

ETUDE DES TERROIRS VITICOLES VAUDOIS COMPORTEMENT DE LA VIGNE EN FONCTION DES CONDITIONS PEDO-CLIMATIQUES

RAPPORT FINAL

V. ZUFFEREY et F. MURISIER

*Agroscope RAC Changins
Station fédérale de recherches agronomiques de Changins,
Centre viticole du Caudoz, CH-1009 Pully*

Avec la collaboration de :

Madame Isabelle LETESSIER et Monsieur Cédric FERMOND
SIGALES Etudes de Sols et de Terroirs, F-38410 St Martin d'Uriage

Madame Karine PYTHOUD
*Laboratoire de Systèmes d'information géographique (LASIG), EPFL,
CH-1015 Lausanne*

Mademoiselle Véronique BONNET (ENSA Montpellier)

Messieurs C. VERDUN (ENSA Rennes)
D. LOIZEAU (UFR Sciences Angers)
L.-M. SABADIE (ENSA Montpellier)
F. MALLE (ENSA Montpellier)
J. PRIETO (INTA Mendoza, Argentine)
O. GARCIA (ENSA Montpellier)
G. BRUN (ENSA Montpellier)
S. ALMENDROS (Institut Jules Guyot, Dijon)

Avril 2004

**ETUDE DES TERROIRS VITICOLES VAUDOIS
COMPORTEMENT DE LA VIGNE EN FONCTION DES
CONDITIONS PEDO-CLIMATIQUES**

RAPPORT FINAL

V. ZUFFEREY et F. MURISIER

*Agroscope RAC Changins
Station fédérale de recherches agronomiques de Changins,
Centre viticole du Caudoz, CH-1009 Pully*

Avec la collaboration de :

Madame Isabelle LETESSIER et Monsieur Cédric FERMOND
SIGALES Etudes de Sols et de Terroirs, F-38410 St Martin d'Uriage

Madame Karine PYTHOUD
*Laboratoire de Systèmes d'information géographique (LASIG), EPFL,
CH-1015 Lausanne*

Mademoiselle Véronique BONNET (ENSA Montpellier)

Messieurs C. VERDUN (ENSA Rennes)
D. LOIZEAU (UFR Sciences Angers)
L.-M. SABADIE (ENSA Montpellier)
F. MALLE (ENSA Montpellier)
J. PRIETO (INTA Mendoza, Argentine)
O. GARCIA (ENSA Montpellier)
G. BRUN (ENSA Montpellier)
S. ALMENDROS (Institut Jules Guyot, Dijon)

Avril 2004

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement la Commission pour la Technique et l'Innovation (CTI) pour leur aide financière et l'encouragement prodigué dans l'étude captivante des terroirs viticoles vaudois ainsi que la direction de la Station fédérale de recherches agronomiques de Changins (Agroscope RAC Changins) qui nous a permis de réaliser ce travail de recherche viticole.

Nos remerciements chaleureux s'adressent également aux membres du comité du projet, à l'office de la viticulture du Canton de Vaud et à l'Association pour l'étude des terroirs viticoles vaudois, en particulier à son Président Louis-Philippe Bovard, pour la confiance témoignée, pour nous avoir fourni les moyens et donné la liberté d'œuvrer vers une approche passionnante de la viticulture.

Nous sommes profondément reconnaissants à Conrad Briguet (chef du projet) et à François Murisier pour leur soutien précieux et leur disponibilité renouvelée tout au long de la réalisation de cette étude.

Notre gratitude s'adresse finalement à tous les vigneron(ne)s qui ont partagé ce projet et nous ont fait part de leur savoir et de leur passion pour la culture de la vigne et du vin.

AVANT-PROPOS

A une époque où triomphe la civilisation scientifico-technique et économique, où nombre de succès sont éphémères et partiels, l'agriculture constitue peut-être encore un incomparable enjeu de culture et de sagesse pour la place qu'elle occupe depuis des millénaires dans les relations de l'homme à la nature.

D'aucuns m'accuseront d'idéaliser le monde campagnard en une image vertueuse où règnent l'ordre et le bonheur célébrés par la poésie bucolique. Pourtant, cet espace rural, autant par ses origines, sa culture et son histoire représente ce lieu d'appartenance qui, lorsqu'on ne l'a plus, est un drame pour tout citoyen.

Dans son ouvrage des Confessions, Jean-Jacques Rousseau révèle son attachement pour la campagne vaudoise : « Quand l'ardent désir de cette vie heureuse et douce qui me fuit et pour laquelle j'étais né vient enflammer mon imagination, c'est toujours au Pays de Vaud, près du lac, dans les campagnes charmantes qu'elle se fixe. Il me faut absolument un verger (une vigne) au bord de ce lac et non pas d'un autre... Je ris de la simplicité avec laquelle je suis allé plusieurs fois dans ce pays-là uniquement pour y rechercher ce bonheur imaginaire. »

Cette fresque, si belle soit elle, ne doit toutefois pas occulter la réalité : le milieu rural est un espace où des femmes et des hommes ont patiemment modulé au cours du temps des paysages et tenté de préserver, du mieux qu'ils le pouvaient, un lopin de terre nourricière. Aujourd'hui encore, ils persistent à vouloir l'entretenir avec passion, par respect pour leurs ancêtres, mais aussi (même si le mot paraît pompeux et désuet, mais les plus âgés me comprendront) pour l'honneur.

L'avenir de nos campagnes et de l'agriculture réside pour une grande part dans une prise de conscience de toute une société envers ce patrimoine inestimable que constitue une terre cultivée qui rend légitimement fiers celles et ceux qui la travaillent. La recherche agronomique contribue également de manière significative à la mise en valeur et à la sauvegarde d'une telle richesse par l'étude et la connaissance

approfondie de nos terroirs par exemple, de leur diversité et leurs potentialités. Une recherche dynamique et prospective, proche des préoccupations quotidiennes des gens de la terre, est un atout majeur non seulement pour le monde agricole mais aussi pour une société respectueuse et responsable de notre si belle planète, de « ce jardin bordé de nuit ». L'étude des terroirs viticoles vaudois s'inscrit dans cette optique : si elle devait aspirer à quelque devise, ce serait à celle de Roland Barthes : « Nul pouvoir, un peu de savoir et le plus de saveur possible ».

Théodore Monod qui avait parcouru la Terre et ses déserts en tous sens au cours de sa longue vie toute remplie d'observations et de méditations, enseignait : « Ne mourrons pas résignés devant nos ordinateurs. Battons-nous. Cherchons le beau, le vrai ». Voilà des exemples dont s'inspirer pour que notre vision du monde ne rétrécisse pas chaque jour davantage et que le vacarme ne cesse de s'amplifier...

Vivian Zufferey

Pully, mai 2004

COMPORTEMENT DE LA VIGNE EN FONCTION DES CONDITIONS PEDO-CLIMATIQUES DANS LES DIVERS TERROIRS VITICOLES VAUDOIS

1. Résumé	8
2. Introduction	10
3. Matériel et méthodes	11
3.1 Dispositif expérimental	11
3.2 Les grandes unités de sols et les principales roches-mères	17
3.3 Données climatiques	19
3.4 Méthodes et mesures expérimentales	22
3.4.1 Caractérisation des systèmes racinaires et réserve en eau des sols	22
3.4.2 Techniques d'appréciation de l'alimentation en eau de la vigne	22
3.4.3 Notation des stades de développement	26
3.4.4 Mesures de l'expression végétative	26
3.4.5 Détermination des composantes du rendement et maturation	29
4. Résultats et discussion	30
4.1 Répartition du système racinaire et réserve en eau des sols	30
4.2 Alimentation hydrique de la vigne	38
4.2.1 Etude générale	38
4.2.2 Applications des mesures hydriques	51
4.2.3 Suivis hydriques à la Côte	55
4.2.4 Suivis hydriques à Lavaux	70
4.2.5 Suivis hydriques à Bonvillars	76
4.2.6 Suivis hydriques au Chablais	85
4.2.7 Relations entre les diverses approches de mesures hydriques	90
4.3 Phénologie et cycle végétatif	113
4.4 Expression végétative	124
4.4.1 Vitesse de croissance des rameaux	124
4.4.2 Arrêt de la croissance végétative	130
4.4.3 Estimation des surfaces foliaires	133
4.4.4 Poids frais des rognages (biomasse foliaire exportée)	136
4.4.5 Analyses foliaires et indice chlorophyllien	137
4.4.6 Poids des bois de taille	142
4.5 Composantes du rendement et maturation du raisin	147
4.5.1 Analyse de la production et de la maturation	147
5. Synthèse et conclusions	180
6. Bibliographie	191
7. Annexes	205

ABREVIATIONS ET SYMBOLES UTILISES

<u>Symboles</u>	<u>Signification</u>
PAR	Radiation photosynthétique active dans le domaine du visible 400-700 nm ($\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
ETP	Evapotranspiration de la plante et/ou du sol (mm)
CEC	Capacité d'échange cationique (meq/100g)
ABA	Acide abscissique (hormone végétale)
SFT	Surface foliaire totale (m^2)
SFE	Surface foliaire exposée (m^2)
IF	Index foliaire (SFE/SFT)
CSPA	Continuum sol-plante-atmosphère
RU	Réserve utile en eau du sol (mm)
Y_F	Potentiel hydrique foliaire (bar)
Y_{base}	Potentiel hydrique foliaire de base (bar)
Y_T	Potentiel hydrique de tige (bar)
$Y_{T\text{MIN}}$	Potentiel de tige minimal (bar)
Y_S	Potentiel hydrique dans le sol (bar)
Y_{ALU}	Potentiel hydrique foliaire sous couvertures iso-thermiques (bar)
DY	Gradient de potentiels ($\Psi_T - \Psi_F$, bar)

1. Résumé

L'étude du comportement physiologique et agronomique de la vigne (cv. Chasselas) a été réalisée de 2001 à 2003 par la Station fédérale de recherches agronomiques de Changins (Agroscope RAC Changins) sur divers terroirs viticoles du Canton de Vaud (Suisse), dans le cadre d'un projet d'étude des terroirs viticoles vaudois en collaboration avec le bureau I. Letessier (SIGALES) à Grenoble et l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).

Les unités pédologiques définies et représentatives du vignoble ont entraîné des réponses pertinentes du végétal, notamment sur le comportement hydrique de la vigne, l'expression végétative et la vigueur des souches et sur les caractéristiques qualitatives de la récolte.

Les conditions d'alimentation en eau de la vigne ont été étroitement liées à la réserve en eau des sols (réserve utile, RU) et à la pluviométrie estivale durant les saisons 2001-2003. Le suivi du régime hydrique de la vigne, effectué au moyen du Ψ_{base} , a montré que le niveau de contrainte hydrique a été faible en 2001. La saison 2002 a été marquée par une contrainte hydrique modérée durant la maturation du raisin dans les sites à faible RU (moraines compactes de pente, peyrosols sableux, moraines en recouvrement sur la molasse conglomératique ou gréseuse, ou sur le calcaire du Jura). Partout ailleurs, l'alimentation en eau de la vigne n'a pas été limitante. En 2003, la contrainte hydrique s'est accentuée en cours de saison en raison d'un déficit hydrique élevé durant la période estivale et des températures caniculaires, enregistrées en juin et en août. Les valeurs du potentiel hydrique n'ont cessé de décroître de la floraison jusqu'à la mi-août quels que soient les sites et les types de sol. Globalement, le vignoble s'est trouvé en condition de contrainte hydrique modérée durant la maturation du raisin. Dans certaines situations (moraines compactes de pente ou peyrosols sableux à faible RU), les vignes ont subi une contrainte forte, et des défoliations naturelles ont pu être observées dans la zone des grappes.

Nos résultats ont également mis en évidence que la mesure du potentiel de tige minimum ($\Psi_{T \text{ MIN}}$) pouvait rendre compte d'une contrainte hydrique diurne

momentanée : de ce fait, le Ψ_{TIGE} s'avère un bon indicateur pour étudier l'émergence de déficits hydriques ou la persistance d'une contrainte après une pluie dans les terroirs viticoles. Nos observations ont indiqué que la technique de discrimination isotopique du carbone ($\Delta C13$) dans les sucres des raisins était étroitement corrélée au régime hydrique observé chez la vigne durant la maturation (phase d'accumulation des sucres dans les baies).

La précocité des terroirs et la vitesse de croissance végétative ont été principalement influencées par le mésoclimat thermique (altitude, déclivité et orientation des pentes). La mise en valeur des stades phénologiques (ex. débourrement) avec les entités climatiques identifiées a donné des résultats encourageants. L'expression végétative de la vigne, analysée à travers la biomasse foliaire rognée ainsi que la vigueur des souches (poids des bois de taille) ont été largement tributaires du réservoir en eau des sols et des conditions d'alimentation hydrique de la plante durant la saison. Les vignes conduites sur des terroirs à RU importante ont présenté des poids de rognage et des poids individuels des sarments plus élevés que les vignes établies sur des sols à RU et enracinement limités.

Le régime hydrique de la plante, observé durant la maturation du raisin, a largement influencé la taille finale des baies et leur concentration en sucres réducteurs. Les vignes soumises à une contrainte hydrique modérée ont obtenu des teneurs plus élevées en sucres des baies que les vignes caractérisées par une absence de stress hydrique. Ce résultat atteste le rôle bénéfique d'une contrainte hydrique modérée pendant la maturation du raisin pour l'accumulation des sucres et pour un arrêt précoce de la croissance végétative (autour de la véraison). Des situations de trop forte restriction en eau (contrainte forte) ont par contre pénalisé la concentration des moûts d'autant plus nettement que la contrainte hydrique était précoce.

Enfin, il faut raisonner les relations « état hydrique de la vigne – expression végétative - composantes de la baie » en considérant pour une contrainte hydrique donnée, sa période d'apparition, sa durée et son intensité. L'aptitude à réguler l'alimentation hydrique apparaît comme le principal facteur qualitatif d'un terroir.

2. Introduction

L'incidence du milieu naturel sur la qualité et la typicité du raisin et des vins est largement reconnue (Seguin 1983 ; Duteau 1982 ; Becker *et al.* 1983 ; Morlat 1989 ; Lebon 1993 ; van Leeuwen 1991). Néanmoins, l'étude des terroirs s'avère complexe car les facteurs susceptibles d'influencer la qualité des vins sont multiples et le rôle exercé par chacun d'eux n'est pas encore clairement établi. Une chose est certaine : un facteur considéré isolément ne suffit pas à expliquer la valeur d'un terroir.

De nombreuses approches de caractérisation des terroirs viticoles ont été entreprises à ce jour (Morlat 2001). Parmi celles-ci, l'approche éco-physiologique, orientée sur l'étude des fonctions entre les différentes parties du système terroir-vigne (Morlat, 1989), semble très satisfaisante quand il s'agit d'intégrer et de caractériser les facteurs du milieu édaphique et climatique, pertinents vis-à-vis du fonctionnement de la plante et de la qualité de la production (Lebon 1993). En effet, l'influence du terroir sur la vigne se traduit par des différences de comportement physiologique et agronomique de la plante. Diverses études ont montré que les effets les plus importants concernaient la régulation de l'alimentation en eau de la vigne et la précocité des terroirs (Morlat, 1989 ; van Leeuwen 1991).

L'analyse du comportement de la plante doit permettre de confirmer ou d'infirmer la valeur explicative de certains paramètres pédologiques et climatiques. Il s'agit également de déterminer les indicateurs les plus pertinents qui permettent d'interpréter le comportement de la vigne dans les diverses entités pédo-climatiques des régions étudiées.

L'importance des facteurs pédologiques (enracinement, pédoclimat hydrique, types de sols) et climatiques sur les principaux aspects de la physiologie viticole (expression végétative de la vigne, cycle végétatif, régime hydrique et évolution de la maturation) et les potentialités de la vendange est ainsi analysée dans cette étude.

3. Matériel et méthodes

3.1 Dispositif expérimental

L'étude du comportement de la vigne sur les principaux terroirs vaudois recommande que le dispositif et le protocole d'expérimentation limitent au mieux les éventuels effets physiologiques propres à un matériel végétal hétérogène ou à des différences liées au système de conduite et à l'entretien du sol. Néanmoins, le dispositif retenu constitue un compromis dans la majorité des cas entre les choix scientifiques et la réalité viticole imposée par le vignoble lui-même et les multiples contraintes inhérentes à ce type d'expérimentation en champ.

Lieux d'étude

L'analyse du comportement de la plante a été réalisée dans les quatre régions représentatives du Canton de Vaud (La Côte, Lavaux, Bonvillars et le Chablais). L'étude de la zone pilote *La Côte* comprend les appellations de Begnins, Luins, Vinzel et Bursinel, et s'étend sur 312 ha. La zone pilote de *Lavaux* englobe les appellations de St-Saphorin et de Chardonne, et s'étend sur 249 ha. L'appellation de *Bonvillars* recouvre 196 ha, et la région du *Chablais* est représentée par les appellations de Bex et Ollon d'une superficie de 223 ha.

Caractéristiques du matériel végétal

Le cépage

Le cépage retenu dans notre étude est le Chasselas du fait de son importance économique majeure pour la viticulture du Canton de Vaud (70 % de la superficie totale). Cépage à la fertilité élevée, mais à production irrégulière, sa sensibilité à la coulure peut devenir un facteur de variation des rendements certaines années entre les terroirs. Il est également sensible à la chlorose en particulier si la vigne a été surchargée et selon les conditions pédo-climatiques. Le Chasselas est un cépage à débourrement précoce et de maturité hâtive (1^{ère} époque).

Le porte-greffe

Le choix du porte-greffe s'est porté sur le 3309C (Riparia x Rupestris) qui est largement dominant dans la région lémanique. De vigueur moyenne, il présente par contre une faible résistance à la sécheresse et supporte peu de manière générale les terrains compactants et humides (chlorose).

L'âge des vignes

Les conditions qui apparaissent à priori les plus favorables à la mise en évidence de l'influence du milieu édaphique sur le fonctionnement de la vigne sont celles qui favorisent une colonisation racinaire maximale (Lebon, 1993). D'après Branas et Vergnes (1957) et Champagnol (1984), ce stade est atteint lorsque les vignes sont âgées de 7 à 10 ans. Dans notre dispositif expérimental, les vignes sont âgées en moyenne de 10 à 15 ans.

Conduite de la vigne

Le mode de conduite retenu a été la taille Guyot simple avec un palissage à plan vertical. A la Côte, la densité de plantation avoisine les 6500 ceps/ha avec un espacement entre les rangs de 1,8 à 2,1 m, et de 0,8 m entre les souches. L'orientation des rangs est majoritairement N-S à la Côte (>90 % des cas). Les parcelles sont enherbées 1 ligne sur 2. A Lavaux, la densité de plantation s'élève à 7500 ceps/ha environ. L'orientation des rangs est principalement E-O (>80 % des cas). Dans l'appellation Bonvillars, la densité moyenne de plantation atteint 6500 ceps/ha avec des rangs de vigne orientés N-S dans la majorité des cas et enherbés un rang sur deux. La région du Chablais offre par contre des densités plus importantes (10 000 ceps/ha) et des vignes menées en taille courte (cordon). Le dispositif comprend des orientations diverses de rangs de vigne en fonction de l'exposition et de la pente du terrain.

Charge en raisins : rapport feuille /fruit

L'importance de ce paramètre en matière d'expérimentation viticole n'est plus à démontrer et plus particulièrement dans le cas d'une étude du comportement de la vigne dans différentes situations pédoclimatiques. 1 grappe/ bois a été conservée sur toutes les parcelles de suivis viticoles (7 grappes par souche). L'essentiel est d'assurer un rapport feuille-fruit suffisant ($SFE/kg > 1.0$) pour une bonne maturation du raisin, sans toutefois limiter le potentiel d'expression viticole des divers terroirs.

Dispositif général de l'étude

Les approches pédologiques et climatiques de l'étude ont permis de définir des entités homogènes du point de vue du sol et du climat. Ces entités doivent entraîner des réponses pertinentes du végétal, en particulier sur le plan qualitatif. La réponse de la plante a donc été analysée au moyen de paramètres agronomiques et physiologiques.

Objectifs

- L'analyse du comportement de la plante doit permettre de confirmer ou d'infirmer la valeur explicative de certains paramètres pédologiques et climatiques.
- Il s'agit également de déterminer les indicateurs les plus pertinents qui permettent d'interpréter le comportement de la vigne dans diverses entités pédo-climatiques des régions étudiées.

Dans ce but, deux réseaux d'étude ont été mis en place dans les quatre régions représentatives du Canton de Vaud (La Côte, Lavaux, Bonvillars, Chablais, tableaux 1,2) :

1. ***Un réseau élargi de parcelles*** comprenant 50 parcelles d'observation au total dans les zones pilotes de Lavaux, de la Côte, de Bonvillars et du Chablais visant à examiner quelques critères clés du comportement viticole : suivi des stades phénologiques, analyses foliaires, suivi de la maturation du raisin (cv. Chasselas).

2. *Un réseau restreint de parcelles de référence* mises en place dans les entités particulièrement importantes et caractéristiques du vignoble avec 6 à 12 parcelles d'observation dans chacune des zones pilotes (soit 36 parcelles au total). Dans ce réseau, outre les observations de paramètres agronomiques, nous avons étudié plus en détail le comportement physiologique de la vigne, notamment les conditions d'alimentation hydrique de la plante.

Types de sol	Réseau élargi	Parcelles de référence	Réseau pour observations particulières
Zone pilote du CHABLAIS			
Moraines locales, caillouteuses	Ollon 01	Ollon 01	Ollon 01
	Ollon 03	Ollon 03	Ollon 03
	Ollon 06		
	Ollon 08		
Sols sur gypse	Bex 06	Bex 06	
	Ollon 04	Ollon 04	Ollon 04
Sols issus de flysch (en plaques ou feuilletés)	Bex 01	Bex 01	Bex 01
	Bex 02		
	Bex 03	Bex 03	Bex 03
Total	9 parcelles	6 parcelles	5 parcelles
Zone pilote de BONVILLARS			
Moraines moyennement compactes			
	Concise 02	Concise 02	
	Onnens 01	Onnens 01	
	Bonvillars 02	Bonvillars 02	Bonvillars 02
Moraines compactes			
	Concise 04		
Moraines sur calcaire du Jura	Bonvillars 01	Bonvillars 01	Bonvillars 01
	Champagne 02	Champagne 02	Champagne 02
Colluviosols	Bonvillars 03	Bonvillars 03	Bonvillars 03
Total	7 parcelles	6 parcelles	4 parcelles

Tableau 1 : récapitulatif du dispositif expérimental utilisé pour l'étude du comportement de la plante au Chablais et à Bonvillars.

Types de sol	Réseau élargi	Parcelles de référence	Réseau pour observations particulières
Zone pilote de LA CÔTE			
Moraines peu compactes et caillouteuses	Begnins 01	Begnins 01	Begnins 01
	Vinzel 01	Vinzel 01	
	Vinzel 03	Vinzel 03	Vinzel 03
Moraines compactes de pente	Begnins 02		
	Begnins 03	Begnins 03	Begnins 03
	Vinzel 02		
	Luins 01	Luins 01	
	Luins 03	Luins 03	Luins 03
	(Dully 01)		
	Gland 01		
Peyrosols sableux	Bursinel 01		
	Luins 02	Luins 02	
	Dully 02	Dully 02	
Colluviosols de bas de pente	Bursins 02	Bursins 02	Bursins 02
	Begnins 06	Begnins 06	Begnins 06
	Begnins 07	Begnins 07	
	Bursinel 02	Bursinel 02	
Total	Bursins 01		
	17 parcelles	12 parcelles	6 parcelles
Zone pilote de LAVAUX			
Moraines peu compactes et caillouteuses	Chardonne 06		
	Chardonne 07	Chardonne 07	Chardonne 07
	Chardonne 09	Chardonne 09	
	Chardonne 10	Chardonne 10	
	St Saphorin 01		
	Rivaz 02	Rivaz 02	Rivaz 02
	(Rivaz 06)		
Moraines compactes	Chardonne 04	Chardonne 04	
	Chardonne 08		
	Rivaz 01	Rivaz 01	Rivaz 01
	Corsier 01		
	Chexbres 01	Chexbres 01	
	Chexbres 02		
Moraines sur molasse conglom., gréseuse ou marneuse	St Saphorin 03	St Saphorin 03	
	Corsier 02	Corsier 02	Corsier 02
	Rivaz 04	Rivaz 04	Rivaz 04
	Rivaz 05	Rivaz 05	
Colluviosols	Chardonne 03	Chardonne 03	Chardonne 03
Total	17 parcelles	12 parcelles	6 parcelles

Tableau 2 : récapitulatif du dispositif expérimental utilisé pour l'étude du comportement de la plante à La Côte et à Lavaux.

Les parcelles du réseau constituent des *micro-parcelles de 50 ceps*, répartis sur un nombre variable de rangs (2-3), et délimitées au sein de parcelles viticoles de taille plus importante. Les principales mesures, notations et prélèvements sont effectués à l'intérieur de la micro-parcelle sur un nombre déterminé de souches propre à chaque contrôle.

Le choix des parcelles de référence résulte des premières conclusions de la caractérisation des sols et du mésoclimat (altitude, orientation et déclivité des pentes). Dans chacune des zones pilotes, 3 parcelles de référence ont été placées sur chaque entité pédologique. Ces parcelles représentent en quelque sorte des répétitions, disposées sur une unité pédologique, afin d'étudier la variabilité de la réponse physiologique et viticole.

A l'intérieur de ce réseau de référence, 4 à 6 parcelles représentatives des entités les plus importantes par zone ont fait l'objet d'une étude plus approfondie des conditions d'alimentation hydrique de la vigne, notamment des mesures de potentiel du xylème des rameaux (potentiel de tige) et des gradients de potentiels hydriques dans la plante (réseau à observations particulières).

3.2 Les grandes unités de sols et les principales roches-mères

L'étude des sols a permis d'opérer des regroupements entre les types de sols et d'élaborer une première cartographie des entités pédologiques (Letessier et Fermond, 2004). La grande majorité des sols est issue de moraine alpine, mélange de débris indifférenciés et de toutes tailles transportés par le glacier du Rhône. Ce type de sol représente environ 80% de la superficie des zones pilotes.

Les moraines peuvent être classées en trois types de roches-mères (Letessier et Fermond, 2004) :

- Moraines latérales caillouteuses, rhodaniennes à cailloutis mixte (30-60% d'éléments grossiers siliceux et calcaires) et à terre fine moyenne à légère. Les moraines dites « locales » (Chablais) sont beaucoup plus riches en graviers et en cailloux calcaires. Déposées sur les flancs latéraux des glaciers, elles peuvent être parfaitement meubles, mais parfois également compactes et serrées.
- Moraines de fond peu caillouteuses (0-30% d'éléments grossiers), limoneuses. Déposées sous les glaces, soumises à des fortes pressions, elles sont non poreuses, massives, parfois fissurées selon des faces de compression et très compactes. Les racines ne pénètrent pas ce matériau.
- Moraines de retrait et/ou formations fluvio-glaciaires (Peyrosols), beaucoup plus gravelo-caillouteuses et/ou sableuses, toujours meubles. Sols à horizon pierrique ou cailloutique (>60% d'éléments grossiers), ils sont très perméables.

On observe, à certains endroits, la moraine en faible recouvrement sur la molasse gréso-sableuse ou marneuse, d'âge oligocène (La Côte et Lavaux) ou sur le calcaire gréseux du Jura (Bonvillars) en épaisseur parfois très faible (moins de 60 cm).

Les colluvions

Les colluvions se retrouvent en général en bas de pente et sont issus de l'érosion progressive des pentes dominantes. Ils sont généralement peu ou pas caillouteux, profonds, et présentent quelquefois des tendances hydromorphes.

Les gypses et calcaires du trias

La moraine recouvre sur plusieurs coteaux du Chablais, en épaisseur parfois très faible (< à 60 cm), une formation gypso-calcaire (carbonates et sulfates de calcium) du trias.

Le flysch de Chiètres

Les sols de la colline de Chiètres (Bex, Chablais) se différencient nettement des précédents par l'absence totale d'éléments morainiques même épars en surface. La roche mère est directement le flysch lité sombre, schisto-argilo-gréseux et faiblement carbonaté, qui provient, semble-t-il, d'un glissement en masse à partir des reliefs alpins. Ce matériau est altérable et souvent friable.

Les résultats des analyses de terre (% d'éléments grossiers, taux d'argile, de calcaire total et actif, CEC), de la réserve utile en eau ainsi que la description synthétique des profils de chaque micro-parcelle sont présentés dans les annexes 1-4.

3.3 Données climatiques

Les données climatiques ont été recueillies par les stations météorologiques de Changins (La Côte), de Pully (Lavaux), d'Aigle (Chablais) et de Neuchâtel (Bonvillars) et sont exposées dans les tableaux 3 à 6.

L'année 2001 a été caractérisée par une pluviométrie importante (1248 mm à Changins alors qu'en moyenne, il ne pleut que 945 mm, et 1565 mm à Pully pour une moyenne pluriannuelle de 1100 mm). Du mois de janvier à la fin de juin, les précipitations ont été particulièrement abondantes et les orages estivaux très réguliers. Sur le plan des températures, les mois de mai et d'août ont été particulièrement chauds avec des températures supérieures de 2.5°C à 3.0°C à la moyenne des 30 ans. Durant la période de végétation (avril-septembre), le bilan des températures mensuelles a présenté un solde positif (réalisé sur la somme des écarts à la normale). Le mois d'octobre fut spécialement ensoleillé et d'une grande douceur. Ces conditions ont été propices pour assurer une bonne maturation des secteurs moins précoces. Les durées d'insolation ont été légèrement plus élevées que la moyenne trentenaire. L'ETP calculée atteignait 711 mm en fin d'année à la Côte et 729 mm à Pully. Le déficit hydrique cumulé depuis le 1^{er} janvier (précipitations – ETP) n'a jamais dépassé les 140 mm durant la période de végétation.

L'année 2002 a été caractérisée par une pluviométrie légèrement supérieure à la moyenne pluriannuelle, principalement durant la période végétative à Lavaux et dans le Chablais. Des précipitations faibles, mais fréquentes, ont été observées pendant la maturation du raisin dans ces deux régions également. Les vignobles à la Côte et à Bonvillars ont bénéficié d'un temps plus sec durant le mois de septembre. Les températures annuelles ont été partout plus élevées de 2.0 à 2.5 °C par rapport à la moyenne des 30 ans. Le mois de juin fut exceptionnellement chaud. Le bilan des températures mensuelles a présenté un solde positif durant la période de végétation. Les durées d'insolation ont été conformes à la moyenne trentenaire.

En 2003, les températures estivales ont été largement supérieures à la normale de 4.0 à 6.5 °C durant les mois de juin à août. La période estivale a également été caractérisée par de faibles précipitations et par un déficit hydrique important sur l'ensemble du réseau. L'insolation fut aussi exceptionnelle durant l'année.

Mois	Température (°C)				Précipitations (mm)				Insolation (h)				ETP (mm)		
	2001	2002	2003	φ 30 ans	2001	2002	2003	φ 30 ans	2001	2002	2003	φ 30 ans	2001	2002	2003
Janvier	3.6	2.3	1.7	1.1	202	41	73	72	67	97	68	59	10	9	7
Février	4.9	6.2	0.6	1.7	38	77	23	68	118	77	103	70	18	20	8
Mars	8.4	7.9	8.5	5.5	322	56	26	76	68	199	248	129	34	48	57
Avril	8.0	10.6	10.7	8.7	160	41	82	75	121	212	236	175	49	75	75
Mai	16.1	13.3	15.5	13.3	113	191	64	93	223	177	203	215	112	90	102
Juin	16.9	20.3	23.2	16.5	193	77	57	111	256	273	316	235	119	137	150
Juillet	19.9	19.5	22.0	18.4	139	115	81	107	253	240	288	211	130	128	138
Août	20.5	18.6	24.0	17.6	82	106	115	121	253	210	296	203	116	104	130
Septembre	13.1	14.7	15.9	14.5	148	47	74	108	143	160	225	181	61	72	80
Octobre	14.4	11.6	8.9	9.6	84	179	145	93	193	142	99	169	60	43	34
Novembre	4.5	7.9	6.7	4.9	49	260	91	88	69	55	70	102	14	19	22
Décembre	1.2	5.5	3.6	2.0	34	100	38	93	84	16	92	70	6	11	11
An	11.0	11.5	11.8	9.5	1565	1290	870	1101	1848	1858	2244	1821	729	756	814

Tableau 3 : Données climatiques de température moyenne, de précipitations, d'insolation et d'ETP mensuelle et pluriannuelle (f 30 ans) sur le site de **Pully** (CH) de 2001 à 2003.

Mois	Température (°C)				Précipitations (mm)				Insolation (h)				ETP (mm)		
	2001	2002	2003	φ 30 ans	2001	2002	2003	φ 30 ans	2001	2002	2003	φ 30 ans	2001	2002	2003
Janvier	3.1	1.3	1.1	0.7	161	47	80	76	49	76	71	59	9	7	6
Février	4.5	5.9	-0.1	1.7	55	91	29	66	118	90	94	93	16	20	5
Mars	8.3	7.5	8.1	5.3	294	61	16	68	71	195	249	153	34	45	55
Avril	8.0	10.3	10.1	9.0	126	15	69	64	129	211	232	172	50	70	75
Mai	16.0	12.8	15.2	13.4	77	162	53	73	227	176	208	195	109	86	103
Juin	16.7	19.8	23.1	16.6	125	46	23	83	259	276	325	212	116	135	152
Juillet	19.7	19.3	21.8	18.6	96	79	44	81	243	246	284	239	125	124	137
Août	20.0	18.2	23.8	17.6	73	76	99	93	250	202	291	212	115	100	126
Septembre	12.7	14.6	15.6	14.3	78	42	71	90	146	166	229	168	62	71	80
Octobre	13.5	11.1	8.2	9.2	71	157	177	79	174	141	99	118	55	43	31
Novembre	4.1	7.2	5.5	4.5	46	280	60	88	78	40	79	61	14	17	18
Décembre	1.2	5.2	2.8	1.6	46	94	38	84	85	7	94	51	6	10	8
An	10.6	11.1	11.3	9.4	1248	1150	760	945	1829	1826	2255	1733	711	728	796

Tableau 4 : Données climatiques de température moyenne, de précipitations, d'insolation et d'ETP mensuelle et pluriannuelle (f 30 ans) sur le site de **Changins** (CH) de 2001 à 2003.

Mois	Température (°C)			Précipitations (mm)			Insolation (h)			ETP (mm)	
	2002	2003	φ 30 ans	2002	2003	φ 30 ans	2002	2003	φ 30 ans	2002	2003
Janvier	0.6	1.6	-0.2	22	62	57	126	79	75	7	6
Février	6.0	0.3	1.0	95	22	51	69	150	101	20	7
Mars	8.0	8.2	5.2	56	25	58	184	235	166	49	54
Avril	10.7	11.1	8.6	27	66	62	178	201	178	73	75
Mai	13.7	15.7	13.2	108	59	72	158	176	192	92	101
Juin	19.5	22.2	16.3	110	77	97	227	261	210	127	145
Juillet	18.9	20.2	17.6	132	93	92	198	235	236	122	133
Août	17.8	21.7	16.7	105	96	101	166	248	207	96	123
Septembre	14.1	14.6	13.5	92	50	81	137	198	168	67	77
Octobre	10.6	8.1	8.3	108	122	73	137	130	131	43	33
Novembre	7.5	5.4	3.7	150	46	70	63	89	78	19	18
Décembre	5.2	2.2	1.0	77	30	69	61	104	64	12	7
An	11.0	10.9	8.7	1082	748	883	1704	2106	1805	727	779

Tableau 5 : Données climatiques de température moyenne, de précipitations, d'insolation et d'ETP mensuelle et pluriannuelle (f 30 ans) sur le site d'**Aigle** (CH) de 2002 à 2003.

Mois	Température (°C)			Précipitations (mm)			Insolation (h)			ETP (mm)	
	2002	2003	φ 30 ans	2002	2003	φ 30 ans	2002	2003	φ 30 ans	2002	2003
Janvier	1.2	0.9	0.0	35	73	75	60	43	49	7	5
Février	5.8	-0.4	1.0	80	27	68	74	81	83	18	5
Mars	7.4	8.3	4.7	64	21	66	179	245	154	43	55
Avril	10.0	10.4	8.5	17	41	64	185	222	164	68	70
Mai	13.0	14.9	13.1	140	40	80	171	184	175	85	95
Juin	19.8	23.1	16.2	81	32	98	267	305	191	131	150
Juillet	19.0	21.3	18.2	86	101	89	224	263	212	116	129
Août	18.3	23.4	17.3	125	124	104	195	295	202	99	127
Septembre	14.2	15.5	14.1	51	46	89	155	220	165	66	88
Octobre	10.8	7.6	8.8	155	122	78	117	85	108	39	27
Novembre	7.2	5.4	3.9	215	50	87	22	53	48	14	16
Décembre	4.5	2.1	1.1	77	29	84	4	81	38	8	6
An	10.9	11.1	8.9	1126	706	981	1653	2077	1580	694	773

Tableau 6 : Données climatiques de température moyenne, de précipitations, d'insolation et d'ETP mensuelle et pluriannuelle (f 30 ans) sur le site de **Neuchâtel** (CH) de 2002 à 2003.

3.4 Méthodes et mesures expérimentales

3.4.1 Caractérisation des systèmes racinaires et réserve en eau des sols

Des profils racinaires ont été réalisés lors de l'analyse des fosses pédologiques. La méthodologie employée consistait à déployer un filet de 1 mètre de largeur sur toute la profondeur du profil, celui-ci étant creusé parallèlement au rang de vigne. Ce filet est quadrillé en tranches de 10 cm de hauteur. Le nombre de racines présentes sur chaque tranche a été comptabilisé. Pour ce comptage, les racines ont été subdivisées en fonction de leur taille :

- grosses racines (GR): racines dont le diamètre est supérieur à 5 mm,
- racines moyennes (R) : racines dont le diamètre est compris entre 1 et 5 mm,
- petites racines (r): racines dont le diamètre est inférieur à 1 mm.
- la présence de chevelus racinaires a également été notée.

Suite à ce décompte des racines, nous avons pu dresser un profil racinaire qui indiquait le nombre et la nature des racines sur toute la profondeur du profil. La réserve en eau du sol (RU) a été estimée par tranche de 10 cm de sol (réserve décimétrique) dans les profils pédologiques en tenant compte de la texture, de la quantité d'éléments grossiers (Baize et Jabiol, 1995) et de la colonisation racinaire. Les estimations de RU ont été effectuées par Letessier et Fermond (2004). Ces derniers auteurs ont ainsi évalué le profil hydrique ou la quantité d'eau directement utilisable par la vigne dans les différents sites de l'étude.

3.4.2 Techniques d'appréciation de l'alimentation en eau de la vigne

Mesure des potentiels hydriques

La mesure des potentiels hydriques de la vigne a été effectuée au moyen de la chambre à pression ou bombe de Scholander (Scholander *et al.*, 1965). Les applications de la chambre à pression permettent d'évaluer le potentiel hydrique de base (Ψ_{base}), le potentiel foliaire journalier (Ψ_{F}) et le potentiel tige (Ψ_{T}).

Potentiel hydrique foliaire de base (Ψ_{base})

Le (Ψ_{base}) a été mesuré en fin de nuit (02h00 à 06h00) à l'obscurité complète ($PAR < 30 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sur des feuilles insérées dans la partie médiane du feuillage. L'échantillonnage a été constitué de 8 feuilles par micro-parcelle, issues de souches différentes. La détermination du Ψ_{base} a été faite une dizaine de fois de la floraison à la vendange dans les 4 zones pilotes. Des mesures du Ψ_{base} ont été également réalisées sur un secteur test d'une centaine d'ha à la Côte comprenant 50 micro-parcelles, réparties sur les principaux types de sols à réserves hydriques diverses.

Potentiel hydrique foliaire (Ψ_F)

Le Ψ_F a été apprécié en cours de journée sur des feuilles exposées au soleil ($PAR > 1200 \mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$), situées dans la partie médiane du couvert végétal (9 feuilles adultes par micro-parcelle). Le Ψ_F a été mesuré dans la majorité des cas parallèlement à la détermination du potentiel tige.

Potentiel tige (Ψ_T)

Le Ψ_T a été déterminé sur des feuilles ensachées (dans une feuille plastique doublée d'une feuille d'aluminium) au moins une à deux heures avant la mesure. L'ensachage imperméable et opaque provoque la fermeture des stomates et une très grande réduction de la transpiration foliaire. En conséquence, le potentiel hydrique de la feuille ensachée s'équilibre avec le potentiel hydrique du rameau (Ψ du xylème du rameau), appelé le potentiel tige (Begg et Turner, 1970). Les feuilles ensachées ont été choisies sur le côté ombragé des rangs afin d'éviter un échauffement important.

Les mesures du Ψ_T ont été réalisées sur des feuilles adultes de rameaux principaux, insérées dans la partie médiane du feuillage, en milieu de journée (midi solaire), période pendant laquelle la demande évaporatoire est la plus importante ($\Psi_{TIGEMIN}$). Des dynamiques journalières du statut hydrique de la vigne (Ψ_F et Ψ_T) ont aussi été étudiées. 9 feuilles par micro-parcelle constituèrent l'échantillonnage. En parallèle, des mesures du Ψ_F ont été conduites sur 6 feuilles, non emballées, situées dans la partie supérieure du rameau principal qui avait servi à la détermination du Ψ_T .

Le gradient de potentiel hydrique ($\Delta\Psi$) a été déterminé entre le Ψ_T et le Ψ_F dont les feuilles étaient insérées sur le même rameau et exposées à l'éclairement direct.

*Essais de mesure indirecte du potentiel hydrique du sol (environnement racinaire)
au moyen de la plante ($Y_{racine-sol}$)*

Des essais de détermination indirecte du potentiel hydrique du sol ou de l'environnement racinaire (Ψ_{sol}) ont été entrepris sur quelques sites à la Côte. L'expérimentation consiste à couvrir complètement des souches de vigne (6-8 ceps) au moyen de bâches en aluminium (couverture iso-thermique de survie) afin de réduire fortement les flux d'eau dans le système sol-plante-atmosphère. Des mesures comparatives de Ψ_F et du Ψ_{base} ont été effectuées sur des feuilles de vigne bâchée (Ψ_{ALU}) et non bâchée, de nuit comme de jour. L'évaluation des échanges gazeux du feuillage et du microclimat lumineux, thermique et hygrométrique des souches a été réalisée partiellement lors d'une nuit et d'une journée. Des mesures de flux de sève seraient également nécessaires à la connaissance des effets de cette technique sur le déterminisme du potentiel hydrique foliaire lors d'une contrainte hydrique.

Mesure des échanges gazeux du feuillage

L'appréciation des échanges gazeux (transpiration, photosynthèse) des feuilles a été effectuée avec un appareil ADC-LCA 4 (ADC system, Hoddesdon, England), en système ouvert, avec analyseur à infrarouge et équipé d'une chambre d'assimilation de type Parkinson. L'appareil dispose également de capteurs de température, d'hygrométrie et de rayonnement PAR.

Les mesures d'échanges gazeux furent menées sur des feuilles adultes de l'enveloppe externe du couvert, situées dans la partie médiane du feuillage bien éclairée ($PAR > 1200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Ces mesures ont été réalisées en cours de journée, le matin (10h – 12h) et l'après-midi (14h – 16h) sur un échantillonnage de 9 feuilles par micro-parcelle.

Bilan hydrique potentiel

L'évolution du bilan hydrique potentiel a été calculé en cours de saison selon la formule proposée par Riou *et al.* (1994, 1999) et Carbonneau (1998).

$$W = W_o + P - T_v - E_s$$

W : Estimation du niveau du réservoir hydrique du sol au terme d'une période donnée.

W_o : Réserve hydrique initiale du sol, et exploitable par les racines de la vigne.

P : Somme des pluies sur la période d'avril à septembre.

T_v = k x ETP : Somme des pertes par évapotranspiration potentielle du vignoble indexée sur l'ETP et le coefficient (k) d'interception du rayonnement solaire par la vigne (avec k=0.9 x H/E, où H représente la hauteur de la végétation et E l'écartement entre les rangs).

E_s = (1-k) ETP_j x P/5 : Somme des pertes par évaporation du sol. Ce phénomène ne se produit qu'après une humectation suffisante du sol (5 mm minimum) et se situe à la hauteur du complément (1-k) x ETP de la quantité non consommée par la vigne.

Il s'agit d'un modèle où la consommation hydrique est la même quel que soit le niveau de réserve.

Le déficit hydrique potentiel (pluviométrie – ETP) et le bilan hydrique potentiel ont été mis en relation avec l'état hydrique de la vigne, estimé par la mesure du ψ_{base} .

Discrimination isotopique du carbone (DC13)

La discrimination isotopique du carbone dans les sucres des raisins, appelée $\Delta C13$ ($^{13}C/^{12}C$) et exprimée en ‰, a été dosée sur un échantillon de moût obtenu à partir d'un prélèvement à maturité de 300 baies par parcelle. L'échantillon (quelques mL) a été autoclavé, puis converti en CO₂ par combustion à l'aide d'oxygène pur. Le contenu isotopique a été ensuite déterminé à l'aide d'un spectromètre de masse à flux continu (Europe Scientific Ltd., Crewe, UK, Avice *et al.*, 1996).

3.4.3 Notation des stades de développement

Les principaux stades phénologiques (débourrement, floraison, nouaison et véraison) ont été notés sur l'ensemble des parcelles suivant l'échelle de Baggiolini (1952), complétée par celle de BBCH (Hack *et al.*, 1992).

Pour les stades floraison et véraison, le nombre de grappes présentant 0%, 10 %, 25%, 50%, 75% ou 100% de fleurs ou de baies à véraison a été comptabilisé puis ramené à un pourcentage global. Deux à trois passages ont été réalisés pour chaque stade de manière à pouvoir déterminer au mieux leur date précise. Cette détermination fut ensuite réalisée de manière graphique. Le stade était atteint lorsque 50% des grappes étaient parvenues à ce stade au moins.

La date d'arrêt de croissance végétative a également été notée. L'arrêt de croissance végétative a été établi lorsqu'en repliant les deux dernières feuilles du rameau secondaire, celles-ci recouvraient l'apex terminal. L'échantillonnage a été constitué de 100 apex de rameaux secondaires (entre-coeurs) par micro-parcelle.

