



THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'ECOLE DE MONTPELLIER SUPAGRO

Discipline : *Agronomie*
Formation Doctorale : *Science du sol*
Ecole Doctorale : *BSIAE*

***Relations entre états de croissance de la
vigne et maladies cryptogamiques sous
différentes modalités d'entretien du sol en
région méditerranéenne***

présentée et soutenue publiquement par

Héctor VALDES GOMEZ

Le 06 Avril 2007

Jury composé de :

M. Philippe Debaeke, Rapporteur
M. Bernard Tivoli, Rapporteur
M. Christian Gary, Directeur de Thèse
M. Michel Clerjeau, Co-directeur de Thèse
M. Jacques Wery, Examineur
M. Marc Raynal, Examineur

Table de matières

TABLE DE MATIERES.....	I
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLES.....	VIII
LISTE DES PHOTOS.....	IX
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I - SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET DEMARCHE SCIENTIFIQUE	4
1. Croissance et développement de la vigne.....	4
1.1. Taxonomie.....	4
1.2. Développement, croissance et production.....	4
2. L'enherbement et ses conséquences sur la production viticole et l'environnement	6
2.1. Définition et variantes.....	6
2.2. Les effets sur les caractéristiques du sol.....	6
2.3. Effets sur la vigueur, l'expression végétative et la phénologie.....	6
2.4. Effets sur le rendement et la composition des baies.....	7
2.5. Effets sur l'environnement microclimatique au sein du couvert végétal.....	7
2.6. Conséquences environnementales.....	8
3. La vigne et les maladies.....	9
3.1. Les maladies cryptogamiques et leur contrôle.....	9
3.2. La vigne comme plante hôte pour les maladies.....	13
3.3. Les travaux culturaux et leur influence sur la lutte contre les maladies.....	16
4. Démarche scientifique.....	18
CHAPITRE II - MATERIEL ET METHODES	20
1. Le contexte de la zone viticole languedocienne.....	20
1.1. Le climat méditerranéen.....	20
2. Dispositif expérimental.....	20
2.1. La parcelle du Larzat (Villeneuve-lès-Maguelone).....	20
2.2. Observation de la phénologie, de la croissance et de la production de la vigne à l'échelle de la parcelle.....	24
2.3. Le dispositif d'étude du système en stations.....	25

**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 26**

1. Mots clés.....	26
2. Introduction.....	26
3. Matériel et Méthodes	28
3.1. Conditions générales de l'expérimentation	28
3.2. Croissance de la culture intercalaire	28
3.3. Vigne et indicateurs de contrainte	28
3.4. Développement végétatif de la vigne	29
4. Résultats.....	30
4.1. Croissance des cultures intercalaires	30
4.2. Enherbement et contraintes hydriques et azotées	31
4.3. Croissance et développement végétatif de la vigne.....	36
5. Discussion.....	41

**CHAPITRE IV - ENHERBEMENT DES VIGNOBLES EN REGION
MEDITERRANEENNE : II- IMPACT SUR L'ELABORATION DU
RENDEMENT ET LA QUALITE DES MOUTS 44**

1. Mots clés.....	44
2. Introduction.....	44
3. Matériel et Méthodes	46
3.1. Conditions générales de l'expérimentation	46
3.2. Indicateurs de contrainte subie par la vigne	46
3.3. Elaboration du rendement.....	46
3.4. Qualité des moûts de raisin produits.....	46
3.5. Indicateurs composites de fonctionnement du vignoble.....	46
4. Résultats.....	47
4.1. Enherbement et contraintes hydrique et azotée subies par la vigne	47
4.2. Elaboration du rendement.....	48
4.3. Equilibre végétatif et reproductif du vignoble.....	50
4.4. Quelle qualité des moûts selon les années et les modalités d'entretien du sol ?	52
4.5. Relation entre niveaux de contrainte, élaboration du rendement et composantes de qualité.....	55
4.6. Analyse de l'effet de la modalité et du millésime sur la production de raisin....	57
5. Discussion.....	59

CHAPITRE V - LOWER VEGETATIVE AND REPRODUCTIVE GROWTH IN GRAPEVINE CORRELATES TO REDUCED GREY MOLD INCIDENCE **62**

1. Abstract	62
2. Keywords	62
3. Introduction	62
4. Materials and Methods	65
4.1. Climate and vineyard management	65
4.2. Experimental design and cropping practices	65
4.3. Measurements	65
4.4. Analysis of data	68
5. Results	68
5.1. Climatic conditions	68
5.2. Grey mold development	69
5.3. Climate, microclimatic conditions and grey mold incidence	69
5.4. Shoot vigour, vine capacity and grey mold incidence	69
5.5. Cluster architecture, yield components, fruit composition and grey mold incidence	70
5.6. Interactions between climatic and vegetative growth variables	70
5.7. Interactions between cluster architecture, yield components and vegetative growth variables	70
5.8. Treshold effect in the relationship between canopy development and grey mold incidence, example of pruning weight.	71
6. Discussion	71
7. Acknowledgements	74

CHAPITRE VI - L'INCIDENCE ET L'INTENSITE DE L'OÏDIUM DEPENDENT DE L'ETAT DE DEVELOPPEMENT VEGETATIF DE LA VIGNE. **75**

1. Mots clés	75
2. Introduction	75
3. Matériels et méthodes	77
3.1. Dispositif expérimental.....	77
3.2. Développement de la vigne et de l'oïdium	78
3.3. Analyses statistiques	79
4. Résultats	79
4.1. Homogénéité de l'inoculation.....	79
4.2. Croissance de la vigne et évolution de l'épidémie	79
4.3. Relations entre vigueur des rameaux et développement épidémique sur feuilles.....	81

4.4. Interactions entre croissance des rameaux et évolution épidémique sur feuilles et sur grappes	81
4.5. Relations entre maladie sur feuilles et sur grappes.....	84
5. Discussion.....	84
CHAPITRE VII - DISCUSSION GENERALE	88
1. Proposition d'un schéma théorique reliant l'état de croissance de la vigne et le développement des maladies.	88
2. Quels indicateurs pertinents de vigueur et d'expression végétative de la vigne ?	89
3. Prévenir les maladies ou maîtriser rendement et qualité de la récolte ?	90
4. Perspectives : i) peut-on proposer des modifications aux règles de décisions pour tenir compte des relations positives entre croissance de la vigne et développement des maladies cryptogamiques ?	91
5. Perspectives : ii) peut-on identifier des itinéraires techniques à la fois moins sensibles aux maladies cryptogamiques et performants d'un point de vue productif ?.....	92
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	93

Liste des figures

Chapitre I - Synthèse bibliographique et démarche scientifique

- Figure 1.1.** Cycle biologique du botrytis. -9-
Figure 1.2. Cycle biologique de l'oïdium. -11-
Figure 1.3. Règle de décision pour les traitements phytosanitaires contre le botrytis développée par l'UMR Santé Végétale de Bordeaux. -13-
Figure 1.4. Règle de décision pour les traitements phytosanitaires contre l'oïdium développé par l'UMR Santé Végétale de Bordeaux. -14-
Figure 1.5. Schéma conceptuel des relations entre états de développement de la vigne et sensibilité au botrytis et à l'oïdium. -18-

Chapitre II - Matériel et Méthodes

- Figure 2.1** – Climat moyen de la ville de Montpellier au cours des dernières décennies (1971-2000). -20-
Figure 2.2 – Dispositif expérimental établi sur la parcelle expérimentale du Domaine du Chapitre (Villeneuve-lès-Maguelone). -21-
Figure 2.3 – Evolution des conditions climatiques de la parcelle expérimentale de Villeneuve-lès-Maguelone pour la période 2003-2006. -22-
Figure 2.4 – Composition texturale de la terre fine des deux premiers mètres de sol de la parcelle d'étude pour les différentes modalités. -23-

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

- Figure 3.1** – Evolution des biomasses aériennes cumulées produites par l'enherbement de fétuque élevée et d'orge et des taux de couverture de la surface enherbée par chaque enherbement. -30-
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). -31-
Figure 3.3 – Teneur en azote surfacique des feuilles et indice chlorophyllien mesuré à l'aide d'un chlorophylle-mètre en fonction du traitement. -33-
Figure 3.4 – Evolution des surfaces foliaires (LAI) produites par la vigne en fonction du traitement. -36-
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. -37-
Figure 3.6 – Evolution des matières sèches totales (MST) et des fruits (MSG) produites par la vigne en fonction du traitement. -38-

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

- Figure 4.1** – Composantes de l'élaboration du rendement mesurées à la vendange pour chacune des placettes étudiées. -48-
Figure 4.2 – Composantes de la qualité des moûts prélevés à la vendange pour chacune des placettes étudiées. -52-

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 contraintes. -57-

Chapitre V - Lower vegetative and reproductive growth in grapevine correlates to reduced grey mold incidence

Figure 5.1. Relative location on the first two axes of the principal component analysis of treatments W (weed control) and C (cover-crop), and of variables characterizing microclimate and grey mold incidence. -69-

Figure 5.2. Correlations between grey mold incidence (%) and shoot vigour and vine capacity variables. -69-

Figure 5.3. Correlations between grey mold incidence (%) and cluster architecture, yield components and fruit composition. -70-

Figure 5.4. Relative location on the first two axes of the principal component analysis of treatments W (weed control) and C (cover crop) and of variables characterizing shoot vigour (TLN), vine capacity (LA/m, N-TDM, PW), microclimate (PET, Tc>30, RHc>90, PP, PLWP) and grey mold incidence. -70-

Figure 5.5. Relative location on the first two axes of the principal component analysis of treatments W (weed control), C (cover crop), I (irrigated) and of variables characterizing shoot vigour (TLN), vine capacity (N-TDM, PW, LLN), cluster architecture and composition (BW, BN, Nas, S/AT, TA) and grey mold incidence. -71-

Figure 5.6. Variation in grey mold incidence according to pruning weight in different cropping systems. -72-

Chapitre VI - L'incidence et l'intensité de l'oïdium dépendent de l'état de développement végétatif de la vigne

Figure 6.1. Cartographie du poids de bois de taille (PBT) de la vigne (Kg cep⁻¹) sur la parcelle du Larzat (Villeneuve-lès-Maguelone) -77-

Figure 6.2. Evolution du niveau d'attaque d'oïdium sur feuilles et sur grappes en 2005 sur les ceps centraux et latéraux de chaque modalité. -79-

Figure 6.3. Evolution du niveau d'attaque d'oïdium sur feuilles et sur grappes en 2006 sur les ceps centraux et latéraux de chaque modalité. -80-

Figure 6.4. Impact de l'oïdium sur feuilles près du stade de fermeture de la grappe selon la vitesse d'apparition des feuilles totale par rameau (VAT). -81-

Figure 6.5 – Représentation graphique suivant les deux premiers axes des modalités, des variables végétatives et des variables de développement de l'oïdium pour les années 2005 et 2006 après analyse en Composantes Principales (ACP). -82-

Figure 6.6. Classification ascendante hiérarchique pour les individus en 2005 et en 2006. -83-

Figure 6.7 – Analyse en Composantes Principales (ACP) des variables végétatives et de développement de l'oïdium pour les années 2005 et 2006 pour les ceps contaminés. -84-

Figure 6.8. Comparaison des individus (ceps contaminés) avec une classification ascendante hiérarchique. -85-

Figure 6.9. Variation dans la fréquence et l'intensité d'attaque sur grappes par rapport à la vitesse d'apparition de feuilles (VAT) et à la vitesse d'apparition de feuilles malades (VAM) en 2005 et 2006. -86-

Chapitre VII - Discussion générale

- Figure 7.1.** Schème théorique des relations entre la vigueur (ou expression végétative) de la vigne et le développement épidémique des maladies sur grappes. **-88-**
- Figure 7.2.** Schème théorique des relations entre la vigueur (ou expression végétative) de la vigne et le développement épidémique du botrytis et de l'oïdium sur les grappes. **-89-**
- Figure 7.3.** Evolution du LAI entre débourrement et récolte comme indicateur de l'état de sensibilité de la vigne à l'oïdium et au botrytis. **-90-**
- Figure 7.4.** Modification proposée à la règle de décision pour les traitements phytosanitaires contre le botrytis. **-91-**
- Figure 7.5.** Modification proposée à la règle de décision pour les traitements phytosanitaires contre l'oïdium. **-91-**
- Figure 7.6.** **-92-**

Liste des tables

Chapitre I - Synthèse bibliographique et démarche scientifique

- Tableau 1.1.** Synthèse des modèles pour la simulation des risques de maladies cryptogamiques -13-
- Tableau 1.2.** Susceptibilité des cépages de *Vitis vinifera* à l'oïdium et au botrytis -15-

Chapitre II - Matériel et Méthodes

- Tableau 2.1.** Echantillonnage et fréquence des différentes mesures réalisées sur la parcelle d'étude. -25-

Chapitre III - Enherbement des vignobles en région méditerranéenne : I- Concurrence pour les ressources et effets sur l'expression végétative et la vigueur 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. -31-
- Tableau 3.2** – Teneurs en azote assimilable des moûts (mg L^{-1}) pour les différentes modalités étudiées. -35-
- 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. -37-
- 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. -39-
- Tableau 3.5** – Teneurs en amidon, glucides solubles et azote total dosées au moment de la taille en fonction de la modalité étudiée. -40-

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

- Tableau 4.1** – Evaluation de l'équilibre végétatif et reproductif du vignoble. -50-
- Tableau 4.2** – Matrice des corrélations entre les indicateurs de contraintes et les variables de croissance végétative et reproductrice et de qualité du moût. -55-

Chapitre V - Lower vegetative and reproductive growth in grapevine correlates to reduced grey mold incidence

- Table 5.1.** Variables of canopy development, microclimate and grey mold measured at veraison and harvest, and their sampling rules. -65-
- Table 5.2.** Comparison of the two sampling methods tested in 2004 to assess grey mold incidence: either randomly selected vines (1) or a randomly selected "block of consecutive vines" (2). -66-
- Table 5.3.** ANOVA of *Botrytis* incidence in 2004: effects of the cropping system and the sampling method. -69-

Chapitre VI - L'incidence et l'intensité de l'oïdium dépendent de l'état de développement végétatif de la vigne

Table 6.1. Variables végétatives et variables de développement de l'oïdium suivies ainsi que leur règles d'échantillonnage. **-78-**

Tableau 6.2. Evaluation de l'homogénéité des rameaux contaminés 14 jours après l'inoculation de l'oïdium. **-79-**

Liste des photos

Photo 1.1. Symptômes sur grappes infectées par botrytis. **-10-**

Photo 1.2. Symptômes sur feuilles et grappes infectées par l'oïdium. **-11-**

Photo 6.1. Inoculation des rameaux de vigne et protection des placettes de suivie : **-78-**

Introduction

Depuis plus de cinquante ans, les problèmes phytosanitaires qui affectent la vigne ont été gérés essentiellement par des procédés chimiques avec des stratégies d'assurance visant à éviter tout risque de maladies. Ceci explique qu'actuellement un tiers des fongicides utilisés en Europe et en France sont au service de la viticulture. Cette lourde utilisation de produits chimiques génère des résidus qui peuvent polluer les eaux de surface et souterraines, et mettre en danger la santé humaine, la flore et la faune. Ceci a fait naître des doutes sur la durabilité de ce type de système de culture et les pressions pour réduire les impacts des pratiques phytosanitaires ont énormément augmentés. En effet, les consommateurs sont mieux renseignés et leurs inquiétudes sont relayés par l'administration qui assure la surveillance de la qualité des eaux et réduit le nombre de molécules autorisées (Aubertot et al. 2005).

Pour répondre aux nouvelles contraintes liées à la durabilité du système, une protection ou lutte raisonnée des vignobles est proposée. Elle consiste à utiliser de façon rationnelle des préparations phytopharmaceutiques, notamment par le choix des produits, de leur dose, de l'époque d'application et des techniques à mettre en oeuvre, au sein d'un programme tenant compte de l'évolution des organismes nuisibles. L'ensemble des techniques utilisées par la lutte raisonnée répond aujourd'hui aux grands principes définis par l'Organisation Internationale de Lutte Biologique et Intégrée (OILB).

Dans ce cadre de la lutte contre les maladies, des règles de décision (RDD) ont été créées afin de traduire les connaissances épidémiologiques disponibles et de raisonner de cette façon l'application des produits phytosanitaires (INRA 2004). Les RDD sont activées par des indicateurs qui peuvent être de nature variée : des modèles climatiques de risque épidémiologique, des observations des attaques au vignoble, des caractéristiques de la plante comme les stades phénologiques, ou encore des caractéristiques des produits (durée de rémanence par ex.). D'autres variables liées à l'état de croissance de la vigne ont été évoquées mais n'ont pas été incorporées à ce jour. Pour autant les spécialistes viticoles reconnaissent l'importance des relations entre les états de développement végétatif ou reproductif du végétal et la sensibilité aux attaques des champignons tels que l'oïdium et le botrytis (Soyer 1987b; de la Rocque 2002). Cependant ces relations sont pauvrement documentées dans la littérature ce qui fait qu'elles ne peuvent pas être formalisées et incorporées dans une démarche de lutte raisonnée. De plus, les conseillers agricoles préconisent la maîtrise de la vigueur pour un contrôle adéquat des maladies, mais cela reste du domaine de l'expertise. Une quantification des relations entre l'état de croissance de la vigne et le développement épidémique des maladies, ainsi que l'identification des mécanismes sous-jacents semble donc nécessaire.

Dans un contexte de protection intégrée, l'enherbement du vignoble est une alternative technique envisagée de plus en plus favorablement. Les changements entraînés par l'enherbement peuvent agir sur le contrôle des maladies en modifiant :

- 1) le déclenchement des indicateurs de décision (RDD)
- 2) la capacité à intervenir dans la parcelle (application des produits phytosanitaires 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)
- 4) la période de temps nécessaire pour renouveler les traitements (effet de dilution des produits systémiques, nouvelles feuilles apparues sans protection pour des produits de contact).

Depuis quelques années, la pratique de l'enherbement a connu une expansion importante. C'est particulièrement le cas dans les vignobles du centre de l'Europe et des vignobles septentrionaux et atlantiques en France, où les précipitations sont abondantes et/ou réparties de manière régulière au cours de l'année. Cela a conduit à ce que de nombreuses études s'intéressent aux conséquences de l'utilisation d'une culture intercalaire sur la vigne (Murisier and Beuret 1986; Ludvigsen 1987; Morlat et al. 1993; Carsouille 1996; Maigre 1996; Klik et al. 1998; Rodriguez-Lovelle et al. 2000b; Lisa et al. 2001). Les résultats de ces recherches ont montré globalement que cette pratique permet une amélioration de la qualité de la production (via la maîtrise de la croissance de la vigne) et une meilleure protection de l'environnement. Par contre, en région méditerranéenne où le climat est souvent très sec en période estivale, cette pratique est encore observée avec un peu de méfiance de la part des viticulteurs. La crainte d'une forte concurrence pour les ressources, notamment hydriques, qui puisse affecter excessivement la production a retardé son développement dans ces zones (Gaudel 2002). De plus peu de recherches ont essayé de s'attaquer à cette problématique en région méditerranéenne et de donner des réponses qui puissent lever les craintes des viticulteurs (Goma-Fortin 2002; Chantelot et al. 2004; Celette et al. 2005).

Les multiples avantages de l'enherbement de la vigne ont fait de cette technique la base pour la conception de systèmes de culture à faibles niveaux d'intrants proposés par Cinna (2005). Dans sa démarche des analyses multicritères pour le choix du matériel végétal, la surface enherbée et la durée de l'activité de l'herbe dans le cycle annuel répondent à des objectifs de rendement, qualité et protection du sol. Cependant, l'objectif «santé de la vigne» n'a pas été pris en compte. Pourtant la gestion du sol via l'enherbement est intéressante à étudier du point de vue des relations entre l'état de croissance de la vigne et le développement épidémique des maladies. En effet, la grande diversité des types d'enherbements peut permettre de générer des niveaux de croissance de la vigne contrastés pour quantifier ces relations et ainsi les incorporer dans la démarche de conception de cultures proposée par Cinna.

Dans le cadre de cette recherche, nous nous proposons donc **d'étudier et de décrire les relations qui existent entre le développement épidémique de l'oïdium et du botrytis et des états de croissance contrastés de la vigne**. Les indicateurs d'état du couvert végétal les plus pertinents pour chaque maladie seront identifiés. Cela permettrait **d'enrichir les règles de décision de protection intégrée et d'incorporer un critère de santé végétale dans la conception des systèmes de culture innovants**. Au préalable, les impacts de la gestion du sol sur le développement végétatif et l'élaboration du rendement et de la qualité seront évalués.

Ce travail est décomposé en trois parties :

Une **première partie** présente une revue sommaire de l'état des connaissances sur l'association vigne-enherbement et sur les conséquences de cette association sur le développement végétatif et reproductif de la vigne. Ces changements dans l'état de croissance de la vigne sont ensuite mis en relation avec la biologie de deux maladies, le botrytis et l'oïdium. Ce chapitre met ainsi en évidence le manque de connaissances sur les relations positives qui lient ces maladies et l'état de sensibilité de la plante hôte, la vigne. A partir de cette information, un schéma conceptuel est construit permettant de mieux cerner la problématique et d'orienter les objectifs du travail.

Une **deuxième partie** présente les résultats obtenus ; elle est divisée en quatre chapitres :

- Les deux premiers cherchent à caractériser l'impact de différentes stratégies de gestion du sol, en région méditerranéenne, sur l'expression végétative, la vigueur et la production et la qualité de la récolte.
- Les deux chapitres suivants visent à vérifier l'hypothèse selon laquelle les vignes plus vigoureuses sont plus sensibles aux maladies et essaient de quantifier cet effet. Les principaux mécanismes qui expliqueraient cette relation sont explorés.

Enfin, **une troisième partie** s'appuie sur les résultats les plus significatifs pour fournir un cadre théorique plus large sur la relation entre états de croissance de la vigne et les deux maladies étudiées. Dans cette partie sont aussi proposées des modifications aux règles de décision pour la protection de la vigne. Elle donne également des pistes pour classer des itinéraires techniques selon une approche multicritère comprenant les impacts sur l'état sanitaire de la vigne.

Chapitre I - Synthèse bibliographique et démarche scientifique

1. Croissance et développement de la vigne

1.1. Taxonomie

La vigne est une espèce pérenne appartenant à la famille des Vitacées. Cette famille concerne une douzaine de genres pour environ 700 espèces (Galet 1991). Elle est largement répandue dans les zones tropicales et tempérées à travers le monde. Les vignes cultivées sont toutes du genre *Vitis* qui est composé d'environ quatre-vingts espèces plus ou moins bien définies et qui se répartissent sur le continent Américain (55%), en Europe (1%) et en Asie (44%) (INRA 2000). La seule espèce présente en Europe est *Vitis vinifera* qui est à la fois la plus commune à l'échelle mondiale et la plus importante au niveau économique (Galet 2000b). On estime à plusieurs milliers, 6 à 7000 probablement, les cépages existants pour l'espèce *Vitis vinifera*. En France, 227 variétés ont été répertoriées, mais un nombre beaucoup plus restreint est réellement cultivé et utilisé pour la production viticole.

1.2. Développement, croissance et production

La vigne étant une plante pérenne et de croissance indéterminée peut rester toute l'année avec une production active de feuilles si les conditions climatiques lui sont favorables (températures supérieures ou égales à 12° C) (Galet 2000a), comme c'est le cas dans les climats tropicaux. Sous les climats tempérés la vigne possède un rythme de végétation discontinu avec une alternance de périodes de végétation (vie active) et de périodes de repos (vie ralentie). Les vignobles du pourtour méditerranéen se trouvent dans cette deuxième catégorie. Le cycle annuel de croissance pour ces vignobles s'étend de mars à novembre dans l'hémisphère nord. Ainsi, chaque année elle forme une végétation, composée de rameaux et de feuilles qui assurent la croissance et la survie des parties pérennes de la souche : c'est le **cycle végétatif** qui débute avec les pleurs, précédant le débourrement et qui finit à l'automne par la chute des feuilles. La vigne entre alors en vie ralentie, c'est le repos hivernal, plus généralement appelé **dormance**¹ (Galet 2000a). Superposé à ce cycle végétatif se trouve un **cycle reproducteur** qui comprend la formation et le développement des inflorescences, leur fécondation, la croissance des grappes, des baies et des graines. Mais ces deux cycles de croissance dépendent fortement de la température. Champagnol (1984) fait une revue des différentes recherches et définit un seuil de croissance apparente² qui varie entre 10 à 11°C selon le cépage de *Vitis vinifera*. De même, des températures froides sont généralement nécessaires pour la levée de dormance des bourgeons de la vigne. Cependant, les besoins en froid de cette espèce sont limités et sont différents d'un cépage à l'autre (Pouget 1988; Nashimoto and Fujisaki 1995; Lavee and May 1997).

¹ **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.

² **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.

La vigne cultivée évolue dans des systèmes de cultures marqués par de nombreuses interventions culturales. Ainsi, après sa plantation elle est généralement conduite pour ne rentrer en production qu'au bout de trois ans. Ces premières années sans production permettent à la souche de constituer des réserves dans ses bois et un système racinaire adéquat. De plus, cette période permet aux viticulteurs de former la vigne de façon à obtenir l'architecture souhaitée avant le début de l'exploitation. Cette forte anthropisation, ainsi que les conditions du milieu physique où elle se trouve, font varier énormément la capacité et la période de production de la vigne. Champagnol (1984) signale que les vignes peuvent rester en production pendant 30 à parfois plus de 100 ans et que sa capacité maximale est atteinte pour un âge compris entre 7 et 15 ans. Il justifie cette observation en expliquant que le système racinaire de la vigne a alors exploré un volume de sol suffisant pour subvenir aux besoins de la plante. Ce même auteur estime que la production maximale d'une vigne dans le midi de la France est de l'ordre de 25 T ha⁻¹ à 12° d'alcool ce qui est un peu inférieur aux 30 T ha⁻¹ ou plus signalées par Iland (2005) dans des systèmes viticoles fortement irrigués d'Australie.

La production du vignoble d'une année particulière est affectée par divers facteurs dont le climat, le sol, les potentialités génétiques et les pratiques culturales. Tout d'abord le nombre de bourgeons laissés à la taille pendant l'hiver précédent détermine le nombre des grappes qui pourront être récoltées. En effet, le nombre potentiel d'inflorescences par bourgeon est assez constant (Rives 2000a) et il est déterminé au printemps antérieur à la taille (Rives 2000a; Pearce and Coombe 2005). En deuxième lieu, le nombre potentiel de baies par inflorescence est affectés par les conditions environnementales, notamment la température de l'air (Williams et al. 1985), et la vigueur de la vigne (Tesic 2001) au moment de la période floraison - nouaison. Un déséquilibre entre les parties végétatives et reproductives à cette période peut produire une compétition de nature trophique ou hormonale entraînant un faible taux de nouaison (cou lure) (Carbonneau and Ollat 1991). Il semble également qu'une fertilisation azotée excessive ait les mêmes conséquences (Delas and Pouget 1984). Une fois que le nombre de baies par grappe est défini, c'est le processus de remplissage des baies qui détermine le rendement final qui sera récolté. La taille potentielle de la baie est un facteur génétique. Cependant la croissance réelle de celle-ci est affectée par de nombreux facteurs comme le nombre de baies par grappe (Ollat et al. 2002), la nutrition carbonée (Kaps and Cahoon 1992), la température (Hale and Buttrose 1974), la lumière (Smart and Sinclair 1976) et l'alimentation hydrique (Ojeda et al. 2001). Ce dernier facteur est très important car une stress hydrique affecte la taille finale de la baie quel que soit le moment d'apparition entre la nouaison et la maturité.

Au cours de la phase de remplissage, les baies grandissent en taille (principalement par une accumulation d'eau), et elles accumulent des sucres (fructose et glucose pour l'essentiel), des acides organiques (malique et tartrique) et des composés phénoliques (dont les anthocyanes qui donnent leur couleur aux grappes des cépages rouges) et des composées aromatiques (Coombe and McCarthy 1997). 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).

2. L'enherbement et ses conséquences sur la production viticole et l'environnement

2.1. Définition et variantes

L'enherbement du vignoble est une technique qui consiste à laisser se développer ou à installer un couvert végétal, de façon permanente ou temporaire, sur toute la surface de la parcelle ou sur une partie seulement. Pour cela différents types de plantes peuvent être utilisées, telles que des graminées, des légumineuses, ou des mélanges d'espèces (Lal et al. 1991). On peut laisser aussi la flore naturelle se développer et gérer son développement. Trois types d'enherbements caractérisés par leur durée d'activité peuvent être distingués : 1) hivernal, détruit avant le débourrement de la vigne, 2) semi-permanent, présent sur une partie seulement du cycle de la vigne et 3) permanent, présent pendant tout le cycle de la vigne et d'une année sur l'autre (Laffosse 2001).

