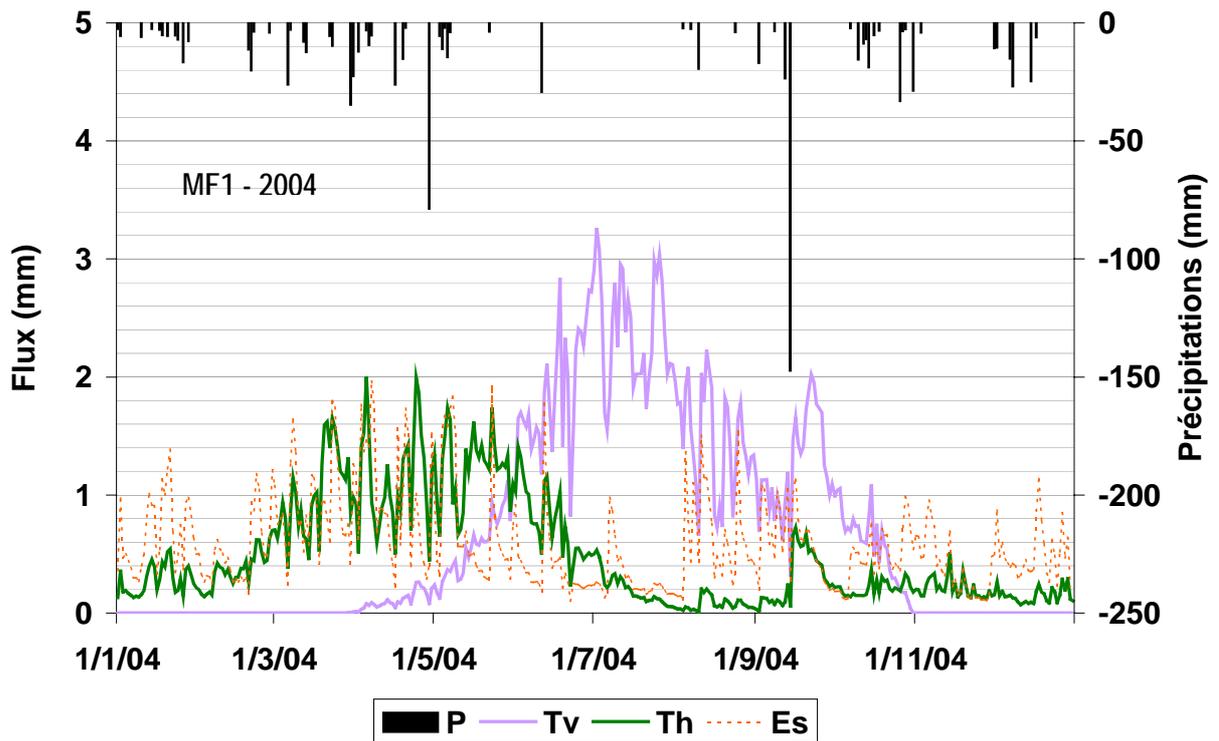
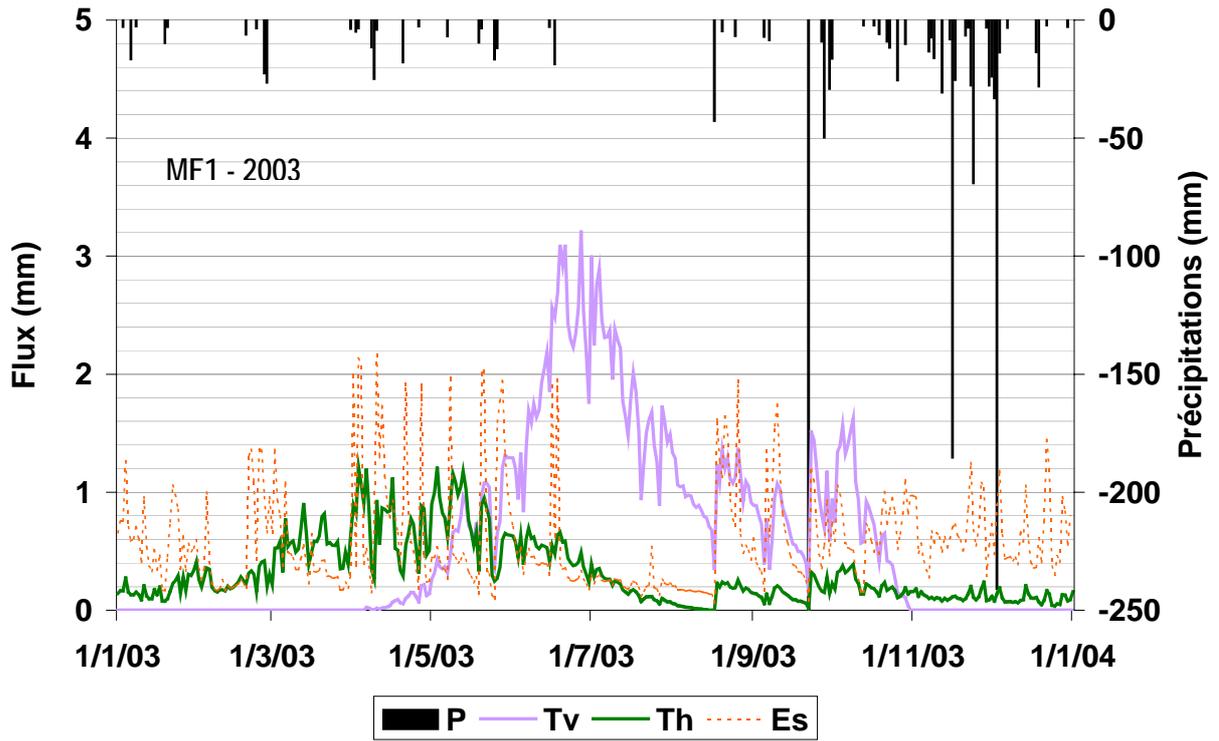
Annexe 7 - Principaux flux du bilan hydrique simulé en fonction de la modalité et du millésime