3.4.4 Mesures de l'expression végétative

Vitesse de croissance printanière des rameaux

La longueur des rameaux a été déterminée à partir des mesures de la croissance de 20 rameaux (non rognés) par micro-parcelle, positionnés sur la branche à fruits (avant dernier rameau). Ces mesures furent réalisées tous les sept jours environ en début de cycle végétatif sur les parcelles de référence. Les résultats ont été ensuite exprimés en centimètres d'allongement par jour, afin d'estimer la vitesse de croissance de la vigne.

Estimation des surfaces foliaires

La surface foliaire totale (SFT) de 10 souches a été mesurée au cours du mois de juillet sur les parcelles de référence. Un rameau principal, représentatif des rameaux de la souche, a été choisi pour le calcul de la surface foliaire totale. Cette valeur a été ensuite multipliée par le nombre de rameaux présents sur la souche.

La méthodologie retenue a été celle proposée par Carbonneau (1976). La surface d'une feuille a été obtenue selon la formule suivante :

$$\text{Aire d'une feuille} = \varphi (L_1 + L_2)^2$$

où L_1 et L_2 correspondent aux longueurs des nervures des deux lobes latéraux supérieurs. Le facteur φ s'élève pour le Chasselas à 0,4885 (Ziegler, 1990). En fin de saison, lorsque la végétation est installée, on tient compte également de la SFT des entre-coeurs. Cette mesure a été ensuite répétée sur 10 ceps différents.

La surface foliaire exposée (SFE) fut estimée à la fin de juillet, lorsque le couvert végétal était en place, selon la méthode proposée par Carbonneau (1980, 1989) :

$$\text{SFE} = \frac{(1-T/D) \times S}{E}$$

T : grandeur moyenne des trous importants dans la végétation pris dans le sens du rang et au-dessus des troncs (m)

D : distance de plantation sur le rang (m)

S : section verticale externe complètement exposée des plans de captage (m)

E : écartement entre les rangs (m).

Le rapport de la surface foliaire exposée (SFE) sur la surface foliaire totale (SFT) nous a permis de calculer un *index foliaire (IF)* qui rend compte de l'entassement du feuillage. Des valeurs d'index foliaire proches de 1 signifient que l'ensemble du feuillage est bien exposé ; à l'inverse des valeurs inférieures à 0.6-0.7 montrent qu'une partie importante du feuillage est à l'ombre.

Poids des rognages

Le poids frais des rognages de 50 souches par parcelle a été pesé au cours de la croissance végétative de la vigne (3 à 4 rognages selon les terroirs). Le dispositif de mesure s'est porté sur 12 parcelles du réseau restreint de référence pour l'ensemble des deux zones (6 parcelles à Lavaux et 6 à La Côte).

Analyses foliaires et indice chlorophyllien

Analyses foliaires

L'analyse foliaire des principaux éléments (N, P, K, Ca, Mg) a été réalisée sur des feuilles principales, insérées en face d'une grappe, et prélevées à la véraison (mi-août). Un échantillonnage de 25 feuilles par parcelle a été effectué sur l'ensemble du réseau.

Indice chlorophyllien

La mesure de l'indice chlorophyllien a été faite au moyen d'un compteur de chlorophylle portable (N-Tester) de la firme Hydro Agri Deutschland GmbH (D-48249 Dülmen) sur des feuilles de rameaux principaux situées dans la partie médiane du feuillage.

Ce système de mesure repose sur les propriétés de transmission de la chlorophylle. Le dosage est basé sur la différence de densité optique à deux longueurs d'onde (650 et 940 nm). Ces mesures furent réalisées à partir du stade nouaison sur l'ensemble des parcelles du réseau à raison d'une fois par mois environ. La mesure a été effectuée sur 4 répétitions de 30 feuilles chacune prises sur les deux plans du palissage.

Poids des bois de taille

Vigueur d'un sarment

40 sarments par parcelle ont été prélevés au début de janvier 2002 et 2003 afin d'apprécier la vigueur individuelle d'un sarment à la taille. L'échantillonnage a consisté à prendre 1 sarment par souche toujours dans la même position sur la branche à fruit (avant dernier sarment au bout de la branche), dont la longueur a été ramenée à 1mètre linéaire. Le poids relatif des entre-coeurs a été établi en relation avec le poids global d'un sarment. La longueur des 6 premiers mérithalles, mesurée à partir de la première grappe, a été notée sur l'ensemble des sarments. Une estimation du poids des bois de taille par souche a également été faite à partir du nombre moyen de sarments par cep. Des mesures de poids des bois de taille ont également été réalisées sur un

secteur test d'une centaine d'ha à la Côte comprenant 50 micro-parcelles, réparties sur les principaux types de sols à réserves hydriques diverses.

3.4.5 Détermination des composantes du rendement

La fertilité a été évaluée sur une vingtaine de souches dans les parcelles de référence. Cette donnée résulte du rapport entre le nombre d'inflorescences et le nombre de rameaux par cep.

A partir du stade nouaison, des estimations de rendement furent effectuées :

- détermination du nombre moyen de grappes par souches,
- détermination du nombre moyen de baies par grappes,
- détermination du poids moyen des grappes.

Ces données ont fourni une indication de récolte. Par la suite, une limitation de rendement a été effectuée à 1 grappe/bois, soit 6 à 8 grappes/souche.

Cette intervention nous a permis de maîtriser la charge des ceps et d'obtenir un rapport feuille/fruit à la vendange (SFE/kg de raisin) supérieur à 1.0 m².

Croissance et maturation des baies

A partir de la fin d'août, un suivi hebdomadaire de 300 baies a été réalisé sur l'ensemble des parcelles d'étude. Les échantillons furent prélevés de manière hebdomadaire. Les analyses suivantes ont été effectuées : poids unitaire de la baie (en g), acidité totale (en g/l), acide malique (en g/l), acide tartrique (en g/l), sucres réducteurs (en °Oe), pH, composés azotés : mesure de l'indice formol (azote directement assimilable par les levures). Ces analyses ont été effectuées de manière standardisée et automatisée à la Station de Changins.

4. Résultats et discussion

4.1 Répartition du système racinaire et réserve en eau des sols

L'étude des profils racinaires, effectuée sur l'ensemble du réseau, a permis de connaître la profondeur de sol exploré par les racines, la quantité et la nature des racines présentes. Quelques profils caractéristiques des types de sols rencontrés à la Côte sont présentés à la figure 1.

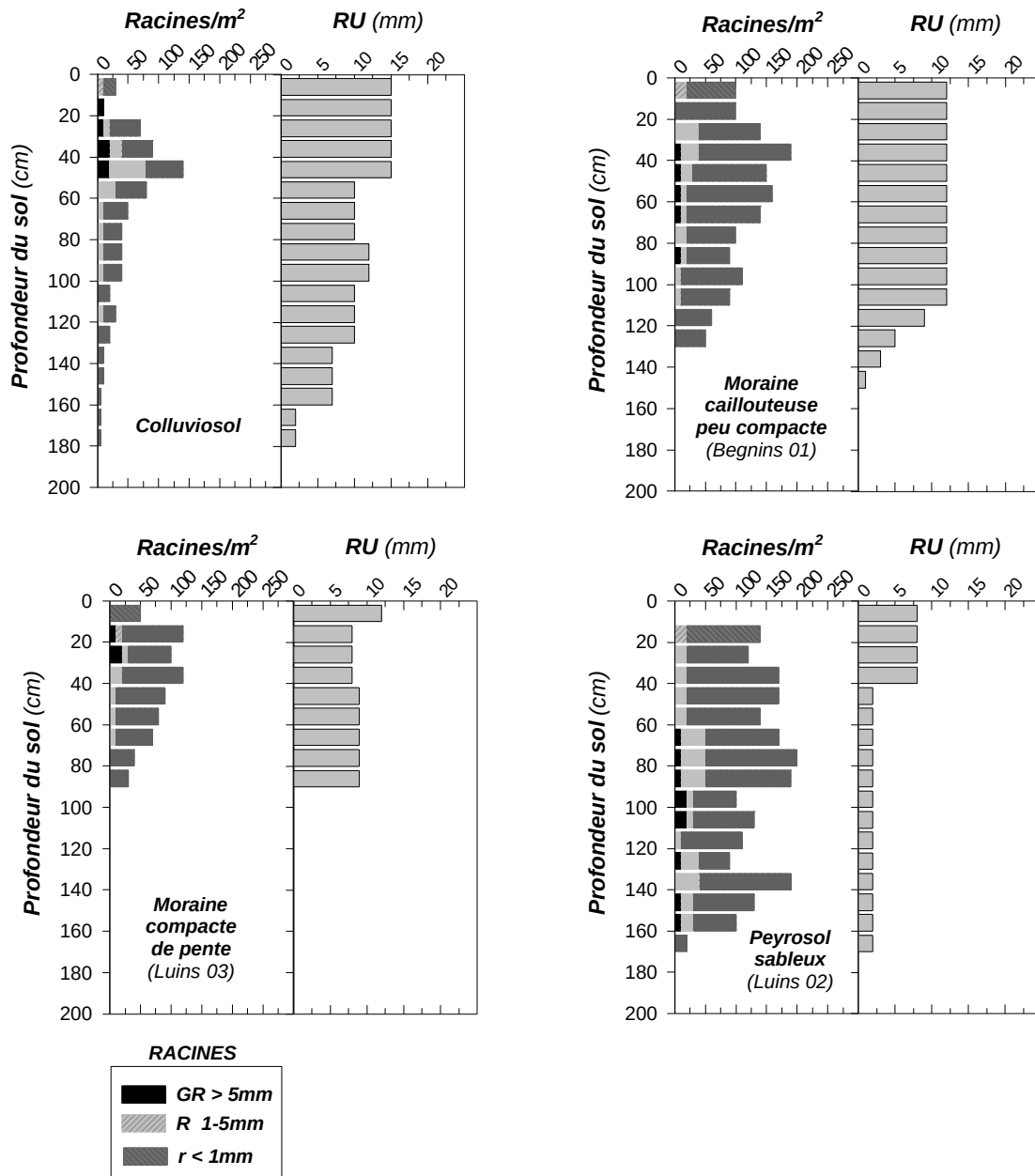


Fig. 1 : Exemples de quelques grands types de profils racinaires et hydriques (Letessier et Fermond, 2004), associés aux divers terroirs viticoles à la Côte. GR : grosses racines avec diamètre > à 5 mm. R : racines moyennes avec diamètre compris entre 1 et 5 mm. r : petites racines avec diamètre < à 1 mm. RU : réserve utile en eau. Souches de Chasselas, âgées de 15 ans. La Côte (CH), 2001.

La profondeur d'enracinement varie fortement en fonction du type de sol. Selon la compacité de la moraine, l'enracinement est très variable : de 120 à plus de 200 cm pour les sols les plus profonds de moraines caillouteuses et peu compactes (Begnins 01, calcisol caillouteux) à moins de 90 cm de profondeur d'enracinement dans les sols de moraine compacte de pente (enracinement assez superficiel, Luins 03). Dans les peyrosols à forte charge grossière sur éboulis, fluvio-glaciaire ou moraine très caillouteuse (Luins 02), l'enracinement est important sur toute la profondeur du profil.

Certains colluviosols à hydromorphie temporaire et à drainage interne moyen (Begnins 06, non présenté) à franchement mauvais (Begnins 07, non présenté) peuvent présenter des enracinements limités en profondeur par manque d'oxygénation temporaire des horizons moyens (asphyxie des racines) qui entrave le développement racinaire. D'autres colluviosols montrent par contre un enracinement important jusqu'à une profondeur estimée à plus de 1.5 m.

Enfin, la présence de très anciens chenaux emplis de grosses pierres, aménagés dans les pentes de moraine compacte (Begnins 03, non présenté) autorisent un enracinement plus développé de souches localisées et régularisent en conséquence leur comportement hydrique (Letessier et Fermond, 2004). Les profils racinaires montrent en général un niveau privilégié de développement racinaire qui se situe entre 20 et 50 cm dans le premier horizon.

Le degré d'exploration du sol par les racines a été représenté par le nombre de racines ramené à une unité de surface de plan de comptage (racines /m²). Le tableau 7 propose des résultats de densité racinaire moyenne entre un enracinement de surface (<1m) et profond (>1m), bien que cette distinction de profondeur d'enracinement soit arbitraire.

Elle permet néanmoins de distinguer globalement que les types de sols « colluviosols, moraines caillouteuses et peu compactes, peyrosols » présentent une densité racinaire moyenne très similaire quel que soit le diamètre des racines, ou la profondeur d'enracinement. En revanche, les moraines compactes de pente montrent un enracinement plus limité, notamment de racines au diamètre < à 1mm, en surface et

surtout en profondeur, qui remplissent l'essentiel des fonctions d'absorption d'eau et d'éléments nutritifs avec les chevelus racinaires.

Types de sols	Diamètres des racines	DENSITE RACINAIRE MOYENNE (nombre de racines/m ²)	
		Profondeurs d'enracinement	
		0 – 100 cm	100 – 160 cm
Colluviosols de bas de pente	> 5 mm	7 ± 1	1 ± 1
	1-5 mm	21 ± 3	2 ± 1
	< 1 mm	92 ± 23	38 ± 16
Moraines épaisses peu compactes	> 5 mm	7 ± 2	1 ± 1
	1-5 mm	23 ± 4	2 ± 1
	< 1 mm	97 ± 7	44 ± 6
Moraines compactes de pente	> 5 mm	6 ± 1	0
	1-5 mm	13 ± 3	0
	< 1 mm	60 ± 9	1 ± 1
Peyrosols, sols caillouteux	> 5 mm	10 ± 3	3 ± 3
	1-5 mm	25 ± 4	8 ± 7
	< 1 mm	103 ± 21	53 ± 25

Tableau 7 : Densité racinaire moyenne (nombre de racines/m²) sur l'ensemble du réseau selon la profondeur d'enracinement, le diamètre des racines et les types de sols. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2001.

Les estimations de la réserve en eau des sols (RU) montrent que le potentiel de réservoir des horizons peut s'avérer très différent d'un type de sol à l'autre (ou entre sites) en raison de leur texture, de la quantité d'éléments grossiers et de la profondeur d'enracinement très divers. La RU est importante en général sur l'ensemble du profil chez les colluviosols peu ou pas caillouteux dont la texture est moyenne à lourde (fig.1). Ils se distinguent entre eux par leur drainage interne et quelques-uns manifestent des hydromorphies temporaires et parfois même permanentes. Dans les moraines caillouteuses et peu compactes, la RU est élevée grâce à la texture moyenne à légère et à une bonne profondeur d'enracinement (Begnins 01, fig.1).

Lorsque la compacité de la moraine s'accroît et que la charge en cailloux diminue au-dessous de 30%, les racines présentent une grande difficulté à pénétrer les couches profondes du sol de la moraine dite « de fond » : la RU y est ainsi limitée (Luins 03, fig.1). La compacité de la moraine combinée à un enracinement superficiel engendrent des sites à faible réservoir en eau à la Côte (zone pilote). Néanmoins, on observe des écoulements d'eau latéraux dans les pentes ou des nappes perchées et temporaires sous les matériaux morainiques compacts des zones étudiées. Ces apports d'eau contribuent

très vraisemblablement à l'alimentation hydrique de la vigne, implantée sur ces moraines de fond. Dans les moraines de retrait et/ou de formation fluvio-torrentielles (peyrosols), les sols sont très caillouteux et très filtrants en profondeur (matrice sableuse grossière autour des cailloux). La réserve hydrique décimétrique demeure faible dans le fond du profil et la RU globale inférieure à 100 mm.

A Lavaux, la profondeur d'enracinement varie essentiellement en fonction de la compacité de la moraine et de la proximité de bancs conglomératiques (grès ou conglomérats) plus ou moins infranchissables pour les racines. Dans des moraines épaisses et peu compactes de pente, l'enracinement est important et profond même si l'on observe quelquefois la présence de bancs de conglomérat affleurant à faible distance du profil étudié (résultats non présentés). L'étalement naturel de la moraine aidé par les remaniements constants opérés par les vignerons, notent Letessier et Fermond (2004), ont pu épaissir les sols qui peuvent avoir une profondeur allant au-delà de 1 m 50 et dont la RU s'avère importante dans la majorité des cas.

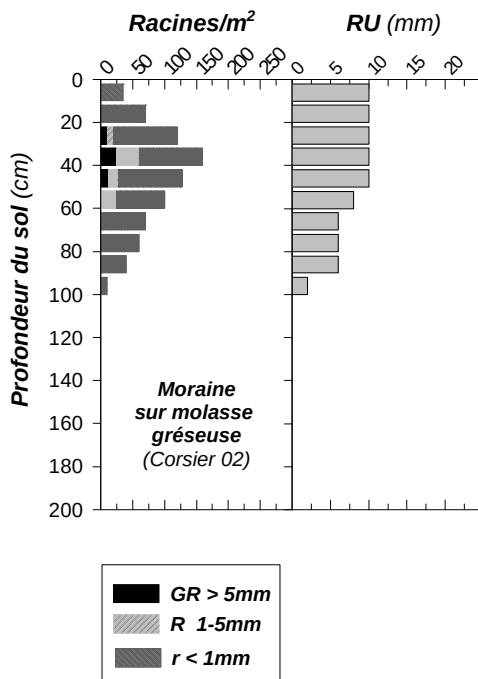


Fig. 2 : Exemple de profil racinaire et hydrique (Letessier et Fermond 2004), observé dans une moraine de recouvrement sur la molasse gréseuse. GR : grosses racines avec diamètre > à 5 mm. R : racines moyennes avec diamètre compris entre 1 et 5 mm. r : petites racines avec diamètre < à 1 mm. RU : réserve utile en eau. Souches de Chasselas, âgées de 15 ans. Lavaux (CH), 2001.

Les moraines compactes de pente présentent en général un enracinement limité en profondeur (< à 1 m) dont la zone préférentielle de colonisation racinaire se situe autour de 30 à 60 cm. Les sols issus de moraine sur conglomérat ou sur grès molassique (Corsier 02, fig. 2) affichent également des enracinements superficiels,

bien que quelques racines puissent s'infiltrer entre le grès fracturé à certains endroits. La RU est souvent inférieure à 120 mm et dépend surtout de la proximité des bancs de grès.

La densité racinaire moyenne est quasi identique entre les divers types de sols dans la première strate de sol, définie entre 0 et 100 cm (tableau 8). Au-delà d'un mètre, les moraines compactes de pente et les moraines sur molasse conglomératique ou gréseuse montrent un enracinement plus faible, principalement de racines au diamètre < 1 mm, que les moraines épaisses et peu compactes.

Types de sols	Diamètres des racines	DENSITE RACINAIRE MOYENNE (nombre de racines/m ²)	
		Profondeurs d'enracinement	
		0 – 100 cm	100 – 160 cm
Moraines épaisses peu compactes	> 5 mm	6 ± 1	1 ± 1
	1–5 mm	20 ± 4	8 ± 3
	< 1 mm	64 ± 5	41 ± 14
Moraines compactes de pente	> 5 mm	5 ± 1	0
	1–5 mm	20 ± 3	1 ± 1
	< 1 mm	76 ± 9	14 ± 6
Moraines sur molasse conglom., gréseuse ou marneuse	> 5 mm	6 ± 1	0
	1–5 mm	21 ± 9	1 ± 1
	< 1 mm	85 ± 10	7 ± 5

Tableau 8 : Densité racinaire moyenne (nombre de racines/m²) sur l'ensemble du réseau selon la profondeur d'enracinement, le diamètre des racines et les types de sols. Moyennes $\pm$ erreur standard. Chasselas, Lavaux (CH), 2001.

On s'accorde généralement sur l'effet prépondérant des propriétés physiques des sols (porosité essentiellement) pour le développement racinaire (Morlat, 1989). Les caractéristiques chimiques (ex. acidité des sols) et nutritives des sols (phosphore, azote...) sont également susceptibles d'influencer la croissance racinaire (Lebon, 1993). Les analyses de sols, effectuées dans les différents profils à la Côte et à Lavaux, présentent des caractéristiques chimiques et nutritives satisfaisantes et ne semblent pas jouer un rôle déterminant entre les divers types de sols étudiés. D'autres paramètres physiques comme la masse volumique et la résistance à la pénétration permettent également d'apprécier l'état de compactage des sols et en conséquence le potentiel de colonisation racinaire. La mesure de la résistance à la pénétration étant inopérante en sols caillouteux, c'est plutôt l'étude de la masse volumique qui a été retenue dans l'étude de Lebon (1993), et qui semble être une variable explicative pertinente des possibilités de développement du système racinaire de la vigne.

A Bonvillars, les sols issus de recouvrement morainique sur la dalle de grès calcaire et jaune du Jura sont souvent très minces. L'enracinement est superficiel (< à 60-80 cm) bien que quelques racines puissent s'infiltrer entre les fissures du grès (fig. 3). La RU représente moins de 100 mm dans la majorité des cas et peut être extrêmement faible à certains endroits où la dalle affleure la surface. Les sols minces, issus de calcaire gréseux, constituent une particularité de l'appellation Bonvillars où les vignes sont cultivées sur une formation géologique de cette nature.

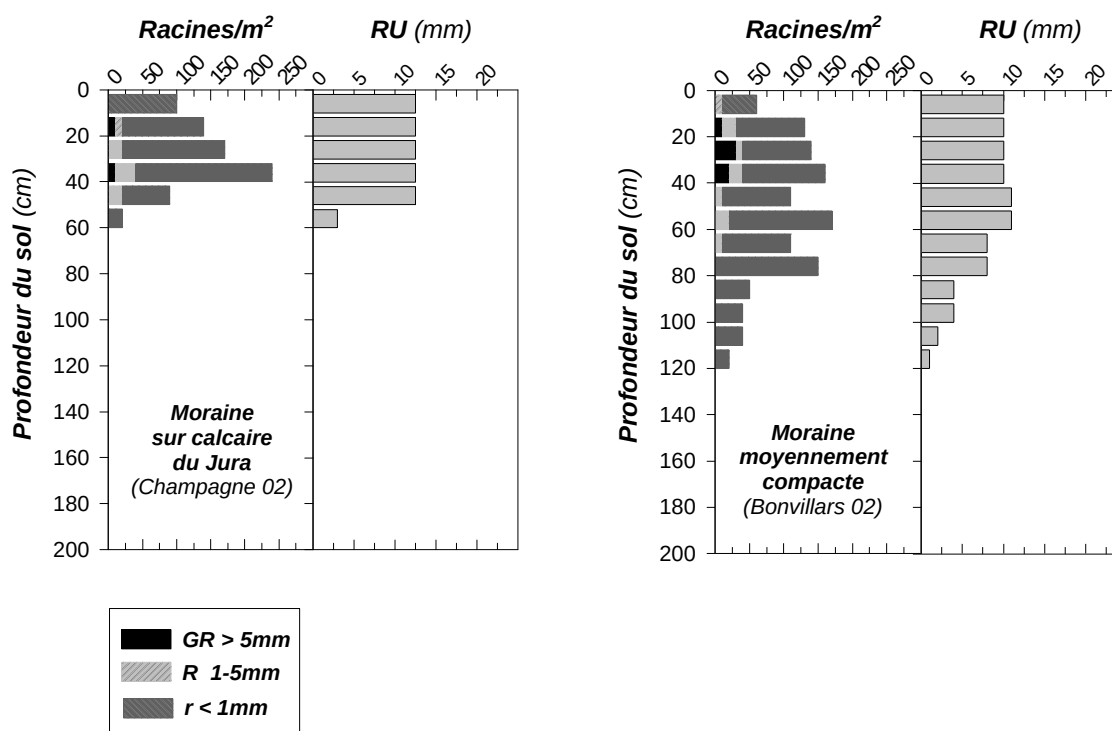


Fig. 3 : Exemples de quelques grands types de profils racinaires et hydriques (Letessier et Fermond 2004), associés aux divers terroirs viticoles à Bonvillars. GR : grosses racines avec diamètre > à 5 mm. R : racines moyennes avec diamètre compris entre 1 et 5 mm. r : petites racines avec diamètre < à 1 mm. RU : réserve utile en eau. Souches de Chasselas, âgées de 15 ans. Bonvillars (CH), 2001.

Ailleurs dans l'appellation, les vignes sont implantées soit sur des moraines latérales (hauts des coteaux), meubles ou parfois compactes en profondeur, soit sur des moraines de fond (Bonvillars 02, fig.3) peu caillouteuses et compactes avec des enracinements allant jusqu'à 1.2 – 1.5 m de profondeur. Le réservoir hydrique de ces sols oscille entre 120 et 160 mm selon la compacité de la moraine et l'enracinement. Quelques vignes sont cultivées sur des moraines de retrait ou des dépôts fluvio-glaciaires (peyrosols) où l'enracinement peut s'avérer profond, mais où la réserve hydrique décimétrique demeure faible vers le fond du profil. Quelques sites reposent sur des colluvions de bas de pente, peu caillouteux et profonds, dont la RU est élevée.

Dans le **Chablais**, la moraine locale plus calcaire, plus caillouteuse et plus perméable en moyenne que la moraine rhodanienne ne semble pas avoir subi les pressions considérables du glacier du Rhône qu'ont connues d'autres régions (Letessier et Fermond, 2004). En conséquence, le drainage est bon et l'enracinement descend correctement en profondeur au-delà de 120 – 150 cm (Ollon 06, fig. 4). La réserve hydrique décimétrique est importante sans être excessive.

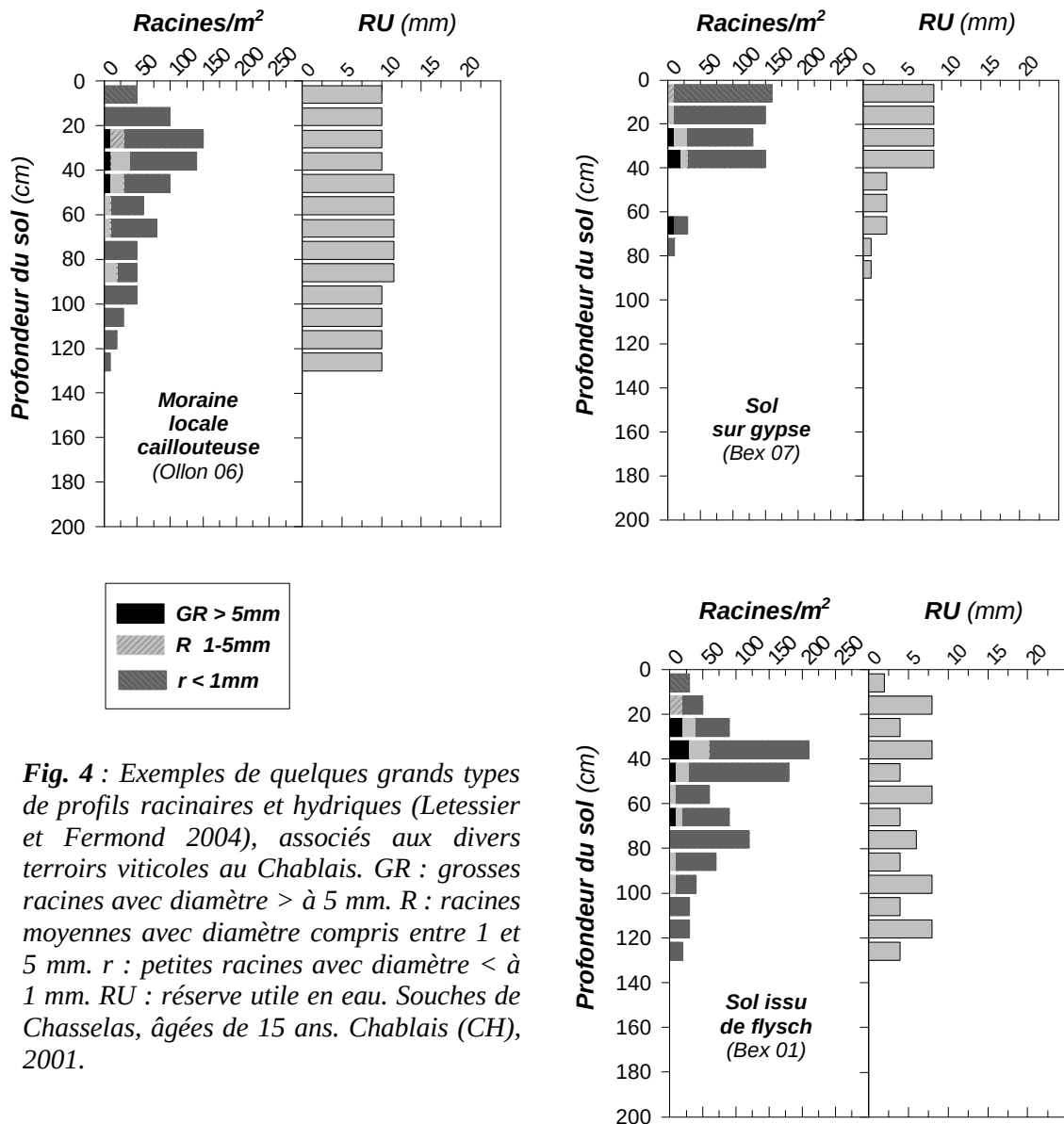


Fig. 4 : Exemples de quelques grands types de profils racinaires et hydriques (Letessier et Fermond 2004), associés aux divers terroirs viticoles au Chablais. GR : grosses racines avec diamètre > à 5 mm. R : racines moyennes avec diamètre compris entre 1 et 5 mm. r : petites racines avec diamètre < à 1 mm. RU : réserve utile en eau. Souches de Chasselas, âgées de 15 ans. Chablais (CH), 2001.

Les sols issus de moraines de recouvrement sur le calcaire gypseux (gypse) sont légers et peu profonds en général (Bex 07) et de faible réserve hydrique (< à 100 mm). La formation gypso-calcaire semble peu favorable à la pénétration racinaire (composition chimique riche en sels tels que chlorure, sulfates... et à forte teneur en calcaire).

Les vignes implantées sur le flysch de Chiètres présentent un bon enracinement entre les feuillets ou les plaques marno-gréseuses qui contiennent une certaine capacité de stockage de l'eau entre les feuillets, difficile à évaluer avec exactitude (Bex 01, fig.4). Dans certains sols, l'altération des plus fines plaques marno-gréseuses très obliques autorisent une excellente pénétration racinaire et un bon stockage de l'eau (Letessier et Fermond, 2004).

Finalement, les principaux types de sols, étudiés dans les zones pilotes du Canton, et leur réservoir en eau respectif sont présentés dans le tableau 9.

En moyenne, les sols à faible RU (< à 100 mm) sont représentés par les moraines de recouvrement sur le calcaire du Jura, les peyrosols sableux, les sols sur gypse et les moraines très compactes de pente. Néanmoins, à l'intérieur d'un même type de sol, des différences importantes peuvent survenir entre deux sites. De surcroît, la répartition décimétrique de la RU s'avère assez disparate, notamment chez les peyrosols sableux où l'enracinement profond permet à la vigne de tirer profit des réserves hydriques des couches inférieures à l'opposé des sites implantés sur des moraines de recouvrement, du gypse ou des moraines très compactes à l'enracinement plus superficiel.

Les sols issus de flysch, les moraines plus ou moins meubles et épaisses de recouvrement sur la molasse conglomératique ou gréseuse, ainsi que les moraines caillouteuses et locales du Chablais constituent autant de sites dont le réservoir hydrique est moyennement élevé (RU de 100-150 mm). Enfin, les sols dont la RU est supérieure à 150 mm sont composés dans la majorité des cas de moraines caillouteuses et peu compactes avec un enracinement profond et de colluvions de bas de pente.

Types de sols	RU estimée sur la profondeur d'enracinement (mm)
<i>Moraines sur calcaire du Jura</i>	80 ± 10
<i>Peyrosols sableux</i>	90 ± 15
<i>Sols sur gypse</i>	90 ± 15
<i>Moraines compactes de pente</i>	100 ± 10
<i>Sols issus de flysch</i>	120 ± 20
<i>Moraines sur molasse congl., gréseuse</i>	125 ± 25
<i>Moraines locales (Chablais)</i>	140 ± 10
<i>Moraines caillouteuses peu compactes</i>	170 ± 15
<i>Colluviosols de bas de pente</i>	190 ± 10

Tableau 9 : Principaux types de sols, observés dans les zones pilotes de l'étude, et leur réserve utile estimée (RU). Moyennes ± erreur standard. La Côte, Lavaux, Bonvillars et Chablais (CH), 2003.

4.2 Alimentation hydrique de la vigne

4.2.1 Etude générale

Introduction

Des études de caractérisation des terroirs viticoles tendent à montrer l'influence prépondérante des conditions d'alimentation en eau sur le comportement de la vigne et la qualité des raisins et des vins (Seguin, 1970 ; Morlat, 1989 ; van Leeuwen, 1991 ; van Leeuwen *et al.*, 1998 ; Spring et Burgos, 2002). De manière générale, l'alimentation hydrique de la vigne durant la maturation des raisins constitue un des facteurs clés de la qualité de la vendange, unanimement reconnu (Champagnol, 1984 ; Carbonneau, 1998).

La sensibilité de la vigne au déficit hydrique est fonction de facteurs intrinsèques à la parcelle (nature du sol, mésoclimat) et varie selon des facteurs génétiques (cépage/porte-greffe, Düring et Scienza, 1980 ; Schultz, 1996 ; Spring, 1997) et agronomiques (techniques culturales, Champagnol, 1984).

Un stress hydrique intense entraîne l'affaiblissement des échanges gazeux (photosynthèse et transpiration foliaires), affecte le développement végétatif (surface foliaire principale et secondaire diminuée) et réduit la durée du cycle végétatif (arrêt de la croissance). Son effet sur les composantes du rendement est fonction du stade d'apparition de la contrainte, de sa durée et de son intensité : un stress précoce réduit le nombre de baies par grappe, une contrainte se développant entre la nouaison et la véraison diminue leur poids unitaire (Ollat, 1997 ; Ojeda *et al.*, 1999 ; 2001) et augmente l'hétérogénéité de la taille des baies. Par contre, si la contrainte intervient pendant la maturation, elle n'aura que peu d'effet sur le poids de la récolte (Matthews *et al.*, 1987 ; Smart *et al.*, 1974). Une sécheresse excessive provoque également une réduction de l'accumulation des sucres dans les baies et un blocage de maturation. Le stress permet dans une certaine mesure de concentrer les phénols du raisin par une diminution de la taille des baies et une action directe sur leur biosynthèse (Deloire *et al.*, 2002, 2003 ; Ojeda *et al.*, 1999, 2002).

Les excès comme les manques d'eau sont généralement néfastes à l'obtention d'une vendange qualitative. Une alimentation hydrique non limitative tout au long de la saison induit un excès de vigueur qui altère la qualité de la récolte : hausse des rendements, compétition accrue pour la répartition des sucres entre partie végétative et reproductrice, phénomènes de dilution, réduction de la coloration des vins, altération du microclimat de la zone des grappes et développement de parasites... (Champagnol, 1984 ; Payan et Salançon, 2002).

Une contrainte hydrique progressive (dès la floraison) et modérée conduit par contre à un ralentissement ou à un arrêt de la croissance végétative autour de la véraison (Carbonneau, 1998) et favorise ainsi la production de raisins plus riches en sucres réducteurs, en anthocyanes, en composés phénoliques et moins acides (van Leeuwen *et al.*, 1998). A la véraison, la fourniture en eau doit être suffisante pour compenser l'évapotranspiration, mais insuffisante pour assurer la croissance (Bessis et Adrian, 2000). Cet état se traduit au niveau édaphique par un épuisement quasi-complet des réserves au cours de la maturation (Riou, 1994 ; Payan et Salançon, 2002).

Appréciation de l'état hydrique de la vigne

De nombreux facteurs influent sur l'état hydrique de la vigne. **L'offre** naturelle (sans irrigation) est assurée essentiellement par la réserve en eau du sol (RU) qui dépend entre autres de la profondeur de sol exploré par les racines, de sa texture et de sa structure (éventuellement de la présence d'une nappe d'eau perchée, ruissellement...), et par le mésoclimat (pluviométrie sur la parcelle). **La demande** découle principalement de l'évapotranspiration de la plante et du sol qui est sous l'étroite dépendance de la dimension du couvert végétal (densité de plantation, architecture de la canopée, surface foliaire, stade phénologique, rendement...), des caractéristiques du cépage et du porte-greffe, de la couverture du sol, des résistances internes de la plante (gradient de potentiel et conductivité hydraulique) et de la demande évaporatoire de l'atmosphère (température, hygrométrie et rayonnement).

Il existe de nombreuses techniques pour évaluer le régime hydrique de la vigne (van Leeuwen *et al.*, 2001). Certaines sont basées sur la mesure de la quantité d'eau dans le sol (gravimétrie ou humidité à neutrons) ou sa disponibilité pour la plante

(tensiométrie). Les indicateurs physiologiques constituent une autre approche en évaluant l'état hydrique de la plante elle-même. Ces indicateurs physiologiques sont divers : potentiel foliaire, potentiel de base ou potentiel de tige (Scholander *et al.*, 1965 ; Begg et Turner, 1970 ; Chone *et al.*, 2001b), microvariations de diamètre d'organes de la vigne (van Leeuwen *et al.*, 2000), débit de sève (Valancogne et Nasr, 1993 ; Trambouze, 1996 ; Schmid, 1997) et transpiration (Schultz, 1989 ; Zufferey, 2000). Quelques techniques font apparaître des paramètres méso ou microclimatiques : bilan hydrique théorique (Lebon *et al.*, 1995, 2003 ; Pellegrino *et al.*, 2001 ; Riou et Payan, 2001) et Crop water stress index (CWSI) (Riou et Lebon, 2000 ; Guilioni *et al.*, 2001 ; Lopes *et al.*, 2001). Enfin, l'évaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans les sucres des moûts laisse présager d'intéressantes perspectives (Gaudillère *et al.*, 1999 ; van Leeuwen *et al.*, 2001).

Néanmoins, la majorité des techniques nécessite un équipement en matériel souvent difficile à mettre en oeuvre, ou des connaissances de la réserve en eau du sol au début de la saison qui s'avère délicate à évaluer en raison de l'enracinement profond et hétérogène de la vigne. La mesure des potentiels foliaires et de la transpiration met par contre en lumière l'état hydrique instantané de la vigne. L'analyse des conditions d'alimentation en eau de la vigne sur l'ensemble de la période de végétation entraîne cependant des mesures répétées tout au long de la saison.

Le continuum sol-plante-atmosphère (CSPA)

Du point de vue des transferts hydriques, le sol, la plante et l'atmosphère forment un continuum (Cruiziat, 1997). L'eau en provenance du sol transite par la plante avant de rejoindre l'atmosphère. La transpiration est le moteur principal du transfert de l'eau à travers la plante. Elle crée un appel retransmis le long de la tige et de cellule en cellule grâce aux forces de cohésion de l'eau. Lorsque la transpiration est active, l'eau est sous tension. Un certain nombre de plantes (dont la vigne) génèrent également une pression ou poussée radiculaire. Mais l'action de la pression radiculaire est annulée le jour, dès que la transpiration induit des valeurs de tension quelque peu importantes (< à -2 bars, ce qui est presque toujours le cas). En fin de nuit, par contre, si la transpiration est presque nulle, la sève peut être sous pression.

Les étapes du transit de l'eau sont schématiquement : l'écoulement de l'eau du sol vers les racines, l'absorption racinaire, des racines au xylème de la tige, de la tige à la feuille, et de la feuille à l'atmosphère en passant par les stomates. Entre deux points de ce continuum, l'eau circule tant qu'il y a une variation de potentiel hydrique (ou gradient de potentiel, $\Delta\psi$). Les transferts d'eau se réalisent dans le sens des ψ décroissants, c'est-à-dire du potentiel hydrique le moins négatif vers le plus négatif. Si le potentiel hydrique est le même entre deux points, il n'y aura point de flux. On peut représenter le flux d'eau entre deux compartiments de la plante (par exemple entre la tige et les feuilles) par la formule : $\text{Flux} = \Delta\psi / r$ où $\Delta\psi$ exprime la différence de ψ entre les deux compartiments et r , les résistances au transfert de l'eau (ou l'inverse de la conductivité hydraulique).

Si le flux est « conservatif », c'est-à-dire, que l'absorption de l'eau par les racines est équivalente à la transpiration (perte d'eau par les feuilles), l'état hydrique de la plante reste alors globalement fixe, et le flux dépend uniquement du gradient de potentiel et des résistances. Si la transpiration est supérieure à l'absorption (en cours de journée), la plante se déshydrate : le flux n'est plus « conservatif » et les physiologistes ont introduit la notion de « réservoirs » qui exprime la capacité hydrique des organes à stocker de l'eau (par exemple dans leurs tiges ou leurs feuilles...). Néanmoins, les flux en provenance des « réservoirs » sont très faibles en comparaison du flux de transpiration (Cruiziat, 1997). Il résulte que l'exigence hydrique d'une plante est très importante.

Résistances hydrauliques

Le continuum sol-plante-atmosphère est parcouru par des résistances au transfert de l'eau (résistance hydraulique du sol, de l'interface sol-racine, de la racine aux feuilles, résistance stomatique). Il semblerait toutefois que la plante ne dispose pas de moyens pour réguler de façon efficace la résistance hydraulique entre les racines et les feuilles (résistance au transfert d'eau dans la plante, Tardieu *et al.*, 1995). Divers auteurs suggèrent que cette dernière est peu variable (Breda *et al.*, 1993 ; Simonin *et al.*, 1994).

Néanmoins, une augmentation progressive des résistances au transfert d'eau dans la plante est fréquemment observée, surtout chez les arbres, lorsque le sol se dessèche (Cochard *et al.*, 1992). Sous certaines conditions, des bulles de gaz (probablement de l'air traversant la paroi des ponctuations entre vaisseaux, Tyree et Ewers, 1991) apparaissent dans les éléments du xylème lorsque la différence de potentiel entre les feuilles et les racines s'accroît. Ce phénomène, appelé **cavitation**, réduit le nombre de canaux de xylème disponibles pour le transfert d'eau, et augmente donc les résistances hydrauliques dans la plante (Schultz et Matthews, 1997). Si un certain seuil de stress est dépassé, la cavitation peut s'aggraver : la baisse de conductivité hydraulique provoquée par la cavitation entraîne une augmentation de la différence de potentiel entre racines et feuilles, qui elle-même accroît le risque d'embolie. La fonctionnalité du xylème peut être partiellement récupérée si des pressions positives se développent.

Toutefois, l'importance réelle de ce phénomène en conditions naturelles est encore mal connue. Une grande variabilité entre espèces existe concernant la susceptibilité à la cavitation (Tyree et Ewers, 1991 ; Cochard *et al.*, 1992 ; Tyree et Cochard 1995 ; Schultz et Matthews, 1993) : certaines espèces sensibles (noyer) commencent à caviter dès que le potentiel hydrique foliaire atteint -10 bars, alors que d'autres (cèdre) résistent jusqu'à -40 bars. L'embolisation précoce de pétioles pourrait être dans certains cas une stratégie de réponse à la sécheresse, dans la mesure où elle entraîne une chute des feuilles et par conséquent une réduction du flux d'eau à travers la plante (Tardieu *et al.*, 1995).

Les plantes ont la capacité de maintenir la différence de potentiel entre les feuilles et les racines en-deçà du seuil de cavitation. La régulation stomatique constitue par conséquent un moyen de réguler les flux d'eau à travers la plante pour permettre le métabolisme et la croissance du végétal, mais aussi pour éviter la cavitation.

Régulation stomatique

Les stomates jouent un rôle clé dans la régulation des flux d'eau et de CO_2 des feuilles. Ils constituent le moyen de contrôler les pertes d'eau par la transpiration et le prélèvement de CO_2 nécessaire à la photosynthèse. Les mouvements stomatiques (ouverture et fermeture) dépendent des variations de turgescence des cellules de garde

et des cellules épidermiques voisines. Les changements de turgescence résultent soit d'une variation du potentiel hydrique des cellules de garde soit d'une variation active du potentiel osmotique de celles-ci.

De nombreux facteurs externes (lumière, CO₂, température, humidité, état hydrique du sol, etc...) et internes (substances de croissance, âge des feuilles, organes puits, rythmes endogènes) influent sur le fonctionnement des stomates (Quereix, 2001, Zufferey, 2000).

De manière générale, l'effet d'un déficit hydrique sur le comportement stomatique doit être analysé en séparant les effets de plusieurs variables environnementales (Tardieu et Dreyer, 1997). L'état hydrique de l'air et l'énergie lumineuse incidente (ces deux dernières variables étant souvent associées au déficit hydrique) ont un effet propre sur l'ouverture stomatique. L'état hydrique du sol agit sur la conductance stomatique au travers de l'état hydrique de la plante, qui induit une fermeture stomatique en cas de dessèchement excessif (rétrocontrôle, *feed back*). Au contraire, la lumière et l'état hydrique de l'air agissent sur la conductance stomatique largement indépendamment de l'état de la plante (*feed forward*). Il s'agit donc de deux modes de contrôle différents.

La vigne : plante iso-hydrique

Plusieurs espèces végétales, appelées « iso-hydriques » comme le maïs (Tardieu *et al.*, 1992), le pois et la vigne, ne voient pas leur potentiel hydrique foliaire diminuer lorsque le sol se dessèche. Le dessèchement du sol provoque la fermeture des stomates, sans que la turgescence ou le potentiel hydrique foliaire ne soient affectés. L'état hydrique foliaire ne peut donc pas rendre compte du comportement stomatique (Tardieu et Dreyer, 1997).

Chez les plantes iso-hydriques, la conductance stomatique se trouve sous un double contrôle : **chimique**, via la circulation d'une molécule d'origine racinaire, l'acide abscissique (ABA) et **hydraulique**, via le potentiel hydrique dans le xylème foliaire qui modifie la sensibilité stomatique à l'ABA.

Ainsi, le potentiel hydrique foliaire ne semblerait pas en mesure de provoquer à lui seul la fermeture des stomates : il accroîtrait par contre la sensibilité de ceux-ci à l'ABA chez les végétaux iso-hydriques.