2.2. Les effets sur les caractéristiques du sol

L'utilisation d'un couvert végétal dans l'inter-rang des vignes a des conséquences sur différents aspects du sol. En premier lieu, il modifie les ressources nutritionnelles disponibles pour la vigne, notamment l'eau et l'azote ((Morlat 1987; Chantelot et al. 2004). La concurrence pour l'eau entraîne une redistribution du système racinaire de la vigne, qui a tendance à se concentrer sous les rangs de vigne et à coloniser des horizons plus profonds (Morlat and Jacquet 2003; Celette et al. 2005). Deuxièmement, l'enherbement augmente la perméabilité du sol (Morlat 1987; Willey 1990) et améliore la recharge du sol en hiver (Celette et al. 2005). Cette dernière atténuera l'impact de la compétition pour l'eau entre la vigne et la culture intercalaire. En troisième lieu, la présence d'une culture intercalaire augmente la teneur en matières organiques du sol (Masson and Bertoni 1996) et améliore leur activité biologique ce qui rend le cycle des nutriments du sol plus efficace (Young 1991; Reeleder et al. 2006). Cette plus forte teneur en matières organiques se traduit également par une meilleure stabilité du sol et une plus grande capacité de rétention d'eau (Tournebize 2001). Le risque de lixiviation du nitrate pendant la période hivernale est également diminué (prélevé par l'enherbement) (Schaller et al. 1991; Klik et al. 1998). Pour finir, la couverture de l'inter-rang modifie l'état de surface du sol en améliorant sa portance, ce qui est bénéfique pour les passages des engins agricoles après une pluie (Morlat 1987) et pour la diminution de la dégradation du sol qu'ils entraînent parfois (Cock 1985). Ce dernier effet conditionne fortement la stratégie de contrôle des maladies fongiques en permettant dans certains cas d'appliquer des traitements curatifs après que l'infection soit déclarée.

2.3. Effets sur la vigueur, l'expression végétative et la phénologie

La concurrence pour les ressources nutritionnelles qu'exerce l'herbe génère d'importantes conséquences sur la croissance de la vigne. Une forte diminution de la vigueur des rameaux (moindre longueur, réduction du nombre de feuilles et de leur taille) est souvent observée dans les vignes enherbées. Cela s'ajoute à une réduction de la quantité de rameaux produits par ces vignes et se traduit par une expression végétative plus faible. Ainsi, Morlat et al. (1993) et Rodriguez-Lovelle et al (2000b) ont observé des réductions du poids de bois de taille par cep qui peut aller jusqu'à 60 à 70 % par rapport à un témoin non enherbé. 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; Moulis 1994).

Sur le plan de la phénologie de la vigne un avancement des stades a été observé dans des parcelles enherbées par rapport aux vignes désherbées (Rodriguez-Lovelle et al. 2000a). Cet avancement a quelquefois été constaté à partir de la floraison, mais le plus souvent ce sont les stades de véraison et de récolte qui sont modifiés (Morlat et al. 1993). Ponchia et Giulivo (1992) signalent que la pratique de l'enherbement modifie la phénologie de la vigne, mais l'intensité de la variation dépend du cépage ainsi que du porte-greffe.

Les changements de la vigueur ainsi que de la phénologie de la vigne signifient une diminution des travaux sur le végétal (rognage, ébourgeonnage, épamprage, etc.) ainsi qu'un ajustement du calendrier des pratiques comme la récolte.

2.4. Effets sur le rendement et la composition des baies.

De nombreuses études ont montré qu'enherber un vignoble a pour principal impact de diminuer significativement la croissance de la vigne et donc le rendement (Soyer et al. 1984; Rozier and Etienne 1991; Maigre and Murisier 1992; Moulis 1994; Masson and Bertoni 1996; Dry and Loveys 1998; Rodriguez-Lovelle et al. 2000a). Cependant la diminution du poids de la vendange est moins forte que celle de la partie végétative. Des pertes de rendement de l'ordre de 30 à 50% dans les parcelles enherbées par rapport aux parcelles désherbées ont été signalées dans différentes régions de France et d'Italie (Morlat et al. 1993; Rodriguez-Lovelle et al. 1999; Corino et al. 2003). Mais cette diminution du rendement est souvent accompagnée de changements dans la qualité des moûts. En effet, une contrainte hydrique imposée à la vigne, tant qu'elle reste modérée, induit également un effet favorable sur la qualité de la récolte (Pellegrino et al. 2005). Ainsi, dans les vignes enherbées on observe généralement une augmentation du degré alcoolique, une diminution de l'acidité (principalement liée à une diminution de l'acide malique) (Maigre et al. 1995; Rodriguez-Lovelle et al. 2000a), voire un enrichissement en certains polyphénols comme les anthocyanes qui donnent leur couleur aux vins rouges (Le Goff-Guillou et al. 2000; Hilbert 2002). Toutes ces modifications sont en grande partie liées à une canopée moins dense et donc à des grappes plus aérées dans les vignes enherbées.

Enfin, la disponibilité plus réduite d'azote dans le sol, du aux prélèvements de l'herbe, diminue souvent la teneur en azote des tissus de la vigne. Ainsi, une composition des baies moins riche en azote peut défavoriser les attaques de champignons comme *Botrytis cinerea* (Maigre and Murisier 1992).

2.5. Effets sur l'environnement microclimatique au sein du couvert végétal

La modification du couvert végétal de la vigne dû à des ressources nutritionnelles moins importantes dans le sol (Boureau and Cuinier 1997; Rodriguez-Lovelle et al. 1999) entraîne nécessairement une modification du microclimat en son sein. Un premier effet, bien que contradictoire, est observé sur la température des grappes. D'un côté, divers auteurs (Morlat et al. 1993; Maigre 1999) ont observé une augmentation de la température des grappes de 1 à 3 °C dans les parcelles enherbées. Cela a été associé à une surface foliaire plus faible dans ces parcelles et probablement à une activité transpiratoire réduite par le manque d'eau. D'un autre côté Pieri et al. (2001b) indiquent que la température (en milieu de la journée) des grappes est plus élevée quand le sol est nu que quand il est enherbé. Cela s'expliquerait par une production de chaleur sensible et un albédo du sol plus élevé dans un sol nu et sec en comparaison avec un sol enherbé. Cette situation se

présenterait plus fréquemment dans un contexte méditerranéen, où le printemps et surtout l'été sont assez secs.

La réduction de la surface foliaire des vignes enherbées a pour conséquence un feuillage moins entassé. Cela crée un microclimat plus aéré et lumineux au niveau des feuilles et des baies (Morlat et al. 1993; Dry and Loveys 1998; Pellegrino et al. 2004). Morlat (2000) signale un éclaircissement dans la zone des grappes jusqu'à 50 % plus élevé dans des vignes enherbées avec de la fétuque en comparaison aux vignes désenherbées. Cette meilleure ventilation du couvert diminue l'hygrométrie au sein de la canopée. Cet effet peut être renforcé dans des conditions de stress hydrique sévère par une moindre transpiration des feuilles.

Les modifications du microclimat du vignoble dans des conditions enherbées sont moins favorables au développement des maladies qui ont besoin d'une hygrométrie élevée ou d'ombre. Un exemple est donné par Corino et al. (2003), qui ont observé que la fréquence des plantes attaquées par *Botrytis cinerea* diminue de 25 % en parcelles en sol nu à 6 % en parcelles avec de l'herbe dans l'inter-rang (sur le cépage Barbera).

2.6. Conséquences environnementales

L'enherbement des inter rangs de la vigne peut avoir aussi des effets positifs (directs ou indirects) sur l'environnement. Ainsi cette pratique limite :

- ❖ **Le ruissellement et l'érosion du sol** (Klik et al. 1998; Battany and Grismer 2000; Corino et al. 2003) qui peuvent être sévères dans les cultures comme la vigne qui ne couvrent pas toute la surface du sol (Le Bissonais et al. 2001). Ces deux processus sont encore plus importants dans des conditions de sol en forte pente et sous un climat avec de forts orages. Cette diminution du ruissellement limite la pollution des cours d'eau par des pesticides ou d'autres matières en suspension dans les eaux ruisselées (Louchart et al. 2001). Cela n'est pas une conséquence mineure si l'on considère que, par exemple, dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse (AME 2003) 78 % des stations de suivi de la qualité des eaux de surface montrent 10 matières actives ou plus.
- ❖ **Le transfert de produits phytosanitaires** vers les nappes phréatiques par une interception de ces produits au niveau de la culture intercalaire.
- ❖ **Le nombre de renouvellements de produits phytosanitaires** appliqués contre les maladies et ravageurs. Ainsi, une croissance de la vigne ralentie signifie une faible apparition de nouvelles feuilles qui ne seront pas couvertes pour un produit de contact, ou bien, une moindre dilution pour les produits systémiques dans celles-ci. Cela permettra de bien exploiter la période d'activité des produits phytosanitaires sans être obligé de renouveler les applications de façon anticipée, comme c'est le cas dans des vignes très vigoureuses (Emmett et al. 1998; Hoppmann and Berkelmann-Loehnertz 2000).

En conséquence, il apparaît que l'enherbement du vignoble procure de nombreux avantages. Il convient toutefois de noter que les divers impacts sur le sol, sur la vigne et sur l'environnement dépendent en grande partie de la nature de l'enherbement et de sa durée de vie. Le choix du matériel végétal pour l'enherbement et les modalités de couverture du sol dans l'espace et le temps agissent sur la période et le niveau de concurrence pour l'eau et l'azote. C'est l'intensité de cette concurrence qui modifie fortement ou faiblement l'état de croissance du vignoble. Ainsi la stratégie d'enherbement la mieux adaptée au vignoble dépend du poids que le viticulteur donne aux critères de production, de qualité de la vendange, ainsi que de lutte contre les maladies.

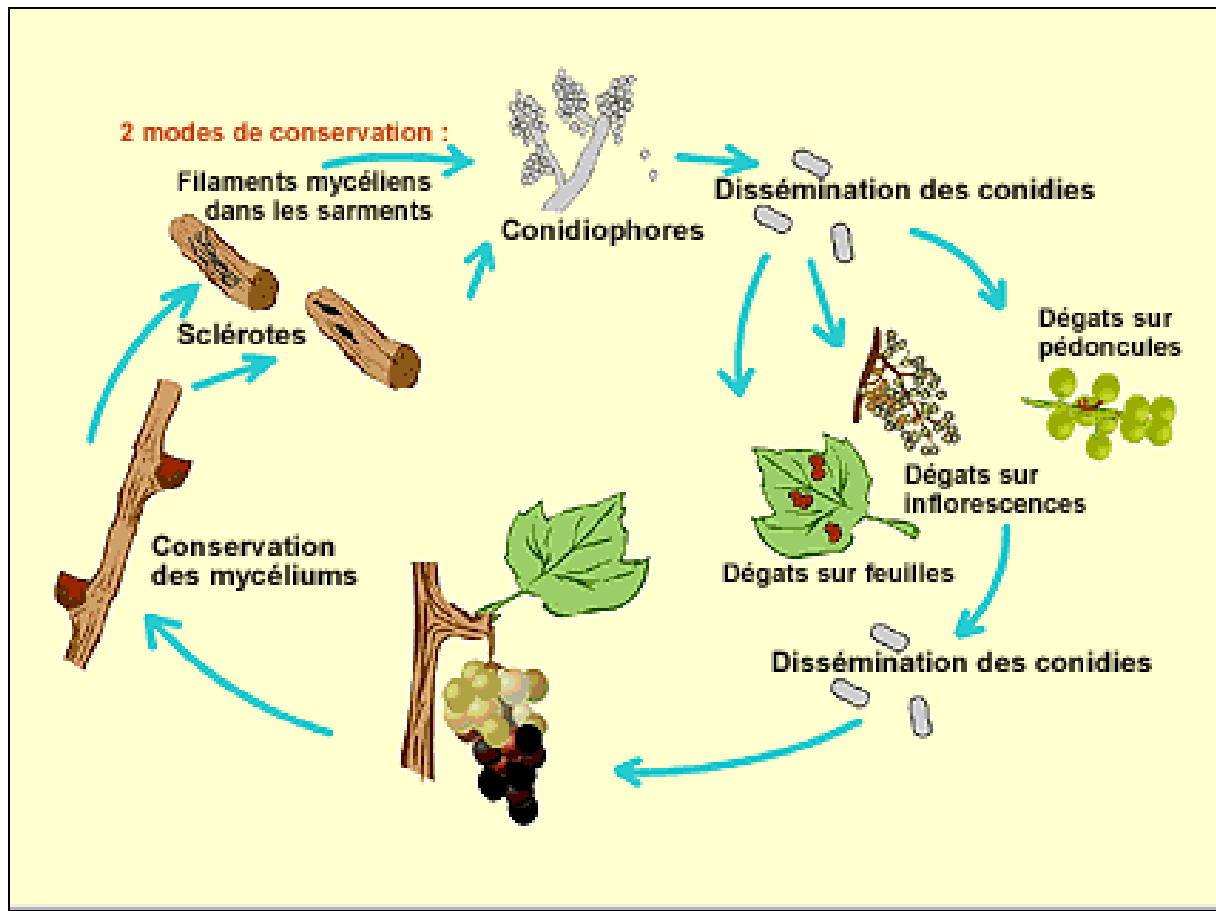


Figure 1.1. Cycle biologique du botrytis. Source: *page internet Syngenta agro*

3. La vigne et les maladies

3.1. Les maladies cryptogamiques³ et leur contrôle

Parmi les problèmes phytopathologiques qui affectent la vigne, ceux causés par les maladies cryptogamiques telles que l'oïdium (*Uncinula necator* Burr.), le botrytis (*Botrytis cinerea*) et le mildiou (*Plasmopara viticola* (Berck. & Curt.) Berl. & Toni) sont sans doute les plus importants. Ils accaparent la plupart des efforts et ressources des viticulteurs (Auger and Esterio 1997; Moriondo et al. 1999; Oliva et al. 1999). Pour combattre ces maladies, les viticulteurs ont le choix d'appliquer une stratégie d'assurance, ou de prendre des risques calculés et d'appliquer le minimum de traitements fongicides possible (Emmett et al. 1998). Dans cette partie, l'essentiel de ces deux types de stratégies sera décrit.

3.1.1. Ecologie des principales maladies cryptogamiques de la vigne

Nous décrirons dans cette partie l'écologie de deux maladies qui constitueront la partie centrale de ce travail : l'oïdium et le botrytis. Ces deux maladies appartiennent au même groupe des champignons : les Ascomycètes⁴. Cependant les modes d'infection et de survie ainsi que les besoins climatiques sont très différents. Ce dernier point est important à retenir pour le choix des stratégies de lutte.

3.1.1.1. Le botrytis

Infection et survie

B. cinerea survit pendant la période hivernale sous forme de sclérotés ou de mycélium dans les résidus de grappes pourries ou sur les sarments de la vigne (Pearson and Goheen 1988). Ces résidus peuvent ensuite contribuer jusqu'à 70% de l'attaque sur les grappes à la floraison et 28% à la récolte (Emmett et al. 1998). Si les baies sont infectées tôt dans la saison (à la floraison -nouaison), le champignon reste inactif et redémarre son activité quand les conditions sont favorables et la teneur en sucre des baies arrive à 6-8 ° Brix ou plus (Nair 1985). Une fois les baies infectées, la progression de la maladie se fait par la dissémination des conidies produites dans les foyers nés du mycélium ou des sclérotés (*Figure 1.1*).

Besoins climatiques

Plusieurs facteurs du microclimat contrôlent le développement des champignons, donc du botrytis, mais sans doute la température, l'hygrométrie et l'humectation des feuilles et des grappes sont les plus importantes, sans oublier la luminosité. Diverses recherches montrent une gamme de températures assez large pour le développement du botrytis. Ainsi, la germination de sclérotés (inoculum primaire) peut se faire entre 1 et 33 °C (T° optimale 18-23 °C). Par contre pour la germination de conidies, la gamme est plus étroite (T° optimale 15-20 °C) (Alvarez 1987; Latorre 1997). Les températures élevées, à partir de 25 °C et surtout au-delà de 30 °C, sont connues in vitro pour freiner, voire inhiber, la croissance du botrytis (Fermaud et al. 2001b; Fermaud et al. 2001a).

En ce qui concerne l'hygrométrie au sein du couvert et l'humectation d'organes, le botrytis a besoin de conditions d'hygrométrie saturantes (près de 100%) pendant une

³ Cryptogamique : se dit des affections causées aux végétaux par des champignons microscopiques

⁴ Ascomycètes : classe de champignons supérieurs caractérisés par des spores formés à l'intérieur d'asques.

période plutôt prolongée (Alvarez 1987; Egger et al. 1994) . Il est courant de parler de la " loi du 15/15 " : le développement du champignon se fait avec des températures à partir de 15 degrés et l'hôte (vigne) reste pendant 15 heures minimum avec des organes humectés (voire avec des hygrométries de près de 100 %) (Alvarez 1987).

La durée de la période d'humectation est influencée par différents facteurs soit physiques comme la température de la zone, l'humidité de l'air, la pluie, le vent et le rayonnement solaire, soit biologiques liés au type de végétal et à son état de développement (Egger et al. 1996). Une modification du couvert végétal entraîne nécessairement une modification de l'humidité au sein de la canopée.

Enfin le rayonnement solaire s'est montré très important pour ralentir significativement le développement de la maladie. Fermaud et al. (2001b) ont observé que la taille des foyers primaires de botrytis de grappes bien exposées à la lumière a diminué jusqu'à 33 % par rapport aux grappes non exposées.

Symptômes et nuisibilité

Cette maladie se manifeste sur les organes herbacés et sur les grappes. Dans des conditions favorables, Botrytis infecte les jeunes rameaux tôt dans la saison en causant des plaques de pourriture marron clair. Quand l'infection se produit à la base du rameau, celui-ci peut mourir (Emmett et al. 1998). Plus tard dans la saison, ce champignon peut produire « la pourriture pédonculaire » qui se manifeste sur le pédoncule et la rafle de la grappe en entraînant le dessèchement des boutons floraux avant la floraison et la chute précoce d'une partie ou de la totalité de l'inflorescence (Photo 1.1a). Après la nouaison, une attaque de cette maladie produit des grains avec une coloration grisâtre, ils brunissent et pourrissent en se couvrant d'un duvet gris (Photo 1.1b). Le plus souvent Botrytis se manifeste tard dans l'été ou au début de l'automne quand les baies mûrissent. Les premiers symptômes d'infection dans les grappes mûres sont de petites tâches circulaires imbibées d'eau. Graduellement les baies infectées ramollissent et deviennent marron, mais elles peuvent rester turgescents pendant que la pourriture progresse à l'intérieur. L'infection progresse à partir d'un grain malade vers les grains voisins par contact ou blessure jusqu'à ce que toute la grappe soit pourrie (Emmett et al. 1998). Cette progression est plus rapide dans les grappes les plus compactes. Plus tard, les grappes deviennent d'une couleur grisâtre. Cette forme de la maladie est la plus grave. Elle est appelée " pourriture grise " et se manifeste par temps humide entre la nouaison et la maturité. Enfin, un autre type de manifestation de botrytis est la " pourriture noble ". Cette dernière se manifeste en période de surmaturation sous certaines conditions climatiques. Elle est recherchée pour l'élaboration de vins liquoreux, avec vendanges tardives et sélection de " Grains Nobles ".

Ainsi la nuisibilité de ce champignon se situe surtout au niveau des baies. Des grappes infectées produisent des vins d'une qualité inférieure due à des saveurs indésirables, avec une augmentation de la sensibilité à l'oxydation ainsi que d'autres modifications biochimiques (Pearson and Goheen 1988). Ce champignon peut produire la perte totale de la récolte sous un climat favorable, froid et très humide (Magarey et al. 1994).

Traditionnellement, cette maladie est gérée par une combinaison de pratiques culturales et chimiques. Celles-ci incluent l'utilisation de porte greffes moins vigoureux, de systèmes de conduite adéquats (Savage and Sall 1984), la taille et autres mesures prophylactiques (effeuillage par exemple), la réduction de la fumure azotée, la maîtrise de la vigueur, l'aération du feuillage au niveau de la zone des grappes, la lutte contre les vers de la grappe et l'oïdium.

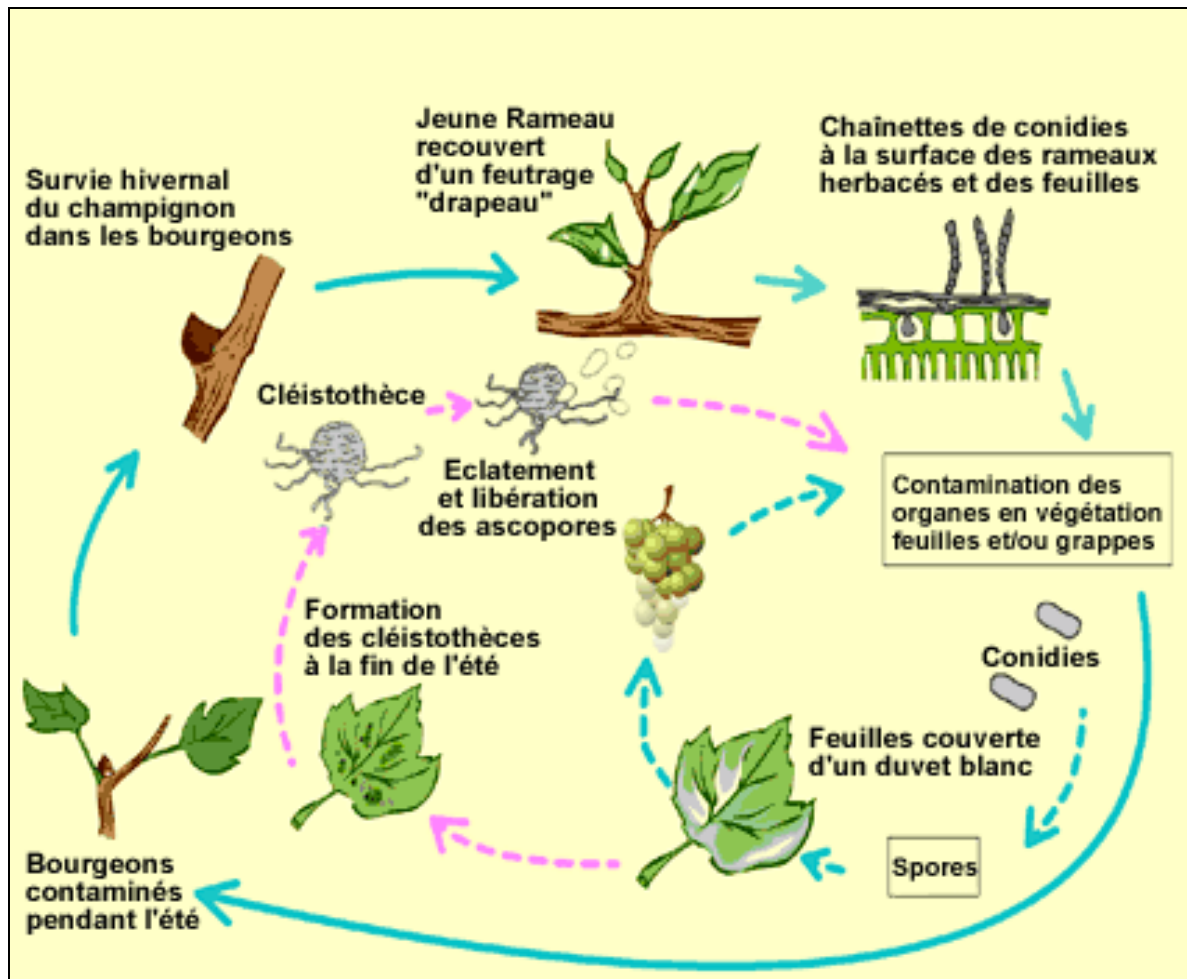


Figure 1.2. Cycle biologique de l'oidium. Source : page Internet Syngenta agro.

3.1.1.2. L'oïdium

Infection et survie

Pour l'oïdium, les deux sources principales d'inoculum primaire sont le mycélium logé dans les bourgeons et les ascospores nés de cleistothèces survivantes dans les bois (écorces) (Bulit and Lafon 1978). Il est important de différencier quelle est la source de l'attaque primaire. La première (mycélium) normalement moins fréquente, produit une attaque plus tôt dans la saison, et la deuxième, au contraire produit une attaque plus tardive (Rugner et al. 2002). Cinq à 32 jours après (cela dépend de la température) le début de l'infection primaire, ce champignon sporule et ses spores (appelés conidies) sont transportés pour le vent pour commencer l'infection secondaire (*Figure 1.2*). Cette dernière peut se produire dans une période de 24 h si les conditions sont favorables, ce qui signifie que le champignon peut faire jusqu'à trois cycles secondaires avant que les symptômes sur feuilles soient détectés (Emmett et al. 1992).

Besoins climatiques

Comme pour le botrytis, l'oïdium a aussi une souplesse importante d'adaptation en ce qui concerne la température et peut se développer avec des températures entre 5 et 30 °C (les températures supérieures à 35°C inhibent la germination de conidies (Halleen and Holz 2001), mais les conditions optimales sont voisines de 25 °C (Clerjeau et al. 1998a). En ce qui concerne l'hygrométrie ce champignon, à l'inverse du botrytis, peut se développer sans la présence d'eau libre sur les organes végétaux (Sall 1980) ce qui lui donne la capacité d'attaquer la vigne pendant une période de plusieurs semaines (si la vigne est réceptive). En effet, les conidies produites par l'infection secondaire d'oïdium n'ont pas besoin d'eau libre pour infecter les feuilles à l'inverse des ascospores produites par l'infection primaire (Jarvis et al. 2002).

La germination des conidies et la croissance de mycélium de l'oïdium sont favorisées en conditions d'ombre (Bulit and Lafon 1978). Ainsi, la présence d'arbres près du vignoble ou une vigueur très élevée dans les vignes serait un facteur favorable. Par ailleurs, les colonies de ce champignon ont été observées préférentiellement sur la face inférieure des feuilles, moins exposée à la pluie, aux températures élevées et au rayonnement en périodes ensoleillées. Cela indique une certaine sensibilité de ce champignon aux rayons UVB (Willoquet et al. 1996; Clerjeau et al. 1998a; Clerjeau et al. 1998b; Halleen and Holz 2001). Il a été observé 2 à 4 fois plus de grappes infectées par l'oïdium dans des vignes palissées que dans des vignes non palissées (Zahavi et al. 2001) sur Chardonnay et Cabernet sauvignon cultivés en Israël. Une plus petite distance entre les rangs favorise aussi une attaque plus forte de la maladie, surtout quand la vigne est plus vigoureuse (Zahavi et al. 2001). Ces mêmes chercheurs ont trouvé que l'intensité de la lumière, dans la canopée, spécialement pour les grappes, est le facteur microclimatique principal qui influence le développement de l'oïdium dans leurs conditions.

Symptômes et nuisibilité

Généralement, les premiers symptômes détectés sont des tâches vert-jaunes sur la surface supérieure des feuilles. Par la suite, quand les températures s'élèvent, la présence de l'oïdium se traduit par des zones décolorées avec présence en face inférieure de zones grises cendreuse ternes (Emmett et al. 1998) (*Photo 1.2a*). La partie attaquée du limbe croît plus lentement et provoque, dans les cas graves, la déformation de la feuille qui se crispe. Les jeunes feuilles sont très sensibles, mais, au fur et à mesure qu'elles prennent de l'âge elles deviennent plus tolérantes (Galet 1977; Doster and Schnathorst 1985a; 1985b). Dans les cépages les plus sensibles, comme par exemple Carignan, Chenin, Zante Currant

et Sultana, les rameaux issus de bourgeons contaminés l'année précédente ont une croissance ralentie et les feuilles se crispent. L'ensemble se couvre d'un mycélium blanchâtre donnant lieu au symptôme appelé communément "drapeau" (Photo 1.2b).

Les inflorescences peuvent être infectées au moment de la floraison, ce qui peut entraîner une mauvaise nouaison (Emmett et al. 1998). L'infection des baies est possible sur une période courte du stade des boutons floraux séparés à la fermeture de la grappe (Rouzet et al. 1998) avec un maximum de réceptivité au stade nouaison - post nouaison. Les grappes et les grains contaminés se recouvrent d'une fine poussière grisâtre qui provoque des nécroses noires (Photo 1.2c). La croissance des parties atteintes est arrêtée, alors que la partie du grain sain continue de croître, et par conséquent les baies éclatent et laissent apparaître les pépins (Photo 1.2d). Ces lésions sont très favorables à la pénétration de la pourriture grise (Jarvis et al. 2002) et compromettent la récolte.