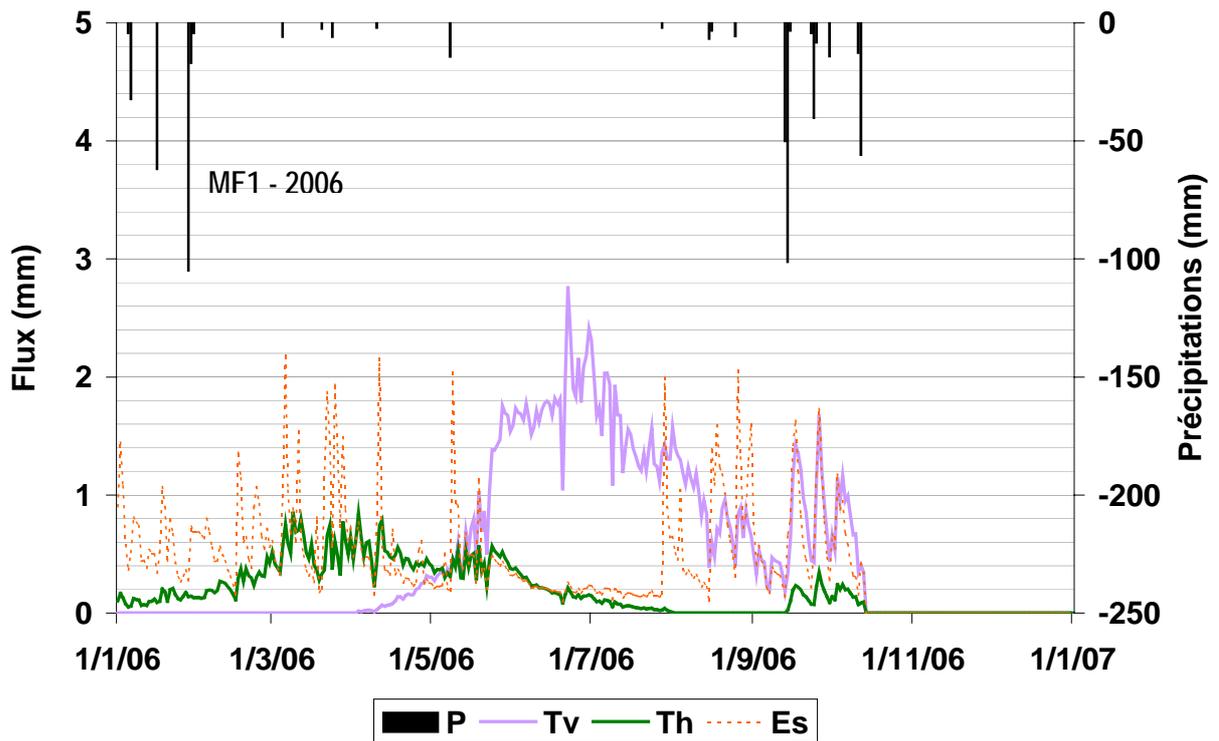