Un comportement différent existe chez d'autres espèces, appelées « *aniso-hydriques* », comme le tournesol dont le potentiel hydrique foliaire n'est pas maintenu constant lorsque les plantes sont soumises à la sécheresse (Tardieu *et al.*, 1995). L'hypothèse suivante a été avancée pour expliquer le comportement des plantes aniso-hydriques : le comportement stomatique n'est déterminé que par le message racinaire (ABA). Dans ce cas, la plante ne maintient pas son potentiel foliaire (Tardieu, 1993). La conductance stomatique et le potentiel hydrique foliaire baissent conjointement en cours de journée, ce qui génère une relation apparente entre ces deux variables. Quelques exceptions de comportement ont été observées, notamment chez de grands arbres poussant en conditions naturelles, où un processus plus complexe de contrôle de la conductance stomatique reste encore à élucider (Cochard *et al.*, 1992).

Les régulations présentées dans ce chapitre concernent les réactions des végétaux à des contraintes hydriques de courte durée, que la plante surmonte en ajustant les flux d'eau et de CO₂ (*mécanisme de tolérance à la sécheresse*). Cependant, des déficits hydriques de longue durée se traduisent par des changements importants de la structure des plantes (*mécanisme d'évitement de la sécheresse*). Il est vraisemblable, notent Tardieu *et al.* (1995), que ces processus d'ajustement de la structure (enracinement, développement foliaire, anatomie des feuilles et des éléments conducteurs, connexions vasculaires...) entraînent des effets plus importants que la régulation stomatique sur les flux d'eau et de carbone à l'échelle du cycle de la plante.

Contrainte hydrique et processus physiologiques

Le déficit hydrique impose la fermeture progressive des stomates qui réduit à son tour les échanges gazeux (photosynthèse, transpiration). Des effets non-stomatiques de la contrainte hydrique se manifestent aussi au travers de la concentration en CO₂ interne de la feuille, des résistances au transfert inter- et intracellulaire du CO₂ et de l'activité enzymatique responsable de la fixation du CO₂ : ces différents phénomènes concourent à la réduction de la capacité photosynthétique des végétaux.

La réponse des végétaux soumis à un stress hydrique ne se traduit non seulement par la régulation stomatique mais aussi par d'autres mécanismes comme la résistance hydraulique au flux d'eau entre la partie racinaire et aérienne ainsi que par le rapport entre le développement racinaire et foliaire (Lovisolo et Schubert, 1998 ; Dry et Loveys, 1999). Il existe également un niveau d'alimentation hydrique pour lequel la croissance, plus sensible que la photosynthèse, est interrompue tandis que l'assimilation peut se maintenir (Carbonneau, 2001).

Par ailleurs, divers auteurs (Davies et Zhang, 1991 ; Tardieu et Davies ; 1992 ; Gollan *et al.*, 1992) ont montré que la fermeture stomatique et l'inhibition de la croissance végétative ne sont pas uniquement la conséquence d'une modification du statut hydrique de la plante mais aussi de l'état hydrique du sol. Ces processus physiologiques répondent à des variations de l'équilibre phytohormonal dans la plante (Turner , 1991). Parmi les différentes hormones connues, l'acide abscissique ou ABA a été identifié comme impliqué dans la réponse des plantes assujetties à des stress divers (salins, hydriques ou thermiques, Salisburg et Ross, 1992). D'autres facteurs tels que la composition minérale de la sève xylémienne, les nutriments dans le courant transpiratoire ou encore la teneur en cytokinine des feuilles jouent un rôle régulateur sur l'influence de l'ABA en tant que signal dans les mécanismes de tolérance à la sécheresse.

L'état hydrique de la plante intervient également dans les processus respiratoires. En général, la contrainte hydrique influence plus fortement l'activité photosynthétique que la respiration (Boyer, 1970 ; Brix, 1962). On reconnaît dans ce comportement la nature essentielle de la respiration dont l'objectif est de maintenir en vie le végétal, le plus longtemps possible. Néanmoins, l'activité respiratoire des feuilles diminue lorsque la contrainte hydrique s'accroît (Brown et Thomas, 1980). Si le stress hydrique s'installe progressivement, la réduction de la respiration de croissance est proportionnelle à celle de la photosynthèse : la respiration de maintien décroît parallèlement à l'activité métabolique dans son ensemble (Mc Cree, 1986b).

L'adaptation à la sécheresse

L'adaptation des végétaux face à une restriction en eau se manifeste de manière progressive, selon un rythme quotidien. En début de saison, la régulation stomatique permet d'adapter les processus physiologiques de la partie aérienne de la plante à une contrainte graduelle. Plus tard, la contrainte apparaît au niveau racinaire et entraîne une modification de l'équilibre hormonal (cytokinine/ABA) et une diminution du potentiel hydrique des racines (Champagnol, 2002). Ces modifications se propagent à la partie aérienne et imposent un ralentissement de la croissance et une régulation efficace des stomates.

Selon Champagnol (2002), l'adaptation peut être passive ou active. La limitation de la croissance des racines et des rameaux participe étroitement à une stratégie, dite d'évitement ou de résistance passive. La réduction de la croissance diamétrale des rameaux ayant poussé à l'ombre s'accompagne par exemple d'une diminution du diamètre des vaisseaux conducteurs et ainsi du débit de sève (Schultz, 1989 ; Schultz et Matthews, 1988). D'autres changements de la structure des plantes (connexions vasculaires) concourent également à un mécanisme d'**adaptation « passive »**.

Les résistances au transfert de l'eau dans la racine et le rameau ont été observées par Schultz et Matthews (1988) chez la vigne. Sous l'effet de la contrainte hydrique, la résistance hydraulique, imposée par le rameau de vigne, est fortement augmentée. A cette résistance, il faut encore ajouter celle qui provient de la rupture de la colonne d'eau des certaines vaisseaux (cavitation provisoire et partielle). En général, les végétaux présentent la capacité de maintenir la différence de potentiel entre les feuilles et l'appareil racinaire en-deçà du seuil de cavitation. Le comportement stomatique peut alors évoluer selon deux voies (Schultz, 1996) : le modèle, dit d'évitement, étudié sur Grenache à Montpellier, comprend la fermeture efficace des stomates qui minimise les pertes en eau de la vigne. Cependant, les conséquences qui en découlent sont importantes : élévation de la température foliaire comme corollaire d'une transpiration réduite ne dissipant plus suffisamment l'énergie, ainsi qu'une production photosynthétique faible.

La régulation stomatique décrite selon le modèle dit tolérant, a été étudié sur Syrah par Schultz (1996) également. La fermeture non-hermétique des stomates permet le maintien de la croissance mais entraîne une consommation plus élevée en eau que chez le Grenache, tout en évitant les chocs thermiques au feuillage.

L'**adaptation active** dérive d'un phénomène d'osmorégulation (ou ajustement osmotique, Turner, 1979), c'est-à-dire d'un accroissement de la concentration des solutés (sucres, acides organiques et aminés, ions minéraux) dans les cellules ou d'une augmentation de l'élasticité cellulaire.

L'osmorégulation procède de plusieurs mécanismes biologiques dont l'épictèse, définie comme un pompage de molécules dans le milieu extérieur ou dans les cellules voisines, et l'anatonose qui consiste en une hydrolyse de macromolécules (amidon en glucose par exemple, Robert et Roland, 1998). Le carbone requis pour l'ajustement osmotique provient non seulement de la photosynthèse mais aussi du métabolisme des acides organiques et des hydrates de carbone. La vigne soumise à une contrainte hydrique est capable d'effectuer des ajustements osmotiques dans ses feuilles adultes et dans les rameaux en phase de croissance active (Düring et Loveys, 1982 ; Rodrigues *et al.*, 1993 ; Schultz et Matthews, 1993 ; Zamboni et Iacono, 1988).

L'augmentation de la concentration en solutés oriente la compartimentation de l'eau en faveur du compartiment métaboliquement actif qui a bénéficié de l'osmorégulation : au niveau des racines, elle permet d'extraire une eau du sol qui était inaccessible (Champagnol, 2002). L'ensemble du continuum sol-plante-atmosphère se retrouve avec des valeurs de potentiel osmotique et de potentiel hydrique (Ψ) plus négatifs dans chacun de ses compartiments. Ce phénomène va se répercuter jusque dans les baies et sur les conditions d'accumulation des sucres et de croissance (Champagnol, 2002).

Définition du potentiel hydrique (Ψ)

Il existe au moins deux types de définition de l'état hydrique d'un échantillon végétal. L'un s'appuie sur *la masse d'eau* (ex : l'humidité pondérale), l'autre sur « *l'état énergétique de l'eau* » de l'échantillon. La mesure du potentiel hydrique (Ψ) permet d'estimer cet état énergétique de l'eau. Seule cette grandeur thermodynamique autorise de déduire les mouvements de l'eau liquide entre deux points de l'ensemble formé par le sol, le végétal et l'atmosphère sous certaines conditions (Cruiziat, 1997).

Le potentiel hydrique est devenu, pour un temps, le concept à la mode. Il représente une mesure de l'énergie libre disponible pour un travail et une mesure de la force motrice nécessaire au déplacement de l'eau (Urban, 1997). Le Ψ correspond à l'énergie qu'il faut fournir à un centimètre cube d'eau pour vaincre les forces d'origines diverses (osmotiques, capillaires, de pression...) qui lient cette eau dans un tissu végétal ou dans le sol, et l'amener à l'état de référence. Cet état de référence équivaut à de l'eau pure à la température de 20°C et dont la valeur de potentiel est égale à zéro ($\Psi = 0$, eau libre). Pour tout autre état énergétique, Ψ est soit positif si l'eau cède de l'énergie en revenant à l'état de référence (ex : poussée radiculaire, sève sous pression), soit négatif s'il faut lui en fournir pour la ramener à cet état (sève sous tension), (Cruiziat, 1992,1997).

Chez les plantes, le Ψ est très souvent négatif. Il varie d'un point à l'autre dans la plante. Les transferts d'eau se réalisent dans le sens des Ψ décroissants, c'est-à-dire du potentiel hydrique le moins négatif vers le plus négatif . Le Ψ s'exprime en unité de pression (Pa, bar). Le Ψ est égal pour une cellule végétale (ou une plante) à la somme des trois composantes suivantes :

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_{\text{p}} + \Psi_m$$

Avec : Ψ_p : potentiel osmotique, Ψ_{p} : potentiel de turgescence, Ψ_m : potentiel matriciel
Le Ψ_m représente la contribution des forces développées à la surface des particules ou forces matricielles. Ces dernières sont négligeables dans la plante, mais peuvent être

élevées dans un sol. Le potentiel hydrique cellulaire ou d'une plante a donc deux composantes principales, l'une osmotique, l'autre de turgescence.

Le potentiel osmotique (Ψ_{π}) résulte de la présence de solutés dissous (sucres, acides organiques et aminés, ions ...) entraînant une diminution du potentiel chimique de l'eau (état énergétique). Il est toujours négatif et proportionnel à la concentration des solutés dissous. Une des particularités des cellules vivantes réside dans la possibilité d'accumuler des molécules ou des ions contre le gradient de diffusion moyennant une dépense énergétique.

Causes des variations du Ψ_p

Le Ψ_{π} est affecté par les variations de la teneur en eau et de répartition de l'eau entre les fractions osmotique et non osmotique (Urban, 1997). En cas de diminution de la teneur en eau, consécutive à une dégradation du bilan hydrique du milieu, le contenu cellulaire se concentre davantage, sa pression osmotique augmente et son potentiel osmotique diminue (devient plus négatif). Une accumulation de sucres solubles, due à une activité photosynthétique intense, entraîne des effets similaires. L'ajustement osmotique représente un mécanisme adaptatif très fréquent chez les végétaux soumis à des conditions de sécheresse. Il consiste en une hydrolyse de macromolécules (ex : amidon) qui se traduit par un accroissement de la concentration en solutés et une baisse de Ψ_{π} . Des modifications entre les réserves apoplastiques et symplastiques en eau des cellules jouent également un rôle sur le potentiel osmotique des tissus cellulaires en cours de saison.

Conséquences des variations de Ψ_p

Les conséquences de la variation du Ψ_{π} permet par exemple le maintien de la pression de turgescence qui est le moteur de l'élongation cellulaire. La diminution du Ψ_{π} entraîne un abaissement du potentiel hydrique, favorable à l'absorption d'eau à partir d'un milieu en cours de dessèchement. La diminution du potentiel osmotique apparaît donc comme un phénomène important pour la croissance et la survie des plantes.

Le potentiel de turgescence (Ψ_p) représente la pression exercée par la paroi pecto-cellulosique sur le contenu cellulaire. Elle s'oppose à l'entrée de l'eau dans la cellule. Elle est comptée positivement. Le Ψ_p joue un rôle fondamental dans les mouvements des cellules de garde des stomates (l'augmentation de Ψ_p est à l'origine de l'ouverture des stomates) ainsi que dans la croissance des cellules. Sa mesure est le plus souvent indirecte et procède de la différence entre le Ψ_F et le Ψ_{Π} .

Dans un couvert végétal, il faudrait ajouter aux deux composantes de Ψ , la composante liée à la différence de hauteur au-dessus du niveau de référence. En général, on néglige cette composante de Ψ parce qu'elle est très faible par rapport aux autres. En effet, une hauteur de 10 mètres correspond à une différence de potentiel ($\Delta\Psi$) de 0.1 MPa ou 1 bar.

4.2.2 Applications des mesures hydriques

Potentiel hydrique de base (Ψ_{base})

La mesure du Ψ_{base} indique l'état hydrique de la plante en fin de nuit quand les flux de sève à travers la vigne sont pratiquement inexistants (transpiration foliaire très faible, seule subsiste la poussée radiculaire) et que la vigne a pu rééquilibrer son état hydrique en relation avec l'eau du sol. Dans ces conditions en effet, l'état hydrique de la plante est considéré en équilibre avec l'état hydrique du sol exploré par le système racinaire (Katerji et Hallaire, 1984).

Le suivi du Ψ_{base} , effectué au moyen de la chambre à pression, permet d'estimer la force avec laquelle l'eau est retenue dans les tissus végétaux lorsque la transpiration foliaire est fortement réduite. Plus les valeurs enregistrées sont basses (ou négatives), plus l'eau est fortement retenue à l'intérieur de la plante indiquant une alimentation en eau limitative.

Des valeurs seuils ont été proposées par divers auteurs (Carbonneau, 1998 ; Riou et Payan, 2001) qui permettent d'apprécier le degré de la contrainte hydrique subie par la plante. Les seuils, proposés dans notre étude pour le cépage Chasselas, résultent d'observations physiologiques (échanges gazeux en relation avec l'alimentation hydrique de la vigne ; Zufferey, 2000) menées depuis plusieurs années sur les sites expérimentaux de la Station de Changins (Pully et Leytron).

- de 0 à -1.5 bar : absence de contrainte hydrique
- de -1.5 à -3.0 bars : contrainte hydrique faible
- de -3.0 à -5.0 bars : contrainte hydrique modérée
- valeurs < -5.0 bars : contrainte hydrique forte (symptômes de sécheresse).

Modèle de bilan hydrique

Un modèle de bilan hydrique, proposé initialement par Riou (1992,1994) et utilisé par différents auteurs (Riou et Lebon , 2000 ; Riou et Payan, 2001 ; Payan et Salançon, 2002), permet de suivre l'état hydrique de la vigne et la disponibilité en eau offerte par

le milieu. Ce bilan repose sur un fonctionnement simple de type « réservoir » et reflète une estimation de la fraction d'eau du sol utilisable par la plante qui fluctue avec les gains issus des précipitations et les pertes par transpiration du couvert végétal et évaporation directe du sol. Par la suite, la quantification de la disponibilité en eau dans le sol (FTSW, fraction d'eau du sol utilisable par la plante) autorise une évaluation directe de l'intensité de la contrainte subie par la vigne au moyen de relations établies avec la mesure du Ψ_{base} (Lebon *et al.*, 2003).

Le paramétrage du modèle de bilan hydrique utilise ainsi la vigne comme indicateur de l'état hydrique du milieu, à travers la mesure du potentiel hydrique de base. Cette approche tient compte des principales caractéristiques parcellaires que sont les paramètres édaphiques, climatiques et physiologiques (Riou et Payan, 2001). La validation d'un tel modèle dans les conditions de notre vignoble a été effectuée en utilisant les mesures hydriques, réalisées durant les saisons 2001-2003. A ce stade, les limites d'utilisation du modèle de bilan hydrique sont les suivantes : le modèle ne prend pas en compte les pertes en eau liées au ruissellement de surface (vigne en forte pente !), aux flux d'eau en profondeur ou latéraux et à la transpiration de la culture intercalaire.

Définition d'un itinéraire hydrique

Une méthode actuellement utilisée pour imager le vécu hydrique d'une parcelle viticole au cours de la saison a été proposée par Codis (2000). Elle présente l'avantage de discriminer les conditions d'alimentation en eau à deux niveaux : par la date d'apparition et par l'intensité de la contrainte. Dans ce but, le cycle végétatif est scindé en cinq classes représentatives des principaux stades phénologiques de la vigne : débourrement-floraison (0 à 300°j), floraison (300 à 500°j), floraison-véraison (500 à 900°j), véraison (900 à 1000°j), maturation (1100 à 1300 °j). A chaque classe est attribuée une note de contrainte hydrique ou « note de stress » en fonction des réserves en eau sur la période considérée (bilan hydrique) ou des seuils de Ψ_{base} (tableau 10).

Un « itinéraire hydrique » est ainsi défini par un quintuplé pour chaque parcelle et par millésime. Ce quintuplé est l'image du régime hydrique qui a prévalu sur une parcelle en cours d'année. A titre d'exemple, la parcelle nommée Luins 03 (La Côte) a été

définie en 2002 par l'itinéraire hydrique suivant : [0-1-1-1-2] . Cet itinéraire indique qu'une contrainte faible est apparue à la floraison et s'est maintenue jusqu'au début de la maturation pour s'intensifier durant la maturation du raisin (contrainte modérée). Une typologie simple et synthétique peut être ainsi proposée (Codis, 2000) pour caractériser un réseau de parcelles.

Les auteurs de cette méthode relèvent qu'il faut pondérer l'incidence de la note obtenue par sa date d'apparition et par sa durée. En effet, un déficit hydrique correspondant à une note moyenne à maximale (notes=2-3) est recherché durant la maturation du raisin pour ses conséquences bénéfiques sur l'arrêt de la croissance végétative, mais il peut s'avérer préjudiciable en début de saison (avant la floraison) pour la mise en place de l'appareil foliaire et son activité photosynthétique.

Niveaux de contrainte	FTSW (%)	Seuils de Y_{base}	Notes de stress
Absence de contrainte	> 40%	0 à -1.5 bar	0
Contrainte faible	21-40%	-1.5 à -3.0 bars	1
Contrainte modérée	7-21%	-3.0 à -5.0 bars	2
Contrainte forte	< 7%	< à -5.0 bars	3

Tableau 10: Définition des niveaux de contrainte hydrique et des notes de stress selon Riou et Payan (2001) et Lebon et al. (2003) en fonction du potentiel hydrique de base (Y_{base}) et de la FTSW (fraction d'eau du sol utilisable par la plante).

Potentiel hydrique foliaire (Ψ_F)

Le potentiel hydrique foliaire est mesuré en cours de journée sur des feuilles de rameaux principaux (ou secondaires). Le microclimat lumineux et thermique de la feuille ainsi que l'hygrométrie du couvert végétal déterminent largement la valeur du Ψ_F de l'organe considéré. En cours de journée, le couvert végétal est ainsi composé de feuilles qui transpirent plus ou moins intensément selon le degré de régulation stomatique et leur environnement. Les feuilles ombragées présentent un Ψ_F supérieur de l'ordre de 1 à 2 bars à celui des feuilles bien ensoleillées en l'absence de contrainte hydrique (Schultz, 1989 ; Zufferey, 2000). La constitution d'un échantillon de feuilles représentatif et homogène vis à vis des conditions environnementales demeure souvent délicate pour cette raison.

Une diminution marquée de la conductance stomatique et de la photosynthèse des feuilles de vigne a été observée lorsque le Ψ_F devenait inférieur à -11 ou -15 bars chez différentes variétés de *Vitis vinifera* (Kriedemann et Smart, 1971 ; Liu *et al.*, 1978 ; Naor *et al.*, 1994 ; Van Zyl, 1987). Le cépage Chasselas semble un peu plus sensible en régulant ses échanges gazeux pour des Ψ_F inférieurs à -10 bars (Spring, 1997 ; Zufferey, 2000).

Potentiel tige (Ψ_T)

La mesure du Ψ_T est réalisée sur des feuilles ensachées (feuille plastique doublée d'une feuille d'aluminium) dont la transpiration est fortement réduite. Par conséquent, le potentiel hydrique de ces feuilles s'équilibre avec le potentiel hydrique du rameau (Ψ du xylème), appelé le potentiel tige (Begg et Turner, 1970).

En théorie, cette technique permet d'estimer la tension de sève qui existe dans les vaisseaux conducteurs du rameau en situation de transpiration de la plante entière. Selon Choné *et al.* (2001), cette application de la chambre à pression est un indicateur plus discriminant des contraintes hydriques modérées que le Ψ_{base} pour les sols à humidité hétérogène. Le Ψ_T permet de mettre en évidence également des déficits hydriques passagers qui surviennent après des épisodes pluvieux.

Les résultats de Choné (2001) ont montré que la régulation stomatique de la transpiration foliaire était observée pour des valeurs de $\Psi_{T\ MIN}$ comprises entre -3.5 et -5.5 bars. La diminution de la vitesse de croissance des rameaux est apparue avec des valeurs de Ψ_T établies entre -6.0 et -6.5 bars. Ces deux dernières valeurs peuvent être considérées comme le seuil d'apparition d'une contrainte hydrique modérée chez la vigne (Choné, 2001).

4.2.3 Suivis hydriques à la Côte

Evolution du potentiel hydrique de base

L'évolution du Ψ_{base} , mesurée durant les saisons 2001-2003, est présentée à la figure 5 en relation avec les principaux types de sols décrits à la Côte.

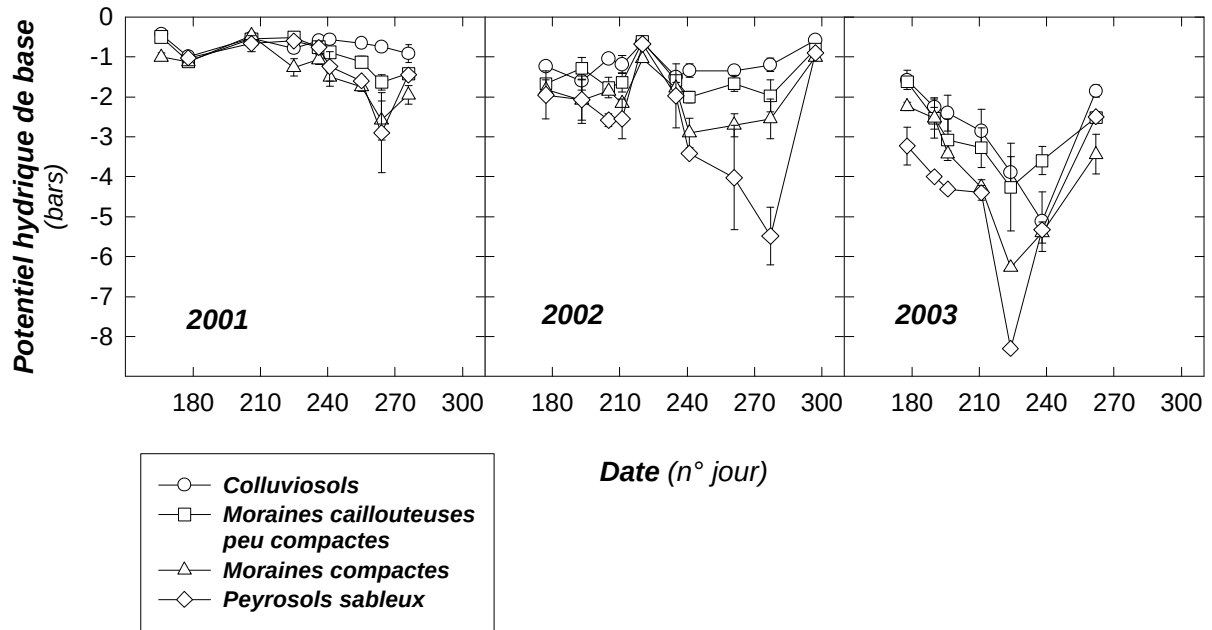


Fig. 5 : Evolution du potentiel hydrique de base (Ψ_{base}) au cours des saisons 2001-2003 sur les divers types de sols. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, La Côte (CH).

Au début des mois de juin 2001, 2002 et 2003, l'état hydrique des sols était considéré à la capacité au champ après les précipitations hivernales et printanières. En effet, durant la période s'étalant du mois de novembre à la fin du mois de mai, la pluviométrie cumulée atteignait 880 mm en 2001, 490 mm en 2002 et 570 mm en 2003 alors que la réserve utile maximale des sols était estimée à environ 300 mm.

Si la contrainte hydrique a été faible en 2001, elle s'est avérée un peu plus importante sur certains sites durant la saison 2002 en raison d'un déficit hydrique plus élevé. Les vignes situées sur des colluviosols à forte réserve en eau ont présenté de très faibles variations de leur état hydrique : elles ont été caractérisées par une absence de contrainte hydrique tout au long des saisons 2001-2002. Les vignes complantées sur

des moraines latérales, peu compactes et caillouteuses, ont montré des valeurs de Ψ_{base} très proches de celles des colluviosols. Par contre, situées sur des moraines de fond à compacité élevée ou sur des peyrosols sableux, les vignes ont affiché durant la maturation des raisins des contraintes qualifiées de légères à modérées en 2001 et 2002. L'enracinement superficiel, observé dans les moraines compactes de fond, et la teneur élevée en éléments grossiers des peyrosols expliquent en grande partie la faible capacité de réservoir en eau de ces sols ainsi que leur sensibilité au déficit et à la contrainte hydrique.

En 2003, la contrainte hydrique a été plus importante que les deux années précédentes en raison d'un déficit hydrique élevé durant la période estivale et des températures extrêmes, enregistrées en juin et en août. Les valeurs de potentiel hydrique n'ont cessé de décroître de la floraison (n° jour 160) jusqu'à la mi-août (n° jour 230) quels que soient les sites et les types de sol (fig. 5). Les vignes situées sur des colluviosols et des moraines peu compactes et caillouteuses ont affiché des contraintes modérées durant la période estivale (juillet – août) et faibles en fin de maturation des raisins. Certains sites, implantés sur des colluviosols à enracinement superficiel (présence d'hydromorphie passagère) ont présenté des stress hydriques importants à la fin du mois d'août. Complantées sur des moraines compactes de pente ou des peyrosols sableux à faible RU, les vignes ont souffert d'une contrainte hydrique élevée durant le mois d'août (sur certains sites dès la fin du mois de juin). Des défoliations naturelles (chute de feuilles) ont pu être observées dans la zone basale du feuillage à cette même époque. Durant la maturation du raisin, la contrainte s'est avérée modérée sur ces mêmes sites.

Ces diverses constations attestent que la réserve en eau (RU) des différents types de sol joue un rôle prépondérant sur l'état hydrique des plantes en relation avec le déficit hydrique cumulé en cours de saison (Zufferey *et al.*, 2002). Le suivi du Ψ_{base} des différentes micro-parcelles, regroupées selon leur réservoir en eau (RU), est proposé à la figure 6.

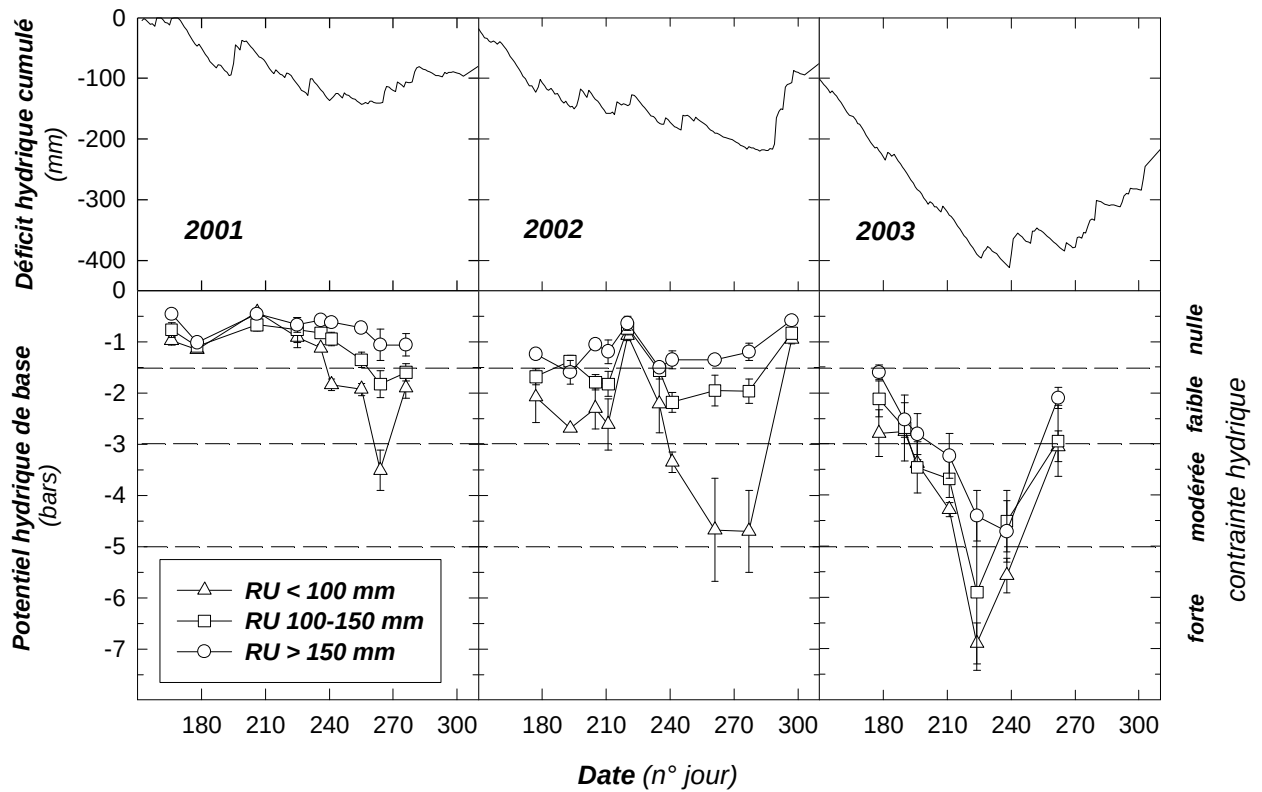


Fig. 6 : Evolution du déficit hydrique potentiel (précipitations-ETP) et du potentiel hydrique de base (Y_{base}) en relation avec la réserve utile en eau (RU) des sols. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2001-2003.

Il ressort de cette étude que les vignes à forte RU ($RU > 150 \text{ mm}$) n'ont présenté aucune contrainte hydrique durant les saisons 2001-2002 quel que fut le déficit hydrique cumulé pendant l'année. Les parcelles à faible RU ($RU < 100 \text{ mm}$) ont par contre affiché en fin de cycle végétatif des contraintes hydriques modérées, principalement en 2002, saison durant laquelle le déficit hydrique cumulé atteignait 220 mm à la fin de septembre. Si la réserve en eau des sols est limitée, l'évolution du Y_{base} est largement dépendante du déficit hydrique cumulé en cours de saison, c'est-à-dire du cumul des précipitations estivales et de l'évapotranspiration de la végétation et du sol. Les vignes dont la réserve en eau des sols se situe entre 100 et 150 mm ont montré une situation intermédiaire, tout en affichant une contrainte hydrique faible durant les périodes de végétation 2001 et 2002.

La saison 2003 a été marquée par un déficit hydrique cumulé très élevé durant la période estivale, atteignant 400 mm à la fin d'août (fig. 6). Les vignes à forte RU

(>150 mm) ont présenté un niveau modéré de contrainte hydrique au cours des mois de juillet et d'août. Les sites dont la RU se situe entre 100 et 150 mm ont montré une sensibilité un peu plus grande au déficit hydrique que les vignes à grand réservoir. La contrainte fut importante à la mi-août puis modérée durant la maturation du raisin. Enfin, les vignes à faibles réservoir en eau ($RU < 100\text{mm}$) ont présenté des niveaux de contrainte modérée très tôt dans la saison (début juin) et importante pendant les mois de juillet et août. La chute des feuilles, dans la zone des grappes a été manifeste sur les sites à régulation hydrique très restreinte.

De manière générale, on observe une relation étroite entre la RU des différentes micro-parcelles et l'état hydrique moyen des vignes enregistré durant la saison, qui résulte des mesures du potentiel hydrique de base effectuées chaque semaine de la floraison à la vendange (fig. 7)

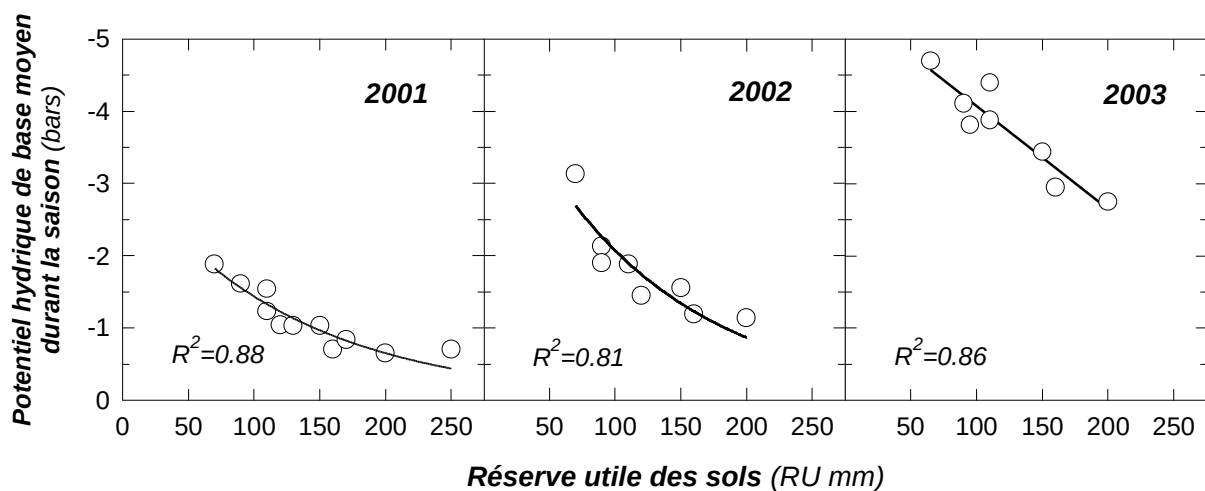


Fig. 7 : Relation entre la réserve en eau des sols (RU) et la valeur du potentiel hydrique de base moyen, mesuré durant la saison. Chasselas, La Côte (CH), 2001-2003.

Les vignes à RU élevée ont présenté des valeurs de Ψ_{base} moyen durant la saison proches de la turgescence en 2001 et 2002 ($\Psi_{\text{base}} > -1,0$ bar). Lorsque la RU des sols est limitée, les valeurs de Ψ_{base} moyen ont été plus négatives et ont indiqué une contrainte hydrique croissante. Selon les années, le déficit hydrique cumulé durant la saison a influencé plus ou moins fortement la relation entre la RU et le Ψ_{base} moyen (pente de la courbe et niveau du stress hydrique). La pente de la relation RU – Ψ_{base} moyen a été plus faible en 2001 qu'en 2002 en raison des précipitations fréquentes et abondantes, observées en 2001. Le déficit hydrique important, enregistré en 2003, a influé

fortement sur le niveau de contrainte subie par la vigne. En moyenne durant la période de végétation, les sites à RU élevée ont affiché des contraintes faibles à modérées. Les sites à RU plus limitée ($RU < 150$ mm) ont entraîné des contraintes modérées chez la vigne, calculées sur l'ensemble de la période de végétation.

En tenant compte du déficit hydrique cumulé à un moment donné durant la saison, on peut confirmer l'importance de ce paramètre dans la relation qui existe entre la RU des sols et le ψ_{base} des vignes (fig. 8).

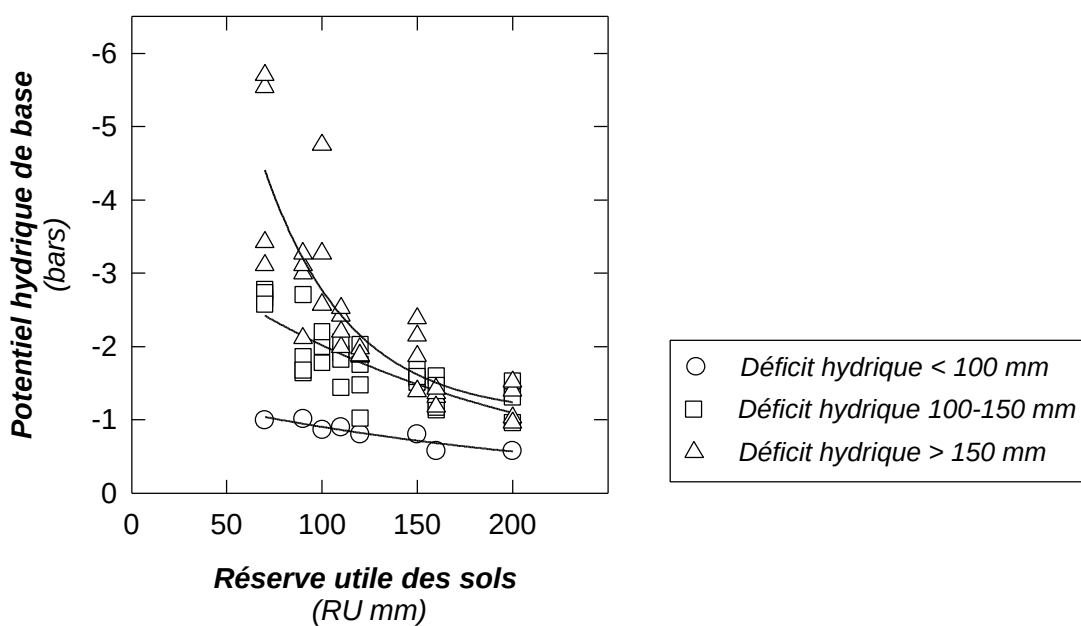


Fig. 8 : Relation entre la réserve en eau des sols (RU) et le potentiel hydrique de base en tenant compte du déficit hydrique du moment. Chasselas, La Côte (CH), 2002.

Si le déficit hydrique est limité (inférieur à 100 mm), la réserve utile des sols n'influe que faiblement sur les valeurs de ψ_{base} mesurées à un instant donné durant la période de végétation. Par contre, si le déficit hydrique s'accroît en cours de saison, la capacité de réservoir en eau des sols et leur rétention en eau jouent un rôle déterminant sur l'état hydrique de la vigne (pour autant qu'il n'existe aucune influence due à un écoulement d'eau latéral ou à une nappe perchée). Les parcelles à RU limitées ($RU < 100$ mm) ont manifesté une contrainte hydrique modérée à forte lorsque le déficit hydrique s'élevait au-delà de 150 mm dans notre étude.

L'état hydrique de la plante est de façon générale sous la dépendance de l'état hydrique des sols et des possibilités d'extraction de l'eau par les racines, des résistances hydrauliques développées sur l'ensemble du transfert d'eau des racines jusqu'aux feuilles et de la demande évaporatoire de l'atmosphère. Ainsi, des vignes implantées sur deux types de sols dont la réserve en eau est équivalente peuvent présenter un état hydrique distinct du point de vue du végétal en raison d'une réhumectation ou au contraire d'une dessiccation différente des sols dans le temps qui provient de la spécificité de leur texture, de leur structure ainsi que leur colonisation racinaire (entre autres). Les résistances internes du sol à l'écoulement ou à l'absorption racinaire de l'eau ainsi que l'hétérogénéité spatiale de l'humidité des sols peuvent entraîner de surcroît des comportements hydriques fort divers dans les sols et par voie de conséquence sur l'état hydrique de la vigne. L'extrême complexité du régime hydrique des sols est encore accrue si l'on considère l'efficacité d'infiltration des eaux de pluie ou au contraire l'importance du ruissellement de surface en cas de précipitations. A cela, il convient d'ajouter, dans la compréhension de l'état hydrique de la plante, les nombreux paramètres qui influent sur l'évapotranspiration du sol et de la plante (surface foliaire, architecture de la canopée, résistances internes de la plante, couverture du sol, demande évaporatoire de l'atmosphère...).

La mesure du Ψ_{base} intègre de façon globale ces différents aspects liés au continuum sol-plante-atmosphère. De ce fait, le Ψ_{base} exprime le régime hydrique de la plante sous certaines conditions. En effet, les sols de vigne représentent, dans la majorité des cas, des couches de sol à humidité hétérogène. Le Ψ_{base} a tendance à s'équilibrer avec l'horizon le plus humide exploré par le système racinaire, selon les végétaux étudiés (Archer et Améglio, 1995 ; Bréda *et al.*, 1995 ; Améglio et Archer, 1996 ; Améglio *et al.*, 1999). Ainsi, le Ψ_{base} ne s'abaisse significativement que si les zones les plus humides du sol s'assèchent. Les valeurs de Ψ_{base} peuvent aussi traduire dans certaines situations une réhumectation partielle des sols à la suite de faibles précipitations. La transpiration de l'ensemble du feuillage peut cependant excéder l'absorption des racines pendant la ou les journées suivantes, particulièrement durant la période encadrant le midi solaire (flux d'eau non « conservatif » dans le cas d'une déshydratation, Cruiziat, 1997 ; Tardieu *et al.*, 1995). Un déficit hydrique de quelques heures peut alors survenir. Une approche complémentaire s'avère nécessaire (mesure

du potentiel du xylème des rameaux, Ψ_T) afin d'étudier la contrainte hydrique diurne momentanée (Choné *et al.*, 2001).

Exemples d'itinéraires hydriques

L'itinéraire hydrique des différentes parcelles de vigne au cours des saisons 2001-2003 est présenté dans le tableau 11. Cet itinéraire, défini par un quintuplé, permet de distinguer les parcelles à plusieurs niveaux : discrimination par l'intensité de la contrainte, discrimination par la période d'apparition de la contrainte, et caractérisation des millésimes sur un plan de l'alimentation en eau (cf. tableau 10).

Types de sols	Parcelles	« Itinéraire hydrique »		
		Saison 2001	Saison 2002	Saison 2003
Colluviosols de bas de pente	Begnins 06	[0-0-0-0-0]	[0-0-0-0-0]	[?-1-2-2-1]
	Begnins 07	[0-0-0-0-0]	[0-0-0-1-0]	[?-1-1-1-2]
	Bursinel 02	[0-0-0-0-0]	-	-
Moraines caillouteuses peu compactes	Begnins 01	[0-0-0-0-0]	[0-1-1-1-1]	[?-1-2-2-2]
	Vinzel 03	[0-0-0-0-1]	[0-1-1-0-1]	[?-1-1-1-2]
	Vinzel 01	[0-0-0-0-1]	-	-
Moraines compactes de pente	Luins 01	[0-0-0-1-1]	[0-1-1-1-1]	[?-1-2-3-2]
	Luins 03	[0-0-0-0-1]	[0-1-1-1-2]	[?-1-2-3-2]
	Begnins 03	[0-0-0-0-1]	-	-
	Vinzel 02	-	-	[?-1-2-3-2]
Peyrosols sableux	Dully 02	[0-0-0-0-1]	[0-0-1-0-2]	Grêle
	Luins 02	[0-0-0-0-2]	[0-1-2-1-3]	[?-2-?-3-?]
	Bursins 02	[0-0-0-0-1]	-	[?-1-2-3-2]

Tableau 11 : Définition des « itinéraires hydriques » pour chaque parcelle à l'étude en relation avec les types de sols. Chasselas, La Côte (CH), 2001-2002.

La saison 2001 a été caractérisée par une absence de contrainte hydrique (quasi générale) sur l'ensemble du réseau jusqu'à la véraison. Durant la période de maturation du raisin, le stress hydrique s'est avéré faible sur la plupart des parcelles, à l'exception des sites implantés sur des colluviosols de bas de pente à RU élevée où l'abondance hydrique a prévalu jusqu'aux vendanges.

En 2002, les vignes situées sur des colluviosols ont affiché à nouveau une absence de contrainte hydrique tout au long de la saison. Le déficit a été faible depuis la floraison jusqu'à la récolte dans les sites implantés sur des moraines caillouteuses et peu compactes ainsi que sur les moraines compactes de pente. Seule la parcelle Luins 03 a présenté une contrainte modérée durant la maturation. Enfin, les parcelles complantées sur des peyrosols sableux et drainants ont montré pendant la maturation du raisin une contrainte hydrique modérée à forte correspondant à des notes de stress allant de 2 à 3.

Le millésime 2003 a été caractérisé par un niveau faible de contrainte jusqu'à la floraison sur l'ensemble des sites. Par la suite, la contrainte s'est accentuée pour devenir modérée chez les vignes implantés sur des moraines compactes de pente et des peyrosols sableux. La contrainte est demeurée faible à modérée, selon les sites, dans les colluviosols et les moraines caillouteuses et peu compactes. La période de véraison et de maturation des raisins, s'est déroulée sous un stress hydrique modéré à fort, dans les parcelles à faible réservoir en eau (moraines de pente, peyrosols sableux). Partout ailleurs, la contrainte fut modérée.

Divers auteurs (Payan et Salaçon, 2002) estiment qu'un stress hydrique correspondant à la note maximale (note 3) doit être recherché au cours de la maturation et qu'il faut concourir à l'obtention de notes « sévères » dans la limite des possibilités offertes par les conditions du millésime. Ces auteurs insistent sur la nécessité d'identifier un *itinéraire hydrique optimal*, concourant à l'obtention d'une vendange de qualité pour un niveau de production déterminé.

Mesures du Y_{base} à grande échelle

Afin d'élargir le réseau d'observation du régime hydrique de la vigne, un essai de mesure du Ψ_{base} réalisé sur 100 ha a été entrepris le 29 août 2002 sur une cinquantaine de parcelles de Chasselas. Il s'agissait de connaître la variabilité de la réponse hydrique du végétal sur des sites complémentaires et externes au réseau de parcelles de référence. Les résultats des valeurs de Ψ_{base} ont été reportés sur une carte des réserves potentielles (ou estimées) en eau, établie à la suite de l'étude pédologique (fig. 9).