Sur les sarments, le même revêtement poussiéreux grisâtre se développe et ils deviennent fragiles et cassants. Après l'aoûtement, les dégâts sont caractérisés par la présence sur les sarments de taches étoilées couleur brun sombre. Tard dans la saison, de petits corps globuleux d'abord jaunâtres, à peine visible à l'œil nu, puis devenant brun noirâtre, apparaissent de façon irrégulière sur la surface de feuilles, grappes ou sarments fortement infectés. Ils correspondent aux organes de conservation de la phase sexuée (appelés cleistothèces).

En plus de son effet sur le rendement, la maladie peut avoir pour conséquence une perte de la qualité des moûts et par conséquent des vins (Pool et al. 1984; Gadoury et al. 2001). Les grappes fortement attaquées peuvent donner un mauvais goût au vin (Emmett et al. 1998; Calonnec et al. 2004; Stummer et al. 2005). Par ailleurs, l'oïdium altère la pellicule de la baie générant des microfissures propices à la pénétration du Botrytis.

3.1.2. Pratiques phytosanitaires traditionnelles d'assurance (calendrier programmé)

Le principal objectif de ce type de pratiques est l'élimination des maladies (90 % d'efficacité au minimum) (Oliva et al. 1999). Il consiste à protéger la culture contre les maladies et les ravageurs en faisant des applications périodiques de pesticides. Le premier traitement est appliqué au moment où la vigne devient sensible à une certaine maladie et il est renouvelé une fois que la rémanence du produit est finie (10-14 jours normalement). Si l'on considère que les agents nuisibles de la vigne se présentent dans des moments différents dans le cycle de développement on peut arriver en moyenne à une vingtaine de traitements phytosanitaires par an regroupés sur environ une dizaine d'applications (INRA 2004). Ce type de pratique a été pendant des années le plus répandu pour les viticulteurs français et européens (Lewis et al. 1997). Ce qui explique qu'actuellement un tiers des fongicides utilisés en Europe et en France sont au service de la viticulture (INRA 2004). Si on additionne aussi les autres types de pesticides, on peut arriver à 28 kg/ha et par an de pesticides appliqués dans des régions viticoles comme celle du Languedoc. Soit, plus du double de la consommation moyenne française qui est de 12 kg/ha toutes cultures confondues.

Les champignons, comme d'autres organismes vivants, sont constamment en train de s'adapter à leur environnement. L'utilisation régulière et peu raisonnée des pesticides peut avoir pour résultat une importante augmentation de la proportion des individus résistants (Pezet and Bolay 1992; Lewis et al. 1997; Emmett et al. 1998). Plusieurs des fongicides, comme les inhibiteurs de la biosynthèse des stérols, qui sont utilisés dans des programmes traditionnels de contrôle des maladies de la vigne se trouvent dans cette situation (Steva et al. 1990).

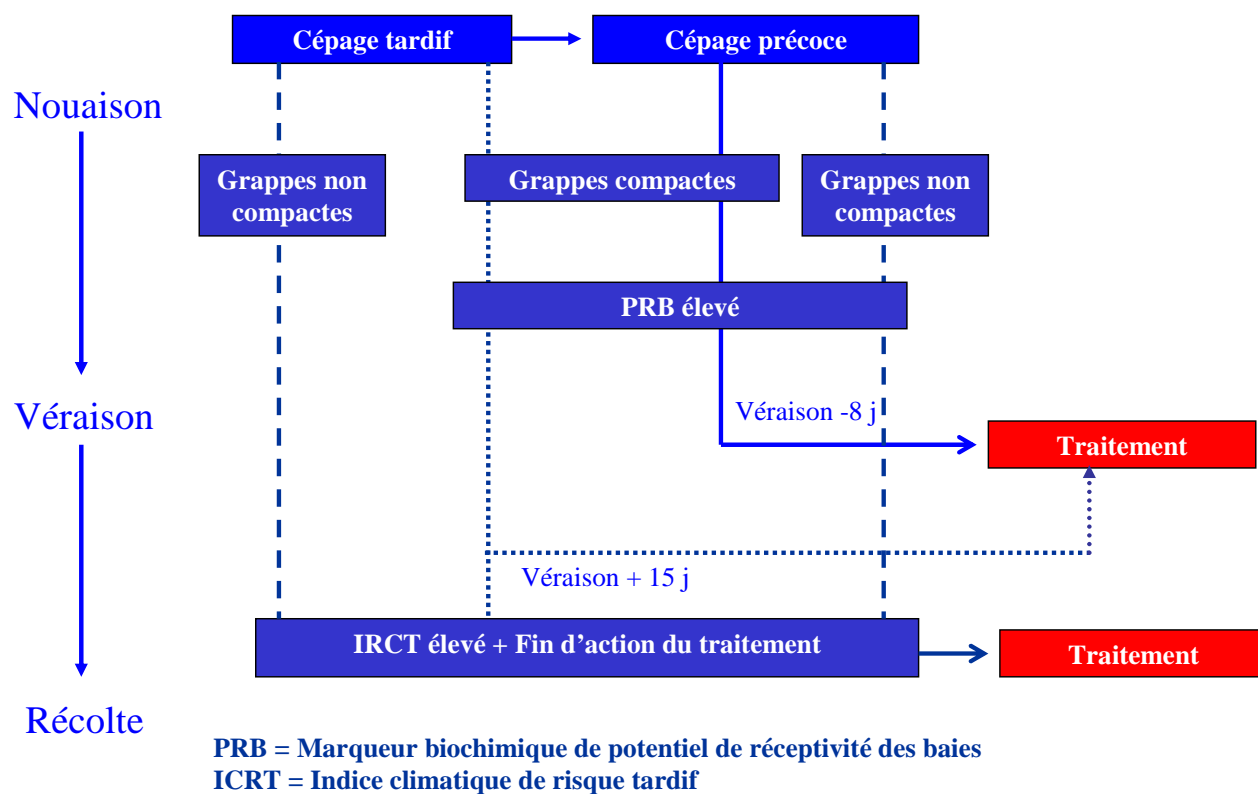


Figure 1.3. Règle de décision pour les traitements phytosanitaires contre le botrytis développée par l'UMR Santé Végétale de Bordeaux. Exemple pour les parcelles à sensibilité moyenne.

3.1.3. Vers une protection raisonnée de la vigne

Pour faire face au constat de l'utilisation lourde des pesticides avec des stratégies d'assurance, de nouvelles stratégies de protection des cultures ont été développées depuis quelques années. Elles essaient de concilier les intérêts économiques et environnementaux pour construire une viticulture durable et de qualité (Goulet et al. 2006). Dans ce contexte, la protection raisonnée⁵ des vignobles est tenue de limiter le nombre des traitements phytosanitaires à ceux vraiment nécessaires. Pour cela, des règles de décision, alliant des modèles épidémiologiques et/ou des observations des attaques du vignoble, permettent de prévoir les risques parasitaires pour la vigne et ainsi de décider du moment le plus propice pour traiter. Deux exemples de règles de décision pour le contrôle des maladies, l'une pour le botrytis et l'autre pour l'oïdium, sont présentés dans les Figures 1.3 et 1.4.

3.1.3.1. Modèles utilisés pour la prédiction des maladies

Dans les dernières deux décennies, beaucoup des travaux ont eu pour objectif de rationaliser l'utilisation des produits phytosanitaires dans les cultures. Pour cela, beaucoup d'entre eux ont utilisé des outils de modélisation de façon à traduire dans un langage mathématique les connaissances sur la biologie des pathogènes et ses relations avec les conditions de l'environnement. Ces modèles visent à simuler les risques d'attaque des pathogènes et peuvent être utilisés comme instruments d'aide à la décision pour mieux gérer les interventions phytosanitaires. Les avancées dans le développement de l'instrumentation météorologique appliquée à l'agriculture ont permis que ces modèles de prévision soient des outils des plus en plus utilisés (Latorre 1997; Viret et al. 2001).

Moriondo et al. (1999) passent en revue les modèles de prévisions des risques des principaux pathogènes qui attaquent la vigne et qui ont été développés dans différentes régions du monde. Ce travail auquel s'ajoutent quelques autres articles, donne un panorama assez exhaustif des informations utilisées pour faire les prédictions de risque des maladies (*Tableau 1.1*). Ainsi, on peut observer que ces modèles s'appuient essentiellement sur des données climatiques et micro-climatiques, négligeant souvent l'état du végétal. Seulement quelques uns d'entre eux incorporent, par exemple, une susceptibilité variétale ou une surface foliaire de la vigne au début de la simulation. Pourtant, les spécialistes viticoles reconnaissent l'importance des relations entre les états de développement végétatif ou reproductif et la sensibilité aux attaques de champignons tels que le mildiou, l'oïdium et le botrytis (Soyer 1987a; de la Rocque 2002).

3.2. La vigne comme plante hôte pour les maladies

3.2.1. La phénologie

Différents systèmes de description ont été proposés pour caractériser les différents stades de développement de la vigne (Eichhorn and Lorenz 1977; Baillod and Baggiolini 1993; Coombe 1995; Lorenz et al. 1995). Ces systèmes varient dans le nombre de stades phénologiques reconnus. Toutefois les principaux stades, comme le débourrement, la floraison, la nouaison, la véraison et la récolte sont toujours identifiés. La description objective de ces stades est très intéressante en viticulture. Elle fournit des indicateurs utiles à l'aide à la décision pour mieux piloter les systèmes de culture viticole. (Pearce and Coombe 2005). En particulier un suivi précis de la phénologie ainsi qu'une bonne

⁵ Protection raisonnée : Emploi rationnel de préparations phytopharmaceutiques, se définissant notamment par le choix des produits, de leur dose, de l'époque d'application et des techniques à mettre en oeuvre, au sein d'un programme tenant compte de l'évolution des organismes nuisibles. Syn. Lutte raisonnée.

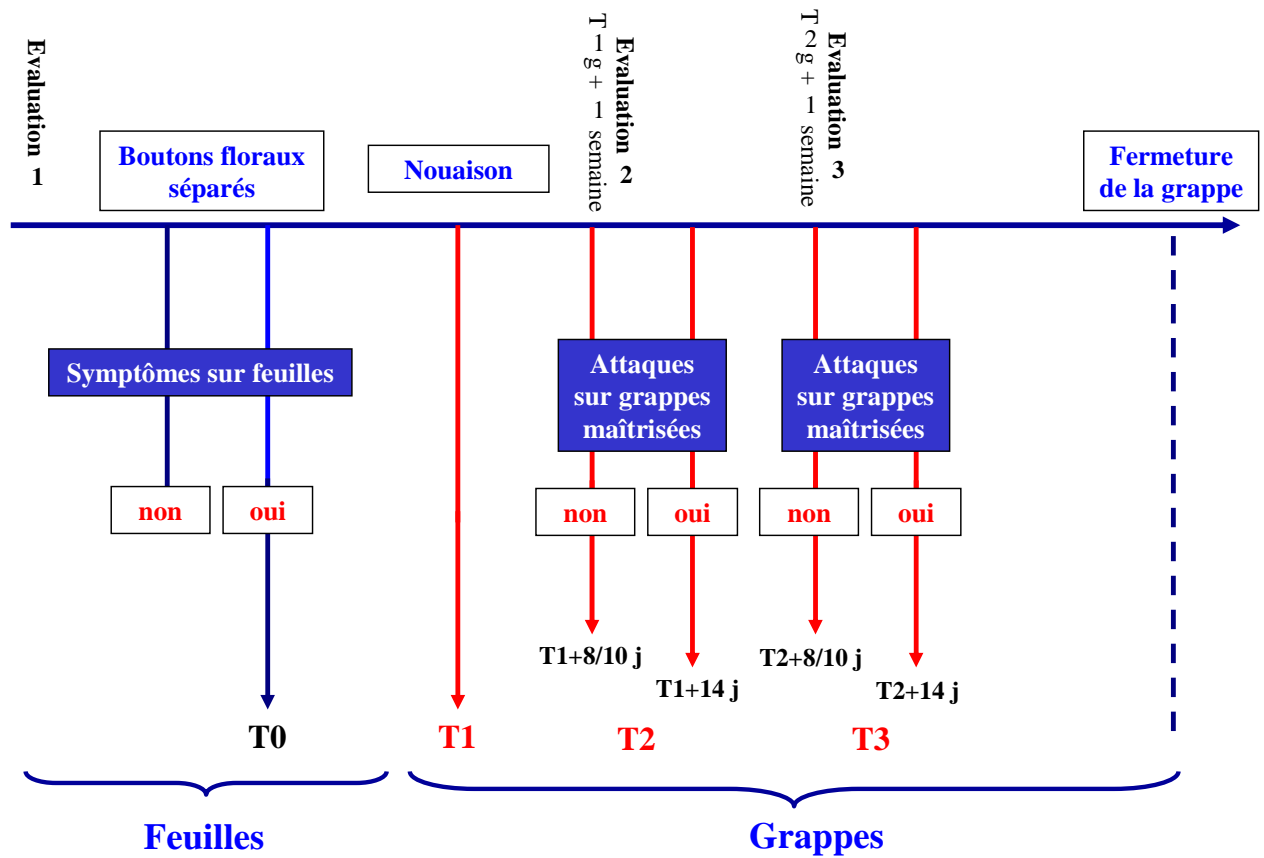


Figure 1.4. Règle de décision pour les traitements phytosanitaires contre l'oïdium développé par l'UMR Santé Végétale de Bordeaux. T0, T1, T2, T3 sont les traitements préconisés.

connaissance des stades plus sensibles aux maladies (Cf. 2.1.1) permettent de mettre en place des stratégies de lutte contre ces maladies (Hoppmann and Berkelmann-Loehnertz 2000).

Le principal facteur qui modifie le développement phénologique de la vigne est le climat (surtout la température), cependant ce n'est pas le seul. Les pratiques culturales mises en œuvre par les viticulteurs agissent aussi, mais avec moins de force. Ainsi, une nutrition hydrique et azotée excessive peut entraîner un retard dans l'arrêt de croissance végétative et dans l'apparition de stades comme la véraison et la maturité (Delas 2000). Une contrainte hydrique forte peut accélérer l'apparition des stades comme la véraison (Matthews et al. 1987b) et retarder la maturité (Smart and Coombe 1983). Par ailleurs, une taille tardive produit un retard de la date de débourrement, retard qui généralement se maintient jusqu'à la récolte (Martin and Dunn 2000). Un changement dans l'apparition, ainsi que de la durée, des stades phénologiques entraîne des conséquences sur l'attaque des maladies. Par exemple, une plus longue durée de la période entre véraison et maturité est favorable au développement du botrytis si les conditions climatiques sont favorables. De même, plus la période de floraison se prolonge dans le temps plus les risques d'attaque par l'oïdium augmentent.

3.2.2. Vigueur et expression végétative

Le concept de « vigueur » est une notion importante en viticulture et il est souvent utilisé par les viticulteurs, les conseillers agricoles et les pathologistes pour caractériser l'état de croissance du vignoble. La vigueur témoigne de l'activité métabolique des organes en croissance et se traduit notamment par l'intensité de l'activité métabolique, du fonctionnement des méristèmes et la vitesse de croissance (Champagnol 1984; Galet 2000b). Autrement dit, elle représente l'intensité de croissance et peut être évaluée à l'échelle du rameau par le taux d'apparition des feuilles, le taux d'élongation, l'augmentation du diamètre et du poids (Winkler et al. 1974; Reynolds and Wardle 1994; Freeman et al. 1998; Rives 2000a). Le terme de vigueur est souvent associé, et parfois confondu, avec la notion d'expression végétative. Cette dernière caractérise la biomasse végétative et reproductive totale produite par la vigne pendant son cycle annuel (Champagnol 1984; Dokoozlian and Kliewer 1995b; Freeman et al. 1998). Plusieurs méthodes ont été proposées pour estimer l'expression végétative de la vigne : surface foliaire par mètre de longueur de rang (Dokoozlian and Kliewer 1995a), densité et porosité du feuillage (Smart 1988), poids des bois de taille.

La vigne est une plante dont la croissance est dite « indéterminée », ce qui signifie qu'elle conserve une croissance active tant que les conditions du milieu lui sont favorables. Ainsi, des souches vigoureuses se rencontrent lorsque les sols sont très fertiles (de façon naturelle ou par fertilisation), bénéficient d'une réserve hydrique importante (due à la pluie ou à l'irrigation) (Smart et al. 1990; Dry and Loveys 1998; Pellegrino 2003) et que l'état physiologique de la plante est optimale. De plus, le potentiel de croissance de la souche doit s'exprimer par un nombre d'apex (sommets végétatifs) relativement limité (Galet 2000a). Si cette dernière condition n'est pas remplie et que la vigne dispose d'un nombre élevé de rameaux le potentiel de croissance est distribué sur tous les rameaux. Cela produit des vignes avec des rameaux de vigueur faible, mais avec une expression végétative élevée.

Cette notion de vigueur est reconnue par les spécialistes viticoles et pathologistes comme très importante pour ce qui est de la sensibilité du végétal aux maladies (Soyer 1987b; de la Rocque 2002). Cependant les relations entre vigueur et maladies sont encore pauvrement documentées. Souvent des recherches concernant les effets de pratiques culturales sur la croissance de la vigne et la qualité de la vendange ont montré, de façon

incidente, des interactions entre les maladies et l'état de croissance de la vigne (Reynolds and Wardle 1994; Fermaud et al. 2001b; Gadoury et al. 2001; Intrieri et al. 2001; Zahavi et al. 2001; Pellegrino et al. 2004; Morlat and Bodin 2006). Une recherche documentaire sur l'oïdium faite par Jarvis et al. (2002) dans différentes espèces, dont la vigne, signale que la sévérité de cette maladie est étroitement et positivement liée aux conditions de vigueur.

Les mécanismes qui expliquent les relations positives observées entre les maladies et l'état de sensibilité du végétal relèvent autant de la vigueur des rameaux que de l'expression végétative. On peut noter qu'une grande vigueur se traduit notamment par un retard des différents stades phénologiques de la vigne, dont l'arrêt de croissance, la véraison et la maturité du raisin. Cela procure aux champignons une période plus longue pour attaquer la vigne. Par ailleurs, dans les vignobles à vigueur et expression végétative élevées, le couvert est entassé et peu aéré (microclimat favorable, Cf 2.1.1.1) les baies sont grosses et les grappes compactes, ce qui favorise des maladies comme le botrytis (Fermaud et al. 2001b; Pellegrino et al. 2004)

3.2.3. Les cépages

Les facteurs qui expliquent la différence de sensibilité aux maladies entre cépages sont de natures différentes. Par exemple, pour les infections de botrytis, la compacité des grappes est très importante, les grappes plus compactes étant les plus sensibles (Marois et al. 1986; Vail and Marois 1991; Fermaud et al. 2001a). Cette situation pourrait être expliquée par une altération des cires qui protègent la cuticule des baies quand deux baies sont en contact (Marois et al. 1986). Pour les infections d'oïdium, le temps des stades phénologiques sensibles, comme la floraison et la nouaison, joue un rôle important dans la sensibilité des cépages. Plus la floraison et la nouaison sont éloignées dans le temps plus les risques d'être attaqué par le champignon sont augmentés. Un autre facteur peut entraîner des différences de sensibilité entre cépages : les différentes réponses de défense que les plantes mettent en place après une attaque de pathogènes. Le Tableau 1.2 donne quelques exemples de cépage et leur sensibilité à l'oïdium et au botrytis.

3.2.4. Les relations de défense vigne-pathogènes et vigne-stress abiotiques

Les relations qui sont établies dans le système plante-pathogène sont très complexes et incluent une série de processus biochimiques et enzymatiques. Suite à l'attaque d'un pathogène, une cascade de réactions se déclenche dans la plante et conduit à l'expression de gènes de défense (Daire et al. 2002). Deloire et al. (2000) citent notamment des réponses structurales (formation d'un épiderme de cicatrisation, nécrose cellulaire...), mais aussi des réponses physiologiques et chimiques (synthèse de protéines de défense comme les chitinases et glucanases ou de molécules antifongiques et antibactériennes comme les phytoalexines (Adrian et al. 2000; Gaudillère 2003). Un exemple bien connu de molécules antifongiques de la vigne est le resvératrol (composant du groupe des stilbenes) qui semble être efficace pour limiter la croissance du *Botrytis* dans les grappes (Hammerschmidt 1999). Cette molécule a été associée aussi à une résistance plus élevée à l'oïdium et au mildiou dans deux hybrides cultivés de *Vitis* (Fr-993-60 et Gf Ga-58-30) par rapport aux cépages de *Vitis vinifera* (Riesling et Kerner) (Bavaresco and Eibach 1987). Une sévérité plus élevée de l'oïdium a été observée quand la nutrition azotée est élevée. Dans ces conditions, la synthèse des stilbenes (resvératrol et viniferin) est diminuée (Bavaresco et al. 1994).

D'autres types de facteurs comme des stress abiotiques peuvent déclencher des réactions de défense. Adrian et al. (2000) indiquent qu'un stress comme celui produit par le rayonnement UV ou le chlorite d'aluminium peuvent déclencher la production de

molécules comme le resvératrol, déjà mentionné, ou autres stilbenes comme viniferin, pterostilbene. Dans le même sens, les travaux de Fregoni et al., 1994 (cité par Deloire et al. 2000) indiquent que le rayonnement UV, en particulier dans les vignobles en pente, pourrait modifier la biosynthèse des phénols, notamment du resvératrol.

3.3. Les travaux culturaux et leur influence sur la lutte contre les maladies

Les diverses pratiques culturales qui sont mises en œuvre par les viticulteurs pour obtenir une production de raisin adéquate en quantité et en qualité influencent aussi la lutte contre les maladies. Parmi celles-ci, le choix du mode de conduite, la taille et les travaux en vert (rognage et effeuillage) sont les plus importants.

3.3.1. Mode de conduite

Le choix du mode de conduite est essentiel pour l'expression du potentiel productif et qualitatif de la vigne. L'utilisation de systèmes de conduite simples ou bien qui divisent la canopée est fonction des conditions du climat, du sol et du potentiel de croissance du cépage. Ainsi pour des sols fertiles avec une réserve d'eau élevée et des cépages vigoureux, un système de conduite que divise la canopée doit être privilégié. En effet un des principaux facteurs modifié avec ce type de pratiques est le microclimat du couvert végétal. Or, une modification des conditions d'humidité, de température et de luminosité minimisent le développement des champignons (Emmett et al. 1998). D'autres travaux indiquent que les formes de base de type espalier simple ou double, double rideau, lyre et lys par exemple, sont les moins favorables au développement du botrytis (Carbonneau 1999).

La proximité entre feuilles sensibles de la vigne et l'inoculum primaire de la maladie est aussi un facteur important de propagation. Des vignes basses et/ou un sol en pente favorisent des éclaboussures des inoculum comme celui du mildiou présent sur le sol, et donc des foyers primaires présents au cœur du cep, et parfois directement sur l'inflorescence (Halleen and Holz 2001; Molot 2001). En conséquence, les systèmes de conduite qui maximisent la distance entre le sol et le feuillage de la vigne peuvent décourager l'infection des maladies (Emmett et al. 1992).

3.3.2. Taille

La taille est une des opérations culturales les plus importantes faite dans le vignoble après la vendange. Cette pratique a des conséquences sur le fonctionnement de la souche car elle influence : la forme et la taille du cep, l'équilibre entre la partie végétative et la partie reproductrice, et la quantité et la qualité de la production (Tassie and Freeman 1998). La taille doit être effectuée de façon à ce que, pendant le cycle annuel de la vigne, des gourmands ne soient pas produits à partir du vieux bois (tronc ou bras). Elle doit également permettre que le diamètre des coursons soit le même que celui de l'année précédente (Rives 2000a). Si des gourmands apparaissent, l'entassement du feuillage crée un microclimat plus favorable aux maladies. Pour éviter ces problèmes la taille doit se réaliser en laissant une charge proportionnelle à la vigueur de la plante, ce qu'on appelle « taille équilibrée » (Rives 2000b).

3.3.3. Travaux d'éclaircissage (rognage, effeuillage) du vignoble

Le rognage et l'effeuillage en milieu de saison ont comme objectif d'exposer les grappes à des conditions d'aération et de luminosité plus élevées. Cela améliore la production des composés comme les phénols, diminue l'acidité et prévient la production des molécules qui donnent des odeurs herbacées au vin (Smart 1998). L'effeuillage augmente en général le mouvement d'air autour des grappes et diminue la durée des humidités élevées et de présence d'eau sur les baies (après une pluie par exemple). De telles conditions sont moins favorables au botrytis (Savage and Sall 1983; 1984; Gubler et al. 1987). Cependant des résultats un peu contradictoire ont été présentés par Pieri et al. (2001a). Ces chercheurs ont observé que dans des vignes en sol nu l'effeuillage expose les baies à des températures élevées en journée, ce qui est défavorable au Botrytis. Mais l'effeuillage permet aussi le refroidissement nocturne des baies, induisant un dépôt de rosée favorable au champignon. Une quantité plus élevée de lumière dans la canopée peut aussi décourager le développement des maladies telles que le mildiou et l'oïdium (Halleen and Holz 2001). Enfin, un feuillage moins entassé a comme bénéfice additionnel d'améliorer la pénétration des produits phytosanitaires, et donc , de favoriser la lutte contre les maladies (Emmett et al. 1998).

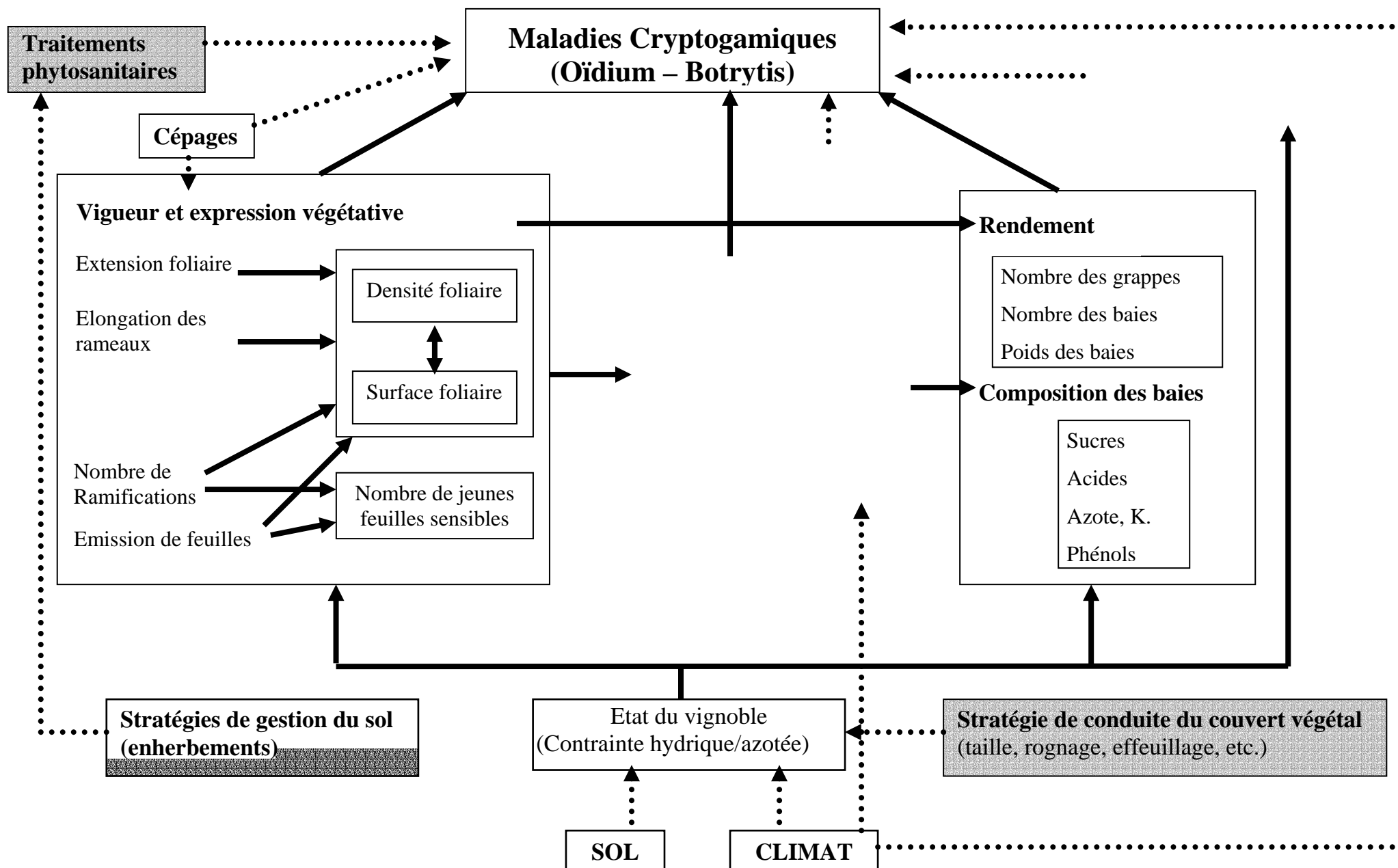


Figure 1.5. Schéma conceptuel des relations entre états de développement de la vigne et sensibilité au botrytis et à l'oïdium. Les lignes pleines correspondent aux processus et variables à étudier expérimentalement. Les lignes pointillées correspondent aux processus et variables non suivis au champ. Cadres en gris représentent les variables de pilotage du système (itinéraire technique)

4. Démarche scientifique

D'après la revue bibliographique présentée on peut conclure que les relations entre les maladies cryptogamiques, notamment l'oïdium et le botrytis, et l'état de croissance du vignoble sont complexes. Pour mieux les comprendre, un schéma conceptuel qui prend en compte la plus part de ces relations est proposé (Figure 1.5). Il en ressort que les effets de la vigueur et de l'expression végétatives de la vigne peuvent agir de façon directe ou indirecte sur les maladies. Pour l'oïdium les effets directs seraient probablement liés à une population de jeunes feuilles sensibles qui serait modifiée dans les vignes moins vigoureuses. Cependant il est possible que la sensibilité des feuilles elle-même soit aussi modifiée. Ce point n'est pas encore très clair. Pour le botrytis les effets directs seraient liés plutôt au développement reproducteur trop intense dans les conditions de grande vigueur. Cette grande production des fruits se traduit par des grappes plus compactes et donc plus sensibles au champignon.