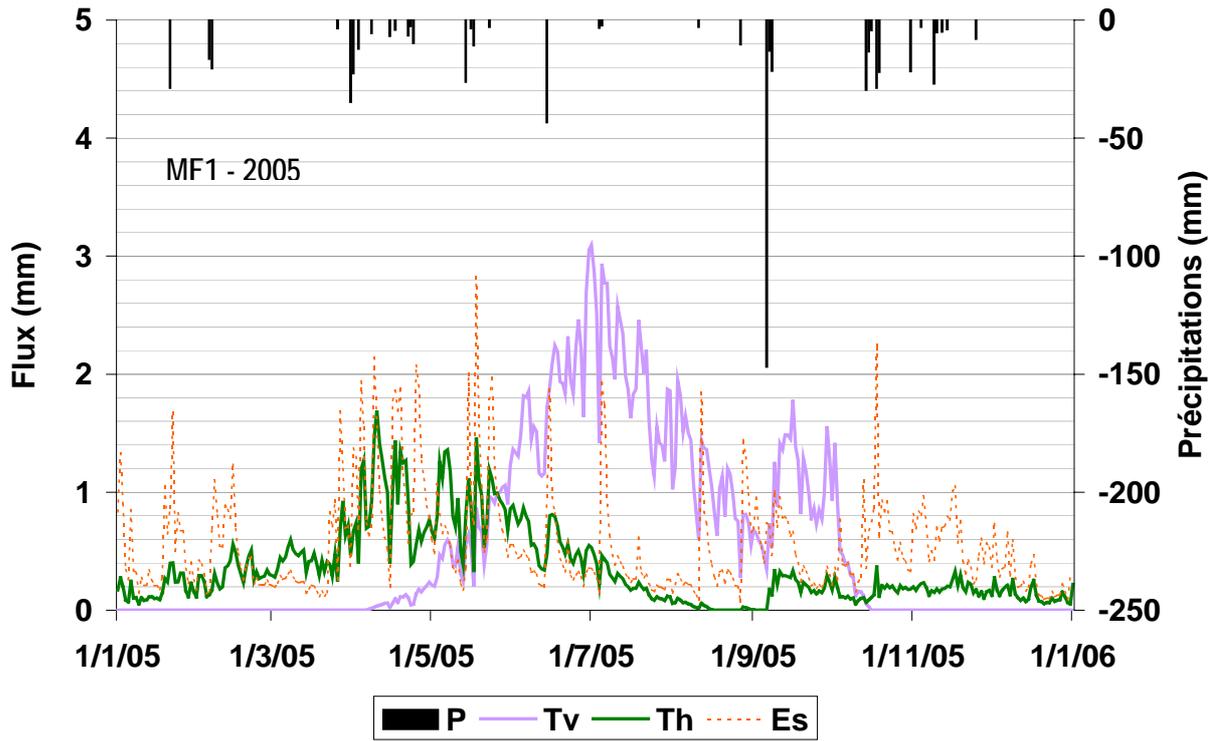