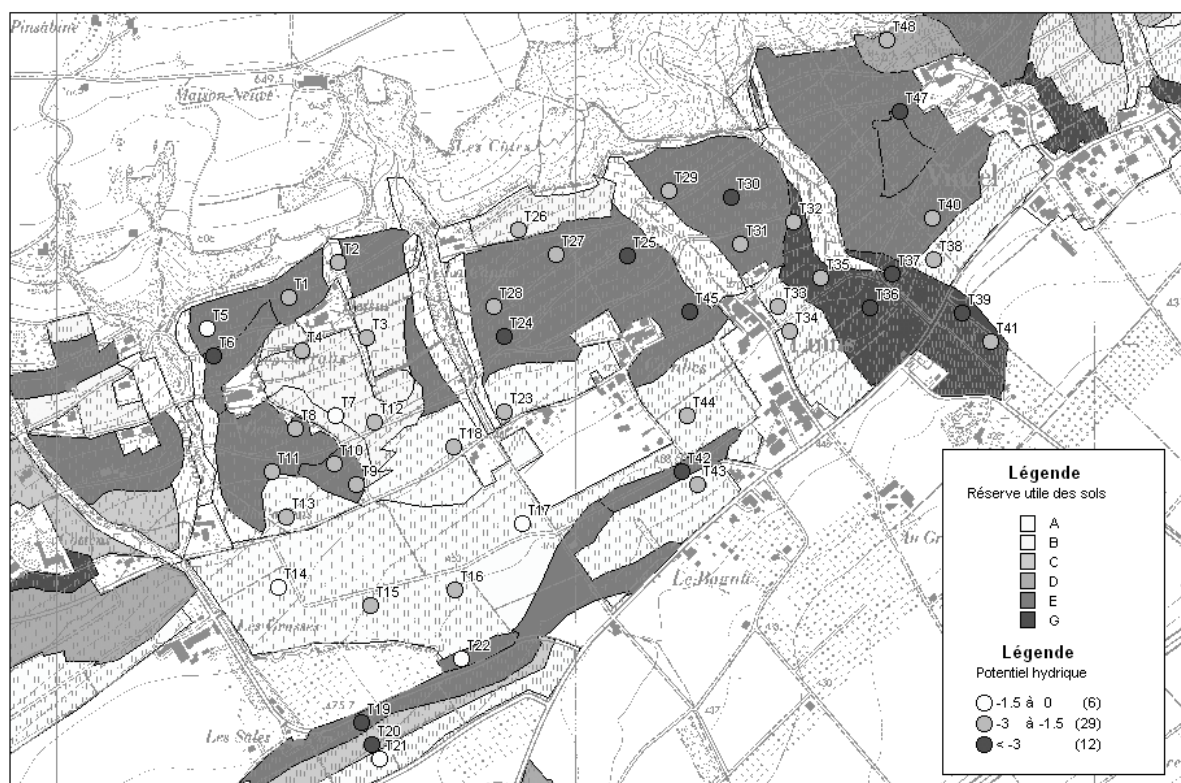


Fig. 9 : Mesures du potentiel hydrique de base (Ψ_{base} , bars) réalisées à grande échelle (100 ha) sur des sols à différentes réserves en eau (RU). A RU > 250mm, B 200-250 mm, C 160-200 mm, D 120-160 mm, E 80-120 mm, G < 60 mm. Chasselas, La Côte (CH), 29.08.2002.
 ⌚ Données propriété de l'Etat de vaud.

Les premiers résultats ont montré qu'il existait une bonne relation entre l'estimation de la RU d'une zone de vignoble et l'état hydrique des vignes situées sur cette même zone à un moment donné durant la saison. Les entités pédologiques à faible RU ont affiché des valeurs plus négatives de Ψ_{base} (contrainte modérée) que les entités à fortes RU (absence de contrainte) en présence d'un déficit hydrique qui s'élevait à 175 mm. Toutefois, quelques anomalies de comportement hydrique ont été relevées et sont imputables en partie à des écoulements d'eau latéraux (fréquents sur le secteur) et à la difficulté d'établir des cartes fidèles de RU à grande échelle. Des essais complémentaires s'avèrent donc nécessaires pour valider cette approche et notamment lors de déficits hydriques importants.

Mesures du potentiel tige (Ψ_T)

Le Ψ_T a été mesuré en milieu de journée quand la demande évaporatoire était maximale ($\Psi_{T \text{ MIN}}$) au cours de différentes journées pendant les saisons 2002 et 2003 en comparant plusieurs sites dont la RU est distincte (tableaux 12 et 13). Des mesures conjointes du Ψ des feuilles (Ψ_F) et de Ψ_{base} ont également été effectuées.

Parcelles (RU)	$Y_{TIGES \text{ MIN}}$ (bars)			
	floraison 26 juin	petit pois (baie) 11 juillet	fermeture grappe 23 juillet	véraison 15 août
Luins 02 (RU 70 mm)	-6.9 ± 0.3	-8.4 ± 0.7	-4.5 ± 0.3	-4.4 ± 0.2
Luins 03 (RU 100 mm)	-4.3 ± 0.2	-4.9 ± 0.1	-4.5 ± 0.2	-
Luins 01 (RU 110 mm)	-5.0 ± 0.2	-4.4 ± 0.2	-3.9 ± 0.1	-4.3 ± 0.2
Vinzel 03 (RU 120 mm)	-4.4 ± 0.2	-4.4 ± 0.1	-4.2 ± 0.2	-3.8 ± 0.1
Begnins 01 (RU 150 mm)	-4.1 ± 0.1	-4.1 ± 0.2	-4.0 ± 0.2	-
Begnins 06 (RU 160 mm)	-4.1 ± 0.2	-3.9 ± 0.2	-3.4 ± 0.2	-3.4 ± 0.1

Tableau 12 : Mesures du potentiel tige minimal ($Y_{TIGES \text{ MIN}}$), réalisées en cours de saison sur divers sites dont la RU est différente. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2002.

De manière générale, la parcelle nommée Luins 02, un peyrosol sableux et drainant dont la RU est la plus faible de tous les sites à l'étude, s'est démarquée par des valeurs de $\Psi_{T \text{ MIN}}$ plus négatives, notamment les 26 juin et 11 juillet 2002. Les autres sites dont la RU est plus importante (> 100 mm) ont présenté des valeurs de $\Psi_{T \text{ MIN}}$ assez semblables entre eux, à l'exception des parcelles à forte RU (> 150 mm) qui ont affiché des valeurs systématiquement moins négatives sur l'ensemble du réseau. Les valeurs de $\Psi_{T \text{ MIN}}$ se sont révélées être plus négatives sur les moraines de fond et

compactes de pente (Luins 01,03) ainsi que sur le peyrosol sableux (Luins 02) que sur les moraines latérales, caillouteuses et peu compactes (Begnins 01, Vinzel 03) ou le colluviosol (Begnins 06). Ces observations confirment les résultats obtenus en 2001 sur un dispositif identique de parcelles (résultats non présentés).

Les mesures de $\Psi_{T\ MIN}$, effectuées en 2003, ont confirmé l'émergence progressive au cours de la saison d'un stress hydrique élevé chez la vigne durant la période la plus chaude de la journée (tableau 13). Des symptômes de sécheresse (décoloration des feuilles de la base, chute de feuilles) ont été observés sur les sites dont les $\Psi_{T\ MIN}$ indiquaient des valeurs inférieures à -11 bars. Les températures extrêmes enregistrées durant le mois d'août, ont de surcroît accentué la demande évaporatoire en milieu de journée : les valeurs très négatives du $\Psi_{T\ MIN}$ reflètent la double contrainte thermique et hydrique. L'arrêt de la croissance végétative a été également un signe tangible de régulation physiologique, consécutif à la contrainte, dès le mois de juillet. Les sites implantés sur des moraines compactes de pente et des peyrosols sableux à faible RU (Vinzel 02, Luins 01 et 03, Bursins 02) ont manifesté les valeurs de $\Psi_{T\ MIN}$ les plus négatives.

Parcelles (RU)	$Y_{TIGE\ MIN}$ (bars)		
	petit pois (baie) 8 juillet	véraison 29 juillet	maturation 13 août
Vinzel 02 (RU 90 mm)	-	-11.8 ± 0.2	-11.9 ± 0.4
Luins 03 (RU 100 mm)	-6.8 ± 0.5	-8.8 ± 0.3	-11.8 ± 0.3
Luins 01 (RU 110 mm)	-5.9 ± 0.2	-	-13.3 ± 0.4
Bursins 02 (RU 120 mm)	-	-13.5 ± 0.5	-14.9 ± 0.3
Vinzel 03 (RU 120 mm)	-4.3 ± 0.2	-6.1 ± 0.4	-10.2 ± 0.3
Begnins 01 (RU 150 mm)	-6.1 ± 0.2	-10.1 ± 0.2	-12.6 ± 0.3
Begnins 06 (RU 160 mm)	-5.7 ± 0.3	-9.0 ± 0.2	-11.8 ± 0.3

Tableau 13 :
Mesures du $Y_{TIGE\ MIN}$, réalisées en cours de saison sur divers sites dont la RU est différente. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2003.

Les valeurs de $\Psi_{T \text{ MIN}}$ comprises entre -4 et -5 bars permettent d'affirmer que les vignes ne souffraient d'aucune restriction en eau. Selon Choné (2001), la régulation stomatique de la transpiration foliaire s'effectuerait pour des niveaux de $\Psi_{T \text{ MIN}}$ compris entre -3.5 et -5.5 bars. Nos mesures de transpiration des feuilles, effectuées sur des vignes de Chasselas dont le Ψ_T s'établissait entre -4 et -5 bars, n'ont pas mis en évidence de régulation stomatique marquée sur les échanges gazeux. Par contre, lorsque les valeurs de Ψ_T étaient inférieures à -6 bars, la conductance stomatique tendait à diminuer, provoquant ainsi l'affaiblissement progressif des échanges gazeux. Les premiers signes de défoliation sont apparus avec des valeurs mesurées de $\Psi_{T \text{ MIN}}$, inférieures à -11 bars. La mesure des échanges gazeux (photosynthèse et transpiration foliaires), réalisées sur des feuilles adultes et ensoleillées (non ensachées), a montré que les stomates étaient quasiment fermés, annihilant la diffusion du CO_2 et de l'eau à travers les ouvertures stomatiques dans des conditions de contrainte hydrique forte ($\Psi_{\text{base}} < -5$ bars et $\Psi_{T \text{ MIN}} < -11$ bars, résultats non présentés).

Globalement, cette technique de mesure (Ψ_T) permet de mettre en évidence des comportements hydriques variés en cours de journée sur les sites de notre étude dont la RU et les possibilités d'extraction racinaire de l'eau sont différentes pendant la période la plus chaude du jour. Le $\Psi_{T \text{ MIN}}$ a reflété fidèlement l'évolution du Ψ_{base} observée dans les terroirs viticoles. La mesure du Ψ_T paraît plus sensible pour indiquer des états hydriques variés sur les terroirs que le Ψ_{base} , notamment le 23 juillet et le 15 août 2002, journées pour lesquelles les valeurs du Ψ_{base} étaient identiques sur l'ensemble des sites. Des résultats similaires avaient été obtenus en 2001 dans notre étude (Zufferey *et al.*, 2002). Lorsque la contrainte devient modérée à forte, la mesure du Ψ_T demeure appropriée pour évaluer des comportements différents entre sites. Le Ψ_T confirme bien souvent dans ce cas les mesures du Ψ_{base} .

Ces mesures, réalisées en l'absence de contrainte hydrique ou à des faibles niveaux de stress, montrent que le $\Psi_{T \text{ MIN}}$ manifeste de manière plus fine et plus prompte un début de déficit hydrique ou des états hydriques différents de la plante que le Ψ_{base} . Ces résultats confirment les expériences réalisées par Choné *et al.* (2000, 2001) qui relèvent que le $\Psi_{T \text{ MIN}}$ est un indicateur plus précis que le Ψ_{base} pour étudier l'émergence de déficits hydriques ou la persistance d'une contrainte après des

précipitations. Le Ψ_T renseigne sur la capacité de la plante à entraîner l'eau du sol à l'atmosphère. Il a été utilisé avec succès comme indicateur de déficit hydrique sur des vergers de pêchers et de pruniers (Garnier et Berger, 1987 ; Mac Cutchan et Schackel, 1992). Sur vigne, des mesures de Ψ_T ont été mentionnées par Liu *et al.*, (1978), Greenspan *et al.*, (1996), Naor (1998), Schultz et Matthews (1993) et Choné (2001).

Il ne faut cependant pas perdre de vue que le Ψ_T est aussi sous la dépendance des conditions atmosphériques (rayonnement, hygrométrie et température de l'air). Par conséquent, le Ψ_T devrait être étalonné sur le Ψ_{base} afin d'apprécier globalement l'état hydrique de la plante. Nos premiers résultats indiquent une corrélation assez étroite entre le $\Psi_{T\ MIN}$ et le Ψ_{base} qui demandent à être confirmés ces prochaines années, notamment avec des niveaux divers de déficit de pression de vapeur de l'air (VPD) ou du Ψ de l'atmosphère.

Suivi journalier du Ψ_T

Des suivis journaliers du Ψ_T ont été réalisés dans notre étude pour connaître les variations du Ψ_T pendant la période diurne. Les mesures du Ψ_T , effectuées sur 4 sites dont la RU est différente (fig. 10), ont montré que les valeurs de Ψ_T diminuaient en cours de journée pour atteindre des valeurs minimales (les plus négatives) en cours d'après-midi quand la demande évaporatoire était maximale (température et VPD les plus élevés). Malgré une contrainte hydrique faible et une demande climatique modérée (déficit de saturation de l'air < 15 mbars) observée le 15 août 2002, les sites à RU limitée ont indiqué des valeurs plus négatives du Ψ_T que les sites à RU importante.

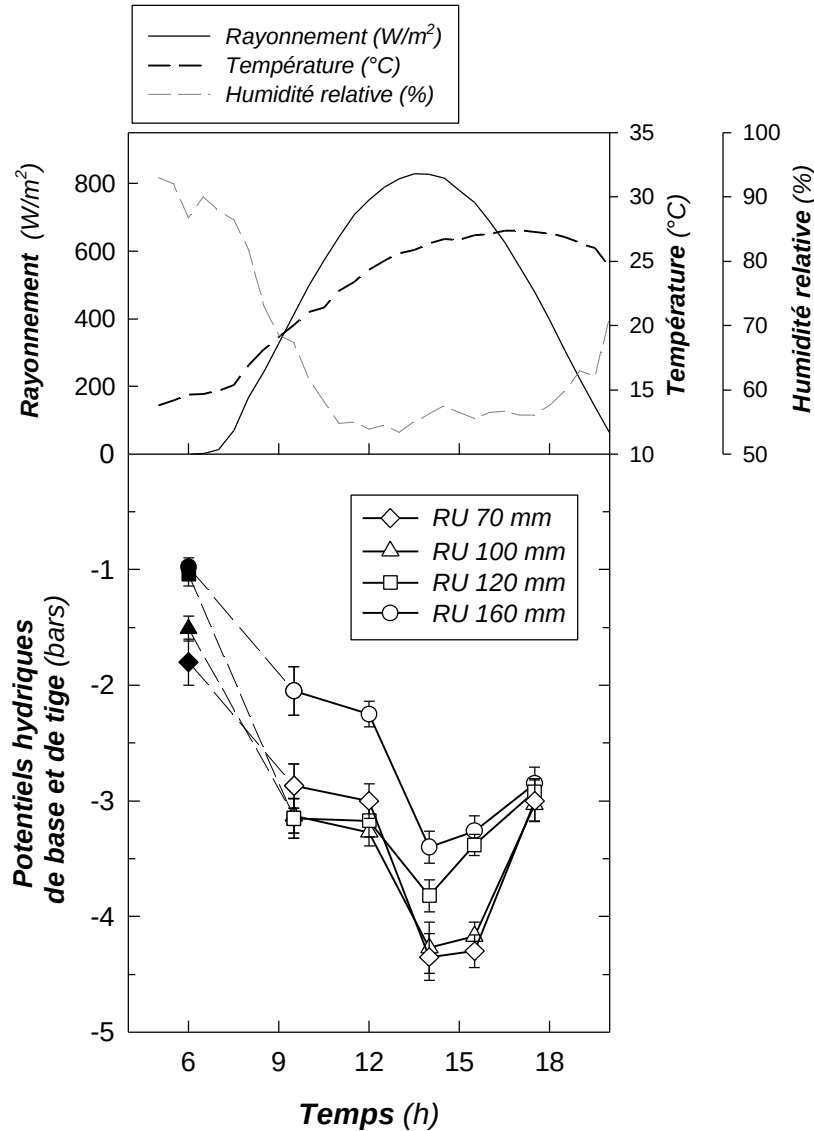


Fig. 10 : Evolution journalière (15.08.2002) des conditions climatiques et du Y_T sur 4 sites dont la RU est différente. Barres verticales : erreur standard. Symboles en noir : Y_{base} . Symboles en blanc : Y_T . Chasselas, La Côte (CH).

L'évolution du Ψ_T semble bien refléter la tension de sève qui existe dans les vaisseaux conducteurs des rameaux en situation de transpiration de la plante entière. La tension de sève dans les rameaux tend à s'équilibrer avec les possibilités d'extraction racinaire de l'eau (RU, résistance hydraulique du sol et de l'interface sol-racine) et la transpiration foliaire (régulation stomatique sous influence environnementale, hydraulique et interne) en cours de journée. La tension de sève mesurée s'est avérée être modeste ce jour-là. Toutefois, la résistance hydraulique entre les racines et les feuilles peut s'accroître dans certains cas lorsque le sol se dessèche et entraîner une augmentation de la différence de potentiel entre racines et feuilles.

Par ailleurs, l'architecture hydraulique de la vigne qui peut être appréciée par le rapport entre la section de bois conducteur dans la tige et la surface foliaire distale à la tige (valeur de Huber, Tyree et Ewens, 1991) ainsi que le potentiel d'exposition de la végétation du rameau à l'éclairement direct influent sur les valeurs de Ψ_T mesurées sur des rameaux distincts d'une même souche. Des variations de mesure du Ψ_T de l'ordre de 0.5 à 1.0 bar entre rameaux d'un même cep ont été ainsi observées dans nos essais. Des observations identiques ont été relevées par Choné (2001).

Des gradients de potentiel hydrique ($\Delta\Psi$) ont été mesurés entre le rameau (Ψ_T) et les feuilles (Ψ_F) dans notre étude à différentes périodes de la saison au moment le plus chaud de la journée (résultats non présentés). De manière générale, les $\Delta\Psi$ estimés sur les divers sites ont été proches et ont suggéré que les flux de transpiration étaient élevés et la résistance hydraulique dans la plante faible à modérée.

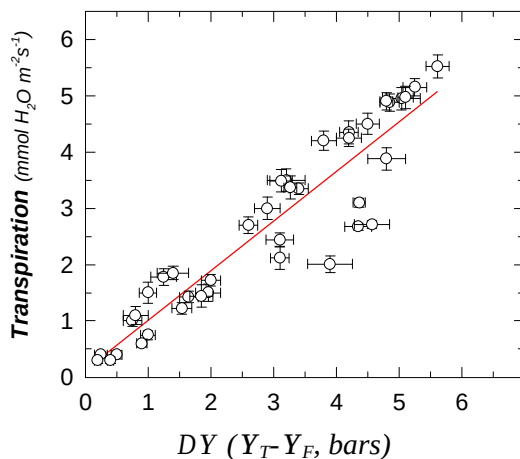


Fig. 11 : Relation entre le gradient de potentiel (DY) et la transpiration foliaire dans les divers sites des terroirs viticoles en milieu de journée. Barres verticales et horizontales : erreur standard. Chasselas, La Côte et Lavaux (CH), 2001.

Une corrélation a pu être mise en évidence entre le $\Delta\Psi$ et la transpiration foliaire, mesurée à midi solaire, sur les principaux sites à l'étude (fig. 11). Ces résultats confirment les observations faites par Choné *et al.* (2001). Ces auteurs indiquent également une relation entre le Ψ_T et la transpiration des feuilles qui a été partiellement vérifiée dans nos essais.

L'ensemble de ces observations tend à montrer que le Ψ_T est un bon indicateur de l'état hydrique global de la plante et qu'il semble bien refléter la conductivité hydraulique du tronc et des rameaux chez la vigne.

4.2.4 Suivis hydriques à Lavaux

Evolution du potentiel hydrique de base (Ψ_{base})

A Lavaux, le suivi de l'alimentation hydrique de la vigne au moyen du Ψ_{base} montre que la contrainte hydrique a été faible durant les deux saisons de mesure, à l'exception d'une période qui se situait à la fin d'août 2001 (fig. 12).

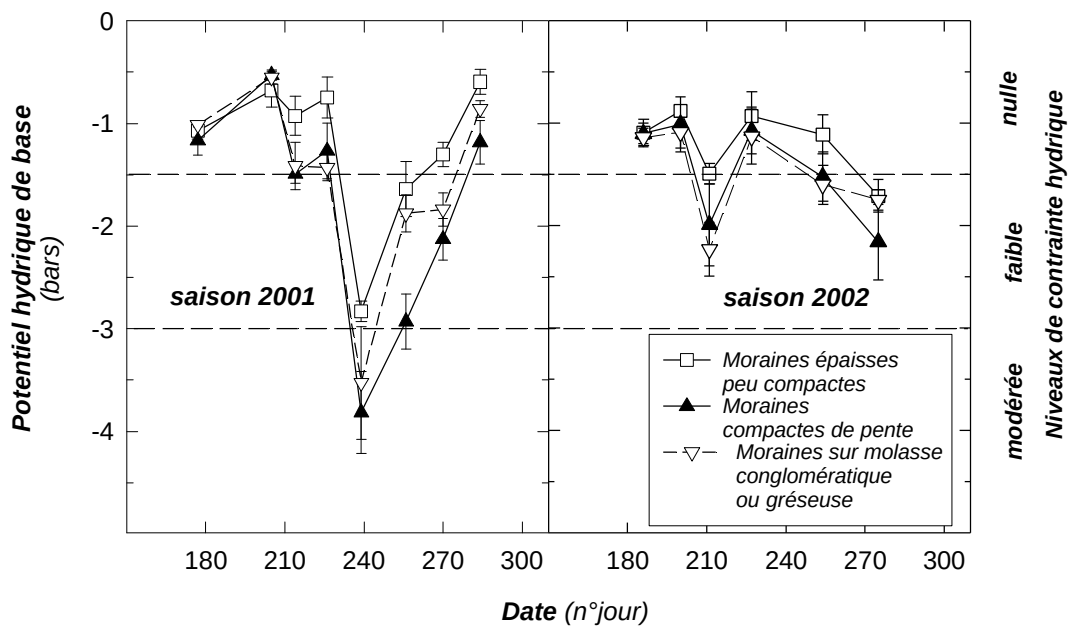


Fig. 12 : Evolution du potentiel hydrique de base (Ψ_{base}) au cours des saisons 2001-2002 sur les divers types de sols. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, Lavaux (CH).

A cette époque de l'année 2001 (n° jour 240), la contrainte hydrique pouvait être qualifiée de modérée ($\Psi_{\text{base}} < -3.0$ bars) chez les vignes établies sur des moraines compactes de pente et des moraines posées sur la molasse conglomératique ou gréseuse à faible RU et enracinement superficiel. La contrainte est demeurée faible par contre dans les moraines caillouteuses et peu compactes à réservoir important durant les saisons 2001 et 2002. L'évolution du Ψ_{base} a assez bien reflété celle du déficit hydrique potentiel (fig.13), qui est resté limité durant les deux années à des valeurs inférieures à 100 mm. Les parcelles de vigne situées sur des moraines établies sur molasse conglomératique et gréseuse ont présenté des valeurs de Ψ_{base} plus disparates que les autres types de sols. La raison de ce comportement particulier proviendrait en partie de la possibilité plus ou moins grande pour les racines de s'infiltrer entre les fractures du grès et de prélever l'eau et les éléments nutritifs en profondeur.

Regroupées selon les potentialités de réservoir en eau des sols, les différents sites à l'étude ont affiché des comportements de régime hydrique assez distincts au cours des saisons 2001-2002 (fig. 13).

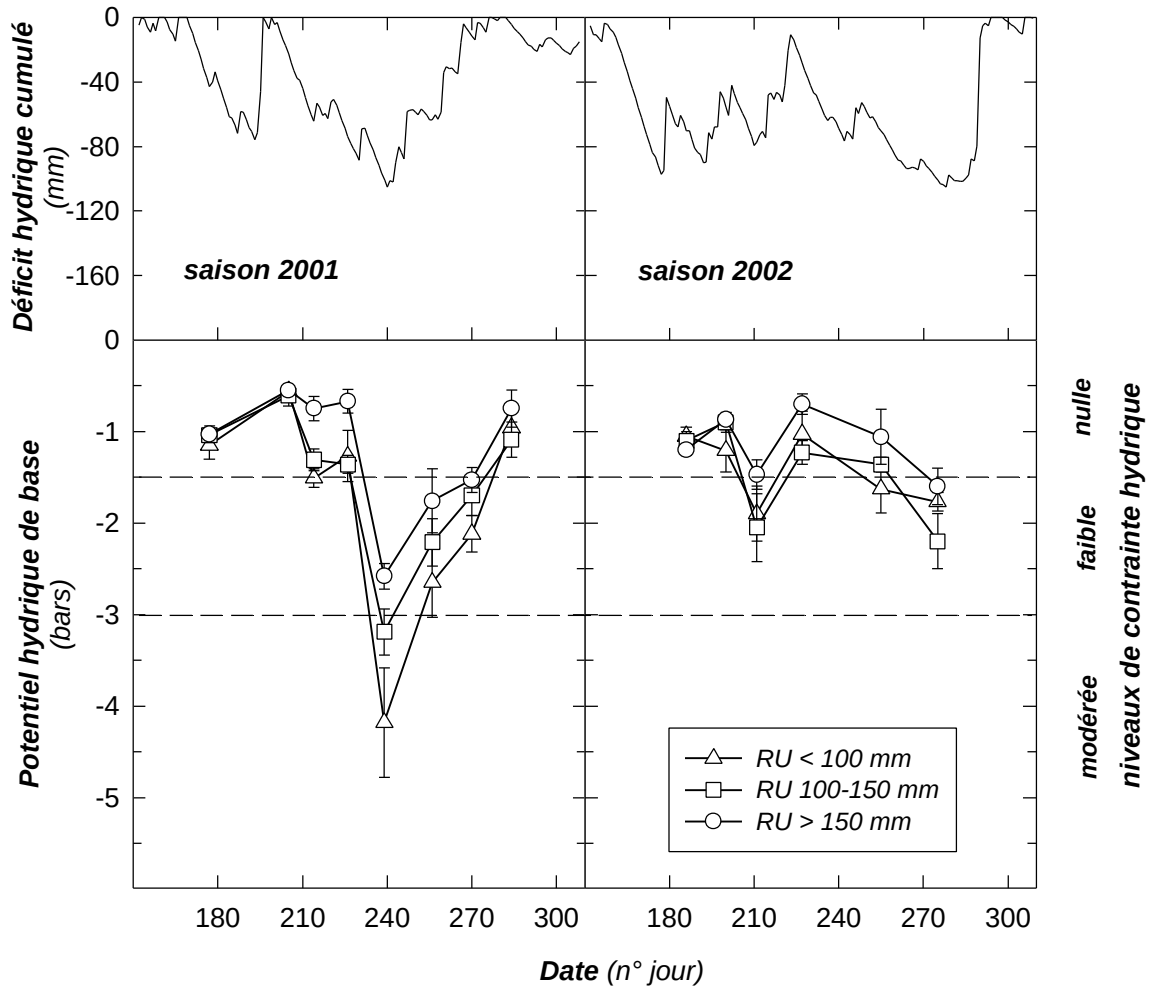


Fig. 13 : Evolution du déficit hydrique potentiel (précipitations-ETP) et du potentiel hydrique de base (Y_{base}) en relation avec la réserve utile en eau (RU) des sols. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, Lavaux (CH), 2001-2002.

Malgré l'absence de contrainte hydrique, les sites dont la RU est la plus faible ont exprimé des valeurs de Ψ_{base} les plus négatives principalement en 2001. Durant la saison 2002, les résultats ont été moins nets en raison de l'absence de déficit hydrique marqué durant l'été. Néanmoins, les parcelles à forte RU ($RU > 150 \text{ mm}$) ont affiché une absence de contrainte hydrique durant les deux saisons quel que fut le déficit hydrique cumulé pendant l'année. Les vignes dont la RU des sols se situe entre 100 et 150 mm ont montré une situation intermédiaire, tout en ayant subi aucune restriction en eau durant la période de végétation.

Le potentiel hydrique de base moyen, mesuré durant la saison, s'est avéré être en relation avec la RU des sites (fig. 14) bien que le déficit hydrique, observé en 2001 et 2002 à Lavaux, ait été faible (inférieur à 100 mm).

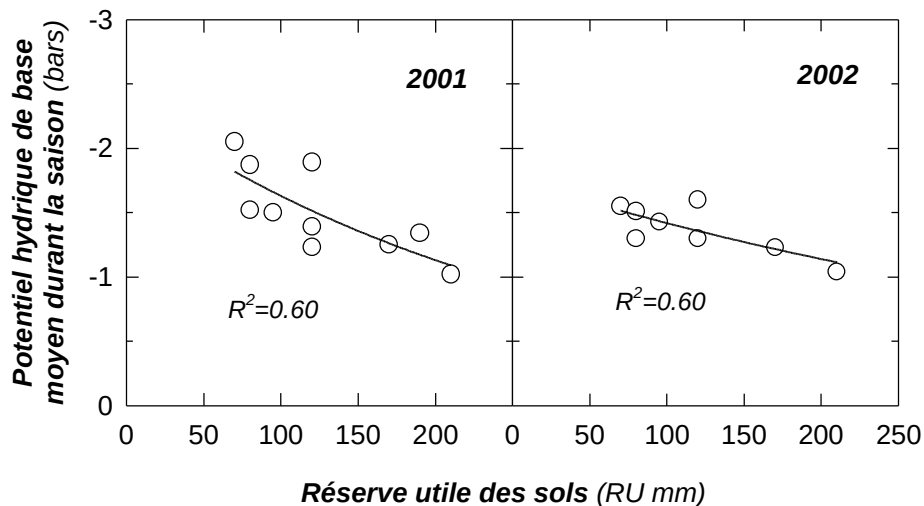


Fig. 14 : Relation entre la réserve en eau des sols (RU) et la valeur du potentiel hydrique de base moyen, mesuré durant la saison. Chasselas, Lavaux (CH) ; 2001-2002.

Les sites dont la RU est limitée ont montré des valeurs de Ψ_{base} moyen plus négatives que les sites à RU élevée. La difficulté d'estimer la réserve en eau des sols dans une zone viticole très remaniée par l'homme et l'absence de contrainte climatique, enregistrée durant ces deux saisons, permettent d'expliquer en partie que la corrélation établie entre la RU des sols et le Ψ_{base} moyen ait été plus modeste à Lavaux que celle observée à la Côte.

Itinéraires hydriques

Les itinéraires hydriques, décrits pour chaque parcelle, ont montré que les sites implantés sur des moraines caillouteuses et peu compactes à RU importante n'ont subi aucune contrainte jusqu'à la véraison en 2001 ainsi qu'en 2002 (tableau 14).

Durant la maturation du raisin, la contrainte hydrique a été qualifiée d'inexistante à faible sur ces mêmes terroirs. Dans les moraines compactes de pente, une contrainte faible s'est installée à la véraison puis s'est accentuée pendant la maturation pour atteindre un état de stress hydrique modéré sur les sites de Chardonne 04 et de

Chexbres 01 en 2001. Durant la saison 2002 par contre, le déficit hydrique et la contrainte sont demeurés faibles jusqu'aux vendanges. Les vignes situées sur le terroir de Corsier 02 (moraine sur molasse gréseuse à faible RU) ont présenté un itinéraire hydrique dont les notes de « stress » sont allées en intensité croissante depuis la floraison jusqu'à la récolte où la contrainte a été qualifiée de modérée en 2001. Sur les autres sites installés dans des moraines posées sur la molasse conglomératique ou marneuse, la contrainte hydrique s'est avérée inexistante jusqu'à la véraison et faible pendant la période de maturation du raisin en 2001 ainsi qu'en 2002.

Types de sols	Parcelles	« Itinéraire hydrique »	
		Saison 2001	Saison 2002
Moraines caillouteuses peu compactes	Rivaz 02	[0-0-0-0-1]	[0-0-0-0-1]
	Chardonne 07	[0-0-0-0-0]	[0-0-0-0-0]
	Chardonne 10	[0-0-0-0-1]	[0-0-0-0-1]
	Chardonne 03	[0-0-0-0-1]	-
Moraines compactes de pente	Rivaz 01	[0-0-0-0-1]	[0-0-0-1-1]
	Chardonne 04	[0-1-0-1-2]	[0-0-1-0-1]
	Chexbres 01	[0-0-0-1-2]	[0-0-1-0-1]
Moraines sur molasse congl., gréseuse ou marneuse	Rivaz 04	[0-0-0-0-1]	[0-0-0-1-1]
	Corsier 02	[0-0-1-1-2]	[0-0-1-0-1]
	St-Saphorin 03	[0-0-0-0-1]	[0-0-0-?-?]
	Rivaz 05	[0-0-0-0-1]	-

Tableau 14 : Définition des « itinéraires hydriques » pour chaque parcelle d'essais en relation avec les types de sols. Chasselas, Lavaux (CH), 2001-2002.

Mesures du potentiel tige (Ψ_T)

Malgré les faibles niveaux de contrainte hydrique, observés durant la saison 2001, la mesure du $\Psi_{T \text{ MIN}}$ a permis de mettre en évidence de petites différences de comportement hydrique entre les sites à l'étude (tableau 15).

De manière générale, les sites à RU importante ($> 150 \text{ mm}$) ont affiché des valeurs de $\Psi_{T \text{ MIN}}$ faiblement négatives, indiquant une absence de stress hydrique lors des quelques journées de suivis physiologiques. La constatation est identique chez les parcelles dont le réservoir en eau s'avère de moyenne importance (RU 100-150 mm). Par contre, les sites à faible RU ($< 100 \text{ mm}$) ont montré presque systématiquement les

valeurs les plus négatives de Ψ_T sur l'ensemble du réseau, notamment le 24 juillet et le 13 août 2001. Le site de Corsier (RU estimé à 70 mm) s'est distingué le 23 août des autres sites par des valeurs plus négatives qui indiquaient la présence d'une contrainte hydrique modérée.

Parcelles (RU)	$Y_{TIGES MIN}$ (bars)			
	fermeture gr. 24 juillet	véraison 13 août	véraison +2s. 23 août	maturation 12 septembre
Corsier 02 (RU 70 mm)	-3.2 $\pm$ 0.1	-3.3 $\pm$ 0.1	-6.0 $\pm$ 0.3	-3.5 $\pm$ 0.2
Rivaz 01 (RU 65-80 mm)	-3.0 $\pm$ 0.2	-3.1 $\pm$ 0.2	-4.0 $\pm$ 0.2	-3.6 $\pm$ 0.1
Rivaz 04 (RU 100 mm)	-2.7 $\pm$ 0.1	-2.7 $\pm$ 0.1	-4.2 $\pm$ 0.2	-3.7 $\pm$ 0.1
Rivaz 02 (RU 130 mm)	-2.5 $\pm$ 0.1	-2.7 $\pm$ 0.2	-3.3 $\pm$ 0.1	-3.3 $\pm$ 0.1
Chardonne 03 (RU 180 mm)	-2.6 $\pm$ 0.2	-2.5 $\pm$ 0.2	-3.7 $\pm$ 0.3	-2.8 $\pm$ 0.1
Chardonne 07 (RU > 220 mm)	-2.3 $\pm$ 0.1	-2.4 $\pm$ 0.1	-4.0 $\pm$ 0.1	-3.1 $\pm$ 0.3

Tableau 15 : Mesures du potentiel tige minimal ($Y_{T MIN}$), réalisées en cours de saison sur divers sites dont la RU est différente. Moyennes $\pm$ erreur standard. Chasselas, Lavaux (CH), 2001.

Les mesures du $\Psi_{T MIN}$, réalisées à différentes dates durant l'été 2002, ont permis de relever quelques variations de comportement hydrique de la vigne selon les sites et la RU des sols (tableau 16). Les valeurs de Ψ_T , enregistrées le 4 juillet sur le site de Corsier 02 dont la RU est estimée à environ 70 mm, sont significativement différentes de celles mesurées sur le site de Chardonne 07 qui dispose d'un réservoir plus important en eau. A cette même date, la mesure du Ψ_{base} indiquait des valeurs identiques pour les deux parcelles. Cette constatation peut être reconduite, dans une moindre mesure toutefois, pour la journée du 19 juillet. Le volume de colonisation racinaire est moins important sur le site de Corsier 02 (enracinement superficiel sur

molasse gréseuse) que sur celui de Chardonne 07 (sol épais de moraine caillouteuse peu compacte) et explique en partie que durant la plus forte demande climatique de la journée l'absorption racinaire peut s'avérer momentanément limitante pour compenser les pertes en eau du végétal à Corsier 02 et non à Chardonne 07. Ce phénomène pourrait justifier que les valeurs de $\Psi_{T\ MIN}$ étaient plus négatives à Corsier 02 d'autant que la transpiration des feuilles isolées étaient identiques sur les deux sites (résultats non présentés).

Parcelles (RU)	$\Psi_{TIGE\ MIN}$ (bars)			
	nouaison 4 juillet	petit pois (baie) 19 juillet	fermeture grappe 29 juillet	véraison 16 août
Corsier 02 (RU 70 mm)	-5.5 ± 0.2	-3.7 ± 0.1	-4.6 ± 0.1	-4.1 ± 0.2
Chardonne 04 (RU 65-80 mm)	-3.8 ± 0.1	-3.3 ± 0.1	-5.0 ± 0.1	-4.2 ± 0.1
Rivaz 01 (RU 65-80 mm)	-3.3 ± 0.2	-3.1 ± 0.2	-4.5 ± 0.1	-4.3 ± 0.1
Rivaz 04 (RU 100 mm)	-3.6 ± 0.2	-3.2 ± 0.2	-4.6 ± 0.2	-4.1 ± 0.2
Rivaz 02 (RU 130 mm)	-3.2 ± 0.2	-2.4 ± 0.2	-4.4 ± 0.2	-3.3 ± 0.1
Chardonne 07 (RU > 220 mm)	-2.9 ± 0.4	-2.6 ± 0.1	-4.1 ± 0.1	-3.7 ± 0.1

Tableau 16 : Mesures du potentiel tige minimal ($\Psi_{T\ MIN}$), réalisées en cours de saison sur divers sites dont la RU est différente. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Lavaux (CH), 2002.

Il ressort également de cette étude que les valeurs du $\Psi_{T\ MIN}$ se révèlent plus négatives lorsque les sites présentent un réservoir en eau plus limité. Par ailleurs, les vignes établies sur des moraines caillouteuses et peu compactes ont présenté systématiquement durant les saisons 2001 et 2002 des valeurs plus élevées (moins négatives) du $\Psi_{T\ MIN}$ que les moraines compactes de pente ou établies sur molasse conglomératique ou gréseuse.

4.2.5 Suivis hydriques à Bonvillars

Evolution du potentiel hydrique de base

En 2002 à Bonvillars, l'évolution du Ψ_{base} a montré que les sites implantés en faible couverture et à réserve en eau limitée ($\text{RU} < 100 \text{ mm}$) sur le calcaire jaune du Jura ont entraîné une contrainte hydrique chez la vigne, qualifiée de modérée à forte durant le mois de septembre (fig. 15-16).

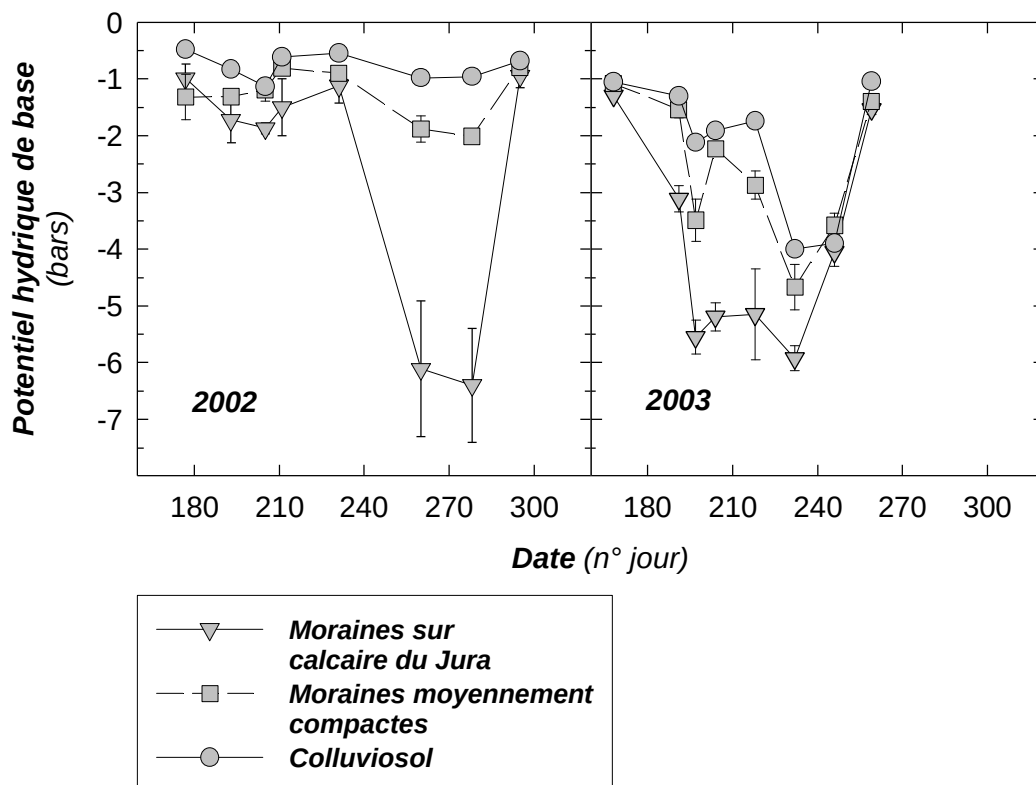


Fig. 15 : Evolution du potentiel hydrique de base (Ψ_{base}) au cours de la saison en relation avec le type de sol. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, Bonvillars (CH), 2002-2003.

L'enracinement superficiel, observé dans ces sols de faible épaisseur (40 à 70 cm), et leur réserve restreinte en eau ont provoqué une chute brutale du Ψ_{base} au début de septembre 2002, moment où le déficit hydrique devenait supérieur à 100 mm. Des symptômes de sécheresse (chute des feuilles de la base des rameaux) ont pu être observés durant la maturation du raisin chez les vignes soumises à une contrainte hydrique sévère (Ψ_{base} de -7 à -8 bars durant plus de 3 semaines). Les valeurs de Ψ_{base}

ne sont remontées qu'à la mi-octobre à des niveaux d'absence de contrainte hydrique après les précipitations survenues dans le mois.

Les vignes complantées sur des moraines caillouteuses dont l'épaisseur et la RU sont plus importantes n'ont souffert par contre d'aucune restriction en eau et les valeurs de Ψ_{base} ont fluctué entre -1 et -2 bars en cours de saison. Situées sur des colluviosols à forte RU, les vignes ont présenté une absence de contrainte tout au long de la saison avec des valeurs de Ψ_{base} proches de la turgescence.

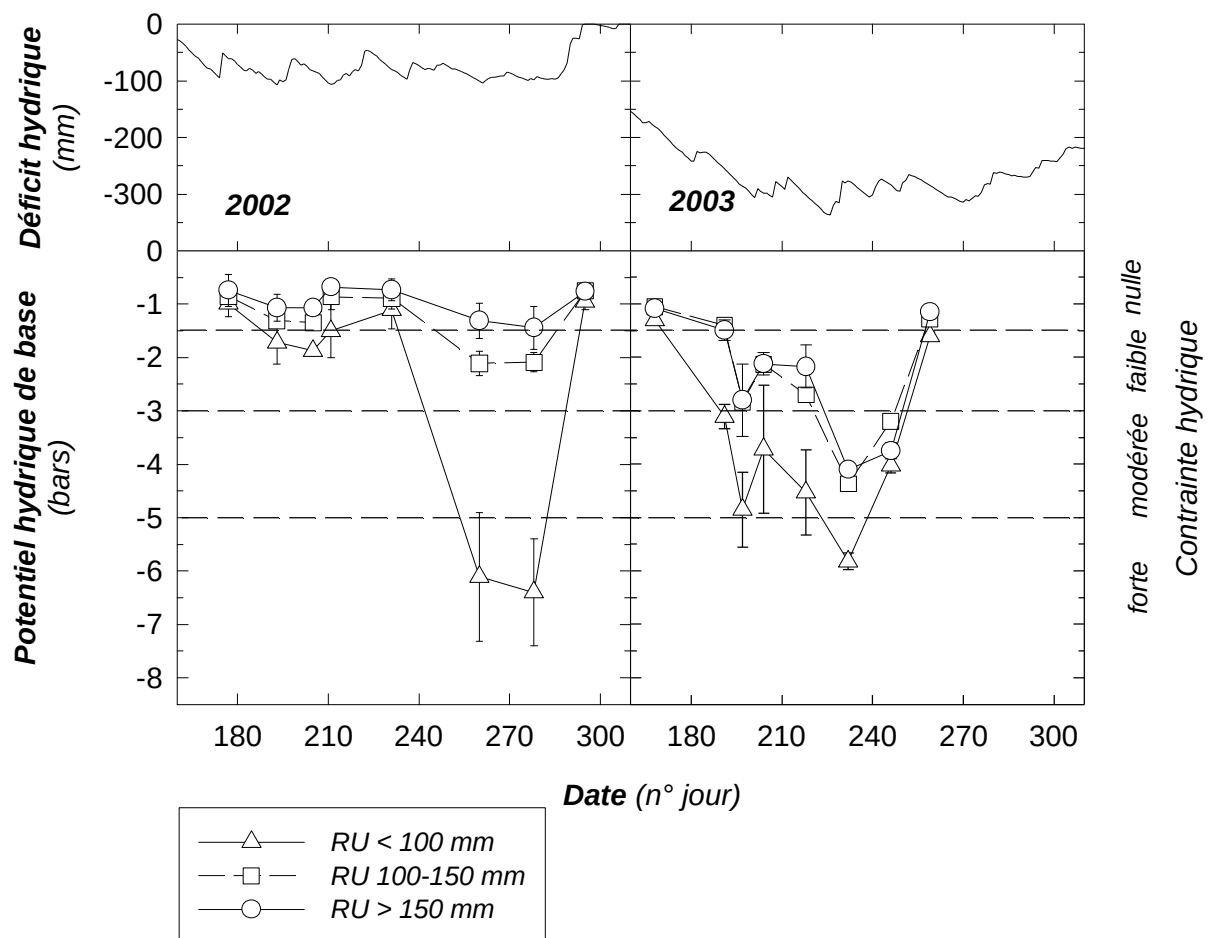


Fig. 16 : Evolution du déficit hydrique potentiel (précipitations-ETP) et du potentiel hydrique de base (Ψ_{base}) au cours de la saison en relation avec la réserve utile en eau des sols (RU). Barres verticales : erreur standard. Chasselas, Bonvillars (CH), 2002-2003.