En ce qui concerne les effets indirects, c'est la modification du microclimat qui affecte le plus le développement des maladies. Une expression végétative moins élevée signifie des conditions d'hygrométrie plus faible et une température et une luminosité plus élevées, conditions qui sont peu favorables aux pathogènes. Cependant cette modification de microclimat entraîne aussi des changements dans la composition des baies. Une vigne avec une moindre croissance et des grappes bien illuminées, produira généralement des baies plus sucrées, avec moins d'acidité, moins d'azote et plus des composants phénoliques. Ces baies seront probablement moins sensibles au botrytis. Un deuxième effet indirect à prendre en compte est la modification des stades phénologiques. Dans les vignes vigoureuses les périodes de sensibilité peuvent être rallongées ce qui augmente la durée de la période de sensibilité aux maladies. Enfin, les vignes de faible vigueur se trouvent dans des conditions de fortes contraintes nutritionnelles. Cela peut intensifier les réponses de défense que les plantes mettent en place quand elles sont attaquées par des maladies.

Rares sont les recherches qui ont essayé d'étudier les interactions entre les maladies cryptogamiques et la vigne dans son ensemble. Souvent les effets directs et indirects des différents états de croissance du vignoble sont analysés séparément. Encore plus rares sont les recherches qui ont travaillé ces relations dans des conditions méditerranéennes, souvent très sèches pendant la période estivale.

Pour élucider l'importance de la vigueur et de l'expression végétative dans la relation vigne – pathogène, il faut dans un premier temps **créer des conditions de croissance contrastées**. Pour cela dans cette thèse on a privilégié les techniques de gestion du sol, notamment l'enherbement des inter-rangs. Comme le montre la Figure 1.5 la stratégie de gestion du sol agit sur les ressources du sol (eau et azote) et ainsi sur l'état du vignoble. Cependant dans l'arc viticole méditerranéen les résultats sont encore peu nombreux et récents au sujet de l'enherbement de la vigne. Cela signifie qu'un travail destiné à mieux cerner les conséquences de la présence d'un enherbement et de sa gestion sur la vigueur des rameaux et l'expression végétative doit être réalisé. Cette étude doit également porter sur les conséquences sur l'équilibre végétatif/reproductif de la vigne ainsi que sur le rendement, ses composantes et la composition des baies. Les interactions dans d'autres domaines comme celui des ressources hydriques et azotées ont été étudiées par ailleurs dans le même dispositif expérimental, dans le cadre du travail de thèse de Florian Celette.

Dans un deuxième temps des expérimentations spécifiques ont été mises en place pour **relier des états de croissance très contrastés et deux maladies : le botrytis et l'oïdium**.

Enfin le croisement de cette information expérimentale avec des données obtenues dans la littérature permet de **proposer un schéma théorique sur l'effet des états de**

croissance sur la sensibilité aux deux maladies étudiées. De plus, des créneaux et des indicateurs de sensibilité aux maladies, sont identifiés pour évaluer des systèmes de culture et pour enrichir les règles de décision pour la protection intégrée.

Chapitre II - Matériel et Méthodes

1. Le contexte de la zone viticole languedocienne

1.1. Le climat méditerranéen

La majorité du département de l'Hérault, et notamment la zone de l'étude, si située 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, et autour de 25°C en moyenne durant l'été. 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 abris 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 va cependant jouer 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.

Les précipitations. La moyenne pluviométrique du département de l'Hérault va varier 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*).

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 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 (AgroM), 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 hectare (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 de 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 1m 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. Description du climat de l'expérimentation

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 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 PAR⁶ et le rayonnement global (Rg) sont 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.

⁶ PAR : Photosynthetic Active Radiation – Rayonnement actif pour la photosynthèse

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 dernières années (*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 se révèle particulièrement chaud (été de la « canicule ») et sec. En effet, la parcelle ne reçoit 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 reste 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 révèlent d'une très grande intensité (entre 185 et 270 mm en moins d'une journée). Au total, les précipitations auront été supérieures à 1200 mm au cours de cette saison.

Hiver 2003 à Automne 2004 (Année 2)

Après l'automne particulièrement arrosé de l'année 2003, les précipitations hivernales sont conformes aux moyennes habituelles (environ 250 mm). Le profil de sol est 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 événements 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'est rechargé imparfaitement que jusqu'à 1 m dans la partie désherbée 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 sont 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 de l'expérimentation, un orage important est survenu peu après les vendanges (environ 150 mm entre le 13 et le 14 septembre). Cet orage sera 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 de vérifier son homogénéité. Ainsi, le sol de la parcelle du Larzat est un sol brun calcaire, profond et de texture relativement homogène selon la position dans la parcelle. En moyenne, on compte environ 30% de sable, 35% de limon et 35% d'argile (*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 globalement comprise entre 1,5 et 1,7 g cm⁻³ selon la profondeur.

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 n'a pas montré de carence.

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 la longueur de ceux-ci (*Figure 2.2*). Ainsi, chaque traitement suivi ici 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 une pollution de l'une des modalités par sa voisine. Ces inter-rangs ont été maintenus désherbés 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 semées 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 tondu 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 cela est 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 pente (placette 2) (Figure 2.2).

A partir du début de l'année 2004, une modalité témoin (MT) a été ajoutée au dispositif. Pour cela, une station 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 m³ ha⁻¹ en 2005, 7400 m³ 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 statut hydrique de la vigne maximal entre le débourrement et la vendange. La fertilisation apportée sous la forme d'engrais minéraux (ammonitrates) visait, quant à elle, à éviter toute contrainte azotée de la vigne sur cette même période. Elle s'est composée de 50 UN⁷ (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 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) (Annexe 1). 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.

⁷ UN : Unité d'azote (ou kg d'azote ha⁻¹)

2.3. Le dispositif d'étude du système en stations

L'essentiel du dispositif expérimental porte sur les placettes délimitées au sein des modalités étudiées. C'est bien dans ces placettes que la plupart des mesures expérimentales ont été réalisées. 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. C'est bien pour essayer de prendre en compte, en partie au moins, cette hétérogénéité 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 visent à caractériser les réponses de la vigne aux maladies ainsi que les fonctionnements hydrique et azoté des différents systèmes étudiés (*Tableau 2.1*). Ce dernier point, eau-azote fait partie de la thèse de Florian Celette, et donc ne sera pas abordé dans ce travail. Cependant quelques données sont ici utilisées afin d'explorer les relations vigne-maladies dans des vignes avec différents niveaux de nutrition hydrique et azotée. Les protocoles élaborés pour les différentes mesures présentées dans le *Tableau 2.1* seront plus spécifiquement traités dans chacune des chapitres de résultats.

Chapitre III - Enherbement des vignobles en région méditerranéenne : I- Concurrence pour les ressources et effets sur l'expression végétative et la vigueur de la vigne⁸

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 and 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 and 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 débourrement 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 utilisées (Lal et al. 1991). Le développement d'un couvert spontané peut aussi être géré et utilisé.

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

⁸ Ce chapitre sera soumis sous la forme d'un article scientifique co-signé par Valdés, H., Celette, F. et Gary, C.

la pratique de la non-culture (Dion 1993). Pourtant, les inconvénients de cette pratique 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 and 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 connues (Murisier and Beuret 1986; Ludvigsen 1987; Morlat 1987; Maigre and 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 (meilleur 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. En effet, 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 and 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 atténuer 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 and Dokoozlian 2003) et sa sensibilité à certaines maladies comme le botrytis (Fermaud 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% environs 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 pour chacun des enherbements étudiés. Les différentes mesures effectuées sont réalisées sur une surface délimitée par un cadre métallique de 0,13 m². 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 and Seguin 1994; 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 and 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 adultes 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 généralement isohydrrique, 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 observée entre le potentiel de base mesurée 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. La mesure d'un indice chlorophyllien 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

Le nombre de feuilles a été mesuré sur 20 rameaux par placette 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}). Dans ce chapitre, seules les feuilles des ramifications seront discutées. En effet, le rameau principal étant rogné au début de l'été, il est difficile de mettre en évidence des différences entre les modalités.

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.

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). Cette mesure a été réalisée sur 16 rameaux par placette, 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 localisées 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⁻¹). 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 (Volaire et al. 1998; Norton et al. 2006). 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 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 $\Delta^{13}\text{C}$ mesurées qui sont supérieures à $-22,5\text{‰}$ (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 en 2004 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 $\Delta^{13}\text{C}$ 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 and Katerji 1991; Améglio and 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 g_s très différentes et systématiquement supérieures à, respectivement, $-0,25$ MPa et $0,4 \text{ cm s}^{-1}$. Le $\Delta^{13}\text{C}$ permet également de distinguer invariablement MT des autres placettes avec des valeurs inférieures à $-24,7\text{‰}$. 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 $\Delta^{13}\text{C}$. 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 $\Delta^{13}\text{C}$ 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 and Hori 1979; Zapata et al. 2004), elle est probablement légèrement limitante à cette période là. Par la suite, la fourniture du sol étant très supérieure (fertilisation et minéralisation de l'azote organique favorisée par l'irrigation), la Nsurf% 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*). Si en 2006, la $N_{surf}\%$ de la modalité MT se maintient par la suite 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 ensuite 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.

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 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 désherbée (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 sa 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.

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 and Kliewer 1995b). 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 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 T ha^{-1}) et l'année 2006 (14 T 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 désherbée 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 désherbée 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 désherbée 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 désherbée 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 désherbée 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 désherbée en 2005 mais elle le devient en 2006.

La production de MSG est légèrement inférieure (différence non significative) dans tous 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 de privilégier la croissance végétative en conditions très favorable par rapport à la croissance reproductive (Matthews et al. 1987b; 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 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 (1995b) 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 désherbées 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.

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 and 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 varie 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 débourre 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

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. 2006). 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, est supérieur 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. 2000; 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 observée 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 azoté) et son intensité (Schultz and 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 intéressante 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 and 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 (Emmett et al. 1998). 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 and 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 and 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.

Chapitre IV - Enherbement des vignobles en région méditerranéenne : II- Impact sur l'élaboration du rendement et la qualité des moûts⁹

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 and Anderson 1988; Jackson and Lombard 1993; Van Leeuwen and Seguin 1994).

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 and Sinclair 1976; Kaps and Cahoon 1992), la température (Hale and 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 and Anderson 1988; Van Leeuwen and Seguin 1994). Une contrainte hydrique modérée pendant la période véraison-récolte est également favorable à la qualité des baies (sucres, arômes, anthocyanes) (Coombe and 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 and Seguin 1994). 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

⁹ Ce chapitre sera soumis sous la forme d'un article scientifique co-signé par Celette, F. Valdés, H. et Gary, C.

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 and Saayman 1989; Maigre and 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 and 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 and Saayman 1989; Coombe 1992; Coombe and McCarthy 2000; Rodriguez-Lovelle et al. 2000a; Ojeda et al. 2001; Ojeda et al. 2002; Ollat et al. 2002; Rodriguez-Lovelle and 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 and 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. Elaboration du rendement

Au moment de la vendange, les différentes composantes du rendement ont été mesurées pour chacune des placettes. Cette mesure a été réalisée 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'ITV¹⁰ 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 :

$$SLA = \frac{SF}{MS_{\text{feuille}}}$$

Avec :

SLA : Surface Foliaire Spécifique (cm² g⁻¹)

SF : Surface Foliaire (cm² pl⁻¹)

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

¹⁰ ITV : Centre technique interprofessionnel de la vigne et du vin.

Du fait d'un épaississement 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 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 and 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

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 a été moins bonne (*Figures 3.2 et 3.3*).

4.2. Elaboration 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 l'année 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 and 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. Ceci 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*). Ceci 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 2000a; Pearce and 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 and Considine 1976; Matthews and 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. 1987b; Lindhard and 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

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 compris 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 and 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 and Kliwer 1995b; Acevedo Opazo and Ortega-Farías 2004). De plus, de tels indicateurs peuvent également être variable d'un cépage à l'autre (Freeman et al. 1980; Koundouras et al. 1999; dos Santos et al. 2003; de la Hera et al. 2007).

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 désherbée. 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 Météo*). 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 and Cahoon 1992; Howell 2001; Kliewer and Dokoozlian 2005). Ces chercheurs ont présenté des valeurs qui peuvent aller de 0,6 à 1,7 m² de surface foliaire par kg 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 (Kliewer and Dokoozlian 2005). Toutes les situations observées ont un rapport rendement/PBT considérés 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 modalité d'entretien du sol. Pour autant,

une observation plus attentive des résultats montre que la modalité MR présente un indice rendement/PBT assez stable entre les années, 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 entre 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 and 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 and Saayman 1989; Coombe and 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 ainsi augmentée et la dégradation de l'acide malique est accélérée (Smart 1998; Coombe and McCarthy 2000). Ceci confirme qu'une contrainte hydrique induit une diminution de la teneur en acide malique de la baie (Van Leeuwen and Seguin 1994). 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. 1987b; 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. 2000; 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 and 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. Une 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 de laquelle une carence apparaît, les teneurs observées en 2005 et 2006, notamment dans la modalité MF (entre 50 et 60 mg.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 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 and Saayman 1989; Coombe and 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

correspondait généralement à une acidité totale supérieure (Conradie and 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. 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 and 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 cette relation.

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 and Considine 1976; Morlat and Bodin 2006). Les acides étant formés, pour l'essentielle, 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 la l'intensité de la contrainte hydrique subie par la plante ($r<-0,6$) (Van Leeuwen and Seguin 1994). 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 and 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 semblent 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 et 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 supérieures 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

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 influence 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 and 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 and Considine 1976; Matthews et al. 1987b; 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 and 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 and 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 and 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 semble induire 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 and 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 hL ha⁻¹, soit environ 3,7 kg 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 désherbée.

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 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 induites 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 and Holz 2001; Morlat and 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 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.

Chapitre V - Lower vegetative and reproductive growth in grapevine correlates to reduced grey mold incidence¹¹

Héctor Valdés-Gómez¹, Marc Fermaud², Jean Roudet², Agnès Calonnec², Christian Gary¹³

¹ INRA, UMR SYSTEM, 2 place Pierre Viala, 34360 Montpellier cedex 2, France

² INRA, UMR Santé Végétale, 33183, Villenave d'Ornon cedex, France

1. Abstract

The hypothesis that grey mold incidence would be positively correlated to grapevine canopy development was confirmed over a period of three years (2004-06) on Aranel cultivar in an experimental vineyard near Montpellier, France. Various levels of vine growth were generated by implementing different management policies such as irrigation and cover cropping. Grey mold incidence was assessed at harvest, together with various sets of variables linked with canopy microclimate, shoot vigour, vine capacity, cluster architecture, yield components and fruit composition. Significant positive relationships were established between disease incidence and key variables of shoot vigour and vine capacity: total leaf number, leaf dry matter, leaf layer number, leaf area per m of row, pruning weight and nitrogen accumulation. These relationships were established in the context of an interaction between (micro)climate and grapevine vegetative growth. *B. cinerea* developed in all experimental plots in 2004 because climatic and microclimatic conditions were conducive to grey mold. The main climatic and microclimatic variables identified as favourable were: precipitation, duration of relative humidity > 90% in the canopy and low potential evapotranspiration. However, in 2005 and 2006, under dry summer conditions, disease developed only in the most vigorous vines which were both irrigated and fertilized. These vines showed a very high canopy growth, very compact clusters and a delayed fruit maturity. This evidenced that unfavourable climatic conditions for the disease development can be counterbalanced by conditions of high vine growth and associated canopy and cluster features.

2. Keywords

Vitis vinifera, multivariate analysis, vigour, vine capacity, bunch compactness, Botrytis bunch rot, Botrytis cinerea

3. Introduction

A positive relationship between grapevine growth and susceptibility to fungal pathogens has often been mentioned by vinegrowers, pathologists and extension services (De la Rocque 2002; Goulet et al. 2006). Yet few studies have investigated thoroughly such a crop-pathogen interaction, in particular concerning *Botrytis cinerea* Pers.:Fr. (teleomorph: *Botryotinia fuckeliana* (de Bary) Whetzel). This cosmopolitan filamentous fungus and necrotrophic pathogen (Govrin and Levine 2000; Jarvis 1980), causes one of

¹¹ Article soumis en juin 2007 à la revue Crop Protection

the most serious diseases of aerial organs of grapevine (*Vitis vinifera*, L.), grey mold (or Botrytis bunch rot). The disease can drastically reduce both yield at harvest and wine quality (Ribéreau-Gayon et al. 1980; Bulit and Dubos 1988). The epidemiological development depends on the genetic structure of the *B. cinerea* population (Beever and Weeds 2004; Martinez et al. 2005), but it is mainly driven by various key factors, such as berry susceptibility, cluster architecture and (micro)climatic conditions (Thomas et al. 1988; English et al. 1989; Vail and Marois 1991; Smithyman et al. 1998; Fermaud et al. 2001; Pieri and Fermaud 2005). These factors may affect disease expression at the end of the season, but also the various possible infection pathways occurring from bloom onwards (Elmer and Michailides 2004). Resistance to *B. cinerea* in grape berries has been associated with constitutive elements as well as induced factors following stress or infection (Van Baarlen et al. 2004). Cluster compactness increases berry susceptibility to *B. cinerea* by affecting the microclimate and the thickness and wax content of the berry cuticle (Marois et al. 1986; Vail and Marois 1991; Percival et al. 1993; Fermaud et al. 2001). Furthermore, the number and thickness of epidermal and hypodermal cell layers and the rarity of pores have recently been correlated positively with resistance to *B. cinerea* (Mlikota et al. 2003). As for berry skin composition, water-soluble pectic and phenolic compounds linked to the parietal structures have been identified as indicators of susceptibility and resistance to the pathogen, respectively (Chenet 1997; Dubos and Roudet 2003). Similar effects on *B. cinerea* growth have been reported for phenolic compounds and sugars, as stimulatory substances, when extracted from berry exudates or inner parts of the fruit (Padgett and Morrison 1990; Vercesi et al. 1997).

Some studies of grape quality have incidentally shown interactions between grey mold development and vegetative and reproductive growth patterns of grapevine (Reynolds and Wardle 1994; Intrieri et al. 2001; Morlat and Bodin 2006). First, in studies of shoot pruning strategies, it has been evidenced significant positive effects of canopy density and cluster architecture on grey mold severity at harvest (Smithyman et al. 1997; Intrieri et al. 2001). Second, in several long-term field experiments, *B. cinerea* infections of grapes were enhanced by high nitrogen fertilization (Conradie and Saayman 1989; Kannenberg 1992; Fox 1993; Keller et al. 2001). This could result from the greater vine canopy development and/or the increased yield associated with improved fruit set and more compact and susceptible clusters (Keller et al. 2001; Vail and Marois 1991). Third, a study of vineyards differing in soil depth, clay content and water availability, showed that grey mold incidence was positively correlated with yield, cane pruning weight and foliage density in the fruit zone (Bodin and Morlat 2006, Morlat and Bodin 2006).

In most of previous studies, one of the main potential mechanisms suggested was that vigorous vines may be associated with a microclimate more conducive to the disease. This was further investigated in leaf removal experiments (Gubler et al. 1987; Koblet 1987; English et al. 1989; Gubler et al. 1991; Zoecklein et al. 1992; Percival et al. 1994). Microclimates of canopies in which leaves had been removed or not, differed by a set of variables altogether, i.e. temperature, vapour pressure, wind speed and leaf wetness. When different training systems were compared, the effect of differential wind penetration within the canopy was emphasized (Savage and Sall 1984) as well as the evaporative potential depending on the number of leaf layers within the canopy (English et al. 1990). Penetration of solar radiation into the canopy has also been suggested as an important factor (Savage and Sall 1984; Fermaud et al. 2001).

The notion of vegetative vigour is often used for characterizing the vine canopy growth and development (Dokoozlian et al. 1995b). It has been defined as the rate of vegetative biomass accumulation (Winkler et al. 1974) as well as the intensity of vegetative growth in terms of respiration, proteosynthesis, growth rates of shoots and vines

(Champagnol 1984). More recently, the definition has been focused on the shoot growth by evaluating the rate of leaf appearance, shoot extension, increase in cane diameter or weight (Reynolds et al. 1994; Freeman et al. 1998; Rives 2000). On the other hand, “vine capacity” has been proposed to characterize the vegetative and reproductive biomass produced by the whole vine during the growing season (Champagnol 1984; Dokoozlian et al. 1995a; Freeman et al. 1998). Various direct and indirect methods have been proposed for estimating vine capacity: leaf area per unit row length (Dokoozlian et al. 1995a), leaf area density estimated by the point quadrat method (Smart 1988), total pruning weight.

This experiment was implemented in the context of complex relationships between grey mold expression, climate and microclimate, canopy development and associated morphological and physiological features of grape clusters and berries. Our first objective was to identify the main variables characterizing grapevine vegetative and reproductive growth which were best correlated with grey mold incidence at harvest. For some variables, significant relationships showing a possible threshold effect were further investigated. The second objective was to show possible interactions between some of the major factors affecting grey mold (particularly, climate and microclimate, vine vegetative growth, fruit composition) and to formulate hypotheses or how the factor effects may be graded according to disease expression. To this end, several crop management policies were applied, including irrigation and cover cropping, to increase or decrease canopy development at one experimental site.

4. Materials and Methods

4.1. Climate and vineyard management

The research was carried out from 2004 to 2006 on an experimental vineyard located near Montpellier, France (43°31' N - 3°51' E). The area is characterized by a typical Mediterranean climate with an annual rainfall of about 749 mm and an annual water deficit (PETp – rainfall) of about 174 mm (1975-2005). The soil was deep and homogeneous, classified as clay loam. The vines (*Vitis vinifera* L. cv Aranel grafted onto Fercal rootstock) were planted in 1998 with a density of 3333 vines/ha (2.5 m x 1.2 m) and common commercial practices were carried out to maintain the vineyard. Vines were trained on a vertical shoot positioned trellis with two pairs of movable foliage wires, a head height of 1 m, and a canopy height of 1.9 m. The rows were oriented W-NW / E-SE. In the entire experimental plot, shoots were topped and trimmed twice in 2004 and once in 2005 and 2006, according to farmer usual practices. No fungicide was applied to control *B. cinerea* along the period of experiment.

4.2. Experimental design and cropping practices

In order to create different levels of canopy development, two types of cropping systems were used: i) chemical weed control with glyphosate (Roundup Bio Force □, 2 %) all over the soil surface (W treatment), ii) perennial cover crop sown in 2002 with a mixture of tall fescue (*Festuca arundinacea* Shreb) and ray grass (*Lolium perenne* L.) in every inter-row (C treatment) (accounting for about 60 % of the total area, the soil under vine rows being under chemical weed control). Every treatment was repeated twice in a two-block design. The two blocks differed by their slope: ca. 0% in block 1 and ca. 2 % in block 2. Each unit plot consisted of a total of 180 vines. In 2005 and 2006, a new treatment was added in block 1 to generate higher vegetative growth (I treatment). This treatment was irrigated once a week, from budbreak to harvest, by a drip irrigation system (3400 m³/ha in 2005, 7400 m³/ha in 2006), fertilized with nitrogen (80 Kg N/ha in 2005, 120 Kg N/ha in 2006) and under chemical weed control.

4.3. Measurements

For every variable, the corresponding abbreviation and sampling procedure are listed in Table 5.1.

4.3.1. Grey mold incidence

All clusters from 12 vines per plot (ca. 180-200 clusters) were observed at commercial ripeness stage (September 3 in 2004, August 30 in 2005, August 29 in 2006). In every bunch sampled, grey mold severity was assessed visually on the outer surface of all observable berries (% of the area rotted and/or sporulating). However, grey mold incidence only was analyzed because the severity was too low under the experimental conditions. The incidence was calculated as the percentage of infected clusters, i.e. showing at least one rotten berry with typical symptoms. In 2004, two samplings methods were tested: i) 10 randomly selected vines within each unit plot, and ii) one randomly selected “block of vines” (5 neighbour vines on 2 adjacent rows) within each unit plot. These methods were compared using the Chi-square test based on the number of vines according to classes of number of infected clusters. The two methods were not differentiated at $P = 0.05$ (Table

Lower vegetative and reproductive growth in grapevine correlates to reduced - 65 - grey mold incidence

5.2). Thus, the second “block of vines” method was used to assess grey mold in 2005 and 2006 on the basis of 12 vines sampled (6 neighbour vines on 2 adjacent rows). Those vines, named “reference vines” throughout the paper, were also used for other measurements (*Table 5.1*).

4.3.2. *Shoot vigour*

Detailed shoot and leaf measurements were taken every three weeks from budbreak to maturity and the following variables were calculated: i) primary shoot length (PL), ii) primary shoot leaf number (PLN) (total leaf number directly born on the primary shoot), iii) lateral secondary and tertiary shoot number (LSN), iv) lateral shoot length (LL), and v) lateral shoot leaf number (LSLN) (total leaf number directly born on secondary and tertiary shoots). From these observations total leaf number per shoot (TLN) and total shoot length (TL) per vine were calculated. Under the cropping system conditions (vertically trellis-training, shoot positioning and cane pruning and shoot thinning) the shoot vigour can be considered, in theory, as the same for all shoots in the vine. Therefore, vine capacity at the end of the season corresponded to the direct result of shoot vigour multiplied by the number of shoots.

4.3.3. *Vine capacity*

In 2004 and 2005, leaf area index (LAI), corresponding to the leaf area (m²) per unit ground surface area (m²), was calculated according to Siegfried et al. (2007) then expressed in the present study by the leaf area per meter of row length (LA/m). Individual leaf area of collected shoots (see *Table 5.1*) was assessed by digital photography processed with the Ad Oculos software version 3.1 (DBS GmbH, Germany) and mean leaf area per shoot, per vine and per unit ground surface area could be calculated. From 2004 to 2006, LAI was also estimated according to Ollat et al. (1998) using LAI-2000 (LI-COR Incorporated, Lincoln, Nebraska, USA) from light transmission measurements (carried out on 12 m row per unit plot). A good correlation was observed between estimated values from direct measurements of leaf area and those from measurements of light transmission. And in 2006 only LAI-2000 measurements were used. Leaf area density (LAD) was calculated using values of LA/m and values of height and thickness of the canopy.

Shoots collected for leaf area measurements were also used for estimating dry weights of leaves, stems and fruits. All material collected was dried in an oven at 60 C until no further loss of moisture could be detected (from 72 to 98 h). Total leaf dry matter (LDM), total stem dry matter (SDM), total fruit dry matter (FDM) and total dry matter (leaves, stems and fruits, TDM) on a per vine and per surface area bases were then calculated. A subsample of each tissue was digested by adding sulfuric acid and potassium sulfate-catalyst mixture to determine total N concentration (Kjeldahl method). Nitrogen accumulation (N-TDM) by the plant was calculated by multiplying weights of leaf, stem and fruit tissues by the corresponding N concentrations.

The thickness and density of foliage were assessed in the cluster and intermediate (50 cm above clusters) zones of the canopy in the reference vines by using the point quadrat method (Smart 1988). A thin, 1.3 m long, metal rod was introduced horizontally through the foliage and the number of contacts with leaves was recorded. Mean leaf layer number (LLN) and percentage of canopy gaps (CG) for the whole canopy (average between measurements in the cluster and intermediate zones) were calculated as the average number of touched leaves and gaps (Smart 1988).

In December 2004, 2005 and November 2006, reference vines were hand pruned and the collected canes were weighted immediately to assess pruning weight (PW). In the meantime, trunk diameter at 15 and 45 cm above ground level was measured and the two values were averaged. Then, the difference between two consecutive years was calculated and named delta trunk diameter (DTD).