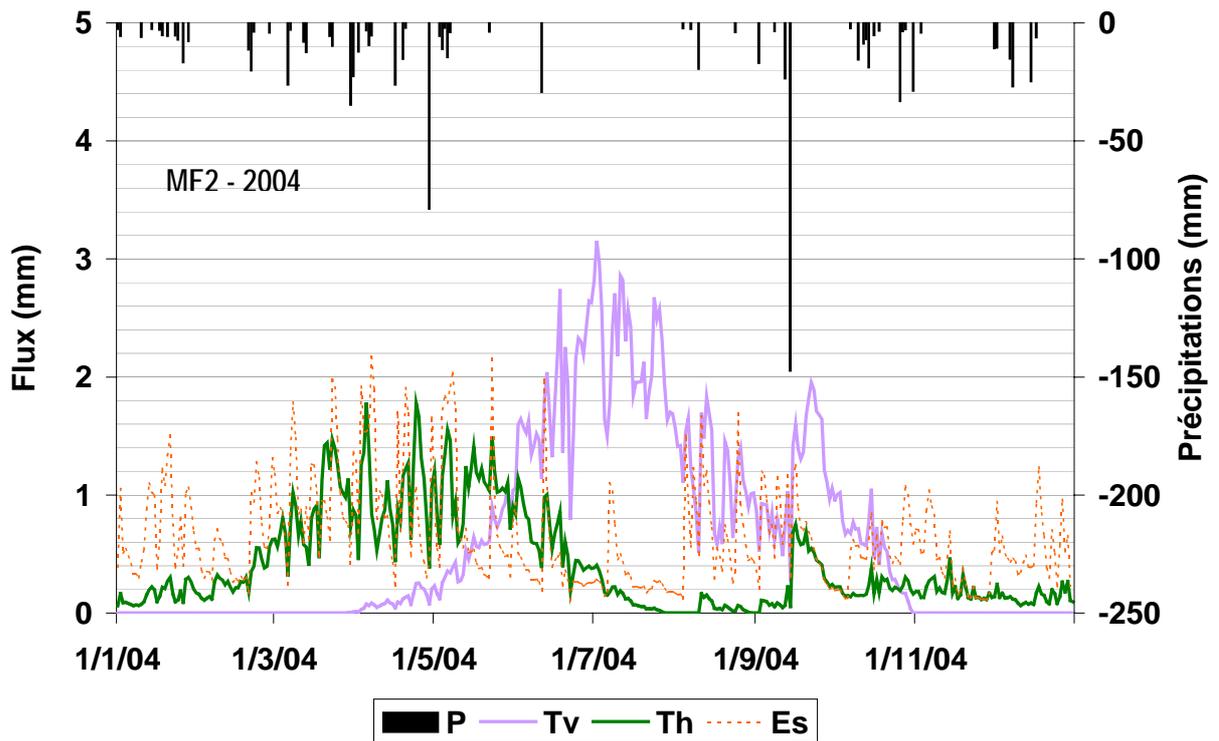
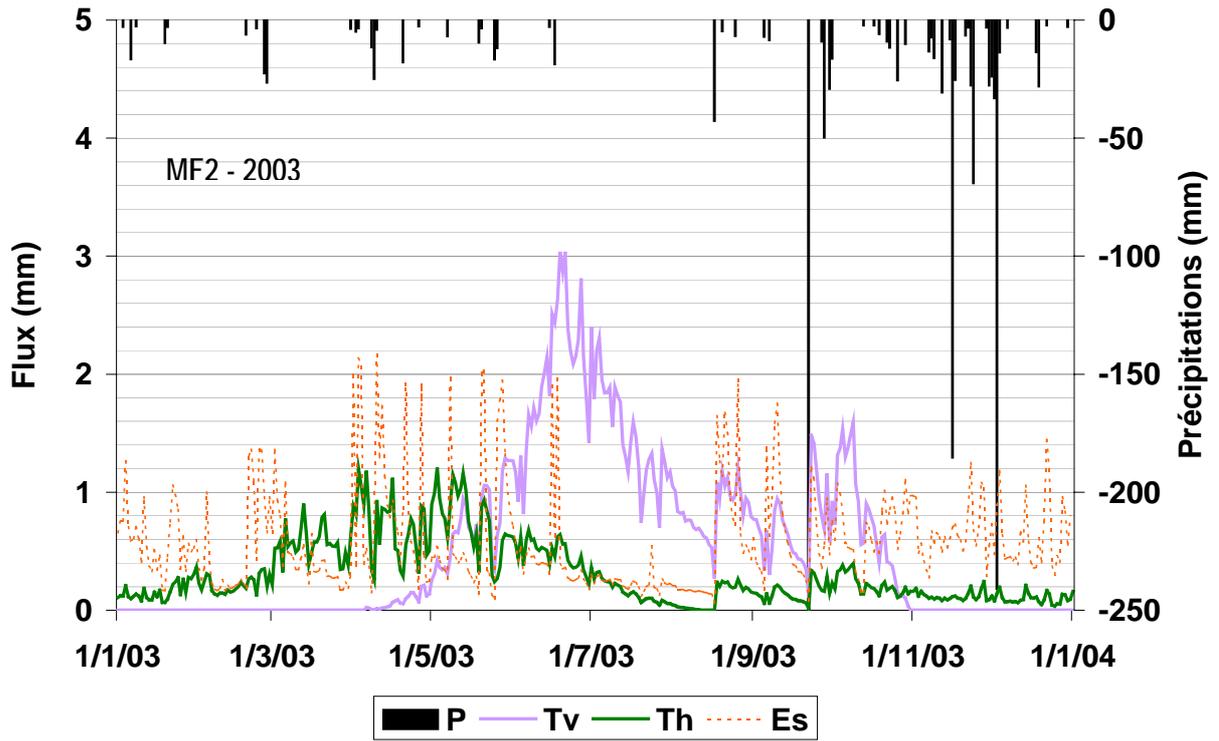