Le déficit hydrique élevé, observé très tôt dans la saison 2003, a provoqué une chute marquée des valeurs du Ψ_{base} à la mi-juillet dans les sites à enracinement superficiel et à faible RU (moraines sur calcaire du Jura, figure 15-16). Une contrainte hydrique,

sévère en début de maturation du raisin, a fait suite à une contrainte modérée à l'approche des vendanges. Les vignes situées sur des moraines plus ou moins caillouteuses dont l'épaisseur et la RU sont plus importantes n'ont subi que des stress passagers et modérés durant le mois d'août. Durant le reste de la saison, la contrainte a été faible sur les sites à gros et moyens réservoirs en eau ($RU > 100$ mm). Les valeurs les plus négatives du base ont coïncidé avec le déficit hydrique le plus élevé, enregistré à la mi-août (-320 mm).

Une étroite corrélation a été mise en évidence sur les cinq sites étudiés entre la réserve en eau des sols (RU) et le Ψ_{base} moyen, mesuré durant les saisons 2002-2003 (fig. 17). Le site dont la RU s'élève à 60 mm a montré le Ψ_{base} moyen le plus négatif (-3.0 bars) suivi, dans l'ordre croissant des RU de sites dont le Ψ_{base} moyen devient de moins en moins négatif, c'est -à -dire dont l'alimentation hydrique est de moins en moins restrictive. En 2003, le niveau de la contrainte hydrique a été plus important que durant la saison 2002, quelle que soit la RU des sols, en raison d'un déficit hydrique élevé.

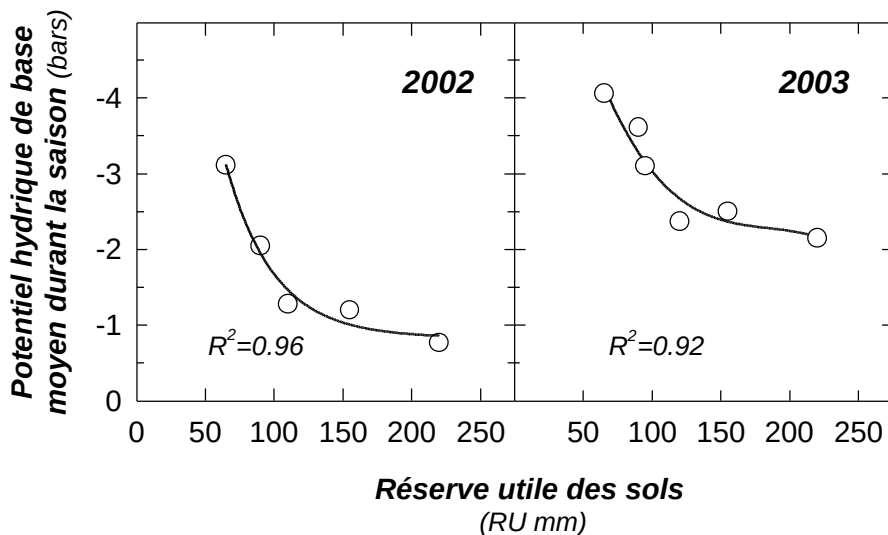


Fig. 17 : Relation entre la réserve en eau des sols (RU) et la valeur du Ψ_{base} moyen, mesuré durant la saison. Chasselas, Bonvillars (CH), 2002-2003.

Itinéraires hydriques

Les itinéraires hydriques, définis dans tous les sites, ont montré que la contrainte hydrique a été inexistante dans la parcelle implantée sur un colluviosol à RU élevée durant toute la saison 2002 (tableau 17). Dans les moraines caillouteuses et peu compactes, la vigne n'a souffert d'aucune restriction en eau jusqu'à la véraison, alors que durant la maturation du raisin, la contrainte hydrique a été faible. Situées sur des sols de faible épaisseur et à enracinement superficiel (moraines sur calcaire du Jura), les sites ont affiché un stress hydrique apparaissant après la floraison et allant d'intensité croissante, notamment pendant la période de maturation où la contrainte s'est avérée modérée à forte selon les sites jusqu'à la récolte.

Types de sols	Parcelles	« Itinéraire hydrique »	
		Saison 2002	Saison 2003
Colluviosol	Bonvillars 03	[0-0-0-0-0]	[0-0-1-1-2]
Moraines peu caillouteuses moy. compactes	Bonvillars 02 Concise 02 Onnens 01	[0-0-0-0-1] [0-0-0-0-1] -	[0-0-1-1-2] [0-0-1-1-2] [?- ?-2-2-2]
Moraines sur calcaire du Jura	Bonvillars 01 Champagne 02	[0-0-1-0-2] [0-0-1-1-3]	[0-0-2-2-2] [0-1-2-3-2]

Tableau 17 : Définition des « itinéraires hydriques » pour chaque parcelle à l'étude en relation avec les types de sols. Chasselas, Bonvillars (CH), 2002-2003.

Durant la période végétative 2003, les itinéraires hydriques manifestent que la contrainte a été très faible jusqu'à la floraison, sur l'ensemble des sites. Elle a par la suite progressivement augmenté dans tous les types de sols pour devenir modérée autour de la véraison et s'y maintenir jusqu'à la récolte. Seul le site de Champagne 02 (moraine sur calcaire du Jura) a présenté un stress élevé (note 3) à la véraison.

Mesures du potentiel tige (Ψ_T)

Des mesures du Ψ_T ont été réalisées en cours de la saison 2002 sur cinq sites avec des RU très différentes pendant la période la plus chaude des différentes journées ($\Psi_{T \text{ MIN}}$, tableau 18). Les valeurs du $\Psi_{T \text{ MIN}}$ ont été systématiquement plus négatives chez les vignes implantées sur des sols à faible RU. Cette technique de mesure a permis de mettre en évidence des variations de comportement d'alimentation en eau de la vigne entre les sites lorsque la demande évaporatoire était la plus élevée (fin d'après-midi), et ceci également durant la période allant du 1 juillet à la mi-août où aucune contrainte hydrique n'a été identifiée par la mesure du Ψ_{base} .

RU (mm)	$\Psi_{T \text{ MIN}}$ (bars)				
	nouaison 1 juillet	Fermeture grappe 22 juillet	véraison 14 août	maturation 18 septembre	vendanges 2 octobre
RU < 70 mm	-6.6 ± 0.3	-5.4 ± 0.2	-4.6 ± 0.2	-16.5 ± 0.3	-13.4 ± 0.5
RU 90-100 mm	-4.4 ± 0.1	-4.5 ± 0.2	-3.3 ± 0.2	-11.1 ± 0.5	-11.0 ± 0.8
RU 100-140 mm	-4.3 ± 0.2	-4.7 ± 0.2	-3.5 ± 0.1	-	-6.0 ± 0.4
RU 150-190 mm	-3.5 ± 0.1	-3.7 ± 0.1	-3.2 ± 0.2	-	-
RU > 220 mm	-3.7 ± 0.1	-3.8 ± 0.1	-3.0 ± 0.2	-	-4.0 ± 0.2

Tableau 18 : Mesures du potentiel tige minimal ($\Psi_{T \text{ MIN}}$), réalisées en cours de saison sur divers sites à RU différente. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Bonvillars (CH), 2002.

Durant la maturation du raisin 2002 et jusqu'aux vendanges, la contrainte s'est accentuée et les valeurs du $\Psi_{T \text{ MIN}}$ ont reflété parfaitement l'itinéraire hydrique des différents sites. Des symptômes de défoliation, observés dès la mi-septembre sur le site présentant une RU inférieure à 70 mm, ont nettement traduit une contrainte hydrique sévère. Les valeurs de $\Psi_{T \text{ MIN}}$ de -16.5 bars, enregistrées sur ce site, témoignent de l'extrême restriction en eau subie par la vigne durant la période la plus chaude de la journée.

Sur le site dont la RU se situe entre 90 à 100 mm, de très légers symptômes de sécheresse (feuilles jaunies à la base des rameaux) étaient également visibles à cette époque de la saison. Les valeurs du $\Psi_{T\ MIN}$ indiquaient que la contrainte était moins forte que sur le site précédent, mais qu'elle demeurait élevée tout de même ($\Psi_{T\ MIN}$ de -11 bars). Ces résultats rejoignent les observations réalisées par Choné (2001) qui remarque les premiers signes de défoliation chez la vigne pour une valeur de $\Psi_{T\ MIN}$ de -11.2 bars.

Au moment des vendanges, la contrainte hydrique nocturne (Ψ_{base}) et diurne ($\Psi_{T\ MIN}$) était encore élevée sur les sites avec une RU inférieure à 100 mm : les valeurs de $\Psi_{T\ MIN}$ établies entre -11 et -13.4 bars attestaient ce fait. Par contre, sur les sites bénéficiant d'une RU plus importante, les valeurs de $\Psi_{T\ MIN}$ se situaient entre -4 et -6 bars et ne traduisaient aucune contrainte hydrique.

Les mesures du $\Psi_{TIGE\ MIN}$, effectuées à 3 reprises en 2003 (tableau 19), montrent que la contrainte hydrique diurne était déjà présente le 10 juillet sur des sites à faible RU (Champagne 02 et Bonvillars 01).

Parcelles (RU mm)	$Y_{TIGE\ MIN}$ (bars)		
	nouaison + 2 s. 10 juillet	véraison 4 août	maturation 4 septembre
Champagne 02 (RU < 70 mm)	-8.5 ± 0.3	-11.4 ± 0.3	-7.8 ± 0.2
Bonvillars 01 (RU 90 mm)	-7.6 ± 0.3	-8.5 ± 0.4	-7.1 ± 0.2
Onnens 01 (RU 90 mm)	-5.1 ± 0.1	-8.6 ± 0.3	-8.1 ± 0.2
Bonvillars 02 (RU 110 mm)	-5.2 ± 0.3	-7.9 ± 0.2	-6.5 ± 0.3
Concise 02 (RU 155 mm)	-4.1 ± 0.2	-7.6 ± 0.2	-7.2 ± 0.2
Bonvillars 03 (RU > 220 mm)	-	-7.6 ± 0.2	-7.5 ± 0.3

Tableau 19 : Mesures du potentiel tige minimal ($Y_{T\ MIN}$), réalisées en cours de saison sur divers sites à RU différente. Moyennes $\pm$ erreur standard. Chasselas, Bonvillars (CH), 2003.

La contrainte hydrique s'est avérée modérée à forte sur ces deux terroirs lors des mesures suivantes (août - septembre). Les vignes implantées sur des sols à RU supérieure à 100 mm ont affiché des valeurs de $\Psi_{TIGE\ MIN}$ moins négatives qui traduisaient une contrainte faible durant la journée du 10 juillet. Durant les journées du 4 août et du 4 septembre, la contrainte diurne était modérée sur tous les sites en raison d'un déficit hydrique s'élevant à près de 250-300 mm et d'une demande évaporatoire élevée (fortes chaleurs et hygrométrie basse).

Suivi journalier du Ψ_T

Un suivi de l'évolution journalière du Ψ_T , du gradient de potentiel hydrique ($\Delta\Psi$) entre les rameaux et les feuilles, et de la transpiration foliaire a été effectué par une belle journée ensoleillée (2 octobre) sur 4 sites différents en 2002 (fig. 18). La mesure du Ψ_{base} indiquait que les 4 parcelles se différenciaient quant à leur alimentation hydrique : cette dernière étant largement fonction de la RU des sols. L'évolution du Ψ_T a reflété globalement le niveau de contrainte hydrique, observé par la valeur du Ψ_{base} , dans les différentes parcelles à l'étude.

Sur les sites à faible contrainte (RU > à 100 mm), les valeurs minimales de Ψ_T ont été enregistrées aux alentours de midi solaire. Le $\Psi_{T\ MIN}$ a été atteint vers 15 h00 sur le site où la contrainte hydrique était modérée (RU de 90 à 100 mm). Lorsque l'alimentation hydrique était largement restrictive (site avec RU < à 70 mm), les valeurs du $\Psi_{T\ MIN}$ diminuaient encore en cours d'après-midi et atteignaient -14.5 bars vers 16 h30. Ces valeurs excessivement basses traduisent une diminution de la disponibilité de l'eau dans le sol pour la vigne. Cette contrainte a entraîné une chute du potentiel hydrique de l'eau dans le sol (et donc du Ψ_{base}) et surtout une forte augmentation des résistances hydrauliques au transfert de l'eau depuis le sol jusqu'aux racines puis aux feuilles.

Selon Cochard (1995), la sécheresse crée chez la plante un stress « statique », lié aux variations du potentiel de base, et un stress « dynamique » lié aux résistances hydrauliques. Ces deux phénomènes contribuent à diminuer le potentiel hydrique dans

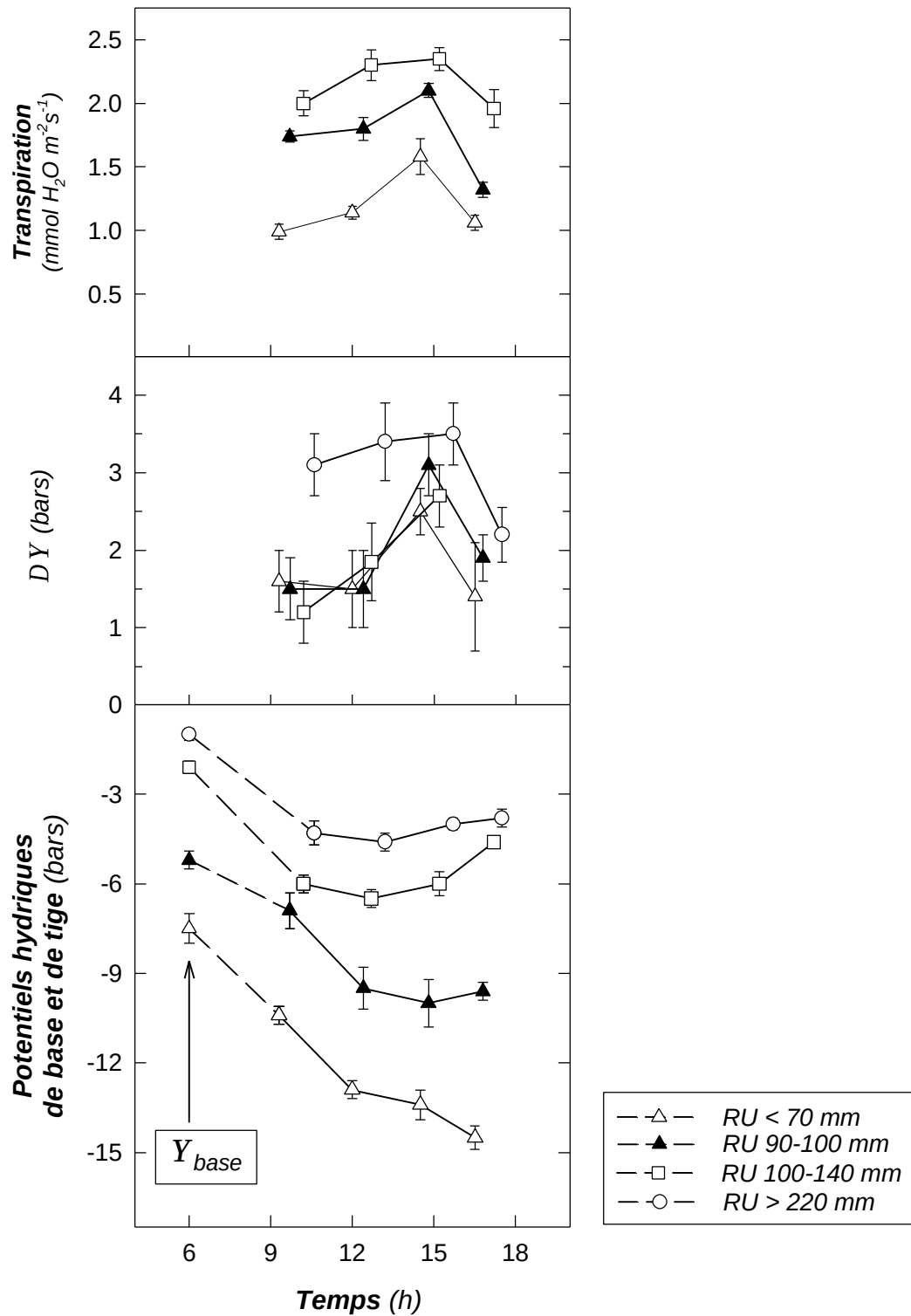


Fig. 18 : Evolution journalière (02.10.2002) de la transpiration foliaire, du gradient de potentiel entre le Y_T et le Y_F (DY), et du potentiel tige (Y_T) sur 4 sites dont la RU est différente. Barres verticales : erreur standard. Belle journée ensoleillée, $^{\circ}\text{C}_{\text{max}}$: 19.8, humidité relative minimale dans l'après-midi : 52%. Chasselas, Bonvillars (CH).

les conduits du xylème. Diverses études ont par ailleurs montré l'existence de relations entre l'état de tension dans les conduits du xylème (ou potentiel hydrique du xylème) et le degré d'embolie (cavitation) chez différents végétaux. La perte de conductivité hydraulique est néanmoins variable selon l'espèce végétale, l'âge des tissus conducteurs et les conditions environnementales (Cochard, 1992 ; Tyree *et al.*, 1993). L'apparition d'embolie chez la vigne a été soupçonnée à plusieurs reprises lors d'une contrainte hydrique sévère : ces phénomènes de cavitation entraîneraient entre autres l'arrêt de la croissance des apex et l'apparition des premiers signes de défoliation (Schultz et Matthews, 1988).

Les valeurs les plus élevées de $\Delta\Psi$ ont été observées en cours d'après-midi au moment où la transpiration foliaire s'avérait la plus importante. Dotée d'une RU supérieure à 220 mm, la parcelle située sur un colluviosol affichait des niveaux élevés de $\Delta\Psi$ par rapport aux autres sites. Le niveau de contrainte hydrique a également influé sur les taux de transpiration foliaire, mesurés en cours de journée. L'élévation de la contrainte a provoqué une nette diminution des échanges gazeux des feuilles sur les sites à l'étude. La transpiration représente une des premières fonctions de la plante affectée par un déficit hydrique. Diverses études, menées notamment sur des terroirs viticoles soumis à une contrainte hydrique, confirment nos observations (Morlat *et al.*, 1992).

4.2.6 Suivis hydriques dans le Chablais

Evolution du Y_{base} et itinéraire hydrique

Le suivi de l'alimentation en eau de la vigne, au moyen du Ψ_{base} , a montré que durant la saison 2002 la restriction hydrique est demeurée modeste ou inexistante sur l'ensemble des sites (fig. 19, tableau 20).

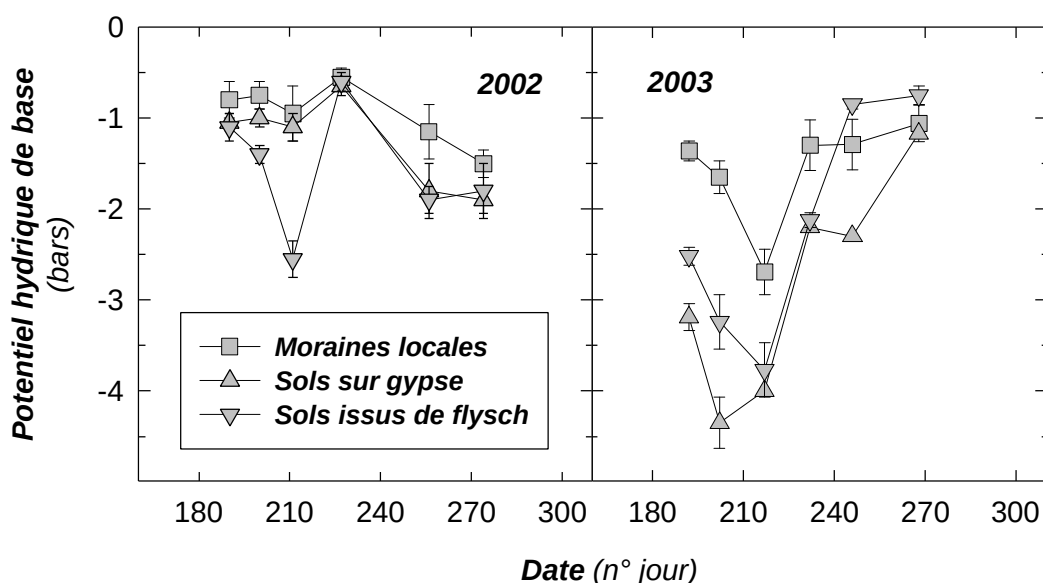


Fig. 19 : Evolution du potentiel hydrique de base (Y_{base}) au cours de la saison sur les divers types de sols. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, Chablais (CH), 2002-2003.

Implantées sur les sols de moraines locales et caillouteuses, les vignes n'ont subi aucune contrainte hydrique pendant la période de végétation 2002. Ces observations prévalent également pour les sites implantés sur gypse qui, à l'exception des sites précédents, ont présenté une contrainte qualifiée de faible durant la maturation du raisin. Seuls les sols issus de flysch ont entraîné des niveaux de contrainte hydrique faible chez la vigne durant la période floraison-véraison ainsi que durant la maturation (tableau 20 présentant les itinéraires hydriques pour chaque parcelle).

En 2003, les vignes situées sur des sols gypseux ou issus de flysch ont présenté une contrainte modérée au cours du mois de juillet et de la première quinzaine d'août (figure 19). Seules les moraines locales et caillouteuses ont offert des conditions moins

contraignantes à cette même époque. Les mesures, réalisées à la fin d'août et durant le mois de septembre, ont permis d'observer que la contrainte a été faible sur l'ensemble des sites à l'étude dans le Chablais. Les itinéraires hydriques, exposés dans le tableau 20 confirment ces observations.

Types de sols	Parcelles	« Itinéraire hydrique »	
		Saison 2002	Saison 2003
Moraines locales	Ollon 01	[0-0-0-0-0]	[?-0-1-1-0]
	Ollon 03	[0-0-0-0-1]	[?-0-1-1-0]
	Ollon 06	-	[?-0-1-1-0]
Sols sur gypse	Bex 06	[0-0-0-0-1]	[?-2- grêle]
	Ollon 04	[0-0-0-0-1]	[?-2-2-2-1]
Sols issus de flysch	Bex 01	[0-0-1-0-1]	[?-1-2-2-1]
	Bex 03	[0-0-1-0-1]	[?-1-1-2-1]

Tableau 20 : Définition des « itinéraires hydriques » pour chaque parcelle à l'étude en relation avec les types de sols. Chasselas, Chablais (CH), 2002-2003.

En regroupant les sites en fonction de leur réserve utile en eau, on observe que les valeurs de Ψ_{base} ont été très proches en 2002 jusqu'à la véraison quel que soit leur niveau de RU (fig. 20). Durant la période de maturation du raisin, les vignes à RU limitée (< 100 mm) ont affiché des valeurs de Ψ_{base} plus négatives, tout en restant faibles, que les sites à RU supérieure. L'absence de déficit hydrique prononcé et les précipitations régulières, enregistrées durant l'été 2002, expliquent en grande partie que la vigne n'ait pas souffert de restriction en eau.

Le déficit hydrique cumulé s'est avéré relativement important en 2003 et s'est élevé à 270 mm durant le mois d'août. Ce déficit a entraîné des niveaux de contrainte modérée sur les sites à RU limitée ($RU < 100$ mm), jusqu'à la mi-août (fig. 20). Ailleurs, dans les sols à plus grand réservoir en eau, la vigne n'a subi qu'une faible contrainte. Les quelques précipitations, survenues à la fin d'août, ont entraîné des contraintes faibles durant la maturation du raisin sur l'ensemble des terroirs.

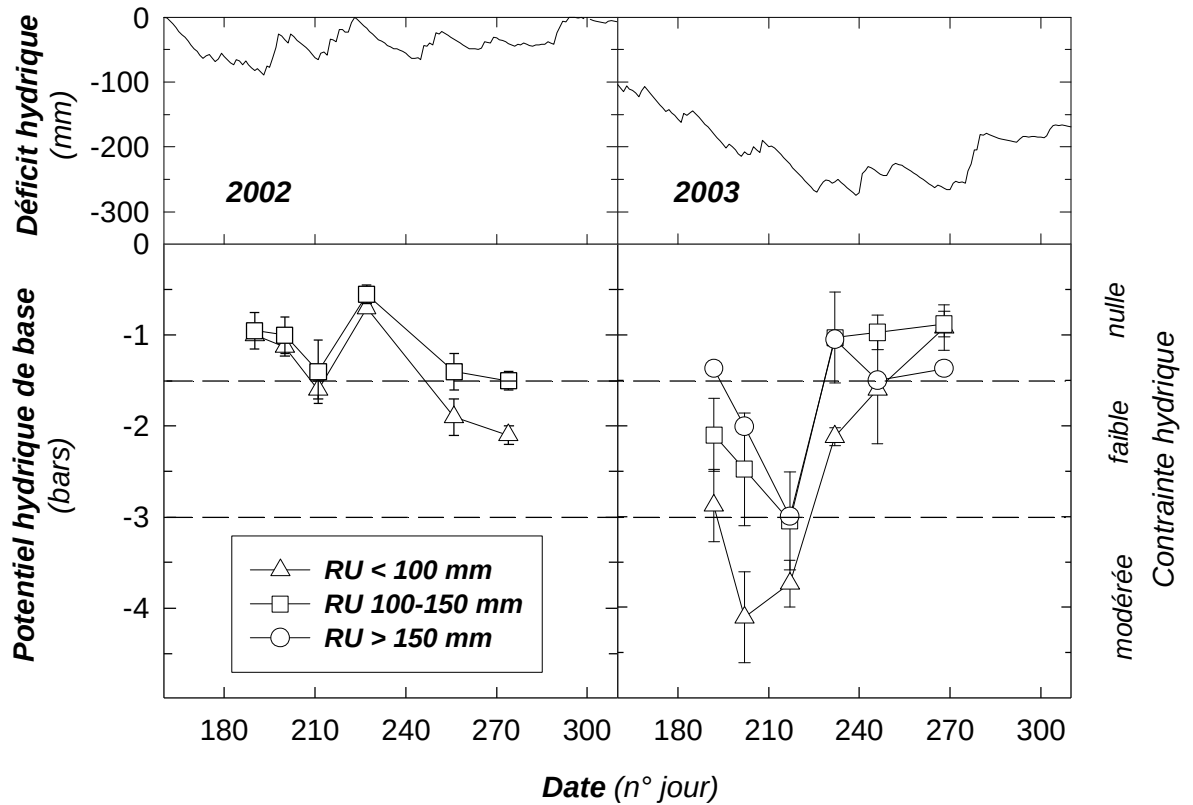


Fig. 20 : Evolution du déficit hydrique potentiel (pluies-ETP) et du potentiel hydrique de base (Y_{base}) au cours de la saison en relation avec la réserve utile en eau des sols (RU). Barres verticales : erreur standard. Chasselas, Chablais (CH), 2002-2003.

Une relation a pu être établie entre le RU des sols et la mesure du potentiel hydrique de base moyen, observé durant les saisons 2002 et 2003 (résultats non présentés).

Mesures du potentiel tige (Y_T)

L'évaluation du Ψ_T , menée sur différents sites et durant la période la plus chaude de plusieurs journées au cours de la saison 2002, est présentée dans le tableau 21.

De manière générale, les valeurs de $\Psi_{T \text{ MIN}}$ indiquent que la contrainte hydrique est restée modeste durant les journées d'étude sur l'ensemble du réseau de parcelles. On observe toutefois que les sites à RU limitée (< à 100 mm) ont entraîné des valeurs plus négatives de $\Psi_{T \text{ MIN}}$ que les sites à RU élevée. Ces résultats confirment les observations réalisées au moyen du Ψ_{base} .

Parcelles (RU)	$\Psi_{T \text{ MIN}}$ (bars)			
	nouaison 4 juillet	petit pois (baie) 19 juillet	fermeture grappe 29 juillet	Véraison +1s. 22 août
Bex 01 (RU 75 mm)	-3.4 ± 0.2	-3.1 ± 0.1	-5.0 ± 0.2	-3.8 ± 0.1
Ollon 04 (RU < 100 mm)	-3.6 ± 0.2	-2.7 ± 0.3	-5.0 ± 0.1	-4.1 ± 0.3
Ollon 01 (RU 100 mm)	-3.2 ± 0.1	-2.4 ± 0.1	-4.0 ± 0.1	-2.8 ± 0.1
Bex 06 (RU 110 mm)	-2.2 ± 0.2	-2.7 ± 0.1	-5.0 ± 0.2	-3.7 ± 0.2
Ollon 03 (RU 130 mm)	-2.2 ± 0.1	-2.5 ± 0.2	-4.0 ± 0.1	-2.5 ± 0.2
Bex 03 (RU 155 mm)	-	-	-5.4 ± 0.2	-4.4 ± 0.2

Tableau 21 : Mesures du potentiel tige minimal ($\Psi_{T \text{ MIN}}$), réalisées en cours de saison sur divers sites à RU différente. Moyennes $\pm$ erreur standard. Chasselas, Chablais (CH), 2002.

La parcelle désignée Bex 03 représente un cas particulier dans la mesure où sa RU estimée est importante et les valeurs de $\Psi_{T \text{ MIN}}$ ont été les plus négatives de tous les sites à l'étude (contrainte faible à modérée). Cette parcelle se situe sur un sol issu de flysch dont il est difficile d'apprécier la réserve en eau en raison de sa structure (agencement en feuillets schisto-argileux) ainsi que la profondeur d'enracinement prospectée. Des mesures complémentaires du régime hydrique de la vigne s'avèrent nécessaires sur les divers sites du Chablais afin de mieux comprendre (dans la mesure du possible) leurs particularités vis-à-vis de l'alimentation en eau.

Les mesures de $\Psi_{T \text{ MIN}}$, réalisées au cours de deux journées chaudes en 2003 (tableau 22), montrent que la contrainte hydrique diurne a été modérée. Le site de Ollon 04 (sol sur gypse à faible RU) a présenté les valeurs de $\Psi_{T \text{ MIN}}$ les plus négatives de tous les terroirs à l'étude. Une contrainte modérée à forte a été observée le 11 août sur l'ensemble du réseau en raison de températures élevées et d'une demande évaporatoire

importante. La journée du 22 juillet a été caractérisée par une contrainte faible à modérée en fonction du type de sol et de la réserve en eau.

Parcelles (RU mm)	Y _{TIGE MIN} (bars)	
	début véraison 22 juillet	véraison + 2s. 11 août
Bex 01 (RU 75 mm)	-5.7 ± 0.2	-9.0 ± 0.1
Ollon 04 (RU < 100 mm)	-9.2 ± 0.3	-10.7 ± 0.3
Ollon 01 (RU 100 mm)	-5.0 ± 0.3	-8.9 ± 0.3
Bex 06 (RU 110 mm)	-6.7 ± 0.2	-
Ollon 03 (RU 130 mm)	-5.4 ± 0.3	-7.6 ± 0.3
Bex 03 (RU 150 mm)	-5.1 ± 0.2	-8.5 ± 0.4

Tableau 22 : Mesures du potentiel tige minimal ($Y_{T\ MIN}$), réalisées en cours de saison sur divers sites à RU différente. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Chablais (CH), 2003.

4.2.7 Relations entre les diverses approches hydriques

Déficit hydrique cumulé et potentiel de base

Nos observations, réalisées à la Côte, indiquent que le déficit hydrique cumulé depuis le 1^{er} janvier (pluies – ETP) est bien corrélé avec le potentiel hydrique de base, mesuré durant les saisons 2001 à 2003 (fig. 21). La succession de 3 années très différentes d'un point de vue climatique a permis d'étudier le comportement hydrique de la plante sur une large gamme de déficit hydrique (de 0 à 420 mm).

Dans les sols à grand réservoir en eau ($RU > 150$ mm), la contrainte hydrique demeure faible ($\Psi_{\text{base}} > -3,0$ bars) tant que le déficit hydrique s'avère inférieur à 300-320 mm. Au-delà, la contrainte devient modérée et même forte avec des déficits avoisinant les 400-420 mm. Dans les moraines compactes de pente dont la RU estimée s'élève entre 70 et 150 mm, la contrainte modérée est atteinte vers 200-250 mm. On relève cependant quelques particularités dans le réseau établi à la Côte. Sur les sites implantés dans des peyrosols sableux, les valeurs du potentiel hydrique de base ont chuté plus rapidement lorsque le déficit hydrique s'accroissait. Une contrainte hydrique modérée était déjà atteinte avec un déficit s'élevant aux environs de 200 mm. Ces sols très caillouteux et filtrants ont provoqué des contraintes modérées à fortes chez la vigne très rapidement durant l'été 2003. L'autre particularité concerne la parcelle Vinzel 03 (moraine caillouteuse et peu compacte) qui malgré des déficits hydriques élevés n'a entraîné qu'une contrainte faible chez la vigne. La RU de ce sol est peut-être plus importante que prévue. Des écoulements d'eau latéraux ne sont pas exclus dans le secteur : ils ont peut-être approvisionné la vigne en eau.

Des résultats identiques à ceux de la Côte ont été obtenus à Bonvillars (fig. 22). Une relation a été mise en évidence entre le déficit hydrique cumulé et les valeurs du Ψ_{base} . La date d'apparition du déficit hydrique apparaît aussi importante que le niveau du déficit. En effet, un déficit hydrique précoce dans la saison (juin 2003) n'entraîne pas les mêmes conséquences chez la vigne qu'un déficit observé durant la fin de saison (automne 2002). C'est la raison pour laquelle, les sites de Bonvillars 01 et de Champagne 02 composés de moraines étalées sur le calcaire du Jura à très faible RU

ont montré des comportements de régime hydrique très différents selon la date d'apparition du déficit hydrique.

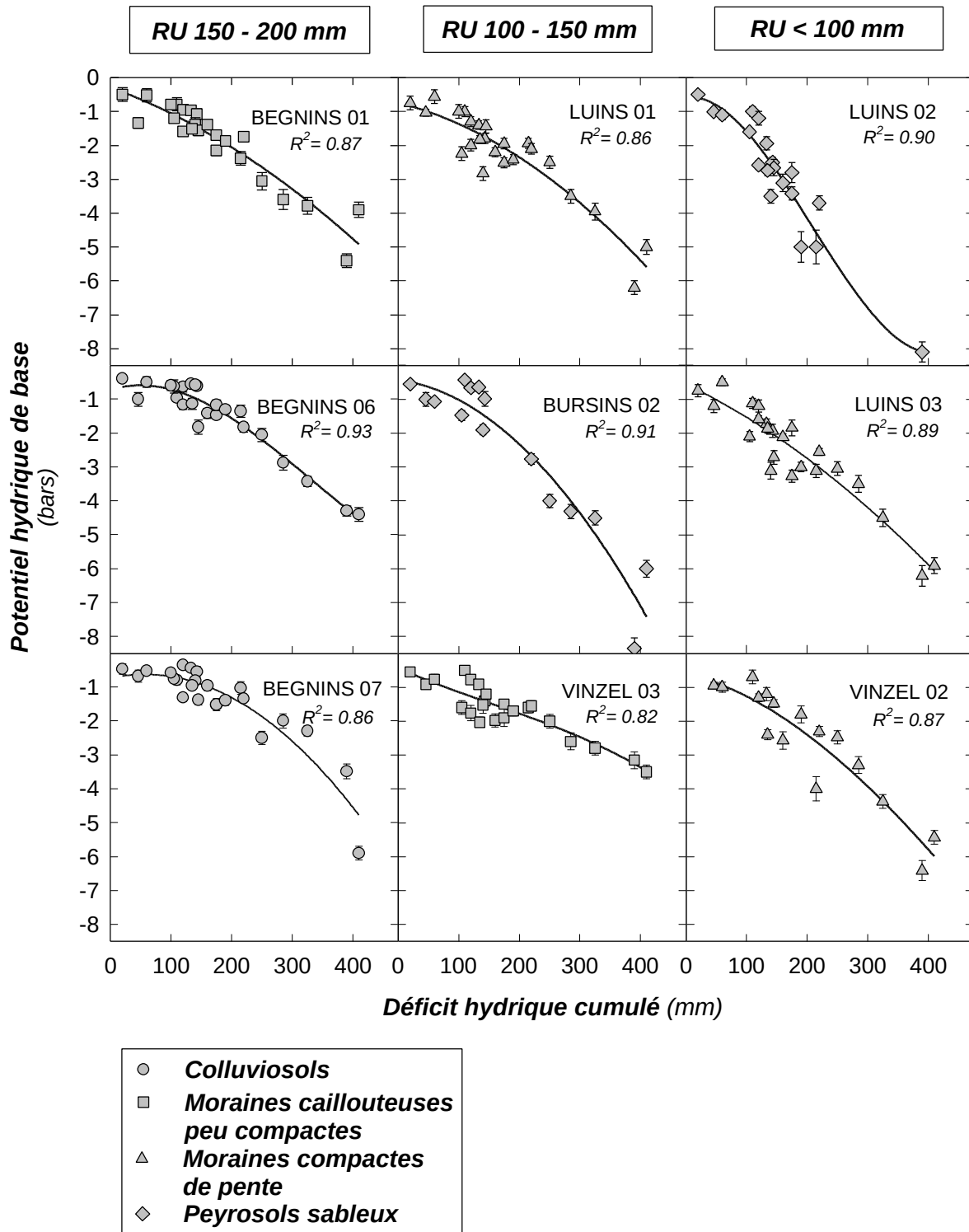


Fig. 21 :Relation établie entre le déficit hydrique cumulé à partir du 1^{er} janvier (pluies – ETP) et le potentiel hydrique de base, mesuré sur différents sites . RU : réserve utile en eau des sols. Barres verticales : erreur standard. La Côte (CH), 2001-2003.

Les valeurs du Ψ_{base} ont été plus négatives (contrainte élevée) en fin de saison que durant la forte croissance végétative (juin 2003) avec un déficit hydrique équivalent s'élevant à 120 mm. Les deux sites représentent cependant des situations extrêmes quant à leur très faible réservoir en eau. La contrainte hydrique peut apparaître très rapidement sur ces sites lorsqu'une période sèche et chaude d'une dizaine de jours survient durant l'été.

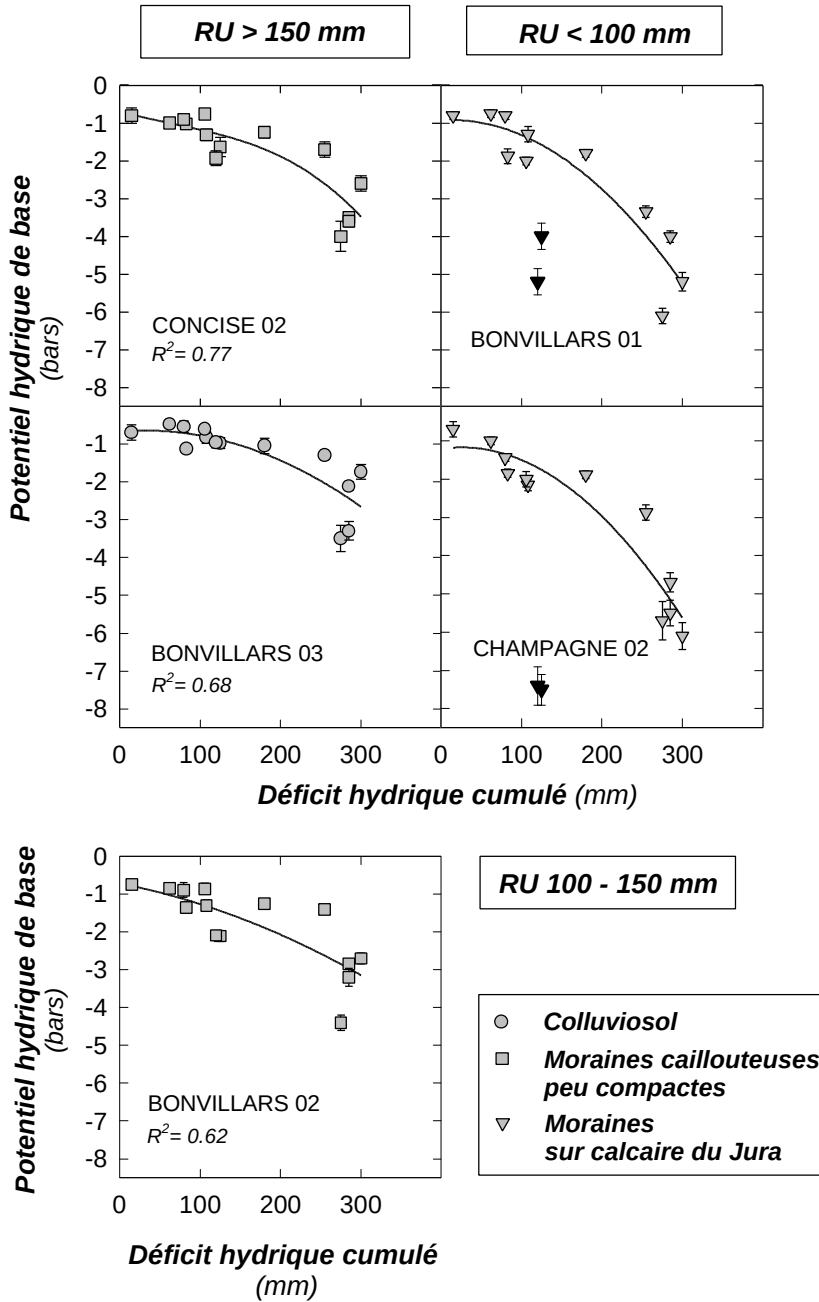


Fig. 22 : Relation établie entre le déficit hydrique cumulé à partir du 1^{er} janvier (pluies – ETP) et le potentiel hydrique de base, mesuré sur différents sites. RU : réserve utile en eau des sols. Barres verticales : erreur standard. Bonvillars (CH), 2002-2003.

Dans le Chablais et à Lavaux, le déficit hydrique cumulé a été moins important qu'à la Côte et à Bonvillars (fig. 23 et 24). Ce dernier s'est élevé au plus fort à 220 mm dans le Chablais en 2003 et à 150 mm à Lavaux pour les saisons 2001-2002. Un nombre plus restreint d'observations combinées à un déficit plus faible n'ont pas permis de tirer des tendances assurées quant à la relation pouvant exister entre le déficit hydrique et le potentiel hydrique de base, notamment à Lavaux. On réalise aisément au travers de cet exemple qu'une étude de terroirs est exigeante vis-à-vis du nombre d'années d'observation pour recueillir suffisamment d'informations susceptibles d'expliquer ou d'interpréter un comportement physiologique et viticole.

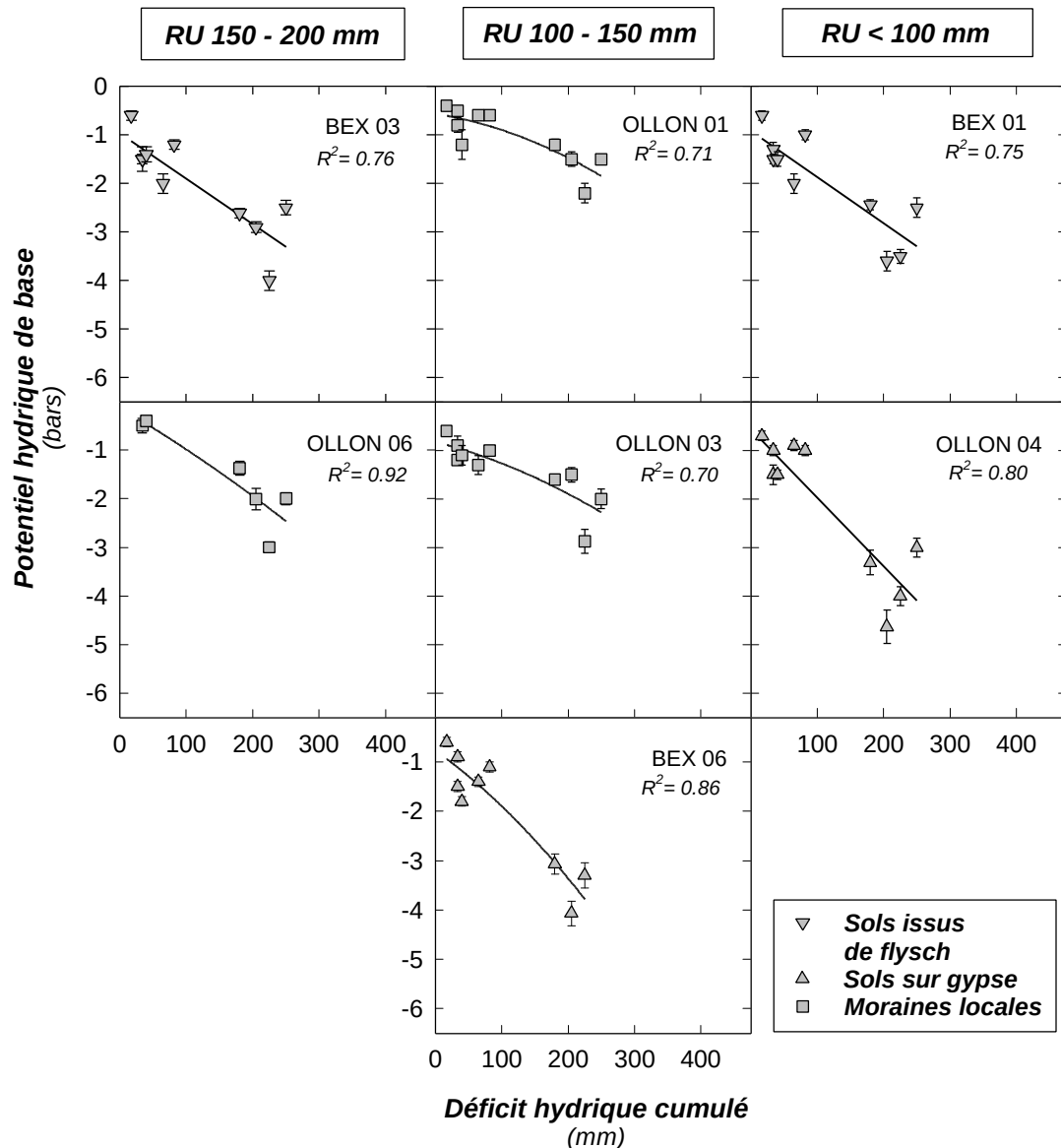


Fig. 23 : Relation établie entre le déficit hydrique cumulé à partir du 1^{er} janvier (pluies – ETP) et le potentiel hydrique de base, mesuré sur différents sites. RU : réserve utile en eau des sols. Barres verticales : erreur standard. Chablais (CH), 2002-2003.