4.3.4. Cluster architecture and yield components

The cluster architecture was characterized by using two compactness indices as according to Fermaud (1998). The first index (CI) was obtained by dividing cluster weight by rachis length (estimated as the sum of lengths of the main cluster axis and of its 1st ramification). The second index (CII) corresponded to the number of berries divided by rachis length, as above defined. The clusters sampled to calculate CI and CII were also used to assess mean weight of 100 berries and mean berry number per cluster. In 2004 and 2005, fruit set (FS) was also assessed and percent of berry set calculated by dividing berry number by flower number (Casteran et al. 1981). At last, vine yield (VY) and mean bunch weight (BW) were measured at harvest on the reference vines.

4.3.5. Fruit composition

Standard measurements on berry juice including sugar concentration (SC, °Brix) estimated using a hand refractometer, titrable acidity (TA), pH, assimilable nitrogen (Nas) and potassium (K) were carried out as described by Iland et al. (2000) on reference vines. Furthermore, analyses of pectic and phenolic compounds were performed to characterize biochemically berry skin susceptibility to *B. cinerea* (Chenet 1997). Beforehand, berries were peeled to obtain 100 g of skin from which components not soluble in alcohol (NSA fraction) were separated by a fractional process (Chenet, 1997). Pectic compounds soluble in water (PSW) were extracted from the NSA fraction by centrifugation (10000 g) for 30 mn of 0.5 g of the NSA fraction diluted in 25 mL of distilled water. Concentration in uronic acids was measured by the colorimetric method using metahydroxyphenylphenol, as described by Robertson (1979). A UV-visible spectrophotometer (UV-1605, Shimadzu) was operated at 520 nm to assess optical density. Results were expressed in mg of galacturonic acid per g of NSA fraction (Chenet 1997). Phenolic compounds (PC), linked to the parietal structures, were extracted from the NSA fraction using NaOH (1M) at 70°C (Starck et al. 1988) and measured by colorimetry by using the above-mentioned spectrophotometer at 725 nm according to Chenet (1997). Results were expressed in mg of gäiacol per g of NSA fraction.

4.3.6. Canopy microclimate

On the reference vines, the canopy air temperature (Tc), canopy air relative humidity (RHc) and berry temperature (Tb) were measured throughout the growing season in 2004, 2005 and 2006 on all plots, except in the I treatment in 2005 and 2006. Two types of variables were calculated from this information: the daily average and the number of hours over a threshold (30 °C for Tc and Tb and 95% for RHc). Tc and RHc measurements were collected using Vaisala HMP 35C probes (Campbell Sci., Logan, UT) that were set in the fruit zone within the canopy (two sensors per plot). Berry temperature was measured from veraison to harvest with thermocouples, inserted in berries and distributed at the top, centre and bottom of the clusters; half the thermocouples were distributed on each side of the rows. These measurements besides global radiation and wind speed (collected by the

weather station over the vineyard) were used to calculate potential evapotranspiration (PET) and vapour pressure deficit (VPD) in the plots. All these sensors were sampled at 20 second intervals and mean values were recorded on an hourly basis using CR10X dataloggers (Campbell Sci. Logan, UT). As an indicator of the microclimate-soil interaction, the predawn leaf water potential (PLWP) was measured at veraison and harvest with the pressure chamber technique (Scholander et al. 1965) on the reference vines. Lastly, in 2005, in order to favor grey mold, water was sprayed in the fruit zone in all plots, on ten vines per plot (five neighbour vines on two adjacent rows). This started in the afternoon ten days before harvest and was repeated every two hours along the following day. To this end 15 L of water were sprayed per plot.

4.4. Analysis of data

Data analysis was conducted with StatBox software (Version 6.23, Grimmer Logiciels, Paris). The Chi-Square test was used to compare the two sampling methods tested in 2004 (Tab 2). The incidence data was analyzed using ANOVA (2-block design). In 2004, the 2 main factors were the cropping system (C vs W) and the sampling method. In 2005, the water spraying and the vine were the 2 main factors tested on the basis of 2 blocks in the ANOVA which were the irrigation unit plot (I) and the chemical weed control unit plot (W1).

Climate and microclimate variables were submitted to principal component analysis (PCA) to identify the main relationships among them and to choose the ones that could explain better grey mold incidence in our conditions. These variables were calculated for three different decades, i.e. the one just before veraison (“v”), and the two consecutive ones within the 20 days before harvest (“h” and “p”, successively).

The relationships with grey mold incidence and explanatory variables (shoot vigour, vine capacity, cluster architecture, yield components and fruit composition) were explored by using correlations and linear regressions. Data of disease incidence were fitted to explanatory variables by linear regression analysis (only data with an incidence higher than 0 % being considered). Variables with a significant effect were selected based on the Pearson’s correlation coefficient threshold value at $P = 0.05$ of 0.75 and 0.88 for 5 and 3 degrees of freedom, respectively. In order to avoid redundancy, when the Pearson’s correlation coefficient was higher than 0.95 between two variables within a set of explanatory variables, one variable only was kept. From the previous regression and correlation analyses, a sub-set of variables was selected for principal component analysis (PCA) to study some aggregate relationships. In PCA, grey mold incidence was always analyzed as a supplementary variable; the explanatory variables being the active ones.

5. Results

5.1. Climatic conditions

From budbreak to harvest, the mean air temperature and potential evapotranspiration (between 10 to 30°C and 1 to 7 mm/day, respectively) were rather similar in 2005 and 2006 and slightly higher than in 2004. Contrariwise, the amount and distribution of precipitations differed a lot among the three years. From September 2003 to March 2004 (autum-winter period), rainfall reached a total of 1483 mm when compared to 543 mm and 604 mm for the same period in 2004/05 and 2005/06, respectively. The soil water profiles were then fully refilled before vine budbreak in 2004, but not in 2005 and 2006 (data not shown). During the spring - summer period, the precipitation regime also differed: in 2004,

Lower vegetative and reproductive growth in grapevine correlates to reduced - 68 - grey mold incidence

2005 and 2006, rainfall reached a total of 263 mm, 187 mm and 40 mm, respectively. This difference in available water resulted in a marked lower growth of grapevine in all non-irrigated plots in 2005 and 2006 compared to 2004. From veraison to harvest, the rainfall (47 mm) was higher in 2004, corresponding to more conducive conditions for the disease, than in 2005 and 2006 (less than 20 mm).

5.2. Grey mold development

In 2004, the cropping system influenced significantly grey mold incidence (*Table 5.3*). The vines with perennial cover crop showed four times less disease than vines with chemical weed control. Grey mold incidence was also significantly influenced by the block effect. Both the effects of the sampling method and interaction between cropping system and sampling method were not significant.

In 2005, a year less conducive to grey mold, the disease developed only in the irrigated plot (I). Water spraying over fruit zone allowed grey mold symptoms to develop in two unit plots only, I and W1 (weed control in block 1). In these plots and in the absence of any vine effect (*Table 5.4*), grey mold incidence was significantly increased by the water spraying treatment, i.e. from 13.9 % to 29.2 % in the irrigation plot and from 0 % to 2.3 % in the W1 plot.

5.3. Climate, microclimatic conditions and grey mold incidence

The principal components analysis (PCA), based on climatic and microclimatic active variables, resulted in two first main composite axes representing 59.3% and 24.3% of the total variance in the data, respectively (*Figure 5.1*). The first factorial axis was mostly related to thermal and evaporative phenomena comprising mostly 3 variables: PET, VPD and $T_c > 30$ which contributed positively to the axis at the rate of 26.5%, 24.8%, and 21.5%, respectively. Precipitations also contributed to the first axis, but negatively and to a lesser extent (14.7%). The second axis corresponded mostly to the water status of vine, comprising PLWP (62.9%) but also to a lesser extent $RH > 90\%$ (25.4%). The two last decades before harvest in 2004 were characterized by negative coordinate values on axis 1 and positive ones on axis 2. They corresponded to humid weather conditions (associated with precipitations) with temperatures exceeding rarely 30°C (less than 16 cumulated hours), resulting in a lower potential evapotranspiration (< 40 mm). Such conditions were conducive to grey mold development, as shown by the close location of this supplementary variable. The decade just before veraison was characterized by dry and hot climatic conditions, particularly in 2006, but also by a higher predawn leaf water potential (positive coordinate values on both axes 1 and 2). The two last decades in 2005 and 2006 were located intermediately according to the first axis and showed low predawn leaf water potential. Lastly, within each decade x year combination, the experimental treatments were located differentially along the second axis, showing treatment “C” (cover crop) in block 2 with the lowest PLWP, indicating smallest soil water potential in the root zone.

5.4. Shoot vigour, vine capacity and grey mold incidence

All variables of shoot vigour (first row in *Figure 5.2*) and 80% of the variables of vine capacity (second and third rows in *Figure 5.2*) were significantly ($P < 0.05$) correlated with disease incidence. Among them, three variables of shoot vigour, TLN, LSLN, LSN, and seven variables of vine capacity LLN, PW, N-TDM, LA/m, TDM, LDM and SDM were highly correlated with grey mold incidence ($P < 0.01$). Some of these variables showed a

marked threshold effect characterized by a value over which the disease incidence increased linearly: LLN, PW, N-TDM, LA/m and LAD.

5.5. Cluster architecture, yield components, fruit composition and grey mold incidence

Correlations between grey mold incidence and variables representative of cluster structure, yield components and fruit composition (*Figure 5.3*) were, in general, poorer than with vegetative variables. Three variables were highly significantly correlated to grey mold ($P < 0.01$): BW, FDM and TA, and three other were significantly correlated at $P < 0.05$: BN, Nas and SC/TA ratio. Yield, although anticipated as an important variable linked positively to the disease, was not significantly correlated to grey mold incidence.

5.6. Interactions between climatic and vegetative growth variables

Relationships and interactions among climatic and vegetative growth variables were tested using a principal component analysis (PCA). According to criteria previously described, six vegetative growth variables were selected for the analysis and represented different aspects of shoot vigour and vine capacity: TLN and LDM were related to an amount of organs, LLN and LA/m to foliage density, N-TDM to plant composition and PW as a global indicator representing the whole vegetative growth during the season. The first three main factorial axes accounted for 51.8%, 29.8% and 9.4% of the total variance, respectively (*Figure 5.4*). Strong positive correlations were shown between all vegetative growth variables tested as active ones (TLN, LA/m, N-TDM and PW) or supplementary ones (LDM, LLN). These variables contributed to the first main axis, characterized then as a “vegetative growth axis”, at the rates of: N-TDM (19.1%), LAI/m (18.7%), PW (16.5%) and TLN (15.5%). The second main axis was based on strong contrasts between climatic variables: on one hand, PET, $T > 30^{\circ}\text{C}$ and, to a lesser extent, PLWP contributing positively at the rates of 26.5% and 23.7% and 13.8%, respectively; on the other hand, precipitations (PP) contributed negatively to the axis definition (22.1%). On the PCA diagram based on axes 1 and 2, experimental treatments were located differentially according to the period considered in the season: harvest data (h) with negative coordinate values on axis 2 and veraison data (v) mostly with positive ones. This corresponded to higher PET and warmer conditions earlier in the season contrasting with rainfall associated with the later period near harvest. The years were differentiated along the first axis: 2004 was characterized by individuals shifted forward higher positive coordinate values on axis 1 indicating a higher vegetative growth than in 2005 and 2006. For every year x period combination, the experimental treatments were also differentiated, i.e. treatment W (weed control) resulted in a higher vegetative development and higher PLWP than in treatment C (cover crop). In this diagram, grey mold incidence was located close to $\text{RHc} > 90\%$ and associated with a high vegetative growth of the grapevine as indicated by close active variables such as N-TDM and LA/m. Lastly, by using the third PCA axis which comprised $\text{RHc} > 90\%$ (62.8%) and PLWP (16%), the PCA diagram with axes 1 and 3 showed that grey mold incidence was close to LLN and LA/m, but also to PLWP (data not shown).

5.7. Interactions between cluster architecture, yield components and vegetative growth variables

Interrelations among cluster architecture, yield components and vegetative growth variables were investigated by PCA (*Figure 5.5*). As previously, six variables were

Lower vegetative and reproductive growth in grapevine correlates to reduced - 70 - grey mold incidence

selected beforehand: BW, BN and FDM for yield and cluster architecture and Nas, SC/TA, and TA characterizing fruit composition and maturity. The first two main factorial axes accounted for 87% and 7.9% of the total variance, respectively. PCA showed strong positive correlations between all the active vegetative growth variables which contributed to the first axis as follows: PW (13.9%), LLN (13.8%), N-TDM (13.7%) and TLN (13.2%). The first axis included also fruit characteristics which were positively associated with an increased vegetative growth: two variables of grape cluster architecture, BN (13.0%) and BW (12.4%) and one of fruit composition, Nas (12.3%). The second main axis was representative of the maturity level because it comprised mostly SC/AT (72.5%) and, to a lesser extent, BW (16.4%). On the PCA diagram based on axes 1 and 2, individuals were differentiated along the first axis. Treatment C, mostly with negative coordinate values on axis 1, led to a reduced vegetative growth; treatment W was located intermediately and, as expected, treatment I shifted forward higher positive coordinate values on axis 1 indicating the highest vegetative growth in 2005 and 2006. In this diagram, grey mold incidence was located close to active variables such as TLN and N-TDM. Lastly, it was noticeable that grey mold incidence, being close to TA, was located in opposition to high values of SC/TA, the maturity index. This indicated the relative minor importance of this fruit composition variable in comparison with the main variables of vegetative growth.

5.8. Threshold effect in the relationship between canopy development and grey mold incidence, example of pruning weight.

To identify a possible threshold effect associated with the canopy vegetative development from which the disease can develop, pruning weight was plotted against grey mold incidence (*Figure 5.6*). From our data, a PW value of ca 0.4 kg/m was a possible threshold value for the cropping system and region considered. Data from the literature from various regions and cropping systems confirmed that a threshold effect may also be effective in a more general context, but the corresponding value may vary with the region and/or cultivar. For example, for Chasselas cultivar in Switzerland (Murisier and Zufferey 1999), the minimal pruning weight value from which botrytis developed would be ca. 0.6 kg/m. In more humid regions and with more susceptible cultivars (Reynolds et al. 1994), grey mold was more severe than under our conditions and the threshold might be lower. However, from the PW threshold upwards, high variations in grey mold incidence were observed in the present study as in the literature.

6. Discussion

In this study, the hypothesis was tested that grapevine canopy development would be correlated positively to grey mold incidence and various variables have been investigated as possible explanatory ones. Under our experimental conditions, the primary risk factor leading to Botrytis development was identified as the microclimatic and climatic conditions. In 2004, the disease developed in all plots because of climatic conditions conducive to the disease during the two decades before harvest. However, in 2005 and 2006, under dry summer conditions, disease developed only in the most vigorous vines which were both irrigated and fertilized. Five climatic and microclimatic variables turned out to be of prime importance: RHc>90% in the canopy, Tc>30°C, precipitation, potential evapotranspiration and predawn leaf water potential. In previous studies, these variables

Lower vegetative and reproductive growth in grapevine correlates to reduced - 71 - grey mold incidence

have also been highlighted consistently (Jarvis 1980; Savage and Sall 1984; Thomas et al. 1988; English et al. 1989; English et al. 1990; Fermaud et al. 2001).

The second important factor involved in *Botrytis* development was vine vegetative growth and canopy development which interacted with climate and microclimate. In 2004, under favourable climatic conditions for the disease, higher shoot vigour and capacity were associated with a significant increase in grey mold incidence at harvest. The C and W treatments were significantly differentiated, but this was not observed in 2005 and 2006. Thus, the occurrence of an interaction between climate and vine growth has been evidenced. This interaction was substantiated by the results in grapes which were water sprayed in 2005. This treatment allowed the disease to develop and to increase significantly in incidence in two unit plots only (I and W1), which were those showing the most vigorous vines. In less vigorous vines (W2, C1 and C2 experimental plots), no disease developed even following the water spraying. Such an interaction effect has also been reported in studies showing a significant increase in disease incidence following high nitrogen fertilization, but this was particularly noticeable in wet seasons conducive to grey mold (Conradie and Saayman 1989; Kannenberg 1992; Fox 1993; Keller et al. 2001). Higher vine growth and shoot vigour were then measured along with higher grey mold intensity at harvest. Similarly, in the present study, the following key variables of shoot vigour and vine capacity were identified on the basis of a high and positive correlation with the final disease incidence: i) the total leaf number, that is a total amount of organs, ii) the leaf area, directly related to foliage density, iii) the pruning weight, as a more global indicator representing the whole vegetative growth during the season and, iv) the nitrogen accumulation related to plant composition. The importance of such variables linked to foliage density and/or cane pruning weight has also been stressed under production conditions (Bodin and Morlat 2006; Morlat and Bodin 2006). The significant role of foliar density was also demonstrated experimentally by showing that removal of leaves in the cluster area after fruit set decreased grey mold intensity (Gubler et al. 1987; Koblet 1987; Gubler et al. 1991; Zoecklein et al. 1992; Percival et al. 1994).

The interaction between climate and vegetative growth of grapevines can also account for differences in canopy microclimates. From our results, predawn leaf water potential and relative humidity inside of the canopy (RH_c>90%) increased as vines were more vigorous (W vs C in 2004). In leaf removal experiments, vines showing a higher foliar density were also characterized by microclimates more conducive to *B. cinerea* and differential wind penetration according to foliar density may affect significantly the microclimate (English et al. 1989). In the present trial, in 2005 and 2006 under dry summer conditions, the disease developed, only in the most vigorous vines which were both irrigated and fertilized. This evidenced that unfavourable climatic conditions for the disease development can be counterbalanced by conditions of high vine growth and associated canopy and cluster features. These most vigorous vines showed a very dense canopy (leaf layer number > 3.7), more compact clusters (bunch weight > 400 g.) and delayed fruit maturity (acidity > 5 g/L). These data agree with other studies showing that high nitrogen fertilization from near 100 kg/ha/yr upwards led to a significant increase in disease incidence (Conradie and Saayman 1989; Kannenberg 1992; Fox 1993; Keller et al. 2001). Higher N fertilization delayed maturity and increased yield as well as total N concentration in the must at harvest (Spayd et al. 1994; Keller et al. 2001). Nitrogen supply favours shoot growth over root growth (Keller 2005) and higher shoot vigour and vine capacity have also been measured along with increased grey mold at harvest (Kannenberg 1992; Fox 1993; Myburgh 2005). However, a special attention is necessary for explaining the irrigation/fertilization effect on the disease. It can then be questioned to which extent the microclimatic conditions in the cluster area were affected by drip irrigation associated

with fertilization in our study. In Figure 5.6, grey mold has been shown to develop systematically in experiments using irrigated vines, whatever the pruning weight value. Thus, further research should be conducted to quantify the possible microclimatic changes in the cluster environment under such conditions and to dissociate direct effects of vine growth from indirect ones due to microclimatic modifications.

As regards yield components and cluster architecture, bunch weight was positively and significantly correlated with grey mold incidence and was more relevant, as possible explanatory variable, than yield. This may be due to the fact that the primary determinant of differences in yield is the bunch weight, followed closely by bunch number (Considine 2004). The first variable is affected by seasonal changes in vine growth (particularly in shoot vigour), whereas the latter is not (Rives 2000; Considine 2004). In our conditions, every vine was pruned and thinned to 12 shoots per plant resulting in similar bunch number whatever the treatment. Furthermore, bunch weight has been shown to make the largest contribution to cluster compactness among various cluster measurements and can be then considered as a key morphological feature increasing *B. cinerea* infection and mycelial colonisation in grape clusters (Vail and Marois 1991; Smithyman et al. 1998; Fermaud et al. 2001). Bunch weight was even more suitable than both compactness indices specifically developed (CI and CII). Lastly, fruit dry matter was correlated significantly with disease incidence and this may result from the close and expected correlation ($r = 0.71$) between this variable and bunch weight.

Concerning fruit composition, disease incidence was significantly and negatively correlated with the level of fruit maturity, as indicated by the sugar/titrable acidity ratio. Similar negative relationships have been established with the berry content in reducing sugars or soluble solids under very different conditions (Smithyman et al. 1998; Morlat and Bodin 2006). Titrable acidity, considered separately, was also highly correlated, and could then be used as a maturity index of interest as regards grey mold expression. However, such field relationships conflict with laboratory results showing that sugars extracted from the grape berry or from exudates are stimulatory substances on *B. cinerea* growth and that tartaric and malic acids are inhibitory substances (Padgett and Morrison 1990; Vercesi et al., 1997). This discrepancy may result from the facts that i) the maturity level of grape berries is generally negatively correlated with the grape yield (Huglin 1986; Morlat and Bodin 2006) and with the grape bunch weight (Smithyman et al. 1998) and ii) higher grape yield and cluster weight (compactness) are associated with vigorous vines and favourable microclimatic conditions for *B. cinerea* (Vail and Marois 1991). Thus, the influence of the berry composition at harvest must be put back in the context of the whole growth and development process of grapevine as well as microclimatic conditions. Lastly, although anticipated as possible key measurements both variables characterizing biochemically the berry skin susceptibility (pectic and phenolic compounds) were not correlated to the disease intensity. These variables were developed by using sauvignon and arniloba cultivars cultivated in Bordeaux vineyards (Chenet 1997). They may not be suitable under different conditions of region and/or cultivar (aranel grapevines in the present study).

All previous variables we have highlighted may be considered as possible explanatory variables when assessed at harvest or later in the season. Some of them could be possibly used as early indices characterizing the vineyard susceptibility to the disease if assessed before harvest, e.g. at veraison. This would require stability or a known and reproducible evolution of measured values between these two stages. The following three key variables related to foliar density, leaf area, total leaf number and leaf layer number, showed a very limited evolution at the end of the season, because fruit is then the main sink (Howell 2001). Only very dry conditions leading to early vine defoliation could alter the stability of

these key variables. Lastly, the genericity of the results may be questioned with reference to the specificity of our experimental conditions and cropping system. The first limitation to consider is the dry summer conditions in the Mediterranean region that limits grey mold development. Second, the vertical shoot positioned trellis system determines a relatively high foliage density compared with divided trellis system that produces a less dense canopy. The observed effect of canopy development on disease expression followed the same trend in other grapevine cropping systems as shown in Figure 5.6. On the basis of the pruning weight variable, a threshold effect, from which grey mold develops, was noticeable and can be considered as a generic result. However, the threshold value may change from one cultivar to the next and from the threshold upwards, disease expression at harvest is highly dependent on weather and microclimate conditions and cultural practices, particularly irrigation and fertilization. In this context, further investigation should be conducted to better understand such relationships, and associated variations, in order to develop management and IPM strategies based on a reduced use of pesticides.

7. Acknowledgements

This work was part of a project supported by ECOS-Sud, Conicyt-Chile. The first author received a fellowship from Conicyt and the French embassy in Chile and from Agropolis International, Montpellier. The authors would like to thank F. Celette, Y. Bouisson, L. Dufour, J.C Galline, C. Clipet and all the technical staff of the Domaine du Chapitre for their invaluable role in the good course of the experiments.

Chapitre VI - L'incidence et l'intensité de l'oïdium dépendent de l'état de développement végétatif de la vigne¹².

1. Mots clés

Vitis vinifera ; maladies ; croissance ; vigueur ; propriétés de tissus ; sensibilité d'organes ; enherbements ; irrigation ; analyses multivariées

2. Introduction

L'oïdium, occasionné par le champignon *Uncinula necator* Burr., est une des maladies les plus répandues et les plus consommatrices de fongicides en viticulture (Moriondo et al. 1999; Oliva et al. 1999; Halleen and Holz 2001). Dans des conditions climatiques favorables et sans une stratégie de contrôle adéquate, ce champignon peut produire des dégâts sévères sur le rendement et la qualité des moûts et par conséquent des vins (Pool et al. 1984; Amati et al. 1996; Abbasi and Adams 2000; Gadoury et al. 2001; Calonnec et al. 2004). Les grappes fortement attaquées peuvent donner un mauvais goût au moûts ainsi que des arômes indésirables (Emmett et al. 1998; Stummer et al. 2005), mais ce n'est pas toujours le cas (Darriet et al. 2002). Par ailleurs, sous certaines conditions climatiques, l'oïdium pourrait altérer la pellicule de la baie et générer des microfissures propices à la pénétration du botrytis (Jarvis et al. 2002; Stummer et al. 2005).

Les deux sources d'inoculum primaires sont le mycélium hivernant dans les bourgeons (Sall and Wrysinski 1982) et les ascospores nées de cleistothèces survivantes dans les bois (écorces) (Bulit and Lafon 1978; Pearson and Gadoury 1987). Après une période de latence de 5 à 32 jours après le début de l'infection primaire -dépendante de la température (Halleen and Holz 2001)- ce champignon sporule et ses spores asexuées (conidies) sont transportées par le vent et initient les infections secondaires sur les feuilles. Cette infection secondaire sur feuille est responsable, dans la plupart des cas, du développement épidémique de la maladie sur les grappes. Elle peut faire jusqu'à trois cycles secondaires avant que les symptômes sur feuilles soient détectés (Emmett et al. 1992).

Les spécialistes viticoles et pathologistes reconnaissent qu'une vigueur élevée du vignoble favorise la sensibilité aux maladies cryptogamiques dont l'oïdium fait partie (Soyer 1987b; de la Rocque 2002). Cependant les relations entre vigueur et maladies sont encore pauvrement documentées et les quantifications expérimentales sont inexistantes. Souvent des recherches concernant les effets de pratiques culturales sur la croissance de la vigne et la qualité de la vendange ont montré, de façon incidente, des interactions entre les maladies et l'état de croissance de la vigne (Reynolds and Wardle 1994; Intriери et al. 2001; Zahavi et al. 2001; Pellegrino et al. 2004; Evans et al. 2006; Morlat and Bodin 2006). Pour l'oïdium en particulier et pour différentes espèces, la sévérité de cette maladie est souvent, mais pas clairement, associée aux conditions de grande vigueur ou de tissus turgescents des plantes (Jarvis et al. 2002). Ainsi toute pratique de gestion du sol et de fertilisation qui augmente la vigueur prédispose l'hôte à l'oïdium. L'oïdium sur blé d'hiver tend à être plus sévère quand le taux de fertilisation azotée augmente et quand la densité de semis diminue (Broscious et al. 1985). Pour la vigne, l'impact de la maladie sur les grappes est plus élevé

¹² Ce chapitre sera soumis sous la forme d'un article scientifique co-signé par Valdés, H., Calonnec, A. et Gary, C.

pour des modes de taille favorisant une grande expression végétative (Gadoury et al. 2001). Des recherches faites en Tasmanie ont aussi montré que l'incidence sur les grappes est deux fois plus élevée et la sévérité cinq fois plus élevée dans une parcelle de chardonnay vigoureuse par rapport à une parcelle à faible vigueur (Evans et al. 2006). Enfin, Lalancette et Hickey (1986) dans leur modèle de développement de l'oïdium sur le pommier utilisent comme variable centrale l'évolution du nombre de feuilles par rameau. Cela rend compte de l'importance de l'état de croissance de la plante dans la progression de la maladie. Dans tous ces exemples, c'est sans doute la dynamique de l'inoculum secondaire de l'oïdium qui est affectée par la vigueur et qui se traduit par des dégâts plus ou moins élevés.

Plusieurs mécanismes ont été envisagés pour expliquer la relation positive entre l'oïdium et l'état de croissance d'une plante :

❖ **une population de feuilles élevée.** L'oïdium présente un impact plus fort dans des vignes avec une taille minimale que dans des vignes avec une taille équilibrée (Gadoury et al. 2001). Dans les premières conditions, la population des feuilles atteintes est plus élevée et suit l'expression végétative. En effet, en comparant les deux types de conduite, on observe que le nombre de feuilles touchées par rameau est sensiblement le même, mais la différence est liée au nombre plus élevé de rameaux dans les vignes avec taille minimale. Ce comportement est observé sur Concord, une variété de *Vitis Labruscana* qui a une sensibilité à l'oïdium bien moindre que les variétés de *Vitis vinifera*.