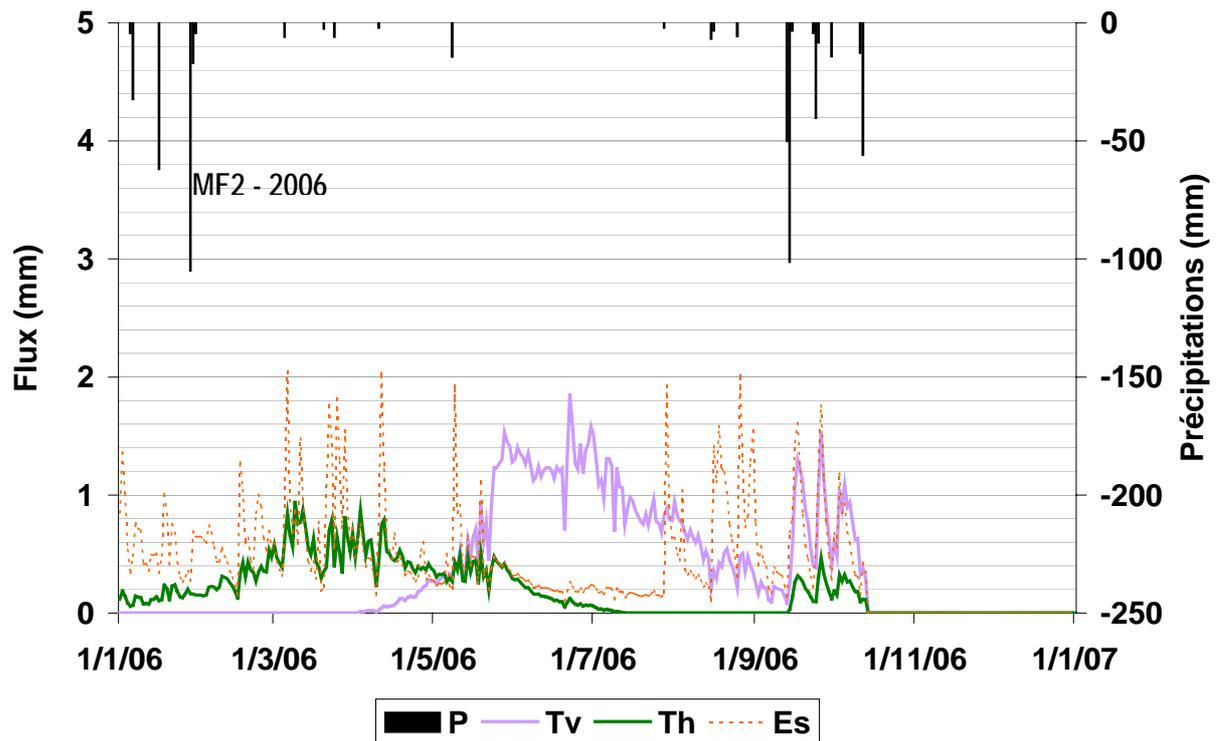
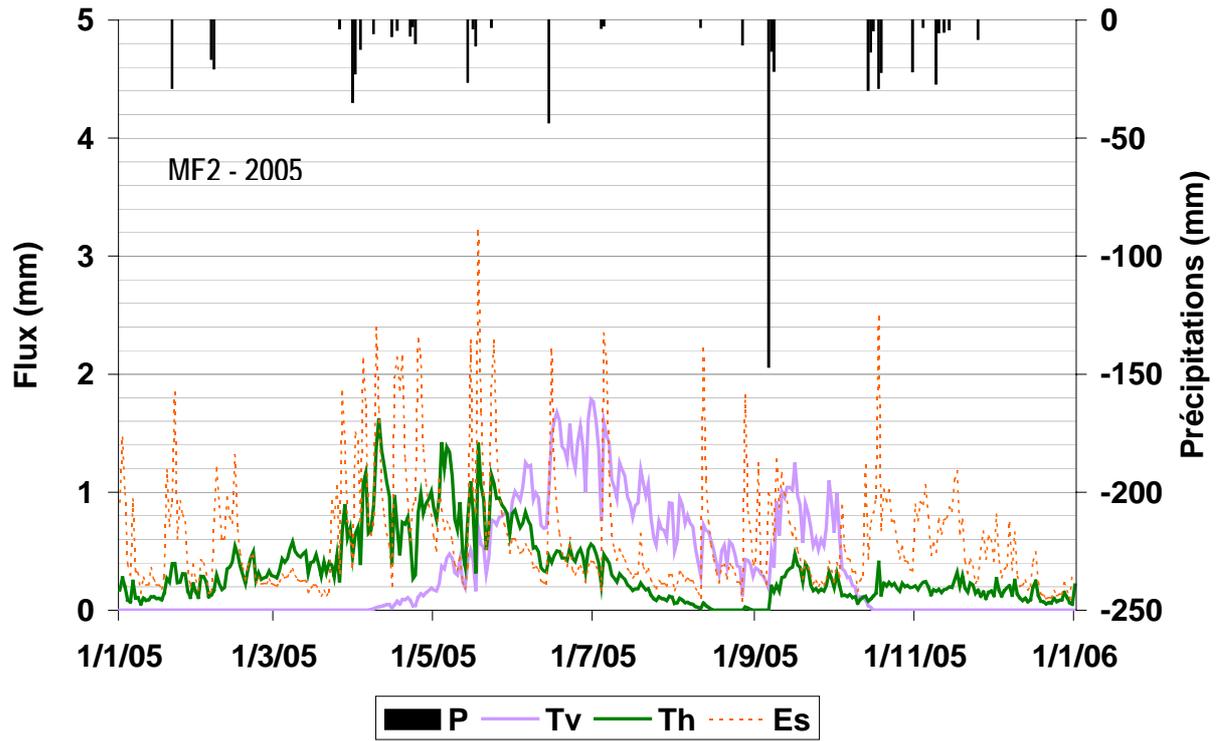