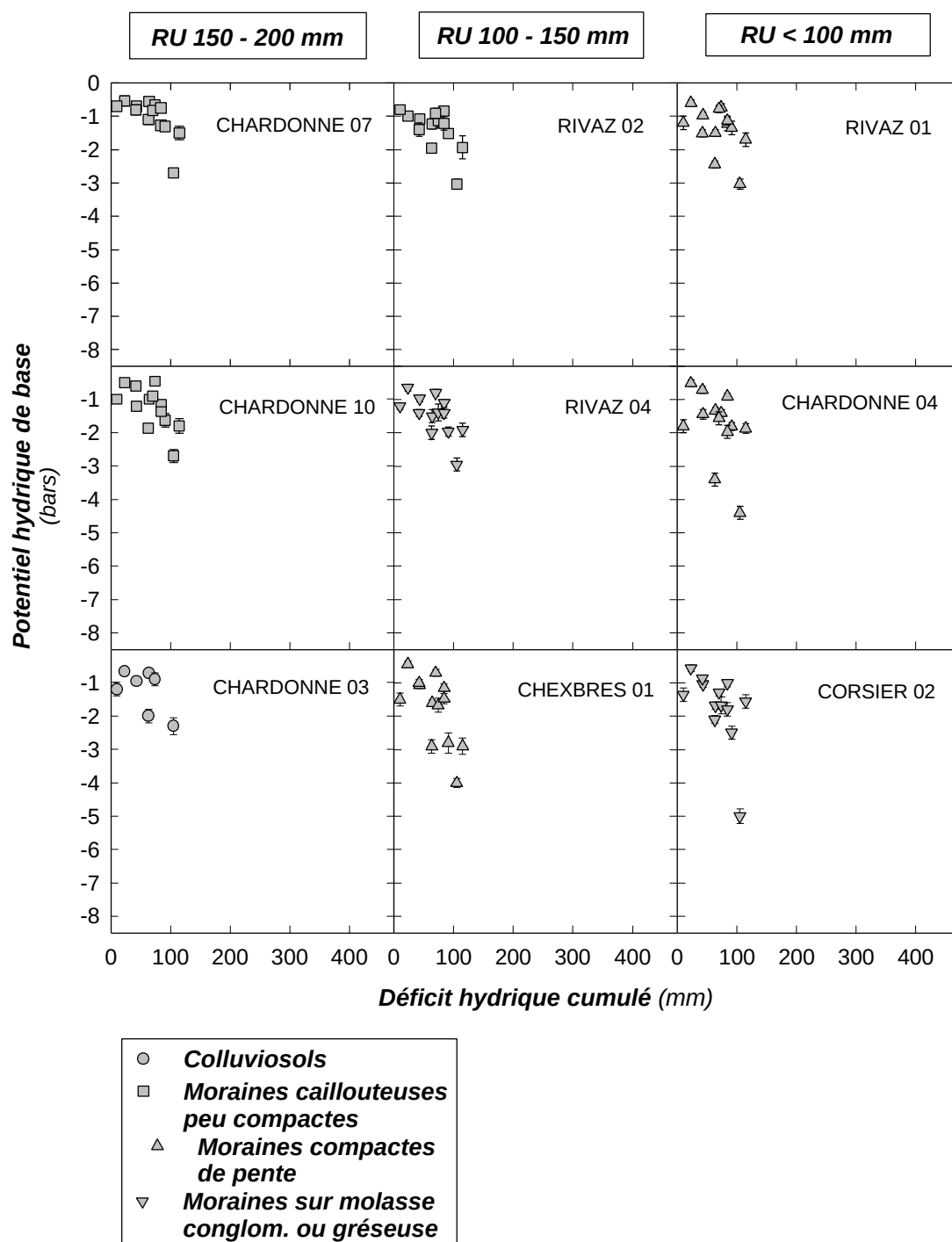


Fig. 24 :Relation établie entre le déficit hydrique cumulé à partir du 1^{er} janvier (pluies – ETP) et le potentiel hydrique de base, mesuré sur différents sites . RU : réserve utile en eau des sols. Barres verticales : erreur standard. Lavaux (CH), 2001-2002.

Dans une étude menée sur un réseau de parcelles de Pinot noir à Chamoson, Spring et Murisier (2004) ont également mis en évidence une relation entre le déficit hydrique cumulé et le régime hydrique de la vigne. Ces auteurs estiment qu'une modélisation des niveaux de contrainte hydrique subie par la plante en fonction des déficits

hydriques calculés semble envisageable avec une assez bonne précision. Les limites actuelles d'une telle modélisation résident toutefois dans l'estimation des pertes en eau liées au ruissellement de surface (vigne en forte pente, type de couverture en surface des sols), des flux d'eau en profondeur ou latéraux et à la transpiration de la culture intercalaire par exemple. Une meilleure prise en compte de la transpiration réelle du feuillage et de l'évaporation du sol (ETR) selon la méthodologie formulée par Carbonneau (1998) pourrait également apporter des précisions supplémentaires. Dans l'élaboration du déficit hydrique cumulé, seule la valeur de l'ETP a été prise en compte.

Bilan hydrique potentiel et potentiel de base

L'établissement d'un bilan hydrique potentiel (Carbonneau, 1998 ; Riou *et al.*, 1994) s'avère intéressant pour analyser le comportement hydrique de la vigne, mais délicat à réaliser dans notre étude en raison des difficultés inhérentes aux vignes en pente (ruissellements, apports d'eau latéraux ...).

La figure 25 représente néanmoins la relation observée entre le bilan hydrique potentiel ($RU + \text{Pluies} - T_v - E_s$) et le Ψ_{base} de la vigne, mesuré au cours des saisons 2001 à 2003 à la Côte. Les résultats des autres régions pilotes ne sont pas représentées pour des raisons de redondance. On peut remarquer que la contrainte hydrique demeure nulle ($\Psi_{\text{base}} > -1,5$ bar) tant que le bilan hydrique potentiel s'avère positif (>0) quel que soit le type de sol ou la réserve utile des sites. La contrainte devient modérée ($\Psi_{\text{base}} = -3$ bars) chez la vigne lorsque le bilan hydrique potentiel s'établit autour de -150 mm dans la majorité des sites à l'étude. Les exceptions concernent à nouveau les peyrosols sableux dont la contrainte modérée est atteinte avec des valeurs de -100 mm de bilan hydrique potentiel. Le site de Vinzel 03 constitue également une particularité en maintenant une contrainte hydrique faible sur une large gamme de déficit hydrique ou de bilan hydrique potentiel largement négatif. L'apparition d'une contrainte hydrique forte ($\Psi_{\text{base}} > -5$ bars) se manifeste pour des valeurs inférieures à -250 mm environ de bilan hydrique potentiel (exceptés chez les peyrosols sableux chez lesquels la contrainte forte apparaît avec des valeurs de -200 mm).

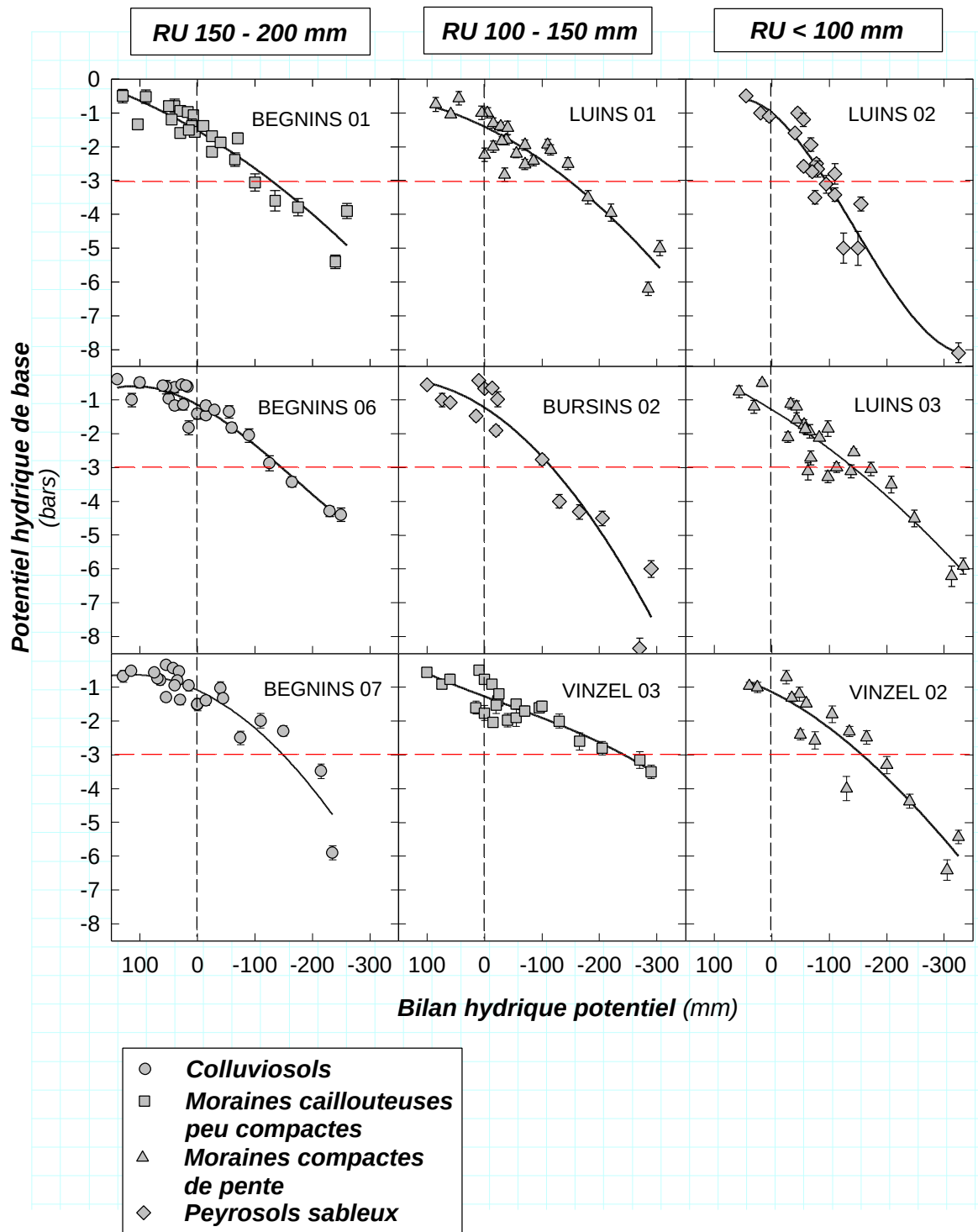


Fig. 25 : Relation établie entre le bilan hydrique potentiel ($RU + \text{pluies} - Tv - Es$) et le potentiel hydrique de base, mesuré sur différents sites. RU : réserve utile en eau des sols. Barres verticales : erreur standard. La Côte (CH), 2001-2003.

La figure 26 illustre la relation établie entre le bilan hydrique potentiel et le ψ_{base} de la vigne, mesuré en cours de saison sur les principaux terroirs des quatre zones pilotes.

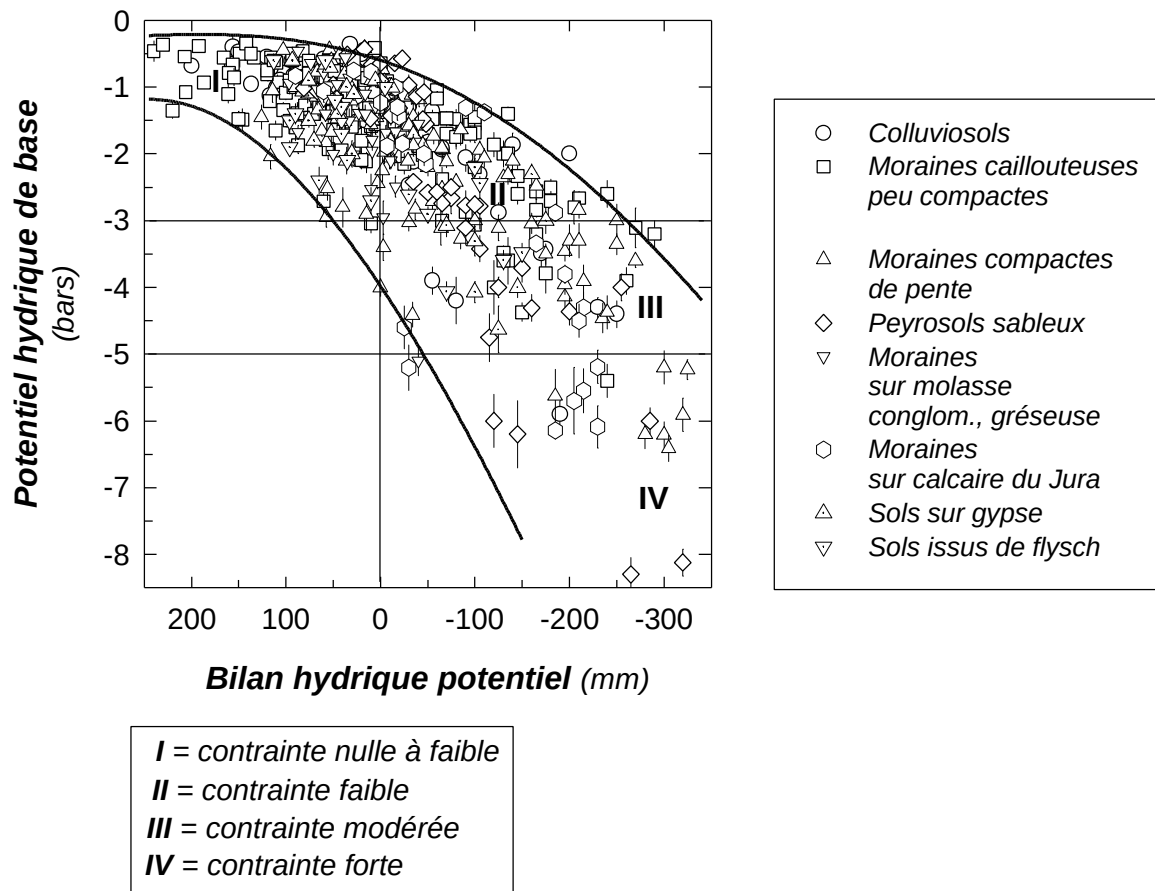


Fig. 26 : Relation établie entre le bilan hydrique potentiel ($RU + \text{pluies} - Tv - Es$) et le potentiel hydrique de base sur les divers sites et types de sols. $n = 4100$ mesures. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, 4 zones pilotes du Canton de Vaud (CH), 2001-2003.

Aussi longtemps que le bilan hydrique potentiel demeure positif, on observe une absence de contrainte hydrique ($\psi_{\text{base}} > -3.0$ bars) chez la vigne quel que soit le type de sols (courbe enveloppe interne). Lorsqu'il devient négatif (la RU et les précipitations ne couvrant plus l'évapotranspiration de la plante et du sol), les valeurs du ψ_{base} deviennent de plus en plus négatives et traduisent l'apparition de la contrainte hydrique. La courbe enveloppe externe indique que la contrainte hydrique peut demeurer faible ($\psi_{\text{base}} > -3.0$ bars) jusqu'à ce que le bilan hydrique atteigne environ 250 mm de déficit. Au-delà, la vigne témoigne pour toutes les situations étudiées un début de contrainte modérée ($\psi_{\text{base}} < -3.0$ bars).

On note cependant que pour un même bilan hydrique, la réponse de la vigne (mesure du Ψ_{base}) peut être très disparate en fonction du type de sols, de sa nature et de nombreux facteurs liés à la déclivité et au ruissellement par exemple.

Relation établie entre le potentiel de base et le potentiel de tige minimal

Nos observations, menées sur les différents sites durant les années 2001-2003, montrent qu'il existe une relation linéaire entre le potentiel de base (Ψ_{base}) et le potentiel de tige (fig. 27), mesuré durant le moment le plus chaud de la journée ($\Psi_{\text{TIGE MIN}}$).

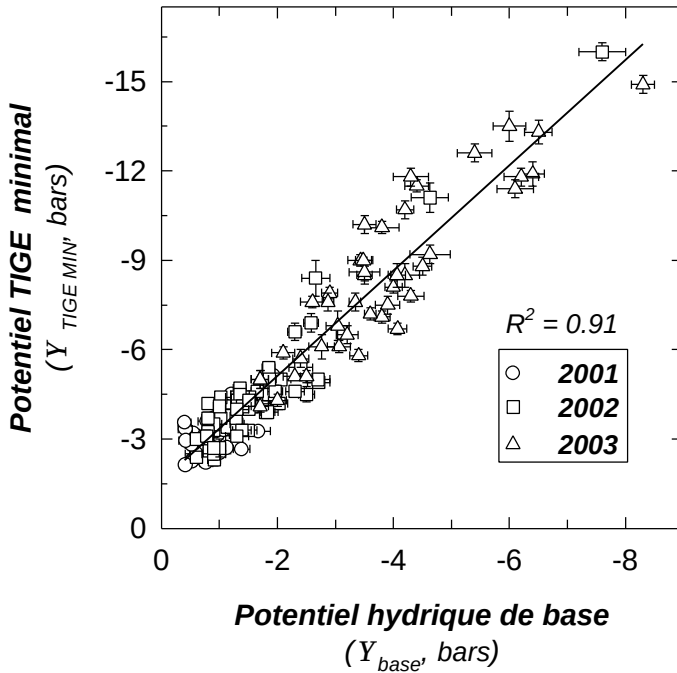


Fig. 27 : Relation établie entre le potentiel hydrique de base (Ψ_{base}) et le potentiel de tige minimal ($\Psi_{\text{TIGE MIN}}$) sur les différents sites à l'étude. Barres verticales et horizontales : erreur standard. Température de l'air comprise entre 25-32°C, l'humidité relative mesurée entre 35-50%, éclaircissement saturant PAR >1200 mmol photons m⁻²s⁻¹, ETPj comprise entre 4.5 et 5.5 mm. Chasselas, Canton de Vaud (CH), 2001-2003.

La relation a été établie dans des conditions météorologiques bien définies et comparables entre les sites concernant la mesure du $\Psi_{\text{TIGE MIN}}$ (température de l'air comprise entre 25-32°C, l'humidité relative mesurée entre 35-50%, éclaircissement saturant PAR >1200 μmol photons m⁻²s⁻¹, ETPj comprise entre 4.5 et 5.5 mm).

Une valeur de -3 bars, mesurée au Ψ_{base} (début d'un stress modéré), correspond à un $\Psi_{\text{TIGE MIN}}$ d'environ -7.0 bars. Une contrainte forte, notée au Ψ_{base} à -5.0 bars, représente une valeur de -10.5 bars au $\Psi_{\text{TIGE MIN}}$.

Cette relation mériterait d'être confirmée par des mesures réalisées avec différents cépages et dans diverses conditions pédo-climatiques. L'établissement de seuils fiables concernant le $\Psi_{TIGE\ MIN}$ serait intéressant dans la perspective d'un allègement des mesures hydriques effectuées chez la vigne par rapport à la mesure du Ψ_{base} réalisée de nuit.

Teneur en eau des sols et potentiel hydrique de base

Des observations, menées sur la teneur en eau de quelques sols durant le mois d'août 2003 à Begnins, Bonvillars et Ollon, ont montré qu'il existait une relation entre l'alimentation hydrique de la vigne (Ψ_{base}) et la teneur relative et moyenne en eau des différents horizons d'un sol (résultats non présentés). Les conditions climatiques très chaudes et très sèches de l'été 2003 ont entraîné des teneurs relatives en eau inférieures à 10% dans certains sols. Sur ces sites, on observait une contrainte modérée à forte chez la vigne. Sur les 2 sites dont la teneur en eau s'élevait à environ 15%, la vigne ne traduisait par contre qu'une contrainte faible.

Ces résultats préliminaires doivent être confirmés par d'autres mesures réalisées en cours de saison et de dessèchement des sols sur des sites différents quant à leur texture et leur réservoir en eau.

Discrimination isotopique du carbone (DC13) et alimentation hydrique de la vigne

L'apparition d'une contrainte hydrique entraîne une diminution du potentiel hydrique foliaire mesurée au vignoble à l'aide de la chambre à pression. Cette technique fiable reste cependant astreignante et réservée à la recherche.

La restriction en eau provoque un ralentissement de la croissance végétative mais aussi la fermeture progressive des stomates des feuilles au travers desquels se réalisent des échanges (notamment l'eau et CO_2) avec l'atmosphère. En situation de contrainte hydrique, la vigne développe une stratégie d'économie de l'eau dont les conséquences

sur le fonctionnement de la photosynthèse sont perceptibles. Le carbone du CO_2 est naturellement présent sous la forme de deux isotopes le ^{12}C et le ^{13}C respectivement à une abondance de 98,9% et 1,1% (Farquhar *et al.* 1989). Le processus photosynthétique incorpore de façon préférentielle l'isotope ^{12}C qui est plus léger. L'isotope ^{13}C , plus lourd, se trouve en quantité moins abondante dans la plante que dans le CO_2 atmosphérique. La restriction en eau subie par la plante, entraînant la fermeture progressive des stomates, ralentit les échanges de CO_2 entre la feuille et l'atmosphère : on observe, dans ce cas, une atténuation de la capacité des enzymes de la photosynthèse à discriminer les isotopes du carbone (Farquhar *et al.* 1982). (isotopes : atomes d'un même élément chimique, dans notre cas le C, ne différant que par les masses de leurs noyaux).

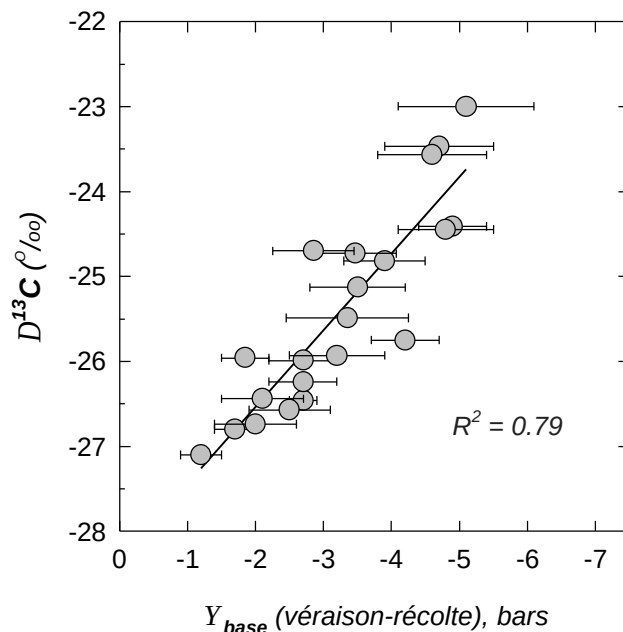


Fig. 28 : Relation établie entre le rapport isotopique du C (DC13) dans les sucres des moûts à la vendange et les valeurs du Y_{base} , mesuré durant la période de la maturation à la récolte sur un réseau de 21 parcelles. Barres horizontales : erreur standard. Chasselas, Canton de Vaud (CH), 2003.

Une plante soumise à une contrainte hydrique présente une teneur en ^{13}C qui se rapproche de celle du CO_2 atmosphérique. Le rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (appelé ΔC13) s'apparente, dans ces conditions, à celui du CO_2 de l'air. Le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, mesuré dans les produits primaires de la photosynthèse (sucres, acide tartique ...) varie en fonction du régime hydrique subie par la vigne au moment de leur synthèse (Gaudillère *et al.* 1999).

Dans notre étude, l'évaluation d'une relation entre le rapport ΔC13 , mesuré sur les sucres du moût à maturité, et le niveau de contrainte hydrique subie par la vigne, durant la maturation du raisin a été effectuée. La corrélation obtenue entre le rapport

$\Delta C13$ et le potentiel hydrique de base moyen, mesuré à cinq reprises en cours de maturation du raisin, a été très significative en 2003 (fig.28). Les valeurs de plus en plus négatives du $\Delta C13$ correspondent à une absence de contrainte hydrique. A l'inverse, les valeurs faiblement négatives s'apparentent à une restriction en eau subie par la plante. Les valeurs du $\Delta C13$ varient entre -20 et -30 pour mille dans la majorité des études réalisées sur la vigne (Gaudillère et van Leeuwen, 2000). Divers auteurs (Gaudillère *et al.*, 1999, Choné 2001, van Leeuwen *et al.* 2001, Trégoat 2003) ont montré que la discrimination isotopique du carbone dans les sucres des raisins était étroitement corrélée au régime hydrique observé sur la vigne durant la maturation (phase d'accumulation des sucres dans les baies). Nos observations corroborent en tous points ces différentes études. Une relation a également pu être établie entre le potentiel de tige minimal ($\Psi_{TIGE\ MIN}$), mesuré durant le moment le plus chaud de la journée et à deux reprises durant la maturation, et le rapport $\Delta C13$ (fig. 29). Des résultats identiques ont été obtenus dans une étude de terroirs à Bordeaux avec le cépage Merlot (Trégoat, 2003).

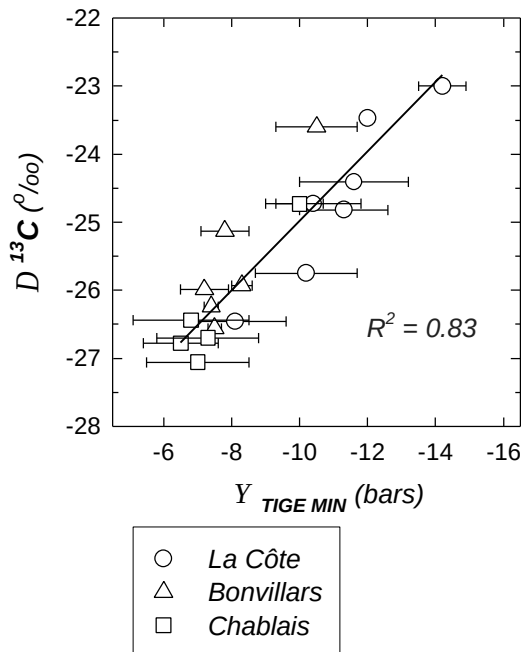


Fig. 29 : Relation établie entre le rapport isotopique du C ($\Delta C13$) dans les sucres des moûts à la vendange et les valeurs du $Y_{TIGE\ MIN}$, mesuré durant la période de la maturation (à 2 reprises) sur un réseau de 18 parcelles à La Côte, Bonvillars et dans le Chablais. Barres horizontales : erreur standard. Chasselas, Canton de Vaud (CH), 2003.

Globalement, le rapport $\Delta C13$ est assez bien corrélé avec le bilan hydrique potentiel, estimé durant la période véraison – récolte (résultats non présentés). La relation est certes un peu moins étroite ($R^2 = 0,70$) qu'entre le $\Delta C13$ et les valeurs du potentiel hydrique de base ou de tige. La difficulté d'établir un bilan hydrique fiable dans des

situations de pente, de ruissellement et d'apports d'eau latéraux explique en partie que la relation s'avère moins significative.

Divers auteurs (van Leeuwen *et al.* 2001, Yunianta *et al.* 1995) ont constaté qu'il existait un effet cépage dans la relation $\Delta C13$ et l'alimentation hydrique de la vigne, qui traduirait une efficience de l'eau plus ou moins marquée en fonction de la variété. La sensibilité de certains porte-greffes à la sécheresse pourrait être également étudiée au moyen de la mesure du rapport $\Delta C13$ notent Gaudillère *et al.* (1999).

Le niveau de contrainte hydrique endurée par la vigne dépend de la nature du sol (texture, profondeur), de sa réserve en eau, du climat (pluies et ETP) et du végétal. Diverses études ont mis en évidence que les variations du rapport $\Delta C13$ permettaient de différencier les sols suivant leur comportement hydrique en relation avec leur réserve utile (RU). Le rapport $\Delta C13$ peut donc rendre compte de l'effet « terroir » notent van Leeuwen *et al.* (2001). Cette propriété, relèvent ces mêmes auteurs, est d'autant plus intéressante que les mesures peuvent être mises en œuvre sur un grand nombre de parcelles pour un coût relativement faible. L'intérêt de cet indicateur ($\Delta C13$) réside de toute évidence dans sa grande accessibilité en comparaison avec les indicateurs classiques du régime hydrique de la vigne que sont les potentiels hydriques foliaires (ou l'humidimètre à neutrons). Cette technique pourrait constituer un outil de choix à l'avenir pour l'étude des terroirs viticoles. Dans ses conditions, il serait toutefois judicieux de poursuivre les investigations concernant la fiabilité de cette approche lors des prochaines années pour valider l'application de cet outil de diagnostic.

Modèle de bilan hydrique

En complément des outils de diagnostic de la contrainte hydrique que représentent la chambre à pression (mesure des potentiels hydriques foliaires), les appareils de mesure des échanges gazeux du feuillage et la discrimination isotopique du carbone, un modèle de bilan hydrique (Riou et Lebon 2000, Riou et Payan, 2001, Lebon *et al.*, 2003) a été testé dans notre étude.

Le modèle de bilan hydrique repose sur un fonctionnement de type « réservoir » (Riou et Payan, 2001 ; Payan *et al.*, 2003) et considère le sol comme un réservoir qui se remplit grâce aux précipitations et se vide en fonction de la demande climatique (évapotranspiration réelle, ETR). Les limites actuelles d'un tel modèle résident toutefois dans l'absence de prise en compte des flux hydriques liés aux remontées capillaires et aux mouvements d'eau souterrains et de ruissellement. La transpiration de la végétation est intégrée au modèle : un coefficient cultural propre à chaque parcelle est défini en cours de saison. Ce dernier est fondé sur les caractéristiques géométriques de la végétation (hauteur, épaisseur, porosité) ainsi que sur l'orientation des rangs (important pour l'interception de l'énergie lumineuse). L'évaporation du sol fait également partie intégrante du modèle. Par contre, la transpiration de la culture intercalaire (par exemple la couverture herbeuse) n'y est pas estimée.

A partir de ces éléments, il s'avère possible, notent Payan *et al.* (2003), de suivre quotidiennement l'évolution du bilan hydrique qui reflète une estimation du niveau de remplissage de la réserve en eau du sol selon le principe suivant : la quantité d'eau disponible dans le sol au jour « j » ($ATSW_j$, available transpirable soil water) est égale à la quantité présente la veille ($ATSW_{j-1}$) augmentée des précipitations (P) et diminuée des pertes issues de l'évapotranspiration (ETR).

$$ATSW_j = ATSW_{j-1} + P - ETR$$

Dans cette équation, l'ETR comprend la transpiration de la végétation (T_v) et l'évaporation du sol (E_s).

$$ETR = T_v + E_s$$

Le modèle permet également d'intégrer la régulation de la transpiration de la vigne lorsque le sol s'assèche (Lebon *et al.*, 2003 ; Trambouze 1996). La méthodologie établie autour du bilan hydrique permet d'estimer la réserve offerte par le sol. La démarche consiste à combiner les informations issues des outils de diagnostic (ex. mesure du Ψ_{base}) avec la modélisation climatique.

Lebon *et al.* (2003) ont ainsi proposé une relation entre la fraction d'eau du sol disponible pour la plante (FTSW, fraction of transpirable soil water, obtenue par relevés neutroniques) et la mesure du Ψ_{base} qui reflète le niveau de contrainte hydrique subie par la vigne (fig. 30).

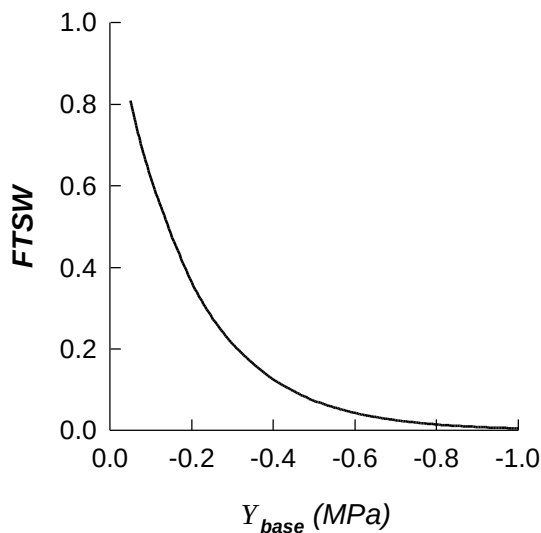


Fig. 30 : Variation du potentiel hydrique foliaire de base (Ψ_{base}) en fonction de la fraction d'eau du sol disponible pour la vigne (FTSW, fraction of transpirable soil water), obtenue par relevés neutroniques. Relation établie avec différents cépages (syrah, merlot, gewurztraminer) en France. D'après Lebon *et al.*, (2003).

La FTSW est définie comme le rapport entre la quantité d'eau du sol utilisable à un moment donné et la quantité totale d'eau pouvant être utilisée lorsque le sol est hydraté à son maximum. La FTSW varie entre 0 et 1, et indique le pourcentage d'eau disponible pour la vigne : $\text{FTSW} = \text{ATSW} / \text{TTSW}$

FTSW : fraction d'eau du sol utilisable par la plante (Fraction of transpirable soil water).
 ATSW : quantité d'eau du sol utilisable par la plante à un moment donné (Available transpirable soil water).
 TTSW : quantité totale d'eau du sol utilisable (Total of transpirable soil water).

La quantité maximale d'eau utilisable dans le sol (TTSW), qui correspond globalement à la RU, est déduite de la relation établie entre la FTSW et le Ψ_{base} .

- Application du modèle à la parcelle

Le développement du modèle repose sur l'acquisition de données simples et accessibles, caractérisant la parcelle sur les plans climatiques et agronomiques (précipitations, ETP, stades phénologiques, gabarit de la végétation). Ces différents paramètres déterminent des coefficients culturaux d'interception du rayonnement solaire, de réduction de la transpiration de la végétation en période de dessèchement des sols et de l'intensité de l'évaporation direct du sol (Lebon *et al.*, 1995 ; Riou et Lebon, 2000). Une interprétation du modèle de bilan hydrique a été réalisée sur différentes parcelles du réseau de l'étude des terroirs viticoles vaudois (exemples de la zone pilote de la Côte, fig. 31-33) afin de tester la pertinence et la validité de la méthodologie.

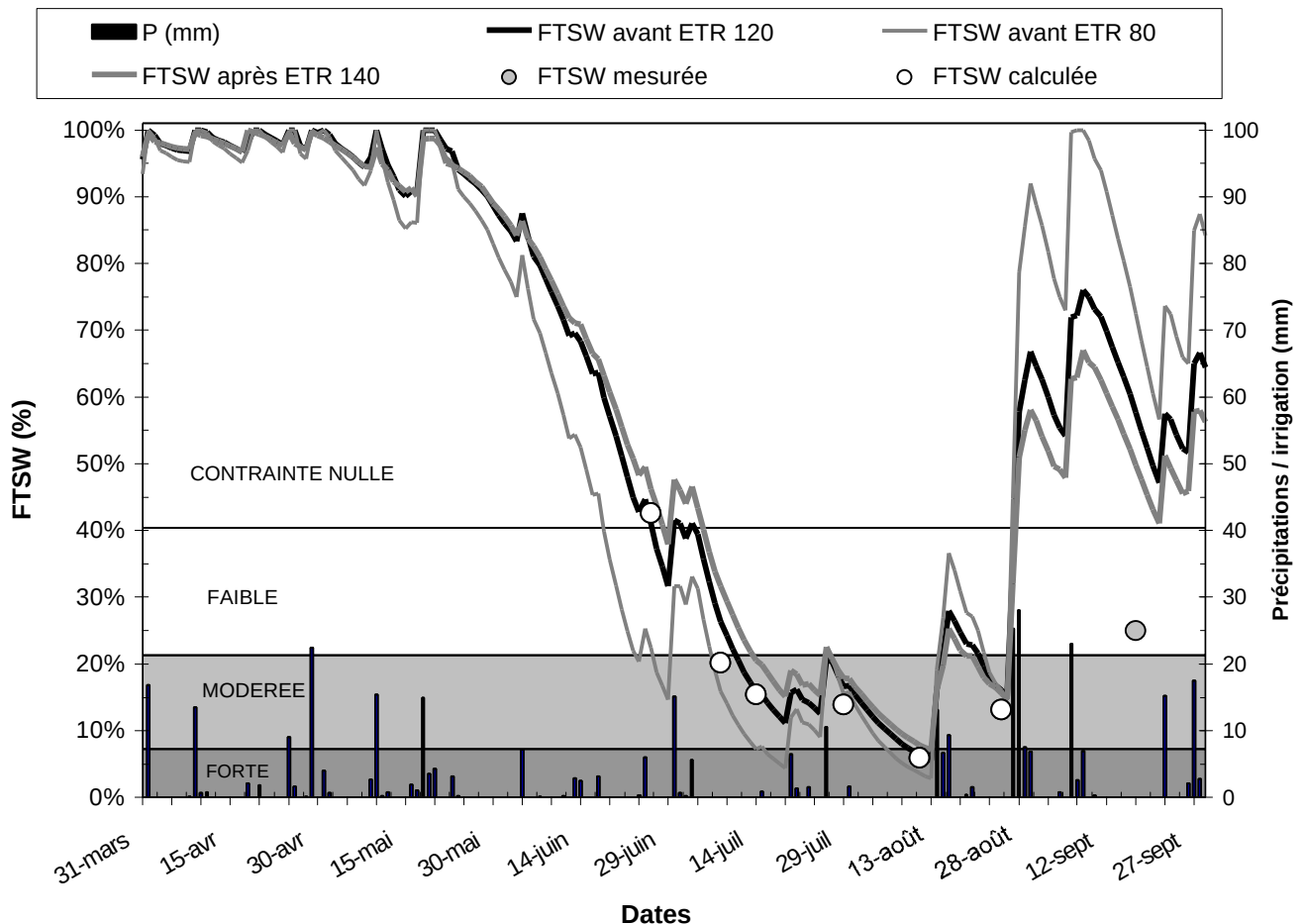


Fig. 31 : Exemple de bilan hydrique modélisé selon Riou et Payan (2001) et Lebon *et al.* (2003). Suivi de la FTSW (fraction d'eau du sol utilisable par la plante) au cours de la saison 2003 avec 3 options de TTSW optimisée (quantité maximale d'eau utilisable dans le sol) : soit 120 mm (ligne noire), 140 mm (ligne grise épaisse), et 80 mm (ligne grise fine). Les cercles représentent les FTSW calculées en fonction des mesures du Y_{base} . P : précipitations, ETR : évapotranspiration réelle de la vigne et du sol. Chasselas, parcelle de Begnins 01, La Côte (CH), 2003.

La figure 31 présente une application du modèle de bilan hydrique au cours de la saison 2003 sur une parcelle du réseau (Begnins 01). Les mesures du Ψ_{base} , traduites en FTSW calculées selon Lebon *et al.* (2003), permettent de caler les simulations de la FTSW (fraction d'eau du sol utilisable par la plante) au cours de la période de végétation. On observe que l'hypothèse d'une TTSW (quantité maximale d'eau du sol utilisable) de l'ordre de 120 mm correspond à une bonne simulation de la FTSW en relation avec les mesures de Ψ_{base} réalisées sur la vigne.

La valeur de TTSW reflète la quantité maximale d'eau du sol utilisable, c'est-à-dire du volume de sol prospecté par les racines : la valeur de la TTSW est ainsi généralement inférieure à celle de la RU. Par ailleurs, le modèle de bilan hydrique ne tient pas compte de la transpiration de la couverture herbeuse intercalaire, ni des pertes en eau par ruissellement : l'absence de prise en compte de ces deux paramètres contribue également à accroître les différences d'estimation entre la TTSW et la RU. La méthodologie proposée devrait néanmoins permettre l'obtention de résultats fiables en terme de simulation de la TTSW de façon intra et inter-annuelle. L'acquisition continue de nouvelles données au cours des saisons vise à accroître la fiabilité du diagnostic et de proposer à l'avenir un outil pratique de suivi de l'alimentation hydrique des parcelles.

Le bilan hydrique, associé à des mesures effectuées sur la vigne, présente l'avantage de discriminer les niveaux de contrainte hydrique au travers de ses trois composantes que sont la précocité, la durée et l'intensité. On obtient ainsi, relèvent Payan *et al.* (2003), une image réelle du vécu de l'alimentation en eau de la plante en cours de saison. La figure 32 illustre l'évolution de la FTSW au cours de trois saisons végétatives (2001-2003) sur la parcelle de Begnins 01. On remarque, selon le modèle, que l'assèchement du sol a été plus rapide et surtout plus prononcé en 2003 que pour les autres millésimes. En 2001 et 2002, le pourcentage de la FTSW est demeuré élevé tout au long de la période de végétation. L'estimation moyenne (années 2001-2003) de la réserve hydrique maximale du sol en eau utilisable par la plante (TTSW, valeur déterminée par couplage du modèle de bilan hydrique à des valeurs de Ψ_{base}) s'est élevée à 125 mm (± 30 mm). La RU du site de Begnins 01 avait été estimée à 150 mm par les pédologues (Letessier et Fermond, 2004).

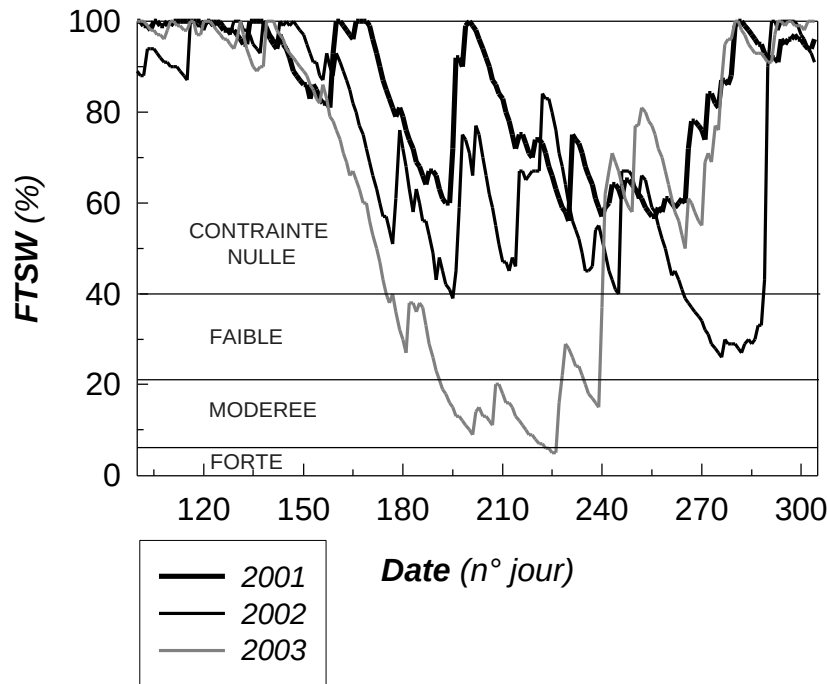


Fig. 32 : Evolution de la FTSW (fraction d'eau du sol utilisable par la plante) et discrimination des millésimes par le bilan hydrique en cours de saison selon le modèle de Riou et Payan (2001) et Lebon et al. (2003). Chasselas, parcelle de Begnins 01, La Côte (CH), 2001-2003.

Un exemple d'évolution de la FTSW de différentes parcelles du réseau à la Côte au cours de la saison 2003 est exposé à la figure 33. On observe aisément l'assèchement très rapide et prononcé du site de Luins 02, simulé par le modèle, autour de la fin de juin (n° jour 180) jusqu'à la mi-août (n° jour 220), période durant laquelle le niveau de la contrainte a été modéré à fort. A l'opposé, le site de Begnins 07 a subi une évolution progressive du dessèchement du sol jusqu'à la mi-août : les autres sites montrant une situation intermédiaire à ces deux extrêmes. Les précipitations de la fin d'août (n° de jour 240) ont entraîné une élévation brutale de la FTSW sur l'ensemble du réseau. Selon le modèle, le niveau de la contrainte a été très faible durant le mois de septembre. Les mesures de l'alimentation en eau, réalisées sur la vigne, indiquaient toutefois une contrainte faible à la même époque dans la majorité des cas, et modérée sur quelques sites à RU restreinte.

L'estimation de la TTSW (réserve hydrique maximale du sol, utilisable par la plante), réalisée au travers du bilan hydrique et des mesures du Ψ_{base} , a été comparée à celle de la RU (réserve utile en eau du sol) proposée par les pédologues (Letessier et Fermond, 2004). Les résultats préliminaires, obtenus à la Côte sur une dizaine de sites (tableau 23), montrent une bonne concordance entre l'estimation de la RU des sols et celle de la TTSW, simulée durant la saison 2003 ainsi que sur une moyenne des saisons 2001-

2003. Les valeurs de la TTSW sont en général un peu moins élevées que celles de la RU des sols. La simulation de la TTSW présente également des variations de résultats inter-annuelles parfois importantes. Néanmoins, ces premières observations sont encourageantes et l'amélioration envisagée du modèle par la prise en compte de la transpiration de la culture intercalaire et des flux d'eau de ruissellement par exemple permettra sans aucun doute d'accroître la fiabilité d'un tel outil de diagnostic de la contrainte hydrique.