❖ **une plus longue période de sensibilité des organes atteints.** Les jeunes feuilles sont très sensibles, mais au fur et à mesure qu'elles vieillissent elles deviennent plus tolérantes (Doster and Schnathorst 1985a; 1985b; Rouzet et al. 1998). Cette sensibilité à l'âge de la feuille pourrait être associée à la quantité de sucre, également plus élevée chez certaines variétés résistantes (Doster and Schnathorst 1985b). L'augmentation de la photosynthèse et l'accumulation de sucres dans les feuilles est fonction de l'âge de la feuille (Kriedemann et al. 1970) et la sensibilité à l'oïdium est étroitement et négativement liée à la quantité de sucres dans les feuilles (Calonnec, communication personnelle). De même les baies sont considérées comme sensibles à l'infection jusqu'à ce que la concentration en solides solubles arrive à environ 8 °Brix (un peu avant le stade de véraison) (Halleen and Holz 2001), tandis que des infections déjà établies peuvent continuer à sporuler jusqu'à une concentration de 12-15 °Brix (après véraison) (Kast and Stark-Urnau 2000; Halleen and Holz 2001). Mais, globalement, la période de haute sensibilité va de la nouaison à la fermeture de la grappe (Rouzet et al. 1998) et peut même être encore plus réduite (Ficke et al. 2002; Ficke et al. 2003; Gadoury et al. 2003; Ficke et al. 2004). Une forte vigueur pourrait modifier cette résistance ontogénique, notamment en retardant des stades comme la véraison et la maturité du raisin (Matthews et al. 1987b; Keller et al. 2001). De même un changement de la durée des stades comme la floraison, la nouaison ou la fermeture de la grappe, pourraient affecter le risque d'être attaqué par le champignon (Gadoury et al. 2006)

❖ **des changements de propriétés des tissus.** Plus la pression osmotique de la sève cellulaire est élevée et la teneur en eau des feuilles est faible, plus la germination des conidies est faible (Goheen and Schnathorst 1963). En tenant compte de cet énoncé, on peut penser que les vignes très vigoureuses, dont les tissus sont riches en eau et en azote ont une sensibilité plus importante à l'oïdium. De plus, les changements de propriétés des tissus liés aux réponses de défense des plantes ont aussi été évoqués. En effet, suite à l'attaque d'un agent pathogène, une cascade de réactions se déclenche dans la plante et conduit à l'expression de gènes de défense (Daire et al. 2002). Ces réactions concernent notamment des réponses structurales (formation d'un épiderme de cicatrisation, nécrose cellulaire...), mais aussi des réponses physiologiques et chimiques (synthèse de protéines

de défense ou de molécules antifongiques)(Adrian et al. 2000; Deloire et al. 2000; Jeandet et al. 2002; Gaudillère 2003). Un exemple bien connu de molécule antifongique de la vigne est le resvératrol qui a été associé à une limitation de la croissance du *Botrytis* dans les grappes (Hammerschmidt 1999) ainsi qu'à une sensibilité plus faible à l'oïdium (Bavaresco and Eibach 1987). Une sévérité plus élevée de l'oïdium a été observée quand la nutrition azotée est élevée. Dans ces conditions, la synthèse des stilbenes (resvératrol et viniferin) est diminué (Bavaresco et al. 1994).

❖ **un effet du microclimat au sein du couvert.** Dans les vignes à vigueur et expression végétative élevées le couvert est entassé, peu aéré et les grappes peu illuminées (Pellegrino et al. 2004), ce qui favorise le développement de l'oïdium (Halleen and Holz 2001). En effet, des conditions d'ombre sont plus favorables pour la germination des conidies et la croissance du mycélium que des conditions ensoleillées (Bulit and Lafon 1978). Le rayonnement ultraviolet affecterait le développement du champignon (Willocquet et al. 1996).

Enfin, les vignes avec un feuillage moins entassé ont comme bénéfice additionnel d'améliorer la pénétration des produits phytosanitaires et donc de favoriser la lutte contre les maladies (Emmett et al. 1998).

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est en premier lieu de vérifier l'hypothèse selon laquelle les vignes plus vigoureuses sont plus sensibles à un développement épidémique de l'oïdium, autant sur les feuilles que sur les grappes et de quantifier cet effet. En deuxième lieu, il s'agit d'identifier les principaux mécanismes qui expliqueraient cette relation positive entre vigueur végétative et l'incidence et la sévérité de la maladie sur les feuilles et sur les grappes. Plusieurs stratégies de gestion du sol ont été utilisées pour créer des états de croissance contrastés, dont l'irrigation, la fertilisation azotée et l'enherbement des inter-rangs.

3. Matériels et méthodes

3.1. Dispositif expérimental

L'étude s'est déroulée pendant les saisons 2005 et 2006 sur un dispositif expérimental mis en place sur la parcelle du Domaine du Chapitre à Villeneuve-lès-Maguelone, près de Montpellier (Cf. Chapitre II). Le climat est de type méditerranéen (Figure 2.3). Le sol de la parcelle est brun calcaire, de texture argileuse, profond et homogène (Cf. Chapitre II - 2.1.3). Pour cette étude seulement une partie de la parcelle expérimentale (Cf. Chapitre II - 2.1.4) a été utilisée. La cartographie faite à partir des données de poids de bois de taille de 2004 et de 2005 (Figure 6.1) a permis de décider les zones de vigueur contrastées à utiliser pour l'expérimentation. En 2005, les zones utilisées se situent en haut de pente des modalités enherbées de façon permanente (MF) et temporaire (MR), en zone basse des modalités désherbée (MD) et témoin (MT). Pour 2006 les mêmes zones des modalités MF et MT ont été retenues ainsi que la zone basse pour la modalité MR. Ces choix ont été déterminés de façon à disposer d'une large gamme d'états de développement foliaire.

Des placettes élémentaires de suivi ont été distribuées aléatoirement sur chacune des modalités choisies. Ces placettes ont été séparées entre elles par au moins 3 ceps de garde et choisies dans la mesure du possible sur des rangs différents. Trois placettes par modalité ont été suivies en 2005. En 2006, compte tenu de la variabilité des données entre placettes observées l'année précédente, quatre placettes par modalité ont été établies. Une placette élémentaire était constituée par trois ceps consécutifs sur le rang.

Afin d'assurer une présence homogène de l'oïdium sur les placettes, des infestations artificielles du champignon ont été réalisées. Ces infestations ont été faites le 29 avril 2005 et le 26 avril 2006, par inoculation d'un rameau situé au milieu du cep central (Delière et al. 2002). L'inoculation s'est déroulée au stade 9 à 12 sur l'échelle d'Eichhorn et Lorenz (4-6 feuilles étalées) par dépôt de conidies à sec sur le rameau ensaché (*Photo 6.1a et 6.1b*). La souche d'*Uncinula necator* est isolée et multipliée au préalable au laboratoire sur des disques des feuilles de vigne en survie (*Photo 6.1c*).

Les placettes inoculées ont été protégées de tout traitement fongicide par un film plastique transparent entourant la totalité de chaque placette élémentaire au moment de chaque intervention (*Photo 6.1d*). Le reste de la parcelle a reçu deux traitements contre l'oïdium au tébuconazole (Corail®, 0,4 L ha⁻¹) et au trifloxystrobine (Consist ®, 0,13 Kg ha⁻¹) pour les deux années de cette expérimentation. Cette protection a permis de prévenir le développement de l'oïdium dans la totalité de la parcelle et ainsi d'éviter des contaminations spontanées sur les placettes inoculées.

3.2. Développement de la vigne et de l'oïdium

Les abréviations des variables, leur type d'échantillonnage ainsi que le pas de temps de mesures sont listé dans le Tableau 6.1.

3.2.1. Suivi de la vigueur de la vigne

Un suivi de la croissance des rameaux a été réalisé deux semaines après l'inoculation et jusqu'au stade de fermeture de la grappe à raison d'une mesure tous les 10 jours. Six rameaux sur le cep central (incluant le rameau contaminé) et trois rameaux sur chacun des ceps latéraux ont été suivis. Les rameaux sont séparés d'une distance de 30 cm. Sur chacun de ces rameaux le nombre de feuilles déployées du rameau principal (FRP), la position et le nombre de feuilles déployées de chacune des ramifications (primaires et secondaires) (FRPr) ont été mesurés. Une vitesse moyenne d'apparition des feuilles (VAT) sur l'ensemble de la saison a été calculée. Le nombre de grappes et leur position sur le rameau principal sont également notés.

3.2.2. Suivi de l'évolution épidémique de l'oïdium

Un suivi de progression de l'oïdium a été fait avec la même périodicité sur les mêmes rameaux que ceux suivis pour la croissance végétative. Le nombre de feuilles présentant des symptômes sur le rameau principal et les ramifications (MRP et MRPr), leur position ainsi que leur surface attaquée (% de la surface foliaire présentant des symptômes, IFRP et IFRPr) ont été notés. Les notations couvrent la période du 10 mai au 5 juillet en 2005 et du 10 mai au 22 juin en 2006. Le suivi de maladie concerne toutes les feuilles (principales, primaires et secondaires). La fréquence par rameau de feuilles nouvellement attaquées (FFNA) parmi celles produites a été calculée comme : $(M_j - M_{j-1}) / (T_j - M_{j-1})$ où M est le nombre de feuilles malades, T le nombre de feuilles totales et j la date de notation. La vitesse d'apparition des feuilles malades (VAM), ainsi que l'intensité (ou sévérité) de maladie correspondant à la surface moyenne d'attaque pour l'ensemble des feuilles a aussi été calculée.

Toutes les grappes des placettes élémentaires (sur les trois ceps) ont été notées et repérées. Sept notations sur grappes en 2005 et cinq en 2006 allant de la période post-floraison (13 juin) à la récolte ont été effectuées. La fréquence de notation était de 7 jours en 2005 et de 10 jours en 2006. L'incidence de la maladie correspondant au pourcentage de

grappes présentant au minimum une baie touchée par l'oïdium et l'intensité correspondant à la surface externe des grappes présentant des symptômes, ont été calculées.

3.3. Analyses statistiques

Une comparaison de moyennes des notes d'incidence deux semaines après l'inoculation a été réalisée par un test de Student ($p < 0,05$) pour déterminer l'homogénéité des infestations artificielles ainsi que pour détecter l'existence d'éventuelles différences dans la croissance des pousses contaminées pour les différentes placettes. Des analyses en composantes principales (ACP) ont été réalisées 1) pour étudier les relations entre variables de croissance végétative à la nouaison et variables de maladie en fin de saison et 2) pour comparer les modalités. La distance euclidienne entre les individus a été calculée à partir de la matrice de coordonnées des individus de l'ACP, et une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été réalisée pour regrouper les individus dans des classes homogènes sur la base de la méthode de Ward (Carpentier 2005). De plus des analyses de régression multiple qui utilisent les variables végétatives et de maladie ainsi que la distance à la source d'inoculum (rameau contaminé) ont été effectués. Les valeurs utilisées pour les variables végétatives sont celles mesurées jusqu'à la fin de la nouaison, celles des maladies sur feuilles jusqu'à la fermeture de la grappe et celles des maladies sur grappes correspondent à la date de véraison. L'analyse des données a été réalisée avec les logiciels StatBox (Version 6.23, Grimmer Logiciels, Paris) et R (version 2.1.1, copyright 2005).

4. Résultats

4.1. Homogénéité de l'inoculation

Quatorze jours après inoculation en 2005 et 2006, aucune différence significative (test de Student, $p < 0,05$) entre les différentes modalités d'entretien du sol n'est détectée, et ce, quelles que soient les variables de croissance et de maladie (*Tableau 6.2*). A cette date, le nombre de feuilles présentant des symptômes d'oïdium est d'environ 50 % du total des feuilles sur le rameau contaminé. La fréquence d'attaque initiale est un peu plus élevée en 2006 qu'en 2005, mais pas l'intensité moyenne d'attaque. Cette homogénéité dans l'expression initiale de la maladie indique une sensibilité des pousses similaire entre les plantes des différentes modalités au début de l'expérimentation.

4.2. Croissance de la vigne et évolution de l'épidémie

4.2.1. Sur feuilles

Au sein de chaque modalité, le nombre de feuilles produites par rameau est globalement similaire pour tous les ceps (centraux et latéraux) en 2005 comme en 2006. (*Figures 6.2a et 6.3a*). Seule la modalité MF en 2005 ne répond pas à cette généralité avec une production des feuilles un peu plus élevée sur les ceps latéraux comparée au cep central en fin de saison. Les conditions sèches de l'année 2005 n'ont pas permis de distinguer clairement les modalités par des niveaux de vigueur précoce distincts. Ainsi, ce n'est qu'à partir du 22 juin que la modalité irriguée (MT) se différencie significativement (test t, $p < 0,05$) des modalités enherbées (MR et MF) pour la variable nombre de feuilles produites (*Figures 6.2a*). En 2006 par contre, on peut classer les modalités en trois catégories, une forte croissance dans la modalité MT, une croissance intermédiaire à faible pour MR et une faible croissance pour MF (*Figures 6.3a*). Près de la fermeture de la grappe, la modalité irriguée en 2006 présente 17 % de plus de feuilles par rameau qu'en

2005. Les modalités MR et MF sont assez similaires. En ce qui concerne la variabilité des placettes élémentaires à l'intérieur de chaque modalité la situation est contrastée. En 2005 de fortes hétérogénéités ont été observées entre les placettes élémentaires, notamment pour la modalité désherbée. L'année 2006 en revanche est caractérisée par des placettes plus homogènes à l'intérieur de chaque modalité d'entretien de sol.

En ce qui concerne le développement épidémique de l'oïdium sur les feuilles, en 2005 le nombre de feuilles malades par rameau des ceps contaminés, près de la fermeture de la grappe, est 25 à 40 % supérieur dans les modalités les plus vigoureuses (MT et MD) par rapport aux autres modalités (*Figure 6.2a*). En 2006, cette différence s'élève à 60 % entre les modalités MT et MF (*Figure 6.3b*). Pour les ceps latéraux, la différence est encore plus marquée et s'élève à 70 % dans certains cas.

Globalement, la fréquence de feuilles nouvellement attaquées (FFNA) n'est pas significativement différente entre les modalités jusqu'à la floraison autant pour 2005 que pour 2006 sur les ceps contaminés (*Figures 6.2b et 6.3b*). Une exception est observée en 2006 où la modalité irriguée montre une FFNA significativement supérieure aux autres, pour la date du 1^{er} juin, mais qui n'est pas significative 10 jours après, du à une forte croissance des rameaux. A partir de ce stade, les valeurs diminuent dans les modalités enherbées, se stabilisent dans la modalité désherbée et continuent à augmenter pour la modalité irriguée. Les différences observées entre les modalités MT et les autres témoignent d'une sensibilité des feuilles plus forte et prolongée dans la modalité MT. Pour les ceps latéraux, le comportement est similaire mais décalé dans le temps et avec des fréquences un peu moins élevées.

L'intensité moyenne de maladie sur feuilles est faible. Elle représente une surface foliaire totale atteinte de moins de 7 et 2 % pour les cep centraux et latéraux, respectivement (*Figures 6.2c et 6.3c*). Ces faibles valeurs ne permettent pas de différencier les modalités en 2005. En revanche en 2006 la modalité MT présente une valeur significativement plus élevée que les deux autres à la dernière date de mesure, autant pour les ceps contaminés que pour les ceps latéraux (22 juin).

4.2.2. Sur grappes

La fréquence des grappes malades varie très peu dans le temps pendant la période de nouaison (deuxième semaine de juin) – récolte, pour les ceps inoculés de toutes les modalités (*Figures 6.2d et 6.3d*). Toutes les grappes de la modalité irriguée sont touchées par l'oïdium, tandis que pour les autres traitements moins de 80 % de grappes présentent des symptômes. La fréquence de grappes malades des ceps latéraux est plus faible que celles des ceps contaminés. Les valeurs les plus élevées pour les ceps latéraux correspondent à la modalité MT, avec un maximum de 75 % en moyenne pour l'année 2006. En 2005, une diminution du nombre des grappes atteintes a été observée entre la véraison et la récolte pour les modalités enherbées, pour les ceps inoculés comme pour les ceps latéraux. Une abscission des baies, conséquence d'une forte contrainte hydrique, ainsi qu'une difficulté d'observation de petits symptômes sur raisin mûr pourrait expliquer ces résultats. L'abscission des baies n'a pas été observée en 2006 et la fréquence des grappes attaquées est restée stable sauf pour les ceps latéraux de la modalité MT. En effet, sur cette modalité irriguée, l'oïdium continue son évolution jusque tard dans la saison.

En ce qui concerne l'intensité moyenne sur grappes (*Figure 6.2e et 6.3e*), elle est très supérieure sur les ceps centraux (inoculés) par rapport aux ceps latéraux. Pour les deux années d'expérimentation, des différences significatives ont été observées entre les modalités les plus vigoureuses (MT et MD) et les autres. Les modalités enherbées ont une intensité plus forte en 2005 (15 %) qu'en 2006 (10 %). Pour la modalité MT, en revanche, l'intensité moyenne était plus forte en 2006 (70 %) qu'en 2005 (40 %).

L'incidence et l'intensité de l'oïdium dépendent de l'état de développement - 80 - végétatif de la vigne .

La variabilité observée sur les feuilles en 2005 a eu pour conséquence une forte hétérogénéité sur le développement d'oïdium sur les grappes, en particulier pour la modalité MD. La variabilité est moindre en 2006, tant sur feuilles que sur grappes.

4.3. Relations entre vigueur des rameaux et développement épidémique sur feuilles.

La vitesse d'apparition des feuilles (VAT) par rameau, estimée entre le 11 mai et le 12 juin (fin de la nouaison) est significativement corrélée au nombre de feuilles malades au 22 juin (près de la fermeture de la grappe) (*Figure 6.4a*), pour les ceps contaminés ($R^2=0,76$) et pour les ceps latéraux ($R^2=0,54$). Cette relation montre que plus la vitesse d'apparition des feuilles est élevée plus le nombre de feuilles malades augmente. Sur les ceps voisins des ceps contaminés, une relation linéaire positive est également observée, mais avec beaucoup plus de variabilité. En effet, en s'éloignant de la source, la variabilité augmente due au phénomène de dispersion

L'intensité moyenne d'attaque par rameau est aussi significativement corrélée à la vitesse d'apparition des feuilles. Cependant cette relation est moins bonne que celle observée pour le nombre des feuilles malades. L'intensité moyenne d'attaque est faible pour les ceps latéraux.

Des analyses de régression multiple faites sur les données des rameaux montrent que les deux variables de développement épidémique sur feuilles (feuilles malades, intensité moyenne sur feuilles malades) sont correctement expliquées quand on utilise la VAT et la distance à la source comme variables explicatives. Les modèles linéaires pour chaque variable sont :

$$\begin{aligned} \text{FM} &= 3,78 - 0,118xd + 21,7x\text{VAT} & R^2 &= 0,81, d = \text{distance au rameau inoculé (cm)} \\ \text{IMR}_{\text{tot}} &= 0,964 - 0,022xd + 1,66 x\text{VAT} & R^2 &= 0,61 \end{aligned}$$

Si l'on compare les R^2 de chacune des régressions multiples avec les R^2 observés pour les régressions simples avec la VAT (*Figure 6.4*) on se rend compte de la nette amélioration que procure l'incorporation de la distance à la source.

4.4. Interactions entre croissance des rameaux et évolution épidémique sur feuilles et sur grappes

4.4.1. Une année 2005 avec beaucoup de variabilité

L'ACP réalisée sur les données expérimentales de 2005 (tous les ceps) synthétise 83% du total de la variance (*Figure 6.5*). Le premier axe est construit principalement par les variables de développement de l'oïdium sur les feuilles, notamment le nombre de feuilles malades sur le rameau principal (MRP), des ramifications (MPRr) ainsi que la vitesse d'apparition des feuilles malades (VAM). Ces variables contribuent à 62% à l'inertie de cet axe.

Les variables de maladie sur grappes expliquent 20 % de l'axe. Enfin les trois variables du développement foliaire ne représentent qu'une proportion de 17% de l'axe 1. Toutes ces variables se positionnent du côté positif. Ce premier axe est représentatif du niveau de maladie sur feuilles et sur grappes. Le deuxième axe comporte principalement les variables de croissance du rameau (60%) comme principales variables explicatives positionnées du côté positif de l'axe.

L'intensité de maladie sur feuilles du rameau principal (IFRP) et des ramifications (IFRPr) expliquent à elles deux 28% de ce deuxième axe. La classification hiérarchique

L'incidence et l'intensité de l'oïdium dépendent de l'état de développement - 81 - végétatif de la vigne .

ascendante permet de distinguer 4 groupes homogènes (*Figure 6.6*): G1) caractérisé par un niveau élevé de vitesse d'apparition des feuilles malades (VAM) et du nombre de feuilles des ramifications malades près de la fermeture de la grappe (MRPr). Ce groupe est composé de deux des ceps contaminés de la modalité irriguée et d'un cep contaminé de la modalité désherbée, G2) comprenant 9 individus représentant les autres ceps contaminés de toutes les modalités plus un des ceps latéraux de la modalité enherbée semi permanente. Ce groupe est caractérisé par une vitesse d'apparition des feuilles (VAT), des nombres de feuilles principales (FRP) et des ramifications (FRPr) à la fin de la nouaison plus faible et un moindre niveau de maladie, G3) et G4) deux autres groupes composés uniquement de ceps latéraux caractérisés par des niveaux de maladie moindre et qui se distinguent par leur faible à très faible niveau de vigueur (VAT, FRP, FRPr) faible à très faible. Ainsi, l'effet de dispersion de la maladie est clairement mis en évidence. Par contre, l'effet modalité de gestion du sol est moins clair et des ceps des différentes modalités se mélangent.

Les trois variables représentant la croissance végétative (FRP, FRPr et VAT) sont positivement corrélées ($r > 0,80$). Ces variables sont également significativement corrélées aux variables de maladie sur feuille MRPr et VAM ($r > 0,54$). En revanche, elles ne sont pas significativement corrélées à la maladie sur les grappes (FG, IG). Cela s'explique par la forte influence des ceps latéraux peu attaqués dans la construction de l'ACP. Enfin, l'intensité d'attaque et la fréquence d'attaque sur les grappes sont significativement corrélées à l'intensité d'attaque sur les feuilles ($r > 0,81$, et $r = 0,55$, respectivement).

4.4.2. Une année 2006 plus homogène

Les deux premiers axes de l'ACP réalisée sur les ceps de 2006 représentent respectivement 69 et 19 % de la variance totale (*Figure 6.5*). Comme pour l'ACP de 2005, le premier axe est construit par les variables de développement de l'oïdium sur feuilles (MRPr 13,5%, VAM 13,9%) et de maladie sur les grappes (FG 12 %). Les variables de croissance des rameaux contribuent aussi, mais avec un poids moins important. Le deuxième axe composite est représenté par les intensités d'attaque sur les feuilles (47%) d'un côté, et par les variables de croissance végétative de l'autre (FRPr 16,4% et VAT 15,3%). Comme pour l'ACP de 2005, ces deux groupes de variables sont quasiment indépendants entre eux.

Une classification hiérarchique ascendante permet de distinguer 4 groupes homogènes (*Figure 6.6*): G1) caractérisé par un niveau élevé de progression de la maladie sur feuilles (MRPr et VAM), une fréquence des grappes atteintes élevée ainsi que une forte vigueur (VAT, FRPr). Ce groupe est composé de tous les ceps contaminés de la modalité irriguée, G2) composé de la plupart des ceps latéraux de la modalité irriguée. Ce groupe est caractérisé par des valeurs élevées de vigueur (VAT, FRPr) à la fin de la nouaison et par un moindre niveau de maladie sur grappes, mais surtout sur feuilles, G3) constitué par tous les ceps contaminés des modalités enherbées. Ce groupe est caractérisé par une faible vigueur et une fréquence d'oïdium sur grappes moyenne à faible. Enfin, un groupe G4) composé presque seulement de ceps latéraux des modalités enherbées est caractérisé par un niveau de maladie très faible. Un des ceps latéraux de la modalité irriguée fait partie de ce groupe, à cause notamment d'une faible intensité des attaques sur feuilles. Cette classification montre surtout un effet très clair de dispersion de la maladie ainsi que de la modalité irriguée.

Comme pour 2005, les variables de vigueur des rameaux (FRP, FRPr et VAF) sont intimement corrélées ($r > 0,82$). Elles sont également corrélées (r variant entre 0,36 - 0,88) aux variables représentant la population des feuilles malades (MRP, MRPr et VAM). A la différence de 2005 une corrélation significative a été établie entre les variables de vigueur et la fréquence ($r > 0,71$) et l'intensité ($r > 0,49$) d'attaque sur les grappes. Elle s'explique par

une évolution importante de l'oïdium dans les ceps latéraux notamment pour la modalité irriguée. Enfin, comme cela a été observé en 2005, la fréquence d'attaque sur les grappes (FG) ainsi que leur intensité moyenne (IG) sont significativement corrélées à l'intensité d'attaque sur les feuilles ($r > 0,56$, et $r > 0,72$, respectivement).

4.4.3. Interactions entre la vigueur des rameaux et l'impact de la maladie sur les ceps inoculés

Les Figures 6.2 et 6.3 ainsi que les analyses multi-variées ont montré une différence significative entre l'évolution épidémique des ceps contaminés et celle des ceps latéraux. L'analyse (ACP et CHA) des ceps contaminés seuls permet de distinguer les effets de la vigueur sur la maladie sans interaction de la distance à la source. Les axes 1 et 2 de l'ACP représentent respectivement 73 % et 10 % de la variance totale des données (Figure 6.7). Dans la définition de l'axe 1 toutes les variables participent, avec un taux de représentation d'un tiers pour les variables de vigueur des rameaux (FRP, FRPr, VAT) un tiers pour les variables liées à la maladie (MRP, MRPr, VAM), 20 % pour la maladie sur grappe (FG, IG) et seulement 13% pour les intensités d'attaque sur les feuilles (IFRP, IFRPr). L'axe 2 est construit en premier lieu par IFRP avec 31 % de représentativité suivie par FG (26 %), par FRP (16%) et enfin par IFRPr (12%). Les autres variables sont peu représentées sur ce deuxième axe.

La classification ascendante hiérarchique opérée sur les résultats de l'ACP distingue de trois à deux groupes selon l'indice d'agrégation choisi (Figure 6.8). Un groupe est composé de tous les individus irrigués de 2006 plus deux individus irrigués de 2005 et un individu désherbé de 2005. Ce groupe correspond aux ceps avec la plus forte croissance à la fin de la nouaison, une quantité de feuilles malades plus élevée à la fermeture et une sévérité d'attaque sur grappes plus élevée. Les deux groupes suivants sont représentés par un mélange de ceps des différentes modalités correspondant à des individus avec une vigueur et un taux de maladie moyenne à faible. Dans la classification du troisième groupe, on distingue des individus présentant une quantité de feuilles sur ramifications et de maladie sur ces feuilles plus faible en majorité de l'année 2005. La classification confirme la grande variabilité observée en 2005 pour la modalité désherbée qui se retrouve répartie dans les trois groupes. De même, une des répétitions de la modalité irriguée se trouve dans le groupe à faible maladie et faible vigueur. Le rameau contaminé de ce cep ayant été coupé accidentellement au dessus de la cinquième feuille, l'évolution de la maladie sur ce cep a été plus faible.

Les variables de croissance des rameaux (FRP, FRPr, VAT) sont fortement et positivement corrélées ($r > 0,88$) aux nombres des feuilles malades sur les ramifications (MRPr) ainsi qu'à la vitesse d'apparition des feuilles malades (VAM) et plus faiblement au nombre de feuilles malades sur le rameau principal (MRP) ($r < 0,64$). Le nombre de feuilles du rameau principal est en effet très peu affecté par les conditions de croissance (nutritionnelles notamment) de l'année, et peu variable d'une modalité à l'autre. Le risque d'infection de ces feuilles est donc peu variable entre modalités pour une date de contamination donnée. Parmi l'ensemble des variables de vigueur et de maladies sur feuilles, les variables les mieux corrélées à la maladie sur grappe sont la vitesse d'apparition des feuilles (VAT), et la vitesse d'apparition des feuilles malades (VAM). En effet, ces deux variables sont corrélées à plus de 68 % avec la fréquence d'attaque sur les grappes et à plus de 85% avec l'intensité d'attaque sur grappes. Cela fait d'elles de bons candidats pour étudier les relations entre la croissance végétative et les dégâts sur grappes.

4.5. Relations entre maladie sur feuilles et sur grappes

Les données de fréquence (FG) et d'intensité d'attaque (IG) sur grappes ont été mises en relation avec la vitesse d'apparition des feuilles (VAT) et la vitesse d'apparition des feuilles malades (VAM). Cela permet de valider l'hypothèse des effets positifs d'une croissance végétative élevée sur les dégâts de l'oïdium sur les fruits (*Figure 6.9*). En effet, des relations linéaires significatives ($p < 0,01$) entre la fréquence des grappes atteintes, la VAT et la VAM ont été établies, autant pour les ceps contaminés que pour les ceps latéraux. Pour l'intensité moyenne sur grappes on observe aussi des relations linéaires significatives ($p < 0,01$) avec la VAT et la VAM, avec des relations de meilleure qualité pour les ceps contaminés. Une plus forte dispersion des points pour les ceps latéraux montre l'effet important de la distance par rapport à la source d'inoculum. Pour cette expérimentation même les ceps contaminés avec les plus faibles valeurs de VAT et de VAM montrent des grappes atteintes par l'oïdium. Par contre, pour les ceps latéraux, les ceps moins vigoureux n'ont quasiment pas développé la maladie.