Water and nitrogen relations in an intercropped vineyard under the Mediterranean climate

Summary

A grass cover on a vineyard inter-row mitigates the environmental impact of grape production and helps to control the vine growth and production. It generates a competition for water and nitrogen resources which are rare in the Mediterranean context.

This work studies the water and nitrogen dynamics of this intercropping system marked by a high contrast between the two species. A comprehensive experiment started in 2002 on a vineyard close to Montpellier, France and three soil managements were studied.

A strong and early growth reduction of the vine related to competition for resources was highlighted. The intercrop management affected both the earliness and intensity of the vine stresses which influenced the different yield components. The climatic years also influence the quality of must.

The water dynamics was deeply modified by the intercropping. A simplified modeling approach of the water balance of this system is proposed and shows encouraging results. Surface runoff is significantly decreased but this impact varied among years with the topsoil structure. This upper infiltration allowed a better winter soil refill in the intercropped systems, particularly with a permanent intercrop. However, this additional water benefited mainly to the grass cover. The vine root system modified its structure when a grass cover (particularly when permanent one) was present. This highlights a "compensatory growth" already observed in other systems. Then vines, in a deep ground, could reach water resources inaccessible to grass cover.

Nitrogen resource was scarce in these deep soil layers explored by the vine and competition for nitrogen induced by the intercropping was not reduced. The grass cover uptook a moderate quantity of nitrogen which represented a significant part of the nitrogen flows in a naturally poor system. The grass cover transpiration dries the upper soil layers and decreased the availability of mineral nitrogen for vine. It also prematurely stopped the organic nitrogen mineralisation. The early reduction of intercropped vine growth is the consequence of a nitrogen stress at the beginning of vine cycle related to a bad refill of the perennial nitrogen reserves of the plant during the previous year. Vine nitrogen status was quickly degraded when the upper soil layer moisture became unfavourable for mineralisation. As a consequence, it seems that, at least in Mediterranean context, vine nitrogen stress is conducted by the water dynamics. This highlights the importance of the interactions between water and nitrogen dynamics in this system.

200 Pages, 52 Figures, 13 Tables, 7 Appendices.

Keywords

Competition ; Dynamics ; *Festuca arundinacea* Shreb. ; Intercropping ; Modelling ; Nitrogen balance ; Nitrogen stress ; Quality ; Vine vigour ; *Vitis vinifera* L ; Water balance ; Water stress ; Water-Nitrogen interaction.

Dynamique des fonctionnements hydrique et azoté au sein d'une vigne enherbée sous le climat méditerranéen

Résumé

L'implantation d'un enherbement sur l'inter-rang d'un vignoble réduit l'impact de la production viticole sur l'environnement et aide à maîtriser la croissance et la production de la vigne. Elle génère une concurrence pour des ressources en eau et azote rares dans le milieu méditerranéen.

Ce travail aborde les fonctionnements hydrique et azoté d'une association culturale marquée par un contraste important entre les deux espèces. Un lourd dispositif a été installé en 2002 sur une parcelle près de Montpellier et trois modalités d'entretien du sol ont été étudiées.

Une réduction forte et précoce de la croissance de la vigne liée à la concurrence pour les ressources est mise en évidence. Les modalités de gestion de l'enherbement affectent de façon plus ou moins précoces et intenses les différentes composantes du rendement et les années climatiques la qualité du moût obtenu.

La dynamique de l'eau est profondément modifiée par la présence du couvert intercalaire. Une approche simplifiée de modélisation du bilan hydrique de ce système est proposée et montre des résultats encourageants. Le ruissellement est diminué significativement mais cet impact varie au cours de l'année avec l'état de surface du sol. Cette infiltration supérieure permet une meilleure recharge hivernale dans les modalités enherbées, particulièrement avec un enherbement permanent. Cependant, cette eau supplémentaire profite essentiellement à l'enherbement. La redistribution du système racinaire de la vigne en présence de l'enherbement (surtout permanent) est la conséquence d'une « croissance compensatoire » déjà observée dans d'autres systèmes. Celle-ci permet à la vigne, dans un sol profond, d'accéder à des ressources en eau inaccessibles pour l'enherbement.

Ces nouveaux horizons explorés par la vigne sont pauvres en azote et la concurrence pour l'azote induite par l'enherbement n'est pas réduite. L'enherbement consomme une quantité modérée d'azote qui représente une part non négligeable des flux d'azote dans un système naturellement pauvre. L'assèchement des horizons de surface par la transpiration de l'herbe diminue également la disponibilité de l'azote minéral pour la vigne et stoppe prématurément la minéralisation de l'azote organique. La diminution précoce de la croissance de la vigne enherbée est la conséquence d'une contrainte azotée en début de cycle liée à une mauvaise recharge des réserves pérennes de la plante l'année précédente. On observe que le statut azoté de la vigne se dégrade rapidement lorsque l'humidité des horizons de surface devient défavorable à la minéralisation. Il semble donc, qu'en région méditerranéenne, la contrainte azotée subie par la vigne soit fortement pilotée par la dynamique de l'eau. Ceci met en évidence l'importance des interactions entre fonctionnements hydrique et azoté dans ce système.

200 Pages, 52 Figures, 13 Tables, 7 Annexes.

Mots-clé

Bilan azoté ; Bilan hydrique ; Compétition ; Contrainte azotée ; Contrainte hydrique ; Cultures associées ; Dynamique ; *Festuca arundinacea* Shreb. ; Interaction eau-azote ; Modélisation ; Qualité ; Vigueur végétative ; *Vitis vinifera* L.