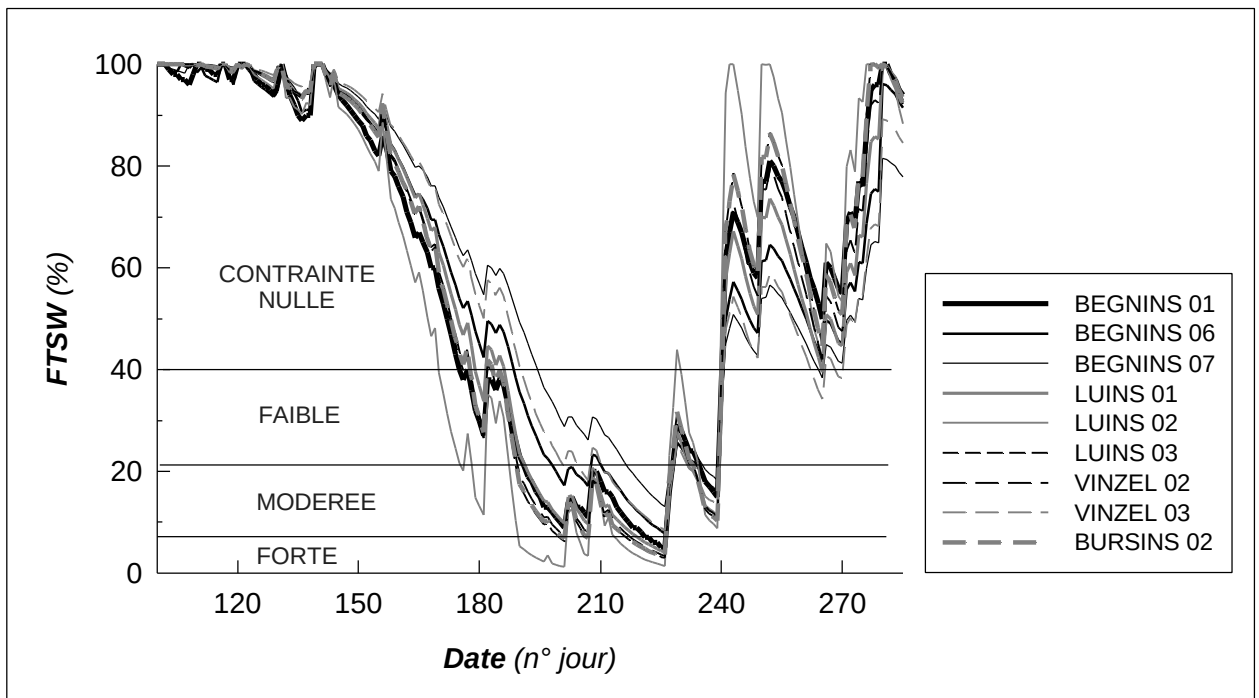


Fig. 33 : Evolution de la FTSW (fraction d'eau du sol utilisable par la plante) en cours de saison 2003 sur différentes parcelles selon le modèle de bilan hydrique proposé par Riou et Payan (2001) et Lebon et al. (2003). Chasselas, La Côte (CH), 2003.

La validation du modèle s'appuie sur l'utilisation directe de la plante comme indicateur des potentialités hydriques du milieu et nécessite une analyse du profil racinaire, considéré comme stable et achevé (vigne adulte). Le paramétrage du bilan, réalisé par la relation établie entre le Ψ_{base} et la FTSW (Lebon *et al.*, 2003), suppose de connaître des niveaux de contrainte modérée à forte pour être représentatif, notent ses concepteurs. Il serait par ailleurs intéressant de connaître s'il existe un effet variétal (ex. Chasselas sensible à la contrainte hydrique) dans la relation obtenue entre le Ψ_{base} et la FTSW. Selon les premières études (Lebon *et al.*, 2003 ; Pellegrino, 2003), l'aspect variétal n'a que peu d'effet sur cette relation.

Parcelles	RU (mm)	TTSW (mm) 2003	TTSW (mm) f 2001-2003
Begnins 01	150	120	125 ± 30
Begnins 06	160	150	165 ± 35
Begnins 07	>150	170	190 ± 40
Luins 01	115	130	110 ± 20
Luins 02	65	50	70 ± 25
Luins 03	80	90	100 ± 15
Vinzel 02	80	110	-
Vinzel 03	120	150	160 ± 30
Bursins 02	125	90	-
Dully 02	85	-	80 (en 2002)

Tableau 23 : Estimation de la réserve utile en eau des sols (RU) par Letessier et Fermond (2004) et de la quantité totale d'eau du sol utilisable par la plante (TTSW), simulée par le modèle du bilan hydrique (Riou et Payan, 2001 ; Lebon et al., 2003) sur différents sites du réseau des terroirs viticoles vaudois. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2001-2003.

L'utilisation combinée du modèle de bilan hydrique et du Ψ_{base} constitue une première démarche de diagnostic du stress hydrique sur les parcelles de vigne, notent Riou et Payan (2001) : elle devrait permettre d'établir, selon ces auteurs, une caractérisation et une typologie des parcelles en réseau pour le suivi de la contrainte hydrique, la définition des conditions d'alimentation en eau optimales pour une production donnée et la mise au point de règles de décision pour une gestion raisonnée de l'irrigation et des interventions agronomiques (équilibre du rapport feuille-fruit).

Tentative d'estimation du Y de l'environnement racinaire

Mesures hydriques effectuées sur des vignes enveloppées de couvertures isothermiques

L'analyse du déterminisme du potentiel hydrique foliaire lors d'une contrainte hydrique repose sur l'équation décrite par Tardieu *et al.* (1995) :

$$Y_F = Y_S - J_w r_{\text{sol}} - J_w r_{\text{plante}}$$

Où Ψ_F et Ψ_S représentent les potentiels hydriques dans la feuille et dans le sol, J_w étant le flux d'eau à travers la plante, r_{sol} et r_{plante} les résistances au transfert hydrique dans le sol et dans la plante. Le Ψ_F est sous la dépendance d'une part des caractéristiques du

sol, Ψ_{sol} et r_{sol} , d'autre part du flux d'eau et de la résistance au flux à travers la plante. Le Ψ_{sol} est imposé à la plante, tandis que r_{sol} dépend, en plus des caractéristiques hydrodynamiques du sol, de la longueur et de la disposition dans l'espace du système racinaire (Tardieu *et al.*, 1992).

Les végétaux disposent de nombreuses possibilités de régulation et d'adaptation morphologique et physiologique face à l'apparition d'une sécheresse. Une des régulations possibles, à court terme, concerne le flux d'eau à travers la plante (J_w) qui est lié au rayonnement solaire et à l'état hydrique de l'air, mais aussi à la régulation stomatique et à la surface foliaire en place (Tardieu et Dreyer, 1997).

En recouvrant les vignes de bâches iso-thermiques et étanches (photo 1), nous espérons diminuer fortement le flux hydrique à travers la plante par l'obscurcissement de l'environnement et la réduction des échanges gazeux de la végétation, notamment la transpiration du feuillage provoquée par la fermeture progressive des stomates. En théorie, l'utilisation de couvertures iso-thermiques permet de réduire au maximum les termes « J_w » et « r_{plante} » dans l'équation proposée par Tardieu *et al.* (1995), qui représentent le flux d'eau et les résistances au transfert hydrique dans la plante. Demeure néanmoins r_{sol} (résistance au transfert d'eau dans le sol) dont l'influence s'exerce sur les capacités d'extraction racinaire de l'eau. Toutefois, si le flux hydrique à travers la plante est suffisamment réduit, le Ψ_F s'apparente de plus en plus au Ψ_s , diminué des résistances à la circulation d'eau dans le sol, c'est-à-dire au Ψ de l'environnement racinaire.



Photo 1 : Vignes recouvertes de bâches iso-thermiques. Chasselas, Pully (CH), 2002.

Les premiers essais ont consisté à recouvrir les vignes de bâches iso-thermiques en fin de journée et à effectuer des mesures de Ψ_F et de Ψ_{base} sur des feuilles de vigne bâchée et non bâchée durant la nuit et la journée suivante. Les résultats de cette technique ont montré que les valeurs du Ψ_{ALU} , observées sur des feuilles de vigne bâchées, étaient systématiquement moins négatives que le Ψ_{base} (fig. 34).

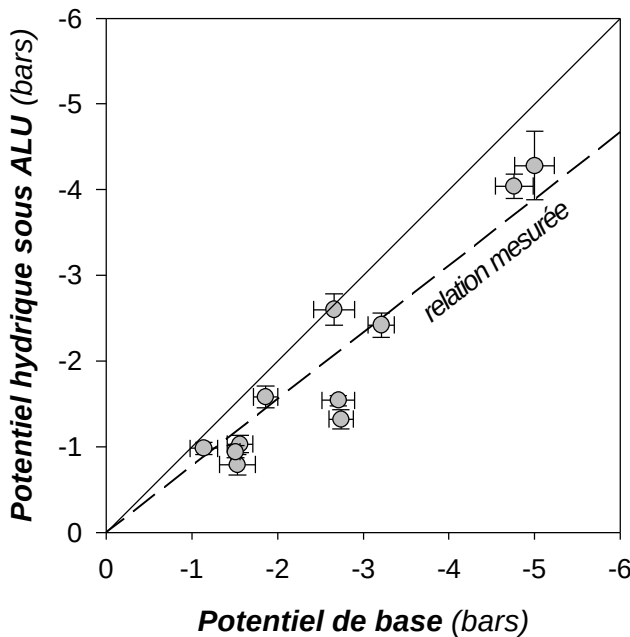


Fig. 34 : Relation mesurée entre le potentiel hydrique de base (Ψ_{base}) et les valeurs du potentiel hydrique foliaire, observées sous les vignes bâchées (potentiel ALU). Barres verticales et horizontales : erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2002-2003.

En cours de journée, les valeurs de Ψ_{ALU} (feuilles de vignes bâchées) demeuraient quasiment stables (ou augmentaient légèrement durant la période la plus chaude du jour) et s'approchaient des valeurs de Ψ_{base} observées la nuit précédente (résultats non présentés). Ces essais ont été menés à plusieurs reprises durant les saisons 2002 et 2003 sur des sols dont la RU varie de 70 à 160 mm. Il est à noter que la contrainte hydrique, enregistrée dans ces expérimentations, s'est avérée faible à modérée.

Les mesures effectuées durant l'été 2003 lors d'une contrainte plus importante qu'en 2002 montrent des résultats identiques (tableau 24). Les mesures d'échanges gazeux (respiration obscure et transpiration du feuillage), réalisées en cours de nuit, indiquent que les flux de CO_2 et d'eau ont été très faiblement diminués lorsque les vignes sont recouvertes de bâches iso-thermiques (tableau 25).

Parcelles	Ψ_{base} (bars) 5h00 – 6h00	Ψ_{ALU} 5h00 – 6h00	Ψ_{ALU} 9h30 – 11h00	Ψ_{foliaire} 9h30 – 11h00
Vinzel 02 (RU 90 mm)	-5.0 $\pm$ 0.2	-4.3 $\pm$ 0.4	-4.4 $\pm$ 0.3	-14.9 $\pm$ 0.2
Vinzel 03 (RU 120 mm)	-3.2 $\pm$ 0.2	-2.4 $\pm$ 0.1	-2.8 $\pm$ 0.2	-9.0 $\pm$ 0.7
Begnins 01 (RU 150 mm)	-4.8 $\pm$ 0.2	-4.0 $\pm$ 0.1	-4.5 $\pm$ 0.1	-14.6 $\pm$ 0.8

Tableau 24 : Mesures du Y_{base} et du potentiel hydrique foliaire sous bâches (Y_{ALU}) et sous vignes non bâchées (Y_{foliaire}) durant la journée du 27.08.2003. Belle journée ensoleillée. $^{\circ}\text{C}_{\text{max}}$: 31.3, humidité relative minimale dans l'après-midi : 37 %. . Moyennes $\pm$ erreur standard. Chasselas, La Côte (CH).

La poursuite de cette expérimentation exige de connaître la température et l'hygrométrie de l'air sous les bâches iso-thermiques ainsi que les flux de sève des vignes bâchées ou non. En effet, l'utilisation de couvertures iso-thermiques entraîne vraisemblablement des perturbations de flux hydriques dans la plante. La poussée radiculaire, observée de nuit, est-elle accentuée par cette technique et infléchit-elle en conséquence les valeurs de Ψ_{ALU} enregistrées? De plus, les valeurs de Ψ_{ALU} reproduisent peut-être uniquement l'état hydrique de l'environnement racinaire le plus humide, de la même façon que le Ψ_{base} traduit les conditions d'alimentation en eau des couches de sols à humidité hétérogène. Il existe par ailleurs différents moyens pour diminuer les transferts d'eau et les échanges gazeux du feuillage en utilisant des sources de refroidissement externe ou des anti-transpirants...

Parcelles	Respiration (R_o , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) Transpiration (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)			
	vigne bâchée (ALU)		vigne non bâchée	
	R_o	E	R_o	E
Vinzel 02 (RU 90 mm)	-0.25 ($\pm$ 0.04)	0.05 ($\pm$ 0.03)	-0.31 ($\pm$ 0.05)	0.11 ($\pm$ 0.06)
Vinzel 03 (RU 120 mm)	-0.55 ($\pm$ 0.05)	0.21 ($\pm$ 0.05)	-0.52 ($\pm$ 0.09)	0.19 ($\pm$ 0.03)
Begnins 01 (RU 150 mm)	-0.28 ($\pm$ 0.04)	0.08 ($\pm$ 0.01)	-0.33 ($\pm$ 0.04)	0.08 ($\pm$ 0.01)

Tableau 25 : Mesure des échanges gazeux (respiration et transpiration foliaires) durant la nuit sur des vignes recouvertes de bâches iso-thermiques (ALU) ou non bâchées. Moyennes $\pm$ erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 27 août 2003.

4.3 Phénologie et cycle végétatif

La précocité d'un terroir est une condition déterminante de ses potentialités viticoles, particulièrement dans une zone climatique septentrionale. En effet, la durée de maturation du raisin est parfois limitée dans le temps par des conditions climatiques défavorables en fin de cycle (Becker, 1985 ; Morlat, 1989). La connaissance des niveaux de précocité des terroirs constituent un aspect important à étudier.

Débourrement (stade C)

En 2001, les dates de débourrement se sont étalées sur une période allant du 10 avril au 29 avril sur l'ensemble du réseau **à la Côte** (tableau 26).

Types de sols	Parcelles	Altitude (m)	Phénologie et somme des températures de l'air du 1 ^{er} mars à la date du débourrement				
			Débourrement Stade C 2001	S °C (> 0°C) 2001	S °C (>10°C) 2001	Débourrement Stade C 2002	S °C (> 10°C) 2002
Colluviosols de bas de pente	Begnins 06	495	28 avril	456	17.0	23 avril	18.0
	Begnins 07	485	26 avril	427	15.0	19 avril	16.0
	Bursins 01	490	27 avril	440	15.7	23 avril	18.0
	Bursinel 02	410	17 avril	393	17.0	24 avril	22.7
Moraines caillouteuses peu compactes	Begnins 01	550	25 avril	402	12.8	28 avril	28.9
	Vintel 01	510	17 avril	364	13.9	16 avril	12.1
	Vintel 03	520	18 avril	371	12.8	16 avril	12.1
	Vintel 04	525	20 avril	379	12.8	19 avril	12.1
Moraines compactes de pente	Begnins 02	565	26 avril	411	12.8	29 avril	27.6
	Begnins 03	530	25 avril	402	12.8	23 avril	17.1
	Vintel 02	500	13 avril	358	13.9	15 avril	16.0
	Luins 01	515	18 avril	371	12.8	12 avril	11.6
	Luins 03	520	29 avril	459	18.0	22 avril	13.5
	Dully 01	420	20 avril	409	17.0	23 avril	22.7
	Gland 01	460	17 avril	386	15.0	-	
	Bursinel 01	410	11 avril	355	17.0	19 avril	20.1
Peyrosols, sols caillouteux	Luins 02	440	12 avril	364	17.0	18 avril	19.9
	Dully 02	410	10 avril	347	17.0	17 avril	19.9
	Bursins 02	505	18 avril	379	12.8	21 avril	13.5

Tableau 26 : Dates de débourrement de la vigne et somme des températures de l'air actives (> à 10 °C) ou > à 0°C calculées du 1^{er} mars à la date de débourrement (stade C) sur les divers sites. Données météorologiques de Changins, recalculées en fonction de l'altitude des parcelles (0.6°C/100m), La Côte (CH), 2001-2002.

Il ne paraît pas que le type de sol ait joué un rôle très important en 2001 sur la précocité du débourrement. Les facteurs explicatifs de l'échelonnement des dates de débourrement semblent plutôt liés aux conditions climatiques (fig. 35) et à la situation

des parcelles (altitude). Après un mois de mars 2001 particulièrement doux (excédent de 3.0°C sur la température moyenne des 30 ans) qui a permis le départ du débourrement des vignes précoces (faible altitude, bonne exposition sud/sud-ouest), le mois d'avril fut très frais et a provoqué un retard de débourrement dans les parcelles se situant sur les hauteurs du vignoble. En 2002, on observe également un étalement des dates de débourrement sur le réseau de la Côte.

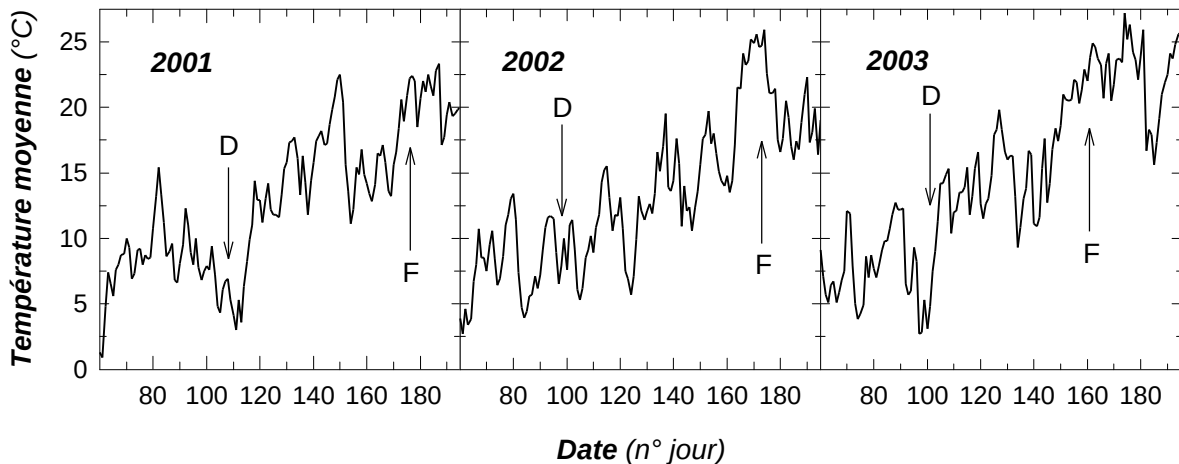


Fig. 35 : Températures moyennes journalières, enregistrées du 1^{er} mars au 15 juillet 2001, 2002 et 2003 à la station météorologique de Changins (CH), 430m. D : débourrement, F : floraison, notés sur le réseau à la Côte.

La tendance générale indique que les sommes de température cumulées, supérieures à 0° et supérieures à 10°C entre le 1^{er} mars et le débourrement (50% des bourgeons au stade C) sont d'autant plus élevées que le site est plus tardif : toutefois, cette tendance semble essentiellement valable pour le seuil thermique calculé à 0°C (tableau 26). Les cumuls thermiques de l'air, calculés sur la base du seuil 10°C (températures physiologiquement actives) sont demeurés très voisins entre les parcelles et les types de sols. Des observations identiques ont été décrites par Lebon (1993).

La température de l'air est généralement évoquée comme jouant un rôle clé sur la date de débourrement. Les travaux de Bouard et Pouget (1971) montrent que les températures basses, inférieures à 10°C, sont efficaces sur la levée de dormance. Pendant la phase de pré-débourrement, la température exerce une action cumulative sur l'évolution physiologique des bourgeons qui progressent ainsi d'une manière irréversible vers le débourrement, notent ces deux auteurs. La phase de pré-

débourrement commence dès le début de janvier sous le climat de Bordeaux par exemple. Selon Pouget (1966, 1967, 1968), une température de 5°C entraîne déjà le débourrement d'un grand nombre de cépages : le temps nécessaire au débourrement des bourgeons latents varie en fonction de la température selon une loi logarithmique entre 5 et 25°C. Chaque cépage semble être caractérisé par des seuils de croissance apparent qui traduisent sa réaction spécifique à la température.

A l'échelle parcellaire ou méso-climatique, Morlat et Hardy (1987) ont montré que la température du sol au niveau de la colonisation préférentielle des racines (-30 à -50cm) était le facteur le plus explicatif des différences de développement au printemps.

Comparaison entre la date de débourrement et l'indice climatique modélisé au printemps

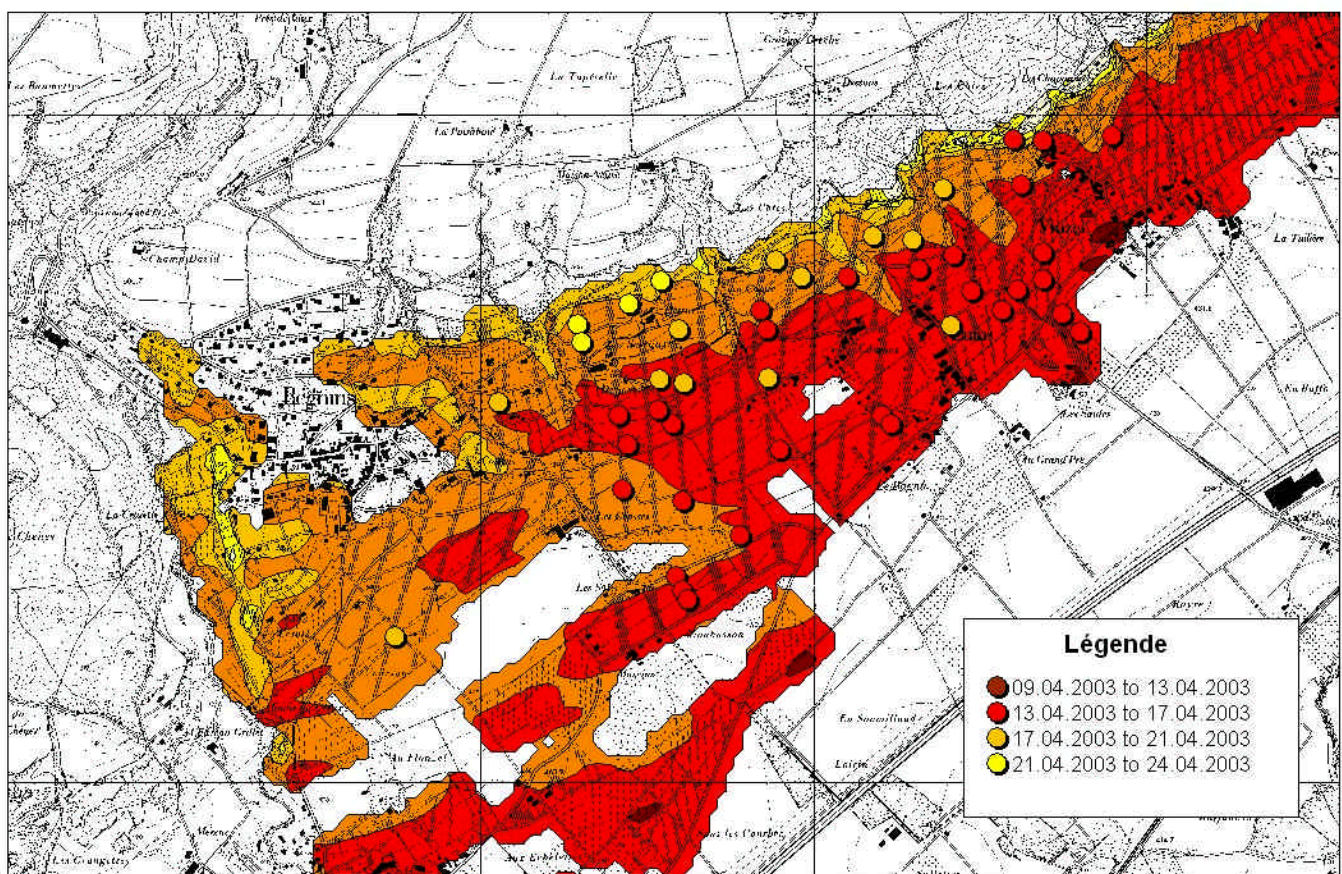


Fig. 36 : Dates de débourrement de la vigne (stade C) sur un réseau élargi de parcelles et indice climatique modélisé au printemps (mois d'avril) selon Pythoud et Caloz (2003). Les intensités de couleur grise sur fond de carte correspondent à des indices climatiques relatifs (gris foncé : zone chaude, gris clair : zone plus fraîche). Chasselas, la Côte (CH), 2003.
 ⌚ Données propriété de l'Etat de Vaud.

La figure 36 représente la date de débourrement de la vigne en 2003 sur différentes parcelles de Chasselas implantées dans les appellations de Begnins, Luins et Vinzel à la Côte en relation avec un indice climatique.

L'élaboration d'un indice climatique modélisé (Pythoud et Caloz, 2003) permet de mettre en évidence que la précocité du stade de débourrement des sites correspond globalement à des situations géographiques plus ou moins chaudes d'un point de vue climatique. Les parcelles les plus précoces au débourrement se rapportent à des zones chaudes, et les moins précoces à des situations plus fraîches en général. L'indice climatique modélisé prend en compte l'influence de l'altitude, du rayonnement potentiel reçu par une surface de sol (en fonction de sa déclivité, de son orientation et des effets d'ombrage projeté par le paysage environnant) ainsi que de l'exposition aux vents dominants. Des effets liés à des courants locaux (descente d'air froid ou chaud provenant de vallons ou combes) ou à des situations micro-climatiques particulières (effets des murs, terrasses, réflexion lumineuse d'un plan d'eau etc.) ne sont pas intégrés dans le modèle et le calcul de l'indice climatique. Enfin, des facteurs se rapportant au sol (pédoclimat thermique et hydrique) sont autant d'éléments importants qui interagissent avec la réponse de la plante.

La nécessité d'affiner et de valider ce modèle par le comportement de la vigne est évidente ; néanmoins, les résultats préliminaires d'une telle étude et les possibilités offertes par les systèmes d'informations géographiques (SIG) laissent présager des applications intéressantes dans le domaine de la climatologie qui a été très peu exploré jusqu'à présent dans les études de terroirs viticoles.

A Lavaux, le débourrement s'est étalé sur une période de 20 jours entre les différentes parcelles en 2001 et une quinzaine de jours en 2002 (tableau 27). Les conditions climatiques du mois d'avril permettent d'expliquer en partie le retard du débourrement observé sur les parcelles situées sur les hauteurs du vignoble. Les facteurs explicatifs concernant les dates de débourrement sont dans un premier temps liés à l'altitude (fig. 37).

Types de sols	Parcelles	Altitude (m)	Phénologie et somme des températures de l'air du 1 ^{er} mars à la date du débourrement			
			Débourrement Stade C 2001	S °C (> 10°C) 2001	Débourrement Stade C 2002	S °C (> 10°C) 2002
Colluviosols de bas de pente	Chardonne 03	525	12 avril	14.8	15 avril	20.9
	Rivaz 07	420	6 avril	19.5	16 avril	29.5
Moraines caillouteuses peu compactes	Chardonne 06	525	21 avril	14.8	15 avril	20.9
	Chardonne 07	560	24 avril	13.5	16 avril	18.3
	Chardonne 10	590	24 avril	12.4	21 avril	16.3
	Rivaz 02	440	5 avril	18.6	7 avril	25.1
	Rivaz 06	520	15 avril	15.0	16 avril	21.3
	St-Saphorin 01	390	6 avril	21.0	4 avril	21.5
	St-Saphorin 02	530	13 avril	14.6	-	-
Moraines compactes de pente	Chardonne 04	540	18 avril	14.2	10 avril	18.3
	Chardonne 08	450	4 avril	18.1	4 avril	17.9
	Rivaz 01	515	21 avril	15.1	21 avril	22.3
	Chexbres 01	480	7 avril	16.7	13 avril	24.4
	Chexbres 02	490	8 avril	16.2	16 avril	23.7
	Corsier 01	480	21 avril	16.7	14 avril	24.4
Peyrosols, sols caillouteux	St-Saphorin 03	555	20 avril	13.7	20 avril	19.0
	Rivaz 04	460	6 avril	17.6	13 avril	26.1
	Rivaz 05	505	6 avril	15.6	19 avril	22.5
	Corsier 02	435	14 avril	18.8	13 avril	28.2

Tableau 27 : Dates de débourrement de la vigne et somme des températures de l'air actives (> à 10 °C), calculées du 1^{er} mars à la date de débourrement (stade C) sur les divers sites. Données météorologiques de Pully, recalculées en fonction de l'altitude des parcelles (0.6°C/100m), Lavaux (CH), 2001-2002.

Les parcelles établies dans la zone d'altitude 375-475 m ont été en effet les plus précoces. Des effets microclimatiques, liés à la proximité des murs, à la déclivité et l'orientation des pentes et à des courants d'air froid ou chaud sont également des éléments déterminants. Dans une même tranche d'altitude par exemple, l'orientation des pentes semble jouer un rôle non négligeable. Les parcelles orientées sud/sud-ouest se sont avérées les plus précoces par rapport à celles exposées au plein sud (fig. 38), tout au moins en début de cycle végétatif.

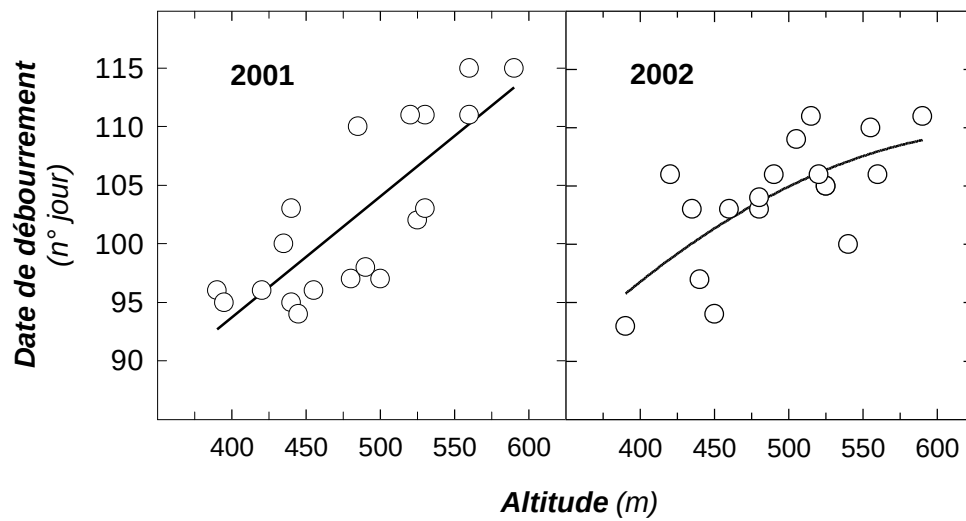


Fig. 37 : Relation établie entre l'altitude des sites et la date de débourrement de la vigne sur un réseau de parcelles à Lavaux. Chasselas, Lavaux (CH), 2001-2002.

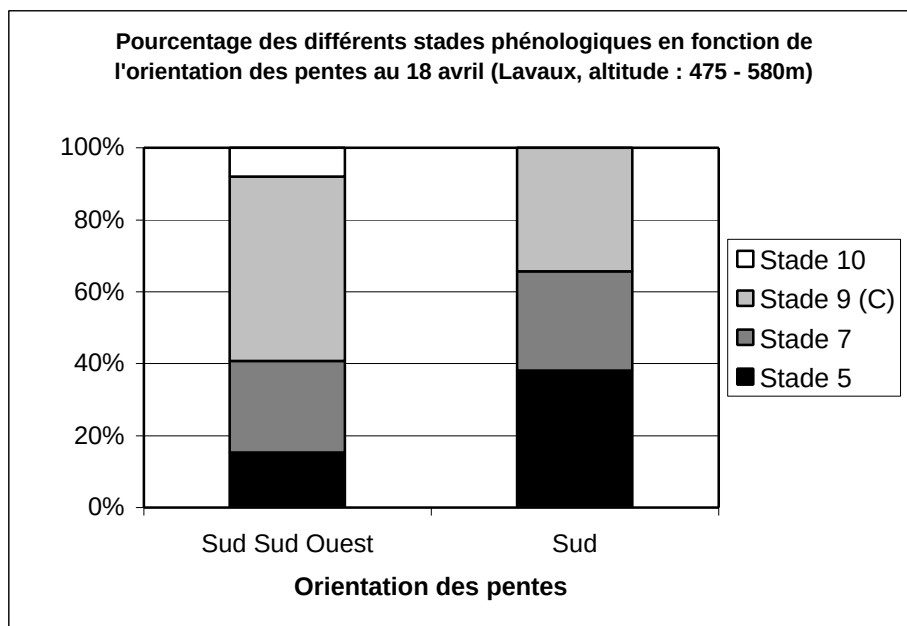


Fig. 38 : Pourcentage des différents stades phénologiques (stades BBCH) atteints au 18 avril en fonction de l'orientation des pentes (orientation Sud/Sud-Ouest et orientation plein Sud). Parcelles du réseau élargi regroupées par orientation des pentes. Chasselas, Lavaux (CH), 18.04.2001.

Autres stades phénologiques

Afin d'analyser l'influence des potentialités climatiques (températures) et de la vitesse de développement de la vigne (stades phénologiques), des cumuls thermiques, réalisés sur les températures actives pour l'ensemble du cycle, ont été calculés en fonction des principales phases de développement de la vigne.

Le tableau 28 présente le nombre de jours qui se sont écoulés entre deux stades phénologiques respectifs ainsi que la durée du cycle complet de la période végétative à la Côte en 2001.

Types de sols	Parcelles	Altitude (m)	Nbre de jours entre les stades					
			D-F	F-V	V-R	D-R	V-R/D-R (%)	
Colluviosols de bas de pente	Begnins 06	495	59	57	50	166	30.1	
	Begnins 07	485	59	57	52	168	30.9	
	Bursins 01	490	59	56	46	161	28.6	
	Bursinel 02	410	67	56	54	177	30.5	
Moraines caillouteuses peu compactes	Begnins 01	550	60	59	57	176	32.4	
	Vinzel 01	510	67	58	52	177	29.4	
	Vinzel 03	520	64	60	52	176	29.5	
	Vinzel 04	525	67	58	56	181	30.9	
Moraines compactes de pente	Begnins 02	565	60	58	57	175	32.6	
	Begnins 03	530	61	60	48	169	28.4	
	Vinzel 02	500	69	58	54	181	29.8	
	Luins 01	515	65	58	53	176	30.1	
	Luins 03	520	57	58	50	165	30.3	
	Dully 01	420	65	59	50	174	28.7	
	Gland 01	460	66	58	46	170	27.1	
	Bursinel 01	410	73	59	51	183	27.8	
Peyrosols, sols caillouteux	Luins 02	440	71	60	51	182	28.0	
	Dully 02	410	75	57	52	184	28.3	
	Bursins 02	505	67	58	58	183	31.7	

Tableau 28 : Nombre de jours écoulés entre deux stades phénologiques respectifs sur les différentes parcelles du réseau. D : débourrement, F : floraison, V : véraison, R : récolte. Chasselas, La Côte (CH), 2001.

Des différences assez importantes ont été observées, notamment pour la durée du cycle complet de végétation (débourrement-récolte) où des variations de l'ordre d'une vingtaine de jours ont été notées. Il est par ailleurs difficile de dégager des tendances

nettes en relation avec le type de sol ou la topographie des sites. En général, il s'est écoulé 100 à 110 jours entre la floraison et la récolte sur l'ensemble du réseau. L'état physiologique de la vigne au cours de la période floraison-véraison (essentiellement les conditions d'alimentation en eau) peut influencer sur la durée de maturation du raisin. Quelques auteurs (Carbonneau *et al.*, 1992) évoquent également l'existence de rythme biologique interne. La phase de maturation du raisin (véraison-récolte) a représenté environ 30% du cycle complet de la vigne (débourrement-récolte). La durée relative de la maturation par rapport à l'ensemble du cycle semble être un peu plus courte sur les sites de faible altitude et de forte pente également. Les parcelles situées sur les hauteurs du vignoble ont présenté par contre une durée plus importante de la maturation.

Types de sols	Parcelles	Altitude (m)	Cumuls thermiques (>10°C)					
			D-F	F-V	V-R	D-R	V-R/D-R (%)	
Colluviosols de bas de pente	Begnins 06	495	330	546	226	1102	20.6	
	Begnins 07	485	311	559	247	1117	22.1	
	Bursins 01	490	325	541	222	1088	20.4	
	Bursinel 02	410	337	569	293	1199	24.4	
Moraines caillouteuses peu compactes	Begnins 01	550	288	550	232	1070	21.7	
	Vinzel 01	510	292	553	239	1084	22.0	
	Vinzel 03	520	270	567	236	1073	22.0	
	Vinzel 04	525	278	549	231	1058	21.8	
Moraines compactes de pente	Begnins 02	565	294	537	227	1058	21.5	
	Begnins 03	530	307	568	195	1070	18.2	
	Vinzel 02	500	276	575	242	1093	22.1	
	Luins 01	515	283	555	248	1083	22.9	
	Luins 03	520	306	551	218	1075	20.3	
	Dully 01	420	330	597	249	1176	21.2	
	Gland 01	460	300	573	238	1111	21.4	
	Bursinel 01	410	326	599	262	1187	22.1	
Peyrosols, sols caillouteux	Luins 02	440	311	598	253	1162	21.8	
	Dully 02	410	337	579	271	1187	22.8	
	Bursins 02	505	334	556	258	1148	22.5	

Tableau 29 : Cumuls des températures actives (cumul thermique > 10°C) entre deux stades phénologiques respectifs sur les différentes parcelles du réseau. D : débourrement, F : floraison, V : véraison, R : récolte. Chasselas, La Côte (CH), 2001.

Les cumuls de températures actives, observées entre les différents stades phénologiques et sur l'ensemble du cycle, témoignent d'une grande diversité entre les sites qui est imputable en partie à la durée de cycle entre les stades et à la situation topographique des parcelles (tableau 29). L'écart maximal, exprimé en somme de cumul thermique (base 10°C) a atteint 140 degrés-jours à la Côte en 2001. Les résultats 2002 ont confirmé cette tendance (résultats non présentés). Par contre, le rapport entre le cumul des températures actives durant la maturation et celui du cycle complet a manifesté des résultats assez similaires sur l'ensemble du réseau, à l'exception de Begnins 03.

Zone pilote de Bonvillars

Les stades phénologiques importants, observés sur l'appellation de Bonvillars sont présentés dans le tableau 30.

Types de sols	Parcelles	Stades phénologiques			
		Débourrement		Floraison	Véraison
		2002	2003	2002	2002
Moraines épaisses, plus ou moins compactes	Corcelles 02	22 avril	17 avril	20 juin	18 août
	Concise 02	18 avril	16 avril	20 juin	17 août
	Onnens 01	24 avril	19 avril	24 juin	20 août
	Bonvillars 02	26 avril	22 avril	20 juin	20 août
	Concise 03	24 avril	-	-	-
	Concise 04	24 avril	-	-	-
Moraines sur calcaire du Jura	Bonvillars 01	23 avril	18 avril	21 juin	18 août
	Champagne 02	23 avril	19 avril	19 juin	19 août
Colluviosol	Bonvillars 03	27 avril	22 avril	21 juin	20 août

Tableau 30 : Dates de débourrement, de floraison et de véraison sur diverses parcelles regroupées par types de sols. Chasselas, Bonvillars (CH), 2002-2003.

Le débourrement (stade C) a été atteint entre le 18 et le 27 avril en 2002 sur l'ensemble du réseau. En 2003, ce même stade a été noté entre le 16 et le 22 avril. Les parcelles d'observation se situent entre 460 et 520 mètres d'altitude : ce critère dont l'importance sur la température de l'air n'est plus à démontrer, ne permet pas à lui seul d'expliquer les écarts d'apparition du débourrement chez la vigne. Des effets de microclimat, liés à l'emplacement de la parcelle (à l'abri des courants froids venant du

Jura, exposition, pente) s'avèrent déterminants dans ce cas. La faible densité d'observations explique également en partie la difficulté de mettre en évidence des relations assurées entre les facteurs explicatifs du débourrement dans cette région. Néanmoins, des sites à débourrement précoce ont été notés en 2002 comme en 2003 (Concise 02, Corcelles 02). A l'opposé, le site de Bonvillars 02 (implanté à 520 m) a été plus tardif d'une semaine environ par rapport aux sites précités.

La floraison s'est déroulée autour du 20 juin et dans un intervalle de temps relativement court (5 jours) sur l'ensemble du réseau en 2002. Le printemps 2003, exceptionnellement chaud, a entraîné un départ de la floraison dès le début de juin (5-7 juin) sur l'ensemble du réseau. La véraison a été atteinte autour du 20 août en 2002 et les écarts entre parcelles étaient faibles. En 2003, le déclenchement de la véraison s'est effectué à la fin du mois de juillet sur l'ensemble des parcelles. Aucune différence notable n'a été relevée entre les parcelles quant à la précocité du stade « véraison ».

Zone pilote du Chablais

Le tableau 31 présente les stades phénologiques notés dans la région du Chablais.

Types de sols	Parcelles	Altitude (m)	Débourrement Stade C		Floraison 2002	Véraison 2002
			2002	2003		
Moraines locales caillouteuses	Ollon 01	415	18 avril	16 avril	18 juin	14 août
	Ollon 02	520	10 avril	-	-	-
	Ollon 03	510	8 avril	13 avril	15 juin	13 août
	Ollon 05	580	19 avril	-	20 juin	-
	Ollon 06	500	19 avril	18 avril	20 juin	14 août
	Ollon 07	510	12 avril	-	-	-
	Ollon 08	510	12 avril	17 avril	16 juin	11 août
	Ollon 09	540	22 avril	-	19 juin	-
Sols sur gypse	Ollon 04	580	19 avril	13 avril	20 juin	12 août
	Bex 06	560	10 avril	16 avril	17 juin	13 août
	Bex 07	590	21 avril	-	21 juin	-
Sols issus de flysch	Bex 01	490	8 avril	12 avril	17 juin	14 août
	Bex 02	470	6 avril	14 avril	16 juin	11 août
	Bex 03	460	6 avril	13 avril	15 juin	13 août

Tableau 31 : Dates de débourrement, de floraison et de véraison sur diverses parcelles regroupées par types de sols. Chasselas, Chablais (CH), 2002-2003.

Le débourrement de la vigne en 2002 a débuté autour du 6-8 avril sur la colline de Chiètres (Bex 01, 02, 03) et s'est étalé jusqu'au 22 avril sur les sites moins précoces à Ollon et à Bex. Là encore, l'altitude des parcelles n'explique pas entièrement la précocité d'un site ou au contraire son retard. D'autres facteurs tels que l'orientation des sites, la déclivité et l'exposition aux courants froids (fond de vallon) ou chauds (foehn printanier) influent sur la précocité des stades phénologiques. En 2003, le débourrement de la vigne s'est déroulé du 12 au 18 avril sur l'ensemble du réseau. Une étude, réalisée sur un nombre important de sites, a montré que la précocité du débourrement de la vigne correspondait globalement à des situations favorisées d'un point de vue climatique (indice climatique élevé, résultats non présentés).

La floraison a eu lieu autour du 18 juin (15-21 juin) en 2002. Elle a été plus précoce en 2003 avec une dizaine de jours d'avance par rapport à l'année précédente. Le départ de la floraison a été observé entre le 2 et le 5 juin en 2003 sur la colline de Chiètres (Bex 01, 02, 03) et vers le 6-8 juin dans la région d'Ollon. La véraison a eu lieu entre le 11 et le 14 août en 2002. Le début de la véraison fut très avancé en 2003 puisque les premières baies vérées ont été observées dès le 20 juillet sur la majorité des parcelles à l'étude.

Il est à noter également que l'influence du foehn durant la maturation du raisin peut s'avérer prépondérante dans la région du Chablais. Son incidence entre autres sur l'accumulation des sucres dans les baies peut être spectaculaire selon les millésimes. En 2002 et 2003 par contre, l'influence du foehn a été très faible durant la maturation.

4.4 Expression végétative

4.4.1 Vitesse de croissance des rameaux

Les mesures concernant la cinétique d'allongement des rameaux principaux peuvent renseigner sur la dynamique de croissance de la vigne. Des suivis de développement des rameaux ont été ainsi effectués dans les réseaux de parcelles de référence à la Côte, à Lavaux et à Bonvillars au printemps 2001 et 2002.

Croissance à la Côte

En 2001, les vignes situées sur des moraines compactes de pente montrent un allongement légèrement plus faible des rameaux principaux que les vignes établies sur des moraines épaisses et peu compactes ou sur des peyrosols (résultats non présentés) durant la première phase de croissance de la vigne (mi-mai à la mi-juin). L'analyse de la vitesse de croissance des rameaux indique une tendance identique (tableau 32). Il est clairement établi que la température constitue un facteur majeur de la croissance. La vitesse très élevée de développement des rameaux, constatée sur les sites à la fin mai, est liée à des températures quasi estivales durant cette période. Par la suite, la croissance s'est ralentie au début de juin en raison d'un rafraîchissement des températures.

Types de sols	VITESSE DE CROISSANCE DES RAMEAUX (cm/jour)		
	21-30 mai	30 mai-11 juin	11-19 juin
Colluviosols de bas de pente	3.79	2.28	1.54
Moraines épaisses peu compactes	3.54 ± 0.17	2.49 ± 0.13	1.56 ± 0.25
Moraines compactes - pente	3.26 ± 0.11	1.93 ± 0.10	1.40 ± 0.08
Peyrosols, sols caillouteux	3.32 ± 0.15	2.50 ± 0.33	1.76 ± 0.16

Tableau 32 : Evolution de la vitesse de croissance des rameaux à trois époques selon le type de sols. Moyennes ± erreur standard. Altitude moyenne des sites 440-540 m. Chasselas, La Côte (CH), 2001.

La vitesse de croissance printanière des rameaux principaux, observée durant les mois de mai et de juin 2002, a été globalement dépendante des conditions de température moyenne, enregistrée à cette même époque (fig. 39).