Une analyse de régression linéaire multiple a été faite sur les ceps contaminés pour estimer la fréquence des grappes atteintes (FG). Les variables explicatives utilisées ont été la VAT, la VAM, le nombre total de feuilles, le nombre de feuilles sur les ramifications, ainsi que les nombre total de feuilles malades et sur les ramifications. Ce modèle linéaire montre qu'avec une seule variable, VAT on arrive à expliquer la majeure partie de la variation (62%) :

$$FG = -0,36 + 0,542 \times VAT.$$

De même, pour l'intensité moyenne d'attaque sur grappes l'analyse de régression linéaire montre que le meilleur ajustement se fait avec deux variables, la VAT et le nombre de feuilles malades sur les ramifications (FM_r) près de la fermeture de la grappe. Le modèle est :

$$IG = -25,33 + 24,8 \times VAT + 1,03 \times FM_r, R^2 = 0,77$$

Pour les ceps latéraux les régressions linéaires ont donné les résultats suivants :

$FG = -0,052 - 0,03 \times FM_1 + 0,037 \times FM$, $R^2 = 0,57$ avec FM et FM₁ sont les feuilles malades totales près de la fermeture de la grappe et à la nuaison, respectivement.

$$IG = -3,98 + 5,3 \times FM - 204,1 \times VAM, R^2 = 0,53$$

Cela montre que quand on s'éloigne de la source d'oïdium le risque d'attaque est lié à la quantité d'inoculum sur les feuilles à proximité.

5. Discussion

Cette étude a eu pour objectif principal de mettre à l'épreuve l'hypothèse selon laquelle le développement épidémique de l'oïdium sur feuilles et ses conséquences sur grappes sont positivement corrélés à la vigueur de la vigne. Les différents états de croissance de la vigne qui ont été créés expérimentalement et qui ont produit différents niveaux d'attaque sur feuilles et sur grappes confirment cette hypothèse. Ainsi des ceps vigoureux qui ont eu une nutrition abondante (irrigation et fertilisation azotée) ont présenté une quantité plus élevée de feuilles malades et des dégâts sur grappes bien supérieurs par rapport aux ceps peu vigoureux. Les observations faites sur d'autres espèces comme le blé, l'orge et le pommier, ainsi que le peu des résultats publiés pour la vigne montrent des résultats similaires

(Broscious et al. 1985; Lalancette and Hickey 1986; Gadoury et al. 2001; Jarvis et al. 2002; Evans et al. 2006).

Parmi les mécanismes proposés pour expliquer la relation positive entre la dynamique de l'oïdium et l'état de croissance d'une plante, le facteur explicatif majeur mis en évidence dans notre expérimentation est le nombre total de feuilles à partir de la floraison et la vitesse d'apparition de ces feuilles. Les fortes corrélations observées entre ces deux variables et les variables de maladie comme le nombre final de feuilles malades, la vitesse d'apparition des feuilles malades, la fréquence et l'intensité d'attaque sur grappes, le démontrent. La quantité de feuilles malades au moment de la floraison, supérieure pour un rameau vigoureux, crée une quantité de foyers de maladie plus élevée à proximité des grappes et donc augmente la probabilité d'infection des baies. De plus, la vitesse de développement du rameau n'est apparemment pas limitante par rapport à la vitesse de développement de l'épidémie. Ces résultats sont à rapprocher de ceux observés aux Etats-Unis dans des vignes avec un mode de taille qui favorise une grande expression végétative (Gadoury et al. 2001). En effet, le nombre de feuilles infectées par rameau étant similaire dans les deux modes de taille étudiés, c'est un nombre plus élevé de rameaux dans les souches avec taille minimale qui fait la différence. Les différences de vigueur doivent également s'exprimer le plus tôt possible pour que l'impact sur la maladie soit significatif. Ainsi, la modalité irriguée en 2006 présente un niveau de vigueur et de maladie sur feuille au 1^{er} juin équivalente de celles observées au 12 juin en 2005. Ces différences ont eu des conséquences non négligeables pour la sévérité de maladie sur grappe (70% en 2006 contre 40% en 2005).

L'autre mécanisme envisagé d'une modification de sensibilité des organes atteints, est plus difficile à mettre en évidence. Sur les grappes, particulièrement en 2006, la fréquence de grappes atteintes sur les ceps latéraux augmente après la véraison dans les souches les plus vigoureuses, tandis qu'elle reste stable dans les moins vigoureuses. De même, pour les ceps contaminés, la sévérité évolue jusque tard dans la saison pour les vignes vigoureuses. Usuellement, la période de sensibilité maximum des grappes correspond à la véraison (Ficke et al. 2002; Ficke et al. 2003; Gadoury et al. 2003). L'évolution tardive de l'oïdium sur les fruits des ceps vigoureux pourrait être liée à un retard de maturité dans cette modalité. En effet, des mesures faites sur des ceps voisins aux placettes de suivi ont montré un rapport sucres/acidité plus faible à la récolte (Cf IV.4.4). Le retard observé était certainement déjà présent au stade véraison. Ceci confirme que lorsque les conditions de croissance sont très favorables, la maturation du raisin est fortement ralentie (Matthews et al. 1987b; Spayd et al. 1994; Keller et al. 2001). Un tel retard de maturité pourrait 1) modifier la résistance ontogénique des baies ou encore 2) prolonger la période infectieuse et faire que des contaminations qui ont eu lieu avant la véraison continuent de progresser (Kast and Stark-Urnau 2000; Halleen and Holz 2001). En ce qui concerne les feuilles, l'évolution du nombre de feuilles attaquées suit la dynamique d'apparition des feuilles des ramifications. Cependant, la fréquence de feuilles nouvellement attaquées qui diminue à cause de la résistance ontogénique pour les modalités les moins vigoureuses (Doster and Schnathorst 1985a; 1985b; Rouzet et al. 1998), continue d'augmenter pour la modalité irriguée. On ne peut cependant pas exclure que cet effet ne soit pas dû à une quantité d'inoculum plus importante dans la modalité irriguée qui permette d'infecter des feuilles plus âgées. Cet effet de pression d'inoculum plus importante dans la modalité irriguée pourrait également expliquer en partie l'augmentation de sévérité sur les grappes.

Le troisième mécanisme évoqué pour expliquer le développement plus fort de l'oïdium sur les plantes vigoureuses est un changement de propriétés des tissus. En effet, Goheen and Schnathorst (1963) ont montré que la germination des conidies sur feuilles de vigne est plus faible quand la pression osmotique cellulaire est élevée. Ainsi, pour des

pressions osmotiques de l'ordre de 3 MPa, le taux de germination est de 4% alors qu'il s'élève à 35 % pour une pression osmotique de 1,1 MPa. Une contrainte hydrique modifie le potentiel osmotique cellulaire comme le démontrent des recherches faites sur *Vitis vinifera* cv Savatiano en Grèce (Patakas and Noitsakis 2001). Le potentiel osmotique passait alors de 1,4 MPa dans des conditions sans stress (potentiel de base égal à -0,15 MPa) à 1,8 MPa dans des conditions stressantes (potentiel de base de -1,2 MPa). Dans notre expérimentation, la modalité avec un enherbement permanent (MF) était caractérisée par des valeurs de potentiel de base passant de -0,6 MPa (fermeture de la grappe) à -1,4 MPa (récolte). Dans la modalité irriguée (MI) le potentiel de base s'est maintenu à environ -0,15 MPa (Cf IV.4.2.1) durant toute la saison. Ces grandes différences dans le potentiel hydrique foliaire ont probablement entraîné des différences dans la germination des conidies et peuvent expliquer en partie la quantité de feuilles malades plus élevée observée pour les souches vigoureuses. Si l'on considère que le flux d'eau entre deux points à l'intérieur de la plante est fonction d'un gradient de potentiel hydrique, alors le potentiel osmotique des baies doit être plus élevé que celui du reste de la plante pour un bon remplissage de celles-ci. En effet, l'accumulation des solutés, principalement glucose et fructose, aboutit à des potentiels osmotiques de baies de 3 ou 4 MPa (Matthews et al. 1987a) dès la véraison. De tels potentiels osmotiques peuvent expliquer la diminution de sensibilité des baies après cette période. De plus, un stress hydrique avant véraison peut également augmenter le potentiel osmotique des baies et donc diminuer le risque d'infection des baies par l'oïdium.

D'autres types de changements des propriétés de tissus peuvent être liés aux réponses de défense des plantes. Des molécules antifongiques comme les phytoalexines sont synthétisées par la vigne après une infection par l'oïdium (Bavaresco and Eibach 1987; Jeandet et al. 2002). Or, cette synthèse diminue dans des conditions de fertilisation azotée élevée (Bavaresco et al. 1994). La forte nutrition azotée apportée dans notre traitement irrigué aura pu limiter la production de molécules de défense. Il n'est cependant pas démontré aujourd'hui que le resvératrol ait un effet sur le développement de l'oïdium.

Enfin, un couvert trop dense, peu aéré et avec une faible illumination des grappes crée un microclimat favorable au développement de l'oïdium (Bulit and Lafon 1978; Halleen and Holz 2001). Ces conditions se retrouvaient au niveau des ceps vigoureux des modalités désherbées et irriguées. Une mesure de la densité de la canopée (sur des ceps voisins aux placettes suivies pour l'oïdium) par la méthode du point quadrat (Smart 1988) a permis de quantifier les différences entre modalités. Ainsi en 2005, à la fermeture de la grappe le nombre des couches de feuilles dans la modalité irriguée est 60 % et 18 % plus élevé que dans les modalités avec enherbement permanent et semi permanent, respectivement. Pour cette même année, au moment de la récolte, la modalité irriguée comptait 3 fois plus de couches de feuilles que MF et 2 fois plus que MR. En 2006, la modalité irriguée comptait en moyenne 4 fois plus de couches de feuilles que la modalité MF et 2 fois plus que la MR à la récolte. Ces densités de feuilles ont pu créer un micro-climat favorable à l'augmentation de sévérité sur les grappes.

Dans les conditions de notre expérimentation, l'infestation artificielle de l'oïdium tôt en saison, a permis un développement optimal de la maladie. Il est fort probable que pour un inoculum arrivé plus tard, la relation entre maladie et vigueur eu été moins claire. Cette situation d'inoculum plus tardif est reproduite sur les ceps latéraux, plus éloignés de la source initiale, et qui présentent des différences d'intensité de maladie sur grappe moindre entre les modalités. Cependant, l'effet distance à la source ou retard d'apparition de l'inoculum n'empêche pas d'observer une relation positive entre vigueur et développement épidémique sur les ceps voisins au cep contaminé.

Si l'on considère une échelle spatiale supérieure comme la parcelle viticole, d'autres facteurs liés à l'hôte, peuvent avoir un impact important sur une épidémie. Un mode de taille qui favorise un grand nombre de rameaux, permet également d'augmenter la population de feuilles potentiellement sensibles au champignon. Ainsi, si le départ de la maladie se fait par des ascospores présentes tôt en saison, un tel mode de taille pourra augmenter le nombre potentiel de foyers qui pourront infecter les baies. Des pratiques culturales comme l'ébourgeonnage produiront un effet contraire.

Enfin les résultats présentés ici ont été obtenus avec un cépage moyennement sensible à l'oïdium. D'autres recherches devront déterminer si pour d'autres cépages, les principaux mécanismes qui expliquent la relation positive entre l'état de croissance de la vigne et le développement de l'oïdium sont les mêmes que ceux évoqués ici. En effet, la durée des stades phénologiques sensibles, comme la floraison et la nouaison, des quantités élevées de sucre dans les feuilles (Doster and Schnathorst 1985b), ainsi qu'une pression osmotique élevée, ou encore la production de ramifications, peuvent être très différents entre cépages, et ainsi modifier les effets de la vigueur sur les dynamiques épidémiques.

Chapitre VII - Discussion générale

Les résultats présentés et analysés dans ce travail ont permis de vérifier l'hypothèse selon laquelle le développement épidémique de l'oïdium et du botrytis et ses conséquences sur grappes est positivement corrélé aux états de croissance de la vigne (vigueur ou expression végétative). Ces observations ont été réalisées sur une situation particulière en région méditerranéenne, donc leur généralité mérite quelques interrogations.

1. Proposition d'un schéma théorique reliant l'état de croissance de la vigne et le développement des maladies.

Les mécanismes qui expliquent la relation positive entre le développement des maladies et les états de croissance de la vigne sont de nature différente si l'on considère le botrytis ou l'oïdium. Cependant un schéma théorique général qui prend en compte cette relation ainsi que les mécanismes explicatifs peut être proposé. Il peut faire la synthèse de l'information recueillie expérimentalement et de celle obtenue à partir de la littérature (*Figure 7.1*). Ainsi, ce schéma est construit dans son axe X par la variable d'état de croissance de la vigne la plus pertinente vis-à-vis de la maladie. Cette variable pourrait être la vigueur de rameau pendant le cycle de croissance de la vigne ou bien l'expression végétative une fois que la croissance est avancée ou terminée, par exemple à la véraison ou à la récolte ou encore plus tard s'il n'existe pas de données pendant la saison. L'axe Y comporterait l'indicateur de la maladie sur les grappes, par exemple la fréquence des grappes atteintes si le développement épidémique est faible ou bien la sévérité de la maladie sur les baies si le taux de maladie est élevé. Sur ce schéma deux points sont connus a priori, celui de l'absence de maladie et celui du taux maximal. En effet, s'il n'y a pas de tissus réceptifs sur la vigne la maladie ne peut pas se développer. De même quand 100 % des grappes sont atteintes ou bien que la totalité de la surface de toutes les baies présentent les symptômes de la maladie, celle-ci ne peut plus continuer sa progression. Sur le plan, une droite est proposée qui représente le taux maximal de la maladie pour un état de croissance particulier. Nous proposons une droite compte tenu de nos résultats, cependant cette courbe enveloppe pourrait avoir une autre forme.

Le schéma théorique propose que pourrait exister une valeur minimale non nulle de croissance de la vigne sans développement de la maladie; il y aurait donc une valeur seuil. Cependant cette valeur seuil est très discutable et pourrait varier selon le type de système de culture dans lequel on se trouve. Ainsi, différentes variables de modification du système telles que le cépage ou le porte-greffe pourraient faire bouger cette valeur seuil. D'autre part, la pente de la droite pourrait être modifiée par d'autres variables du système qui permettraient ou non d'atteindre le taux de 100 % de la maladie. Ces facteurs pourraient être liées au climat, à la présence ou pas du pathogène, aux pratiques culturales, etc.

Si on applique le schéma général pour le botrytis (*Figure 7.2*), on observe des droites enveloppes particulières pour nos données et pour trois autres jeux de données obtenus dans la littérature (*Cf V.4.6*). Sur ce schéma, la variable d'état de croissance de la vigne choisie est le poids des bois de taille exprimé par mètre de rang mesuré l'hiver suivant à la récolte. De même l'indicateur de maladies sur grappes est la fréquence de grappes atteintes. La première constatation est la possible existence de seuils de croissance à partir desquels la maladie se développe. Le cépage est le principal facteur identifié que ferait bouger ces seuils. D'autres variables telles que l'architecture de la vigne pourraient jouer

aussi un rôle important. En effet, les modes de conduite palissés qui divisent la canopée (exemple le Scott-Henry) permettent de produire plus de feuillage dans une même longueur de rang et avec un entassement du feuillage moins élevé. La pente de la droite pourrait être modifiée par plusieurs facteurs, dont le principal serait le climat. En effet, compte tenu que le botrytis a besoin de présence d'eau libre ou d'une hygrométrie élevée, des conditions estivales très sèches au sein du couvert ne permettent pas le développement du botrytis. Tous les facteurs qui modifient le microclimat autour des grappes ont une influence sur la relation vigne-botrytis. Ainsi une architecture qui favorise une canopée dense, un type d'irrigation qui humidifie toute la surface du sol ou même directement le feuillage (aspersion par exemple) favorisent le développement du botrytis. Au contraire, les pratiques culturales telles que l'effeuillage qui favorisent l'aération et l'illumination des grappes défavorisent le développement du champignon. Enfin, une fertilisation azotée abondante modifie la croissance, mais aussi peut produire des baies riches en azote et retarder la maturité, créant ainsi des conditions d'une expression plus forte du botrytis.

Le peu des données publiées sur l'oïdium en relation avec les états de croissance n'a pas permis de confronter nos résultats avec d'autres et, donc le schéma théorique a été construit avec seulement les données de notre expérimentation (*Figure 7.2*). Compte tenu de la biologie du champignon, l'indicateur de croissance de la vigne choisi est la vitesse d'apparition des feuilles entre les stades 15 (boutons floraux encore agglomérés) et 27 (nouaison) de l'échelle de Eichhorn et Lorenz. Pour l'indicateur de maladie, c'est la sévérité d'attaque qui a été utilisée pour décrire une droite enveloppe. Sur ce schéma, on ne distingue pas de seuil de croissance à partir duquel l'oïdium produirait des dégâts sur grappes. En effet, des valeurs de croissance faibles sans développement d'oïdium n'ont pas été observées. Il est probable cependant, qu'il y ait des variations d'ordonnées à l'origine selon deux facteurs principaux, le cépage (Emmett et al. 1998) et la date d'apparition de l'oïdium. Ce deuxième facteur est intéressant à analyser car il est intimement lié au stade phénologique de la vigne. En effet, la période de haute sensibilité des baies étant limitée (*Cf IV.4*) à la période nouaison - fermeture de la grappe, l'absence de sources d'inoculum proches de la grappe à cette période diminue considérablement le risque d'une forte progression de la maladie. Au contraire, plus l'inoculum primaire arrive tôt, plus le développement sur feuilles est augmenté et donc plus de foyers d'inoculation des grappes sont produits. En ce qui concerne la pente de la droite elle pourrait être modifiée par des facteurs comme le climat, les pratiques culturales ou la distance à la source d'inoculum. Le climat ne joue pas un rôle prépondérant mais dans certaines conditions, des pluies peuvent empêcher les sporulations du champignon ou lessiver des conidies déposées sur les tissus, ralentissant ainsi la progression de la maladie (Jarvis et al. 2002). Les pratiques culturales qui modifient l'architecture de la vigne en favorisant une canopée peu dense et des grappes bien illuminées, peuvent aussi décourager le développement de l'oïdium sur les baies. Enfin, la distance à la source d'inoculum est un des facteurs prépondérants que nous avons observé : plus on s'éloigne de celle-ci, plus faible est la sévérité d'attaque.

2. Quels indicateurs pertinents de vigueur et d'expression végétative de la vigne ?

Le schéma théorique proposé doit utiliser une variable de l'état de croissance de la vigne qui ait un caractère pertinent vis-à-vis de la maladie. Pour le botrytis, nous avons retenu le poids de bois de taille et pour l'oïdium la vitesse d'apparition des feuilles. Si l'on se positionne dans un cadre plus pratique d'utilisation de cette relation, ces deux indices sont-ils pertinents ? Pour répondre à cette question, il faut analyser chaque maladie

séparément et se positionner dans le cycle d'infection de chacune d'elles. Pour le botrytis, la période identifiée comme clé est celle qui va *grosso modo* de la véraison à la récolte. Pour l'oïdium, par contre, l'état de la vigne avant la nouaison (un mois environ) établit le nombre potentiel de foyers. Après ce stade (un mois environ), c'est l'état de réceptivité des baies qui est primordial. Pour le botrytis, le besoin de confronter les résultats avec les données d'autres recherches nous a poussé à utiliser le poids de bois de taille. Cependant, cette mesure est réalisée une fois que les fruits ont été récoltés, et donc elle a seulement un caractère explicatif. D'autres variables ont été identifiées comme pouvant relier l'état de croissance de la vigne et le taux de botrytis à la récolte. Celles-ci sont la surface foliaire, le nombre total de feuilles par rameau et la densité foliaire. Elles peuvent être mesurées à n'importe quel moment de la saison, donc en particulier à la véraison, et elles n'évoluent presque pas entre véraison et récolte, sauf dans le cas extrême d'une défoliation précoce. Concernant l'oïdium, la variable vitesse d'apparition des feuilles par rameau jusqu'au stade de la nouaison semble très pertinente. Pour calculer cette variable, on a besoin de connaître le nombre total de feuilles. Donc cette variable pourrait servir d'indicateur précoce de l'état de croissance de la vigne vis-à-vis des deux maladies. Cependant d'un point de vue pratique elle demande un travail lourd pour une bonne caractérisation de la vigne. Une variable alternative pourrait être l'indice foliaire. En effet, de bonnes corrélations entre l'indice foliaire et le nombre de feuilles par rameau ont été établies. Cette variable peut être mesurée de façon indirecte comme cela a été réalisé dans cette étude (*Cf II*)

3. Prévenir les maladies ou maîtriser rendement et qualité de la récolte ?

Nous avons montré dans ce travail que le développement épidémique de l'oïdium et du botrytis sur grappes est moins élevé dans des conditions qui défavorisent la croissance et le rendement de la vigne. Cependant ces conditions ne sont pas attractives d'un point de vue économique (Grainger 1979). Ainsi, quand on observe l'évolution saisonnière du LAI mesuré dans cette étude et qu'on essaie de trouver les valeurs qui permettent d'obtenir un optimum de production et un optimum sanitaire, on voit une situation paradoxale (*Figure 7.3*). En effet, le LAI qui produit le rendement le plus élevé est celui de la modalité irriguée et fertilisée (MT). Il faut rappeler que cette modalité a été conduite de façon à ce qu'aucune contrainte nutritionnelle ne limite la croissance de la vigne. Par contre, le niveau de LAI qui prévient le plus les dégâts sur grappes est celui de la modalité avec un enherbement permanent (MF), c'est à dire le plus faible. Entre ces deux extrêmes, on trouve les autres modalités, notamment la modalité avec un enherbement semi permanent (MR) qui produit des rendements et des dégâts de maladies intermédiaires. Un troisième facteur vient complexifier cette relation qui oppose le rendement et l'état sanitaire de la vigne, c'est la qualité de la vendange. En effet, la gamme des LAI associé à une récolte de bonne qualité pour la production de vin est étroite et se situe à mi-parcours entre l'optimum sanitaire et l'optimum de production (*Figure 7.3*). Ainsi c'est le raisin produit dans la modalité avec enherbement semi permanent qui a été jugé comme le meilleur pour la production de vin, selon les analyses des moûts et d'après l'expertise du chef du domaine.

Les variations climatiques interannuelles qui se produisent dans les régions viticoles méditerranéennes avec des sécheresses estivales fortes font que la présence d'un enherbement permanent peut s'avérer rapidement problématique du point de vue du rendement et de la qualité (en raison d'une forte concurrence pour les ressources). Si l'enherbement permanent est plutôt favorable au cours d'une année relativement pluvieuse

(par exemple en 2004), son impact est très défavorable en année sèche (2005 et 2006). L'enherbement semi-permanent, ressort comme une alternative favorable qui peut répondre aux objectifs de production et qualité ainsi qu'à la diminution de la sensibilité aux maladies. En effet, la diminution de l'expression végétative de la vigne a été importante au cours d'une année humide et modérée les années sèches. 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. Enfin la modalité désherbée, la plus utilisée par les viticulteurs actuellement, s'est avérée trop instable d'une année sur l'autre. En année humide, elle produit des rendements très élevés, quasiment du même ordre de grandeur que la modalité sans contraintes MT, mais la qualité est médiocre et la sensibilité de la vigne aux maladies est élevée. Au contraire, dans des saisons très sèches, le rendement diminue sensiblement et la qualité n'est pas optimale. Cela pose la question de l'utilisation de l'irrigation pour éviter les problèmes de production au cours de ces années très contraignantes. Cependant, l'irrigation devrait être raisonnée et contrôlée, de façon à faire parvenir l'expression végétative de la vigne à un niveau intermédiaire comme défini auparavant. L'irrigation maximale (100% de l'ETP) comme celle pratiquée dans notre expérimentation n'est pas envisageable pour obtenir du raisin destiné à la production de vins de qualité. Elle a été utilisée ici seulement pour assurer des niveaux de vigueur et d'expression végétative élevés.

4. Perspectives : i) peut-on proposer des modifications aux règles de décisions pour tenir compte des relations positives entre croissance de la vigne et développement des maladies cryptogamiques ?

La relation positive qui existe entre le développement des champignons et la croissance de la vigne, ainsi que les indicateurs de vigueur et de croissance végétative identifiés, nous donnent les éléments pour enrichir les règles de décision de protection intégrée. Pour le botrytis il serait possible d'incorporer une mesure de surface foliaire à la véraison comme un critère de plus qui déclencherait ou pas le traitement. La Figure 7.4 montre cette modification. Ainsi, dans des conditions de faible surface foliaire et de grappes peu compactes on pourrait penser que des traitements ne seraient pas nécessaires, même quand l'indice climatique de risque est élevé. D'un autre côté, quand la surface foliaire est élevée et les autres indices de risque sont aussi favorables pour le développement du botrytis, un avancement du traitement préconisé pourrait être nécessaire.

Pour l'oïdium, l'incorporation d'un indice comme la surface foliaire ou la vitesse d'apparition des feuilles pourrait remplacer l'observation des attaques sur grappes faites trois semaines après la nouaison (*Figure 7.5*). Ainsi, si le développement foliaire est faible on pourrait espérer que les conditions du développement de l'oïdium seront peu favorables et donc peu de dégâts sur grappes à la récolte. Cela signifierait qu'un traitement ne serait pas nécessaire.

5. Perspectives : ii) peut-on identifier des itinéraires techniques à la fois moins sensibles aux maladies cryptogamiques et performants d'un point de vue productif ?

La conception d'itinéraires techniques qui permettent de concilier des objectifs de production et de qualité de la vendange, des objectifs environnementaux (réduction des intrants phytosanitaires, diminution de l'érosion, etc.) ainsi que des objectifs économiques, repose sur une bonne définition des critères d'évaluation à utiliser. Pour chaque critère, les gammes de valeurs désirables et non désirables doivent être déterminées et une analyse multicritère doit être réalisée (Gary et al. 2006; Loyce and Wery 2006). Certains travaux ont déjà appliqué ce type d'analyse pour évaluer des stratégies de gestion du sol du vignoble dans des conditions méditerranéennes (Cinna 2005; Gary et al. 2006). Ces recherches ont exploré différentes stratégies sous des conditions climatiques interannuelles variées ainsi que pour différents types de sol. Les critères d'évaluation utilisés dans ces travaux ont été le développement végétatif de la vigne, le rendement, la qualité et le ruissellement. D'autres travaux ont essayé d'incorporer le coût économique et en temps de travail des pratiques dans les critères d'évaluation (Hofmann 2006). Les résultats obtenus dans notre étude pourraient être incorporés comme un critère complémentaire, ou bien enrichir celui du développement végétatif déjà utilisé (*Figure 7.6*). En effet, des risques de dégâts de maladies sur grappes pourraient être associés à l'état de croissance de la vigne.

Dans une analyse multicritère, il est nécessaire d'associer à chaque critère un indicateur facile à obtenir par simulation. Dans les travaux cités, les variables choisies ont été la fraction d'eau du sol transpirable par la plante (FTSW) à différents stades phénologiques de la vigne et le ruissellement moyen annuel. Par la suite, un modèle de fonctionnement du système vigne - culture intercalaire - sol est utilisé pour simuler ces variables (Gary et al. 2006). Ce même modèle pourrait être utilisé pour simuler le développement végétatif de la vigne aux périodes clés établies pour l'oïdium et le botrytis.

Enfin, les valeurs seuils d'acceptabilité de ces critères dépendent fortement des objectifs du viticulteur et du poids qu'il donne à chaque critère. Des références existent ; par exemple certaines recherches indiquent qu'une sévérité de l'oïdium sur grappes égale à 25 % n'a pas d'influence perceptible sur la qualité organoleptique du vin rouge produit à partir de ces grappes (Calonnec et al. 2004). On peut associer à ce seuil de sévérité de l'attaque une valeur seuil de croissance de la vigne à partir des relations entre états de croissance et développement de l'oïdium établies dans notre étude.

Le schéma théorique proposé ici permet d'ores et déjà de classer, du point de vue de leur impact sur l'état sanitaire de la vigne, des itinéraires techniques conduisant à différents états de croissance. Il fournit un cadre conceptuel qui doit permettre d'intégrer les effets de différentes variables de la culture (génotype), de son environnement (climat, présence de l'inoculum) et du système de culture (conduite du couvert végétal, entretien du sol, irrigation, fertilisation).

Références Bibliographiques

- Abbasi M K and Adams W A (2000) Gaseous N emission during simultaneous nitrification-denitrification associated with mineral N fertilization to a grassland soil under field conditions. *Soil Biology and Biochemistry*. 32(8-9), 1251-1259.
- 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.
- Adrian M, Jeandet P, Douillet-Breuil A C, Tesson L and Bessis R (2000) Stilbene content of mature *Vitis vinifera* berries in response to UV-C elicitation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 48(12), 6103-6105.
- 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.
- Alvarez M (1987) Biología - Epidemiología de *Botrytis cinerea* en curso: Manejo de botritis y otras plagas en uva de mesa. . 111-114 pp.
- Amati A, Piva A, Castellari M, Arfelli G, Amati A, Piva A, Castellari M and Arfelli G (1996) Preliminary studies on the effect of *Oidium tuckeri* on the phenolic composition of grapes and wines. *Vitis*: 35(3), 149-150.
- AME (2003) Pesticides dans les eaux superficielles et souterraines des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et de Corse.
- 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.
- Aubertot J N, Barbier J M, Carpentier A, Gril J J, Guichard L, Lucas P, Savary S, Savini I and Voltz M (2005) Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. . In *Rapport d'Expertise scientifique collective, INRA et Cemagref (France)*.
- Auger J and Esterio M (1997) *Botrytis* en vides en Chile: Epidemiología y resistencia a fungicidas. In *Botrytis: Nuevas estrategias de control cultural, biológico y químico en uva de mesa, 1997*. pp 3-9.
- Baillod M and Baggiolini M (1993) Reference stages in grapevine. *Revue Suisse de Viticulture, d'Arboriculture et d'Horticulture*: 25(1), 7-9.
- 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.
- 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.
- Beever R E and Weeds P L (2004) Taxonomy and genetic variation of *Botrytis* and *Botryotinia*. In *Botrytis: biology, pathology and control*. Eds. , Ed E Y e al. pp 29-52. Kluwer Acad. Publishers, Dordrecht.

- Bodin F and Morlat R (2006) Characterization of Viticultural Terroirs using a Simple Field Model Based on Soil Depth I. Validation of the Water Supply Regime, Phenology and Vine Vigour, in the Anjou Vineyard (France). *Plant and Soil*: 281(1 - 2), 37-54.
- Boureau M and Cuinier C (1997) Protection of vineyards and wine quality. Reasoned control, pathogens, residues and fermentation. *Phytoma*: 500, 42-44.
- 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.
- Broschous S C, Frank J A and Frederick J R (1985) Influence of winter wheat management practices on the severity of powdery mildew and Septoria blotch in Pennsylvania. *Phytopathology*: 75(5), 538-542.
- Bulit J and Lafon R (1978) The powdery mildew of the vine. In *The powdery mildews.*, Ed S DM. pp 525-548. Academic Press., London; New York and San Francisco, USA UK.
- Bulit J and Dubos B E (1988) Botrytis bunch rot and blight. In *Compendium of grape diseases.*, Eds R C Pearson and A C Goheen. pp 13-15. APS Press., St Paul, MN.
- Calonnet A, Cartolaro P, Poupot C, Dubourdieu 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.
- 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 (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.
- Carbonneau A (1999) Vineyard training system: results of the French Mediterranean network. *Progrès agricole et viticole*: 116(22;23), 483-485;503-517.
- Carpentier F G (2005) PSRS83B - Introduction aux analyses multidimensionnelles, Ed U d B Occidentale. 72-85 pp.
- Carsoulle J (1996) Enherbement permanent du vignoble. Influence sur la production viticole. *Progrès agricole et viticole*: 114(4), 87-91.
- Casteran P, Raynier A and Rivet P (1981) Evaluation du nombre de fleurs des bourgeons de quelques cépages de *Vitis vinifera* L. . *Progrès agricole et viticole*: 15-16, 595-599.
- 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.
- Champagnol F (1984) *Éléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale*. 351 p.
- 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.

- Chenet I (1997) Résistance de la baie de raisin (*Vitis vinifera*) à *Botrytis cinerea*: étude de la pellicule et de ses parois. Université de Bordeaux II, Bordeaux, 159 p.
- Cinna J-P (2005) Evaluation d'un modèle de bilan hydrique d'une vigne enherbée et analyse multicritère d'itinéraires techniques d'enherbement. MSc thesis, ENESAD, Dijon - France, 64 p.
- Clerjeau M, Blancard D and Launes S (1998a) Early primary contamination, susceptibility of grapes and gravity of attacks of powdery mildew on grapevines. *Progrès agricole et viticole*: 115(2), 32-35.
- Clerjeau M, Blancard D, Launes S and Jailloux F (1998b) Factors influencing attacks of powdery mildew on grapes: early primary leaf contamination and stage of fruit sensitivity. *Phytoma*: 507, 28-31.
- Cock G J (1985) Soil structural conditions of vineyards under two soil management systems. *Australian Journal of Experimental Agriculture*: 25, 450-454.
- 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 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.
- 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 (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.
- 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.
- Daire X, Poinssot B, Bentejac M, Silue D and Pugin A (2002) Stimulation of the natural defence mechanisms of the grapevine against pathogens: encouraging results for downy mildew. *Phytoma*:(No.548), 24-26.
- Darriet P, Pons M, Henry R, Dumont O, Findeling V, Cartolaro P, Calonnec A and Dubourdiou D (2002) Impact odorants contributing to the fungus type aroma from grape berries contaminated by powdery mildew (*Uncinula necator*); incidence of enzymatic activities of the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*: 50(11), 3277-3282.
- de la Hera M L, Romero P, Gomez-Plaza E and Martinez A (2007) 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*: 87(3), 261-274.
- de la Rocque B (2002) Viticulture raisonnée et méthodes alternatives de protection. Une réflexion sur les enjeux et les difficultés, notamment en matière de prophylaxie. *Phytoma*: 548, 18-20.
- 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.
- Delière L, Cartolaro P, Sauris P and Couet I (2002) Artificial powdery mildew infestation of grapevines: an experimentation tool for vineyards. *Phytoma*:(No.549), 9-12.
- Deloire A, Kraeva E and Andary C (2000) Natural defences of the vine. *Progrès agricole et viticole*: 117(11), 254-262.
- 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.
- 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 (1995a) The light environment within grapevine canopies. I. Description and seasonal changes during fruit development. *American Journal of Enology and Viticulture*: 46(2), 209-218.
- Dokoozlian N K and Kliewer W M (1995b) 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.
- 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.
- Doster M A and Schnathorst W C (1985a) Comparative susceptibility of various grapevine cultivars to the powdery mildew fungus *Uncinula necator*. *American Journal of Enology and Viticulture*: 36(2), 101-104.
- Doster M A and Schnathorst W C (1985b) Effects of leaf maturity and cultivar resistance on development of the powdery mildew fungus on grapevines. *Phytopathology*. 75(3), 318-321.
- 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.
- Dubos B and Roudet J (2003) Early evaluation of grape berry susceptibility to *Botrytis cinerea*. *Bulletin OILB/SROP*: 26(8-1), 7-10.
- Egger E, Marinelli E and Greco G (1994) Un nuovo modello gestionale per il controllo della *Peronospora della vite*: prime verifiche nell'ambiente viticolo aretino *Rivista di Viticoltura e di Enologia*: 47(1), 15-32.
- Egger E, Marinelli E and D'Arcangelo M (1996) Influence of different methods for estimating leaf wetting on the forecasting of attacks of downy mildew and grey mould on grapes. *Informatore Fitopatologico*: 46(3), 57-61.
- Eichhorn K W and Lorenz D H (1977) Phenological development stages of the grape vine. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*: 29(8), 119-120.
- Emmett R W, Buchanan G A and Magarey P A (1992) Grapevine diseases and pest management. *Australian & New Zealand Wine Industry Journal*: 7(3), 149-171.
- 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.
- English J T, Thomas C S, Marois J J and Gubler W D (1989) Microclimates of grapevine canopies associated with leaf removal and control of *Botrytis* bunch rot. *Phytopathology*: 79(4), 395-401.
- English J T, Bledsoe A M, Marois J J and Kliewer W M (1990) Influence of grapevine canopy management on evaporative potential in the fruit zone. *American Journal of Enology and Viticulture*: 41(2), 137-141.

- Evans K J, Crisp P and Scott E S (2006) Applying spatial information in a whole-of-block experiment to evaluate spray programs for powdery mildew in organic viticulture. *In 5th International workshop on grapevine downy and powdery mildew*, Italy, 2006. Eds I Pertot, C Gessler, D M Gadoury, W D Gubler, H-H Kassemeyer and P A Magarey. pp 169-171.
- Fermaud M (1998) Cultivar susceptibility of grape berry clusters to larvae of *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Economic Entomology*. 91(4), 974-980.
- 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.
- Ficke A, Gadoury D M and Seem R C (2002) Ontogenic resistance and plant disease management: A case study of grape powdery mildew. *Phytopathology*. 92(6), 671-675.
- Ficke A, Gadoury D M, Seem R C and Dry I B (2003) Effects of ontogenic resistance upon establishment and growth of *Uncinula necator* on grape berries. *Phytopathology*. 93(5), 556-563.
- Ficke A, Gadoury D M, Seem R C, Godfrey D and Dry I B (2004) Host barriers and responses to *Uncinula necator* in developing grape berries. *Phytopathology*. 94(5), 438-445.
- Fox R (1993) Soil and foliage fertilizing with cv. Riesling. Results of long-term studies *Rebe und Wein*. 46, 319-322.
- 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.
- Gabler F M, Smilanick J L, Mansour M, Ramming D W and Mackey B E (2003) Correlations of morphological, anatomical, and chemical features of grape berries with resistance to *Botrytis cinerea*. *Phytopathology*. 93(10), 1263-1273.
- Gadoury D M, Seem R C, Pearson R C, Wilcox W F and Dunst R M (2001) Effects of powdery mildew on vine growth, yield, and quality of Concord grapes. *Plant Disease*: 85(2), 137-140.
- 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.
- Gadoury D M, Seem R C, Wilcox W F, Kennelly M M, P.A. M, Dry I B, Gubler W D, Pscheidt J W, Grove G G, Sutton T B, Ellis M A, Stevenson K L, Maixner M and Evans K J (2006) Modeling and Mapping the relationship between climate and ontogenic resistance to the major fungal diseases of grapevine. *In 5th International workshop on grapevine downy and powdery mildew*, Italy, 2006. Eds I Pertot, C Gessler, D M Gadoury, W D Gubler, H-H Kassemeyer and P A Magarey. pp 157-159.
- Galet P (1977) Les maladies et les parasites de la vigne. 871 p.
- Galet P (1991) Précis d'ampélographie pratique, Montpellier - France. 256 p.
- Galet P (2000a) Dictionnaire Encyclopédique des cépages. 762 p.
- Galet P (2000b) Précis de viticulture, Montpellier - France. 602 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, SupAgro, Montpellier - France, 349 p.
- 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.

- 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, 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.
- Gaudillère J (2003) Conduite de la vigne et résistance aux pathogènes. *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*: 32-33.
- 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.
- Goheen A C and Schnathorst W C (1963) Resistance to powdery mildew in grapevines related to osmotic value and associated factors. (Abstr.). *Phytopathology*: 53, 1139.
- 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.
- Goulet E, Cady E, Chrétien P and Rioux D (2006) Grapevine sensitivity to fungal diseases : use of a combination of terroir cartography and parcel survey. In *Vith International Terroir Congress*, 2006. pp 94-100.
- Govrin E M and Levine A (2000) The hypersensitive response facilitates plant infection by the necrotrophic pathogen *Botrytis cinerea*. *Current Biology*: 10(13), 751-757.
- Grainger J (1979) Scientific proportion and economic decisions for farmers. *Annual Review of Phytopathology*: 17, 223-252.
- Gubler W D, Marois J J, Bledsoe A M and Bettiga L J (1987) Control of *Botrytis* bunch rot of grape with canopy management. *Plant Disease*: 71(7), 599-601.
- Gubler W D, Bettiga L J and Heil D (1991) Comparisons of hand and machine leaf removal for the control of *Botrytis* bunch rot. *American Journal of Enology and Viticulture*: 42(3), 233-236.
- 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.
- 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.
- Hammerschmidt R (1999) Phytoalexins: what have we learned after 60 years? *Annual Review of Phytopathology*: 37, 285-306.
- 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.

- 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.
- Hoppmann D and Berkelmann-Loehnertz B (2000) Prognosis of phenological stages of *Vitis vinifera* (cv. Riesling) for optimizing pest management. *Bulletin OEPP*. 30(1), 121-126.
- 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.
- Huglin P (1998) Biologie et écologie de la vigne. Lavoisier Tec & Doc, Paris - France. 370 p.
- 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.
- Iland P (2005) Chapter 1 - Development and status of Australian Viticulture. In *Viticulture - Volume 1: Resources*, Eds P R Dry and B G Coombe. pp 1-16. Winetitles, Ashford - Australia.
- INRA (2000) Botanique de la vigne: position taxonomique, présentation de la biodiversité des *Vitacées* et de *Vitis vinifera*, Ed INRA. INRA Montpellier.
- INRA (2004) Le problème de la décision des interventions phytosanitaires en protection intégrée de la vigne. In *Les recherches de l'INRA pour la filière vigne et vin*, Ed INRA. INRA Montpellier.
- Intrieri C, Poni S, Lia G and Campo M G d (2001) Vine performance and leaf physiology of conventionally and minimally pruned Sangiovese grapevines. *Vitis*: 40(3), 123-130.
- 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.
- Jarvis W R (1980) Epidemiology. In *The biology of Botrytis*. pp 219-250. Academic Press, New York.
- Jarvis W R, Gubler W D and Grove G G (2002) Epidemiology of powdery mildews in agricultural pathosystems. In *The powdery mildews: a comprehensive treatise*. pp 169-199.
- Jeandet P, Douillet-Breuil A C, Bessis R, Debord S, Mohamed S and Adrian M (2002) Phytoalexins from the Vitaceae: biosynthesis, phytoalexin gene expression in transgenic plants, antifungal activity, and metabolism. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 50(10), 2731-2741.
- Kannenbergh J (1992) Results of N fertilizing during many years on grapevines with regard to soil Nmin content. *Deutsches Weinbau-Jahrbuch*. 43, 107-116.
- 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.
- Kast W K and Stark-Urnau M (2000) The early development of ontogenetic resistance to powdery mildew in fruit of different vine varieties. *Bulletin OILB/SROP*. 23(4), 13-15.
- 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.
- Kliwer W M (1991) Methods for determining the nitrogen status of vineyards. *International symposium on nitrogen in grapes and wine*, 133-147.
- Kliwer 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 November, 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 (1987) Effectiveness of shoot topping and leaf removal as a means of improving quality *In XXIIInd International Horticultural Congress on Grapevine canopy and vigor management*, Davis, California, USA, 1987. Ed W M Kliewer. pp 141-156. Acta Horticulturae.
- 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, Cépape Saint Georges, 1997). *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*. 33(4), 149-160.
- Kriedemann P E, Kliewer W M and Harris J M (1970) Leaf age and photosynthesis in vitis vinifera L. *Vitis*: 9, 97-104.
- Laffosse E (2001) Analyse systémique d'une parcelle de vigne enherbée. MSc thesis, ENSA-M-ENSA-R, Montpellier, 45 p.
- 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).
- Lalancette N and Hickey K D (1986) An apple powdery mildew model based on plant growth, primary inoculum, and fungicide concentration. *Phytopathology*. 76(11), 1176-1182.
- Latorre B (1997) El pronóstico de la pudrición gris (*Botrytis cinerea*) en uva de mesa *In Seminario: Botrytis: Nuevas estrategias de control cultural, biológico y químico en uva de mesa*, 1997. pp 10-13.
- 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 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 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.
- Leonard J and Andrieux P (1998) Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena*: 32, 209-223.
- Lewis W J, Lenteren J C v, Phatak S C and Tumlinson J H, III (1997) A total system approach to sustainable pest management. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*: 94(23), 12243-12248.
- 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.

- Lorenz D H, Eichhorn K W, Bleiholder H, Klose R, Meier U and Weber E (1995) Phenological growth stages of the grapevine (*Vitis vinifera* L. spp. *vinifera*) - codes and descriptions according to the extended BBCH scale. *Australian journal of grape and wine research*: 1(2), 100-103.
- 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.
- Magarey P A, Nicholas P R and Wachtel M F (1994) Control of the diseases of grapes in Australia and New Zealand. *Australian & New Zealand Wine Industry Journal*: 9(3), 197-225.
- 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.
- Maigre D (1999) Physiological behaviour of grapevine and cluster light microclimate: influence of permanent grass cover. Results on cv. Gamay in 1997. *Progrès agricole et viticole*: 116(12), 278-284.
- Marois J J, Nelson J K, Morrison J C, Lile L S and Bledsoe A M (1986) The Influence of Berry Contact within Grape Clusters on the Development of Botrytis cinerea and Epicuticular Wax. *Am. J. Enol. Vitic.*: 37(4), 293-296.
- Martin S R and Dunn G M (2000) Effect of pruning time and hydrogen cyanamide on budburst and subsequent phenology of *Vitis vinifera* L. variety Cabernet Sauvignon in central Victoria. *Australian journal of grape and wine research*: 6(1), 31-39.
- 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.
- Martinez F, Dubos B and Fermaud M (2005) The role of saprotrophy and virulence in the population dynamics of Botrytis cinerea in vineyards. *Phytopathology*: 95(6), 692-700.
- 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, Cheng G and Weinbaum S A (1987a) Changes in water potential and dermal extensibility during grape berry development. *Journal of the American Society for Horticultural Science*: 112(2), 314-319.
- Matthews M A, Anderson M M and Schultz H R (1987b) 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.

- 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.
- Molot B (2001) Downy mildew biology: primary or secondary contamination? Some considerations. *Progrès agricole et viticole*: 118(3), 62-65.
- Monteith J L (1965) Evaporation and environment. In *XIXth Symposia of the Society for Experimental Biology*, 1965. pp 205-234.
- Moriondo M, Orlandini S and Zipoli G (1999) Analyses of agrometeorological modelling applied to fruit crops. Note II. Pathogen simulations. *Rivista di Frutticoltura e di Ortofloricoltura*: 61(5), 73-79.
- 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 (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 (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.
- 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 (1999) Influence of the row orientation on performance of grapevines. *Revue Suisse de Viticulture, d'Arboriculture et d'Horticulture*: 31(5), 235-239.
- Myburgh P A (2005) Water status, vegetative growth and yield responses of *Vitis vinifera* L. cvs. Sauvignon blanc and Chenin blanc to timing of irrigation during berry ripening in the coastal region of South Africa. *South african journal of Enology and Viticulture*: 26(2), 59-67.
- Nair N G (1985) Bunch rot of grapes caused by *Botrytis cinerea*. In *Chemicals in the vineyard*, Eds D C Lester, R M Cirami and T H Lee. pp 59-66. Aust. Soc. Vitic. Oenol., Glen Osmond, SA.
- Nashimoto N and Fujisaki M (1995) Chilling requirements of buds of some deciduous fruits grown in souther Japan and the means to break dormancy. *Acta Horticulturae*: 395, 153-160.
- Norton M R, Lelievre F and Volaire F (2006) 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.
- 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.
- Oliva J, Navarro S, Navarro G, Camara M A and Barba A (1999) Integrated control of grape berry moth (*Lobesia botrana*), powdery mildew (*Uncinula necator*), downy mildew (*Plasmopara viticola*) and grapevine sour rot (*Acetobacter* spp.). *Crop Protection*: 18(9), 581-587.

- 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.
- Padgett M and Morrison J C (1990) Changes in grape berry exudates during fruit development and their effect on mycelial growth of *Botrytis cinerea*. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*: 115(2), 269-273.
- Patakas A and Noitsakis B (2001) Leaf age effects on solute accumulation in water-stressed grapevines. *Journal of Plant Physiology*: 158(1), 63-69.
- 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 Gadoury D M (1987) Cleistothecia, the source of primary inoculum for grape powdery mildew in New York. *Phytopathology*: 77(11), 1509-1514.
- 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 - France, 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, Sullivan J A and Fisher K H (1993) Effect of Cluster Exposure, Berry Contact and Cultivar on Cuticular Membrane Formation and Occurrence of Bunch Rot (*Botrytis-Cinerea* Pers Fr) with 3 *Vitis-Vinifera* L Cultivars. *Vitis*: 32(2), 87-97.
- 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.
- Pezet R and Bolay A (1992) Powdery mildew on grape: present situation and consequences for control. *Revue Suisse de Viticulture, d'Arboriculture et d'Horticulture*: 24(2), 67-71.
- Pieri P, Fermaud M and Mimiague F (2001a) Analyse du microclimat des grappes. Effets de la compacité et de l'effeuillage. In *Actes des XIIe journées GESCO*, Montpellier - France, 3-7 July, 2001a. pp 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.

- Ponchia G and Giulivo C (1992) Influenza della combinazione d'innesto e della tecnica culturale sull'attività vegetative e produttiva di due vitigni. *In International Symposium of Grapevine Physiology*, Torino, Italy, 1992. pp 33-38.
- 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.
- 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.
- 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.
- Reynolds A G and Wardle D A (1994) Impact of training system and vine spacing on vine performance and berry composition of Seyval blanc. *American Journal of Enology and Viticulture*: 45(4), 444-451.
- Ribéreau-Gayon J, Ribéreau-Gayon P and Seguin G (1980) Botrytis cinerea in enology. *In The biology of Botrytis*, Eds J R Coley-Smith, K Verhoeff and W R Jarvis. pp 251-274. Academic Press, New York.
- Rives M (2000a) vigour, pruning, cropping in grapevine (*Vitis vinifera* L.). I. a literature review. *Agronomie*: 20, 79-91.
- Rives M (2000b) Vigour, pruning, cropping in the grapevine (*Vitis vinifera* L.). II. Experiments on vigour, pruning and cropping. *Agronomie*: 20(2), 205-213.
- Robertson G L (1979) The fractional extraction and quantitative determination of pectic substances in grapes and musts. *American Journal of Enology and Viticulture*: 30, 182-186.
- 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.
- Rodriguez-Lovelle B, Soyer J-P and Molot C (1999) Efectos del enherbado en viticultura sobre la nutrición mineral, el rendimiento y el vigor. *Investigación agraria : producción*: 14, 1-12.
- 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.
- Rouzet J, Weber M and Collet L (1998) Modèles de prévision des épidémies d'oidium de la vigne. Premiers résultats. *Progrès agricole et viticole*: 115(7), 155-160.
- Rozier J P and Etienne F (1991) Synthèse des trois premières années d'études sur l'enherbement du vignoble méditerranéen. Effets sur la production et la qualité. *In IIIe Symposium International sur la non culture de la vigne et les autres techniques d'entretien des sols viticoles*, Montpellier, 18-20 November 1991, 1991. pp 433-440.
- Rugner A, Rumbolz J, Huber B, Bleyer G, Gisi U, Kassemeyer H H and Guggenheim R (2002) Formation of overwintering structures of *Uncinula necator* and colonization of grapevine under field conditions. *Plant Pathology*: 51(3), 322-330.
- Sall M A (1980) Epidemiology of grape powdery mildew: a model. *Phytopathology*: 70(4), 338-342.
- Sall M A and Wrynski J (1982) Perennation of powdery mildew in buds of grapevines. *Plant Disease*: 66(8), 678-679.
- Savage S D and Sall M A (1983) Botrytis bunch rot of grapes: the influence of selected cultural practices on infection under California conditions. *Plant Disease*: 67, 771-774.
- Savage S D and Sall M A (1984) Botrytis bunch rot of grapes: influence of trellis type and canopy microclimate. *Phytopathology*: 74(1), 65-70.

- 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.
- 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.
- Scholander (1965) Sap pressure in vascular plants. *Science*. 148, 339-346.
- 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.
- Seguin G and Compagnon J (1970) Une cause du développement de la pourriture grise sur le sol gravelo-sableux du vignoble bordelais. *Connaissances de la vigne et du vin*. 2, 203-221.
- Siegfried W, Viret O, Huber B and Wohlhauser R (2007) Dosage of plant protection products adapted to leaf area index in viticulture. *Crop Protection*. 26(2), 73-82.
- 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 (1988) Shoot spacing and canopy light microclimate. *American Journal of Enology and Viticulture*. 39(4), 325-333.
- 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.
- Smithyman R P, Howell G S and Miller D P (1997) Influence of canopy configuration on vegetative development, yield, and fruit composition of Seyval blanc grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*. 48(4), 482-491.
- Smithyman R P, Howell G S and Miller D P (1998) The Use of Competition for Carbohydrates Among Vegetative and Reproductive Sinks to Reduce Fruit Set and Botrytis Bunch Rot in Seyval blanc Grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*. 49(2), 163-170.
- 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 après 20 ans d'expérimentation. *Progrès agricole et viticole*: 101(12), 315-320.
- Soyer J-P (1987a) Influence of diverse agronomical factors on the sensitivity of grapevine to downy mildew (*Plasmopara viticola*). *In Influence of environmental factors on the control of grape pests, diseases and weeds. Proceedings of a meeting of the EC Expert's Group*, Thessaloniki - Greece, 6-8 October, 1987a. Ed R Cavalloro. pp 245-254.
- Soyer J P (1987b) Influence of diverse agronomical factors on the sensitivity of grapevine to downy mildew (*Plasmopara viticola*). *In Influence of environmental factors on the control of grape pests, diseases and weeds. Proceedings of a meeting of the EC Expert's Group*, Thessaloniki - Greece, 6-8 October, 1987b. Ed R Cavalloro. pp 245-254.

- 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.
- 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.
- Starck D, Heilemann J, Momken M and Wray V (1998) Cell wall-conjugated phenolics from coniferae leaves. *Phytochemistry*: 27, 3517-3521.
- Steva H, Cartolaro P and Gomes da Silva M T (1990) Tolerance of powdery mildew of SBI fungicides: situation for 1989. *Phytoma*: 419, 41-44.
- Stummer B E, Francis I L, Zanker T, Lattey K A and Scott E S (2005) Effects of powdery mildew on the sensory properties and composition of Chardonnay juice and wine when grape sugar ripeness is standardised. *Australian journal of grape and wine research*: 11(1), 66-76.
- 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, 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.
- Tassie E and Freeman B M (1998) Chapter Four - Pruning. *In Viticulture - Practices*, Eds B G Coombe and P R Dry. pp 42-65. Winetitles, Adelaide - Australia.
- 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.
- Thomas C S, Marois J J and English J T (1988) The effects of wind speed, temperature and relative humidity on development of aerial mycelium and conidia of *Botrytis cinerea* on grape. *Phytopathology*: 78(3), 260-265.
- Tournebize J (2001) Impact de l'enherbement du vignoble alsacien sur le transfert des nitrates. PhD thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 306 p.
- 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.
- 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.
- Vail M E and Marois J J (1991) Grape cluster architecture and the susceptibility of berries to *Botrytis cinerea*. *Phytopathology*: 81(2), 188-191.
- 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.
- Van Baarlen P, Legendre L and Van Kan J (2004) Plant defence compounds against *Botrytis* infection. *In Botrytis: biology, pathology and control*, Ed E Y e al. pp 143-155. Kluwer Acad. Publishers Dordrecht.

- Van Leeuwen C and Seguin G (1994) 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 (2000) 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, Gaudillère J-P and Tregoat O (2001) Evaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique $^{13}C/^{12}C$. *Journal international des Sciences de la Vigne et du Vin*: 35(4), 195-205.
- 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.
- Vercesi A, Locci R and Prosser J I (1997) Growth kinetics of *Botrytis cinerea* on organic acids and sugars in relation to colonization of grape berries. *Mycological Research*: 101, 139-142.
- Viret O, Bloesch B, Taillens J, Siegfried W and Dupuis D (2001) Prevision et gestion des infections du mildiou de la vigne (*Plasmopara viticola*) à l'aide d'une station d'avertissement. *Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture*: 33(2), I-XII.
- 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 Norton M (2006) Summer Dormancy in Perennial Temperate Grasses. *Ann Bot*: 98(5), 927-933.
- 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.
- Willocquet L, Colombet D, Rougier M, Fargues J and Clerjeau M (1996) Effects of radiation, especially ultraviolet B, on conidial germination and mycelial growth of grape powdery mildew. *European Journal of Plant Pathology*: V102(5), 441-449.
- 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.
- Winkler A J, Cook J A, Kliewer W M and Lider L A (1974) General viticulture. In *General viticulture*. p 710 pp.
- Yang Y S and Hori Y (1979) Studies on retranslocation of accumulated assimilates in Delaware grapevines. I. Retranslocation of ^{14}C -assimilates in the spring following ^{14}C 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.

Zoecklein B W, Wolf T K, Duncan N W, Judge J M and Cook M K (1992) Effects of Fruit Zone Leaf Removal on Yield, Fruit Composition, and Fruit Rot Incidence of Chardonnay and White Riesling (*Vitis vinifera* L.) Grapes. *Am. J. Enol. Vitic.*: 43(2), 139-148.