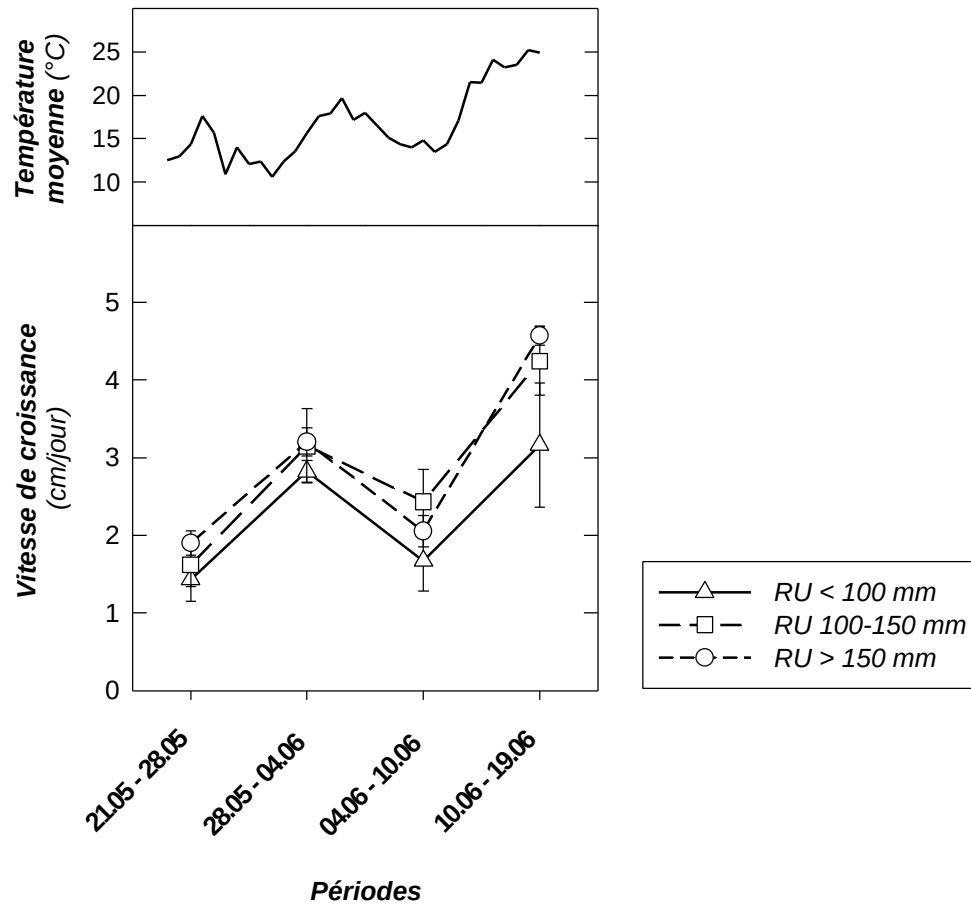


Fig. 39 : Evolution de la température moyenne journalière et de la vitesse de croissance des rameaux par périodes et en fonction de la réserve en eau des sols. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2002.

Les températures élevées, mesurées durant la deuxième partie du mois de juin, ont entraîné une forte croissance végétative. Les périodes de rafraîchissement des températures ont été suivies d'un ralentissement du développement des rameaux. Il est clairement établi que la température a constitué un facteur majeur de la croissance. Nos résultats obtenus en 2002 confirment largement les observations réalisées en 2001.

La réserve en eau du sol et les conditions d'alimentation hydrique de la vigne ont également joué un rôle sur la croissance printanière. Les vignes, situées sur des sols à faible RU (< à 100mm,) ont montré les vitesses de croissance les plus faibles principalement durant le mois de juin. Les sites à forte RU ont présenté les taux de croissance les plus élevés. Les mesures d'alimentation hydrique de la vigne (Ψ_{base} , $\Psi_{T \text{ MIN}}$), réalisées durant la période de la fin juin, ont assez bien caractérisé les conditions de régime hydrique qu'a subie la vigne à cette époque (tableau 33).

Parcelles (RU)	Vitesse de croissance (cm/jour) 10.06 – 19.06.02	Y_{BASE} (bars) 26.06.02	$Y_{T \text{ MIN}}$ (bars) 26.06.02
Luins 02 (RU 70 mm)	2.3 ± 0.3	-2.6 ± 0.1	-6.9 ± 0.3
Luins 03 (RU 100 mm)	4.0 ± 0.4	-1.6 ± 0.1	-4.3 ± 0.2
Luins 01 (RU 110 mm)	3.6 ± 0.4	-2.1 ± 0.2	-5.0 ± 0.2
Vinzel 03 (RU 120 mm)	5.1 ± 0.4	-1.8 ± 0.2	-4.4 ± 0.2
Begnins 01 (RU 150 mm)	4.6 ± 0.4	-1.6 ± 0.1	-4.1 ± 0.1
Begnins 06 (RU 160 mm)	4.4 ± 0.3	-1.1 ± 0.1	-4.1 ± 0.1

Tableau 33 : Vitesse de croissance des rameaux, Y_{base} et $Y_{T \text{ MIN}}$ sur différents sites à la Côte. Moyenne $\pm$ erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2002.

La vitesse de croissance des rameaux, mesurée entre le 10 et le 19 juin 2002, a été élevée sur les sites dont l'alimentation hydrique n'a pas été restrictive ($\Psi_{\text{base}} \geq -2.1$ bars). La parcelle, nommée Luins 02, repose sur un peyrosol sableux et drainant à faible RU : les mesures de potentiels hydriques nocturne (Ψ_{base}) et diurne ($\Psi_{T \text{ MIN}}$) ont indiqué un début de contrainte modérée chez la vigne, notamment durant la période la plus chaude de la journée ($\Psi_{T \text{ MIN}}$ de $-6,9$ bars). La vitesse de croissance des rameaux a été restreinte sur cette parcelle en comparaison avec les autres parcelles de référence du réseau.

De nombreuses études de terroirs (Lebon 1993 ; Morlat 1989 ; Jourjon *et al.* 1992 ; Penavagre *et al.* 1991 ; van Leeuwen et Seguin 1994) ont mis en lumière le rôle essentiel des conditions d'alimentation en eau de la vigne sur la dynamique de la croissance végétative. Quelques auteurs (van Leeuwen et Seguin, 1994) ont par ailleurs indiqué des corrélations entre les valeurs du Ψ_{base} et la vitesse de croissance des rameaux. Selon Choné (2001) la vitesse d'allongement des rameaux est significativement ralentie pour des valeurs de $\Psi_{\text{T MIN}}$ atteignant environ $-6,0$ bars chez des vignes cultivées en plein champ ($-6,5$ bars chez des ceps sans grappe cultivés en serre).

L'hypothèse de l'existence de seuils de potentiel hydrique, capables de limiter la vitesse de croissance et/ou de provoquer l'arrêt de croissance, repose sur les phénomènes de cavitation (ou embolie) des vaisseaux du xylème (Schultz et Matthews, 1988). Après avoir observé le développement de bulles de vapeur dans le xylème des mérithalles situés proches de l'apex pendant l'apparition d'une contrainte hydrique, ces auteurs suggèrent que les embolies jouent un rôle important dans l'inhibition de la croissance des rameaux de la vigne pour des contraintes hydriques modérées.

D'autre part, la diminution ou l'arrêt de croissance repose aussi sur l'équilibre phytohormonal cytokinines - acide abscissique (Champagnol, 1984). Un double contrôle de la croissance végétative (physique par la cavitation et hormonale) permet vraisemblablement à la plante de s'adapter au rythme d'apparition et de durée de la restriction hydrique. Les phénomènes de cavitation représenteraient une économie d'eau adaptée à des contraintes hydriques apparaissant de façon brutale (Cochard, 1995). Dans le cas d'une contrainte hydrique se développant progressivement, la part des phénomènes d'embolies dans le ralentissement de la croissance des rameaux pourraient être moins déterminante, relève Choné (2001).

Croissance à Lavaux

Les résultats de mesure de la longueur des rameaux, réalisée à Lavaux, sont présentés à la figure 40. L'altitude détermine largement en début de croissance printanière la longueur et le développement des rameaux, mais aussi leur vitesse de croissance (fig. 41). La nature du sol ne semble jouer qu'un rôle très secondaire dans ce cas.

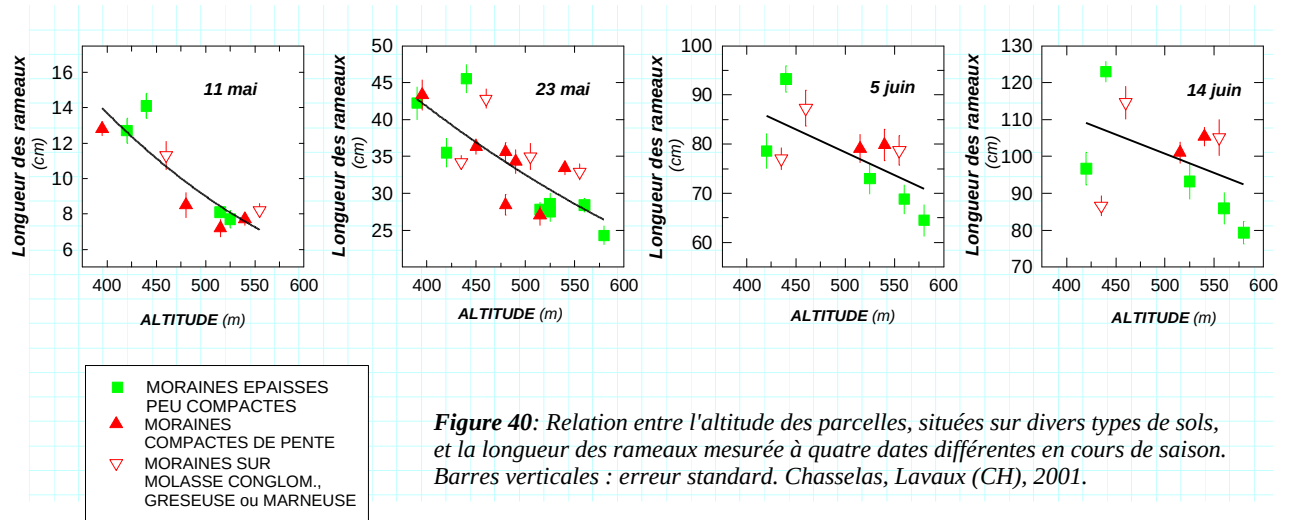


Figure 40: Relation entre l'altitude des parcelles, situées sur divers types de sols, et la longueur des rameaux mesurée à quatre dates différentes en cours de saison. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, Lavaux (CH), 2001.

La vitesse de croissance diminue en général avec une altitude croissante des sites, en relation avec la diminution des températures physiologiquement actives ($> 10-15^{\circ}\text{C}$). La vitesse de croissance est identique du 23 mai au 5 juin 2001 quelle que soit l'altitude des parcelles, en raison des températures très élevées, enregistrées durant cette période, et largement optimales pour la croissance ($> 3.5 \text{ cm/j}$).

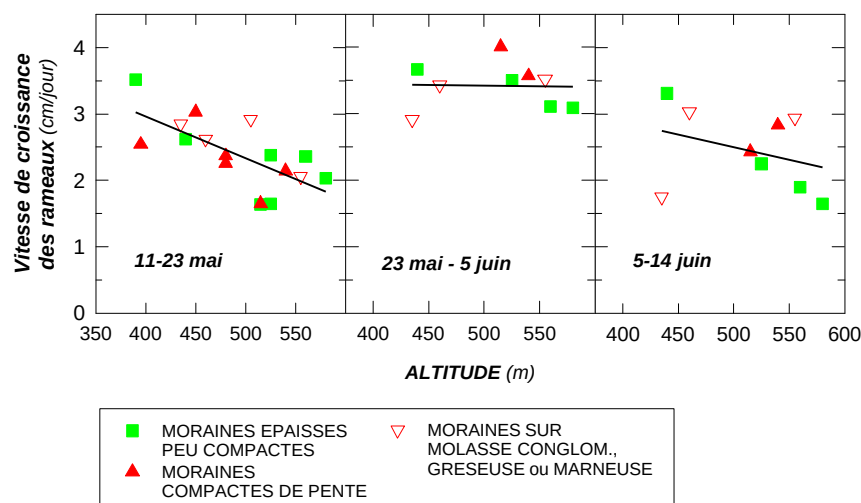


Fig. 41 : Influence de l'altitude sur la vitesse de croissance des rameaux dans les parcelles de divers types de sols, mesurée à trois reprises durant la saison. Chasselas, Lavaux (CH), 2001.

Croissance à Bonvillars

Les mesures de vitesse de croissance des rameaux, effectuées à Bonvillars, montrent que les conditions de température ont eu une influence déterminante sur les taux d'allongement des rameaux (fig. 42).

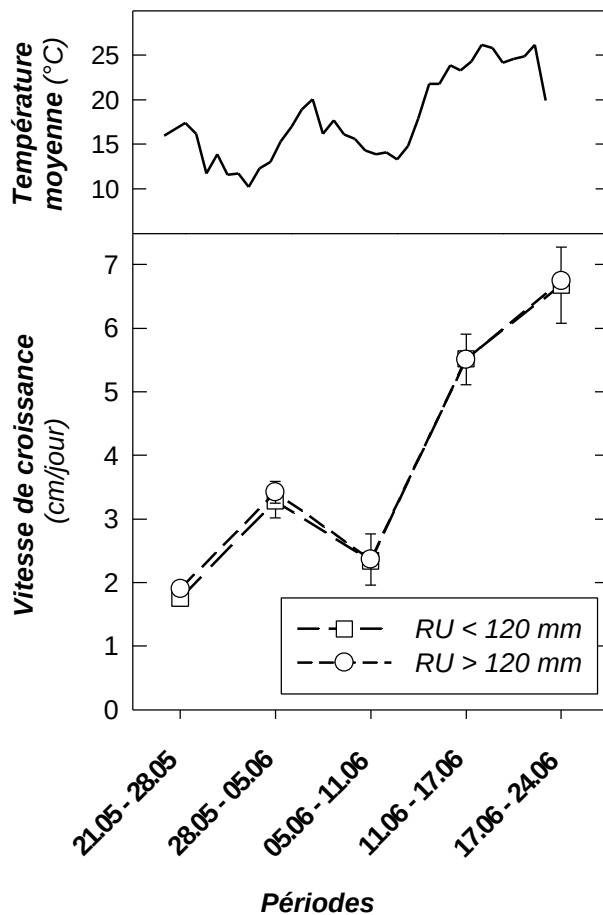


Fig. 42 : Evolution de la température moyenne journalière et de la vitesse de croissance des rameaux par périodes et en fonction de la réserve en eau des sols (RU). Barres verticales : erreur standard. Chasselas, Bonvillars (CH), 2002.

Des vitesses de croissance, supérieures à 6 cm par jour, ont été enregistrées durant la deuxième quinzaine de juin, période pendant laquelle la température moyenne journalière atteignait 25°C. La capacité de croissance végétative entre les divers sites a été indépendante de la réserve en eau durant le printemps. Les valeurs de Ψ_{base} , obtenues à la fin juin, indiquaient que les vignes ne souffraient d'aucune restriction hydrique ($\Psi_{\text{base}} > -1,5$ bars).

En général, l'abondance des précipitations printanières a offert des conditions très favorables à la croissance sur l'ensemble des sites. Lebon (1993) relève également que l'enracinement profond influence considérablement la régulation de l'alimentation en

eau en période de contrainte hydrique. Il permet de maintenir la fonction de croissance. Le même auteur ajoute qu'à potentiel de base égal, l'état hydrique de la vigne semble plus favorable à la croissance sur un terroir qui permet un enracinement profond que dans le cas d'un enracinement réduit.

4.4.2 Arrêt de la croissance végétative

En 2001, l'arrêt de la croissance végétative à la Côte a été très inégal selon les sites et s'est étalé entre le début de septembre et la fin d'octobre (résultats non présentés). Il apparaît que les vignes situées sur des colluviosols présentent les arrêts les plus tardifs dans la saison, alors que certaines parcelles implantées sur des moraines compactes de pente interrompent leur croissance un mois plus tôt. L'alimentation en eau des sols (RU, état hydrique des vignes de la véraison à la pleine maturation du raisin mesuré par le Ψ_{base}) semble expliquer pour une part importante l'arrêt si tardif de la croissance végétative en 2001 et les différences observées entre les terroirs viticoles à la Côte. Des résultats identiques ont été présentés par Koundouras *et al.* (1999).

De même qu'à la Côte, l'arrêt de la croissance végétative a été inégal sur les parcelles d'observation à Lavaux en 2001 (résultats non présentés). Les arrêts les plus tardifs de croissance sont signalés à la mi-octobre chez les vignes établies sur des sols à forte RU (colluviosols, moraines épaisses et peu compactes) de manière générale. Les sites ayant montré une contrainte hydrique modérée à la fin d'août (Corsier 02, Chardonne 04, Rivaz 04, Chexbres 01, St-Saphorin 03) présentent des arrêts plus précoces de la croissance végétative (mi-septembre).

L'évaluation de l'arrêt de la croissance végétative a été réalisée en fin de saison 2002 en estimant le % d'apex de rameaux secondaires encore en croissance (fig. 43). Un fort ralentissement de la croissance a été constaté sur l'ensemble des sites des 4 zones pilotes autour de la mi-septembre en raison de températures fraîches, observées à cette période de la saison.

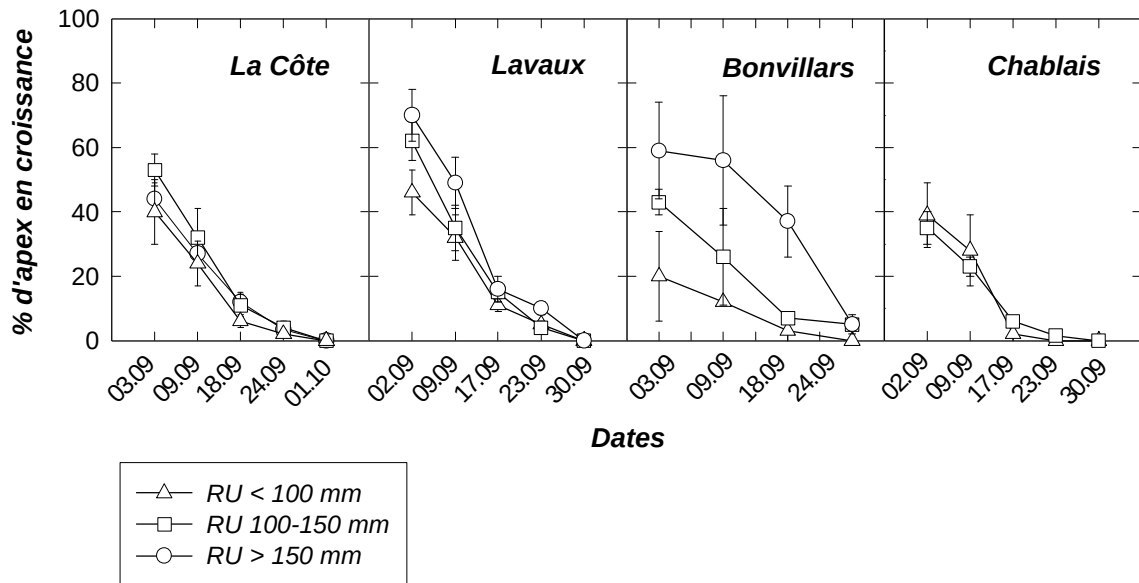


Fig. 43 : Evolution du pourcentage d'apex de rameaux secondaires en croissance en fin de saison en relation avec la RU des sols. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, zones pilotes dans le Canton de Vaud (CH), 2002.

De manière générale, l'interruption de la croissance ne s'est manifestée que tardivement dans la saison sur l'ensemble des terroirs. Les conditions peu contraignantes d'alimentation hydrique observées sur la majorité des sites en 2002 permettent d'expliquer l'arrêt tardif de la croissance végétative. Le ralentissement de la croissance a été néanmoins constaté dès le début de septembre, notamment sur les sites à faible RU (inférieure à 100mm).

A Bonvillars, le % d'apex de rameaux secondaires en croissance a été largement tributaire de la réserve en eau des sols et des conditions d'alimentation hydrique de la vigne. Au début de septembre 2002, seuls 20% des apex manifestaient un état de croissance sur les sites dont la RU est inférieure à 100mm, contre 60% des apex sur les sites à RU élevée (> à 150mm). Diverses études (van Leeuwen et Seguin 1994 ; Koundouras *et al.* 1999) ont par ailleurs montré une relation significative entre la précocité de l'arrêt de croissance des rameaux et la valeur du Ψ_{base} à la véraison, utilisé comme indicateur de la contrainte hydrique.

Dans les zones pilotes de la Côte, de Lavaux et du Chablais, l'alimentation en eau de la vigne n'a, semble-t-il, pas joué un rôle aussi prépondérant qu'à Bonvillars. A la fin de septembre, l'arrêt définitif de la croissance végétative a été observé sur l'ensemble des parcelles du réseau.

En fin de saison, l'arrêt de la croissance végétative est sous l'influence prépondérante des conditions de température dans les vignobles septentrionaux qui autorisent plus ou moins la croissance des apex et de l'équilibre hormonal de la plante. Le vieillissement de la végétation annuelle, accentué par des conditions du milieu peu favorables (contrainte hydrique, photopériode...) induit une modification de l'équilibre hormonal (accumulation d'ABA) qui entraîne l'arrêt de la croissance végétative.

En 2003, l'arrêt de la croissance végétative a été de manière générale plus précoce qu'en 2001 et 2002 en raison des fortes contraintes hydriques et thermiques, observées au cours de la période estivale (fig. 44).

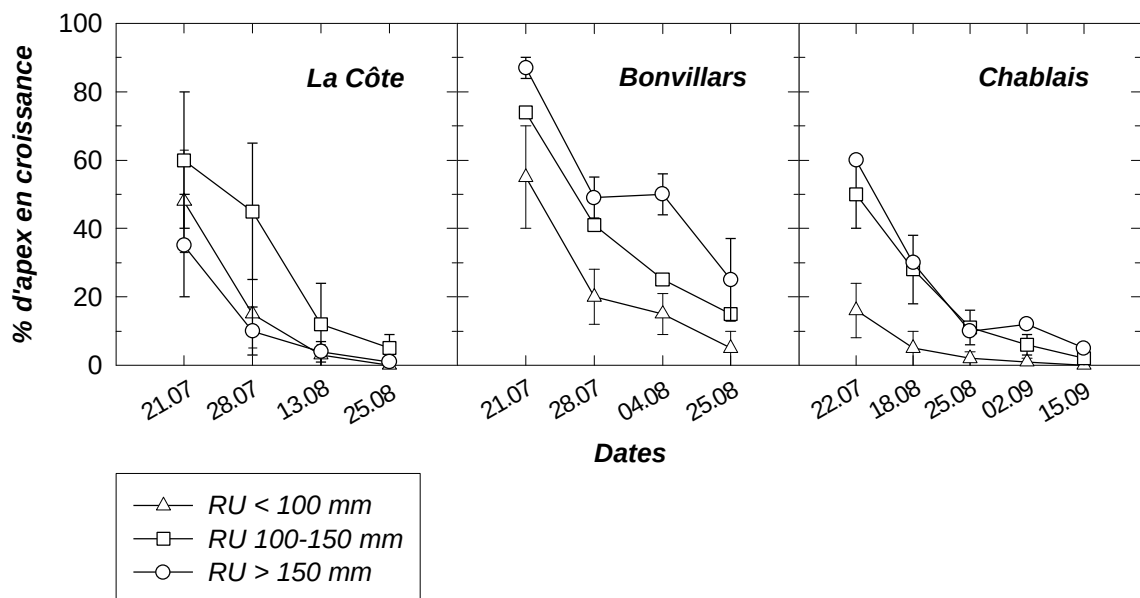


Fig. 44 : Evolution du % d'apex de rameaux secondaires en croissance en fin de saison. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, zones pilotes du Canton de Vaud (CH), 2003.

Au 25 août, la croissance était quasiment stoppée dans la majorité des parcelles de l'étude. Les sites à faible RU (< à 100 mm) ont montré une croissance de la végétation très ralentie déjà à la fin de juillet sur l'ensemble du réseau. Les parcelles à plus grand réservoir hydrique (RU > 100 mm) ont par contre présenté un % d'apex en croissance plus élevé au cours des mois de juillet et d'août, principalement à Bonvillars et au Chablais.

A la Côte, les vignes implantées sur des sols à forte RU (> 150 mm) ont affiché une croissance végétative presque équivalente aux sites à faible RU (< à 100 mm). Ces sols

à RU importantes présentent parfois des enracinements limités en profondeur (notamment les colluviosols) en raison d'une hydromorphie temporaire ou permanente qui peuvent entraîner en année sèche des stress hydriques sévères : la croissance végétative y est dans ce cas naturellement inhibée au même titre que dans les sites implantés sur des moraines très compactes ou des peyrosols à faible RU.

4.4.3 Estimation des surfaces foliaires

L'estimation de la surface foliaire des souches a été réalisée à deux reprises en 2001 à la Côte sur les divers sites de l'étude (tableau 34). La surface moyenne d'une feuille principale est plus faible chez les souches de vigne installées sur des moraines compactes de pente, essentiellement durant la période estivale. Les vignes situées sur d'autres types de sols affichent des surfaces de feuilles très semblables. La surface foliaire totale (SFT), estimée par souche et par m² de sol le 20 juillet 2001, se révèle également plus réduite sur les parcelles moraines compactes de pente. Les surfaces foliaires des souches situées sur des colluviosols, des moraines épaisses peu compactes et des peyrosols, sont plus élevées mais assez similaires entre elles.

Types de sols	Parcelles	Surface moyenne d'une feuille principale (cm ²)	SFT par souche (m ²)	SFT par m ² de sol (m ²)	Part de la SFT des entre-cœurs (%)	SFE / m ² de sol (m ²)	Index foliaire (IF) (SFE/SFT)
Colluviosols de bas de pente	Begnins 06	206 ± 11	3.52 ± 0.29	2.10 ± 0.17	48 ± 4	1.19	0.57
	Bursinel 02	198 ± 11	3.26 ± 0.23	2.26 ± 0.16	41 ± 3	1.38	0.61
	Moyenne	202 ± 4	3.39 ± 0.13	2.18 ± 0.08	45 ± 4	1.29 ± 0.10	0.59 ± 0.02
Moraines épaisses peu compactes	Begnins 01	215 ± 14	3.75 ± 0.40	1.90 ± 0.20	51 ± 6	1.27	0.67
	Vinzel 01	209 ± 12	2.98 ± 0.70	2.33 ± 0.55	48 ± 6	1.64	0.70
	Vinzel 03	215 ± 12	3.15 ± 0.15	2.62 ± 0.12	51 ± 3	2.06	0.78
	Moyenne	213 ± 3	3.29 ± 0.24	2.28 ± 0.21	50 ± 1	1.65 ± 0.23	0.72 ± 0.03
Moraines compactes de pente	Begnins 03	184 ± 7	2.68 ± 0.30	1.71 ± 0.19	40 ± 4	1.32	0.78
	Luins 03	173 ± 12	2.82 ± 0.27	1.66 ± 0.16	50 ± 5	1.35	0.82
	Moyenne	179 ± 6	2.75 ± 0.07	1.68 ± 0.03	45 ± 5	1.34 ± 0.02	0.80 ± 0.02
Peyrosols, sols caillouteux	Luins 02	202 ± 10	3.09 ± 0.31	1.93 ± 0.19	56 ± 4	1.51	0.78
	Dully 02	249 ± 9	4.32 ± 0.36	2.57 ± 0.21	53 ± 5	1.53	0.60
	Bursins 02	233 ± 9	3.25 ± 0.26	2.25 ± 0.18	40 ± 4	1.18	0.55
	Moyenne	228 ± 14	3.55 ± 0.38	2.25 ± 0.18	50 ± 5	1.41 ± 0.11	0.64 ± 0.07

Tableau 34 : Mesure de la surface foliaire moyenne d'une feuille principale, de la surface foliaire totale par souche et par m² de sol, de la part des entre-cœurs, de la surface foliaire exposée (SFE) et de l'index foliaire (IF) sur différentes parcelles à la Côte. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 20 juillet 2001.

La part des entre-cœurs représente 45 à 50% de la surface foliaire totale sur l'ensemble du réseau. Le rapport SFE/SFT ou index foliaire, qui représente indirectement le degré d'entassement de la végétation, montre des différences assez marquées entre les terroirs. D'un niveau élevé sur les parcelles de moraines compactes ou épaisses, l'index foliaire s'avère plus faible dans les types de sols en colluvions et les peyrosols (indiquant un niveau d'entassement foliaire moyen à important).

La mesure des différentes surfaces foliaires a également été conduite sur les parcelles de la zone pilote à Lavaux en 2001 (tableau 35).

Types de sols	Parcelles	Surface moyenne d'une feuille principale (cm ²)	SFT par souche (m ²)	SFT par m ² de sol (m ²)	Part de la SFT des entre-cœurs (%)	SFE par m ² de sol (m ²)	Index foliaire (IF) (SFE/SFT)
Colluviosol	Chardonne 03	228 ± 13	2.69 ± 0.31	2.07 ± 0.24	46 ± 3	1.46	0.70
Moraines épaisses peu compactes	Chardonne 07	202 ± 10	2.53 ± 0.16	2.11 ± 0.13	39 ± 4	1.57	0.74
	Chardonne 10	191 ± 9	2.92 ± 0.30	1.83 ± 0.19	43 ± 4	1.35	0.73
	Rivaz 02	244 ± 8	3.31 ± 0.24	2.75 ± 0.20	47 ± 3	1.70	0.62
	Moyenne	212 ± 16	2.92 ± 0.22	2.23 ± 0.27	43 ± 2	1.54 ± 0.10	0.70 ± 0.04
Moraines compactes de pente	Chardonne 04	238 ± 12	3.30 ± 0.24	2.42 ± 0.18	42 ± 2	1.55	0.64
	Rivaz 01	205 ± 8	3.62 ± 0.30	2.26 ± 0.19	58 ± 6	1.63	0.72
	Chexbres 01	236 ± 13	3.60 ± 0.33	3.00 ± 0.27	48 ± 3	1.90	0.63
	Moyenne	226 ± 11	3.50 ± 0.10	2.56 ± 0.22	49 ± 5	1.69 ± 0.11	0.66 ± 0.03
Moraines sur molasse conglom., gréseuse ou marneuse	St Saphorin 03	189 ± 10	3.33 ± 0.37	2.22 ± 0.25	53 ± 4	1.90	0.85
	Rivaz 04	223 ± 13	3.19 ± 0.29	2.65 ± 0.24	50 ± 3	1.68	0.64
	Corsier 02	201 ± 10	2.18 ± 0.20	1.60 ± 0.15	31 ± 2	1.68	1.05
	Moyenne	204 ± 10	2.90 ± 0.36	2.16 ± 0.30	45 ± 7	1.75 ± 0.07	0.85 ± 0.12

Tableau 35 : Mesure de la surface foliaire moyenne d'une feuille principale, de la surface foliaire totale par souche et par m² de sol, de la part des entre-cœurs, de la surface foliaire exposée (SFE) et de l'index foliaire (IF) sur différentes parcelles à Lavaux. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Lavaux (CH), 28 juillet 2001.

La surface moyenne d'une feuille principale est très semblable dans les vignes regroupées par types de sols. Néanmoins, des disparités assez importantes existent entre les parcelles. Les vignes établies dans des moraines sur molasse conglomératique, gréseuse ou marneuse présentent des feuilles de plus petite taille. La surface foliaire totale, exprimée par m² de sol, s'avère relativement identique entre les terroirs viticoles, mais disparate entre les parcelles d'un même type de sol. La surface foliaire totale d'une souche semble un peu plus élevée chez les vignes conduites sur des moraines compactes de pente par rapport aux autres sites. La part des entre-cœurs s'élève en moyenne à 45-50%. L'index foliaire se révèle un peu plus faible dans les

parcelles de moraines compactes de pente que sur la molasse gréseuse ou conglomératique.

Des estimations de surface foliaire ont également été conduites en 2002 dans les 4 zones pilotes de l'étude (résultats non présentés). Celles-ci confirment dans une large mesure les résultats obtenus en 2001.

L'intérêt majeur de réaliser des estimations de surface foliaire réside dans la possibilité de connaître la surface foliaire évaporatoire et d'établir, si possible, des relations avec la consommation en eau de la vigne en cours de saison. Une mise en place précoce au printemps de l'appareil foliaire est généralement considérée comme positif (Morlat, 1989). C'est une condition importante pour réaliser un bilan positif de carbone favorable à la plante entière. Dès la véraison, un ralentissement, et parfois un arrêt de la croissance végétative est souhaitée, qui favorise une répartition des assimilats dans les parties pérennes de la vigne et les raisins. Les conditions d'alimentation en eau de la vigne déterminent largement l'arrêt de la croissance végétative et la dimension de la canopée (van Leeuwen et Seguin 1994 ; Penavayre *et al.* 1991 ; Lebon 1993 ; Morlat, 1989). L'apparition précoce de la contrainte hydrique peut être à l'origine d'une adaptation à la sécheresse (réduction de la surface foliaire) comme l'ont montré, en conditions contrôlées, Meriaux *et al.* (1979) et Lebon *et al.* (2001).

4.4.4 Poids frais des rognages (biomasse foliaire exportée)

La mesure du poids frais des rognages cumulés durant la période de végétation montre que les vignes situées sur des moraines compactes de pente à faible RU présentent la capacité de croissance la plus faible à la Côte (tableau 36). Les vignes établies sur des peyrosols affichent les poids de rognages les plus élevés avec toutefois une forte fluctuation des résultats entre les deux parcelles mesurées ; les moraines épaisses et peu compactes ayant une position intermédiaire.

Types de sols	Parcelles	Poids cumulé des rognages (g/cep)
Moraines épaisses peu compactes	Begnins 01	398
	Vinzel 03	490
	Moyenne	444 ± 46
Moraines compactes de pente	Begnins 03	382
	Luins 03	409
	Moyenne	395 ± 14
Peyrosols, sols caillouteux	Bursins 02	402
	Dully 02	781
	Moyenne	592 ± 182

Tableau 36 : Poids cumulé des rognages frais durant la saison sur différentes parcelles, regroupées par types de sols. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2001.

A Lavaux, les parcelles conduites sur des sols à RU importante (colluviosol, moraine épaisse et peu compacte) montrent les poids les plus élevés de rognages (tableau 37). Les parcelles situées sur des moraines compactes ou sur molasse conglomératique ou gréseuse présentent des valeurs de rognages plus faibles. Ces observations confirment les résultats obtenus sur le réseau à la Côte.

Types de sols	Parcelles	Poids cumulé des rognages (g/cep)
Colluviosol	Chardonne 03	607
Moraines épaisses peu compactes	Rivaz 02	404
	Chardonne 07	-
Moraines compacte de pente	Rivaz 01	290
	Chardonne 04	274
	Moyenne	282 ± 8
Moraines sur molasse conglomérat ou gréseuse	Rivaz 04	375
	Corsier 02	< 220
	Moyenne	298 ± 75

Tableau 37 : Poids cumulé des rognages frais durant la saison sur différentes parcelles, regroupées par types de sols. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Lavaux (CH), 2001.

La vigne doit posséder une expression végétative minimale afin de fournir une production photosynthétique suffisante. Cependant, un excès de croissance végétative observé tout au long de la saison s'avère préjudiciable à une répartition équilibrée du carbone entre les différents organes récepteurs. Une partie des assimilats photosynthétiques est alors utilisée pour l'édification foliaire au détriment de l'alimentation des baies.

4.4.5 Analyses foliaires et indice chlorophyllien

Diagnostic foliaire à la véraison

Les analyses du diagnostic foliaire ont été réalisées à la véraison durant les années 2001-2003 sur l'ensemble du réseau de parcelles. Pour des raisons pratiques et de lisibilité, seuls les résultats 2002 sont présentés dans les tableaux 38-41. Les résultats 2001 et 2003 figurent dans les annexes 5 et 6.

- Azote foliaire

Sur la base des seuils proposés pour l'interprétation du diagnostic foliaire chez le Chasselas en Suisse romande (Spring *et al.* 2003), on peut relever que l'état d'alimentation azotée a été normal sur les différents sites à la Côte, à Lavaux, et au Chablais.

A la Côte, sur l'ensemble des 3 années d'observation, on peut remarquer que les taux d'azote foliaire ont été systématiquement les plus élevés chez les vignes implantées sur les peyrosols sableux à enracinement profond, et les plus faibles en général dans les moraines compactes de pente. Les vignes issues de types de sols autres que ceux évoqués ont présenté une situation intermédiaire.

A Lavaux, le type de sol n'a semble-t-il, pas influencé de façon importante le taux d'azote foliaire.

Dans le Chablais, seules les vignes établies sur des moraines locales et caillouteuses ont présenté un niveau d'azote foliaire un peu plus élevé que dans les autres terroirs.

A Bonvillars, les vignes situées sur des moraines en faible couverture au-dessus du calcaire du Jura ont montré les taux d'azote les plus importants de tous les sites à

l'étude. Le niveau d'alimentation azotée peut être qualifié d'élevé à très élevé sur ces parcelles à Bonvillars durant la saison 2002. Des taux moins élevés ont été observés en 2003 sur ces mêmes sites (annexe 6).

- Phosphore

Les différents types de sols n'ont pas influé de manière significative sur les taux de phosphore des feuilles. Les niveaux de P foliaire les plus bas ont été observés à la Côte de 2001 à 2003 et sur les sols issus de flysch dans le Chablais en 2002 et 2003. L'antagonisme N/P, relevé par divers auteurs (Maigre *et al.*, 1995 ; Larchevêque *et al.* 1998 ; Maigre et Murisier 2000) n'a pu être observé dans notre étude.

- Potassium

Les valeurs de potassium des feuilles ont été proches sur les différents terroirs. Aucune tendance significative n'a pu être notée pour cet élément. A la Côte cependant, la teneur en potassium foliaire semble un peu plus élevée chez les vignes implantées sur les peyrosols que sur les autres types de sols au cours des 3 années d'observation. La teneur en Mg y est aussi plus faible en moyenne chez les peyrosols.

- Calcium

Les teneurs en calcium des feuilles, observées sur les terroirs, n'ont pas mis en évidence de grandes particularités entre les sites, à l'exception des vignes implantées dans des sols sur gypse dans le Chablais dont le chimisme (carbonate et sulfate de calcium) représente une spécificité propre.

- Magnésium

Aucune tendance n'a été observée quant à la teneur en magnésium des feuilles.

Zone pilote : La Côte

Types de sols	Analyses foliaires (% m.s.)				
	N	P	K	Ca	Mg
Colluviosols de bas de pente	2.17 ± 0.11	0.16 ± 0.01	1.71 ± 0.02	2.96 ± 0.14	0.27 ± 0.05
Moraines épaisses peu compactes	2.10 ± 0.17	0.18 ± 0.02	1.71 ± 0.11	3.16 ± 0.30	0.23 ± 0.03
Moraines compactes - pente	2.09 ± 0.07	0.17 ± 0.01	1.75 ± 0.08	3.35 ± 0.20	0.27 ± 0.03
Peyrosols, sols caillouteux	2.27 ± 0.09	0.18 ± 0.01	2.07 ± 0.13	2.56 ± 0.08	0.17 ± 0.02

Zone pilote : Lavaux

Types de sols	Analyses foliaires (% m.s.)				
	N	P	K	Ca	Mg
Colluviosols de bas de pente	2.32 ± 0.05	0.21 ± 0.02	2.02 ± 0.30	3.51 ± 0.49	0.21 ± 0.01
Moraines épaisses peu compactes	2.31 ± 0.06	0.19 ± 0.01	1.96 ± 0.06	3.46 ± 0.12	0.21 ± 0.03
Moraines compactes - pente	2.25 ± 0.05	0.20 ± 0.01	1.78 ± 0.10	3.76 ± 0.23	0.21 ± 0.03
Moraines sur molasse gréseuse...	2.21 ± 0.10	0.20 ± 0.02	2.03 ± 0.08	3.26 ± 0.19	0.20 ± 0.02

Zone pilote : Bonvillars

Types de sols	Analyses foliaires (% m.s.)				
	N	P	K	Ca	Mg
Colluviosols de bas de pente	2.65	0.21	1.84	3.55	0.24
Moraines épaisses peu compactes	2.44 ± 0.16	0.19 ± 0.03	1.69 ± 0.20	3.46 ± 0.40	0.24 ± 0.05
Moraines sur calcaire du Jura	2.87 ± 0.12	0.23 ± 0.05	2.06 ± 0.02	3.50 ± 0.04	0.27 ± 0.01

Zone pilote : Chablais

Types de sols	Analyses foliaires (% m.s.)				
	N	P	K	Ca	Mg
Moraines locales caillouteuses	2.37 ± 0.09	0.22 ± 0.02	1.87 ± 0.10	3.18 ± 0.12	0.22 ± 0.04
Sols sur Gypse	2.20 ± 0.05	0.20 ± 0.01	1.77 ± 0.07	3.99 ± 0.21	0.25 ± 0.03
Sols issus De Flysch	2.25 ± 0.13	0.16 ± 0.01	1.65 ± 0.22	2.49 ± 0.03	0.20 ± 0.05

Tableaux 38-41 : Analyses foliaires (N, P, K, Ca, Mg) réalisées sur les différents types de sols et les diverses zones d'étude. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, zones pilotes du Canton de Vaud (CH), 2002.

Suivi de l'indice chlorophyllien du feuillage

L'évolution de l'indice chlorophyllien du feuillage, mesurée au cours des saisons 2001 et 2002 dans les quatre zones pilotes de l'étude, est présentée dans *les annexes 7 et 8*.

De manière générale, les valeurs d'indice chlorophyllien ont été élevées sur l'ensemble du réseau durant les périodes estivales 2001-2003. Des valeurs comprises entre 450 et 500 ont été très proches de l'optimum voisin de 500, proposé par Spring (1999) chez le Chasselas.

A la fin de septembre 2001, l'indice chlorophyllien a fortement diminué sur les parcelles conduites sur moraines compactes de pente mais aussi sur les moraines épaisses, indiquant une sénescence avancée du feuillage à la Côte (annexe 7). Les vignes situées sur des colluviosols et des peyrosols ont par contre affiché des valeurs relativement élevées en cette fin de saison (350-400) dont la coloration verte du feuillage était assez intense. Le suivi saisonnier de l'indice chlorophyllien, effectué à Lavaux, a montré un comportement identique à celui de la Côte. En fin de maturation du raisin, les valeurs de N-Tester ont sensiblement chuté sur l'ensemble des parcelles, à l'exception des vignes établies sur des colluviosols qui ont tendance à présenter des valeurs encore élevées pour la saison. Les vignes conduites sur la molasse conglomératique ou gréseuse indiquent des niveaux plus faibles de coloration du feuillage au cours de la période de végétation que les vignes installées sur d'autres types de sols.

En 2002, seules les vignes complantées sur des sols issus de gypse dans le Chablais ou sur des moraines assises sur la molasse gréseuse ou conglomératique à Lavaux ont fait exception à la règle générale en présentant des niveaux inférieurs d'indice chlorophyllien. Durant la maturation du raisin, l'indice chlorophyllien est apparu encore élevé sur la majorité des sites à l'étude, indépendamment du type de sol et de la région viticole considérée, malgré le vieillissement automnal du feuillage.

L'indice chlorophyllien représente un bon indicateur du statut de nutrition azotée chez la vigne. Des relations significatives ont été indiquées entre cet indice et la teneur en azote des feuilles et des moûts, ainsi qu'avec la durée de fermentation alcoolique des

moûts (Spring, 1999). Dans notre étude, une relation a été mise en évidence entre l'indice chlorophyllien et la teneur en azote foliaire (fig. 45) .

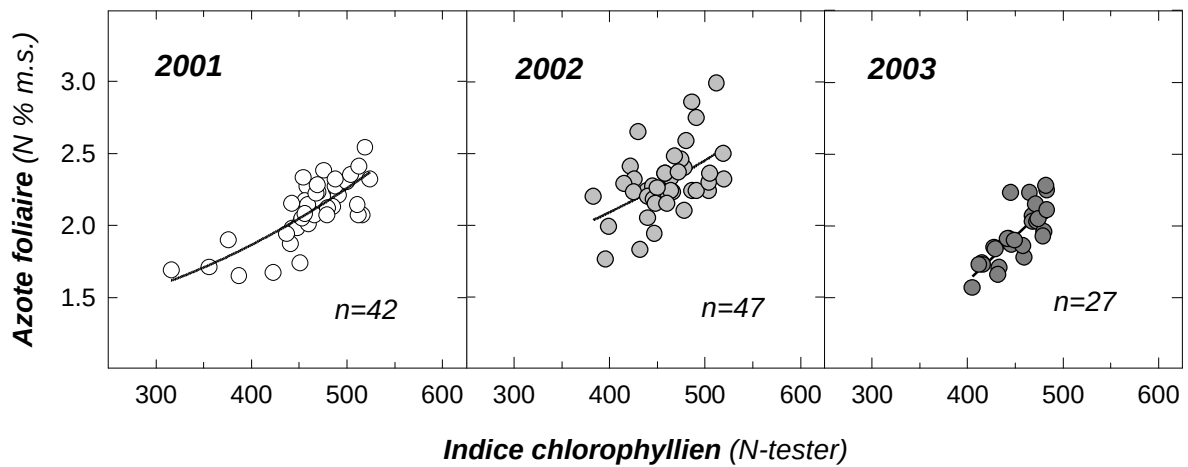


Fig. 45 : Relation entre l'indice chlorophyllien et la teneur en azote foliaire des feuilles de rameaux principaux. n : nombre de microparcelles. Chasselas, zones pilotes du Canton de Vaud (CH), fin août 2001-2003.

Néanmoins, cette relation relativement faible, établie sur notre réseau, est expliquée par la faible amplitude de variation de l'indice chlorophyllien (350-550) en comparaison des valeurs (200-500) rapportées par Spring (1999).

Divers auteurs (Bavaresco, 1995 ; Rupp et Tränkle, 1995 ; Spring et Zufferey, 2000) ont par ailleurs montré qu'il existait chez la vigne une bonne corrélation entre l'indice chlorophyllien et la teneur en chlorophylle du feuillage. Cet indice s'est révélé étroitement lié également à la capacité photosynthétique du feuillage (Spring et Zufferey, 2000).

4.4.6 Poids des bois de taille

L'évaluation du poids individuel d'un sarment à la taille a été réalisée en 2001 et 2002 sur l'ensemble des sites à l'étude (fig. 46).

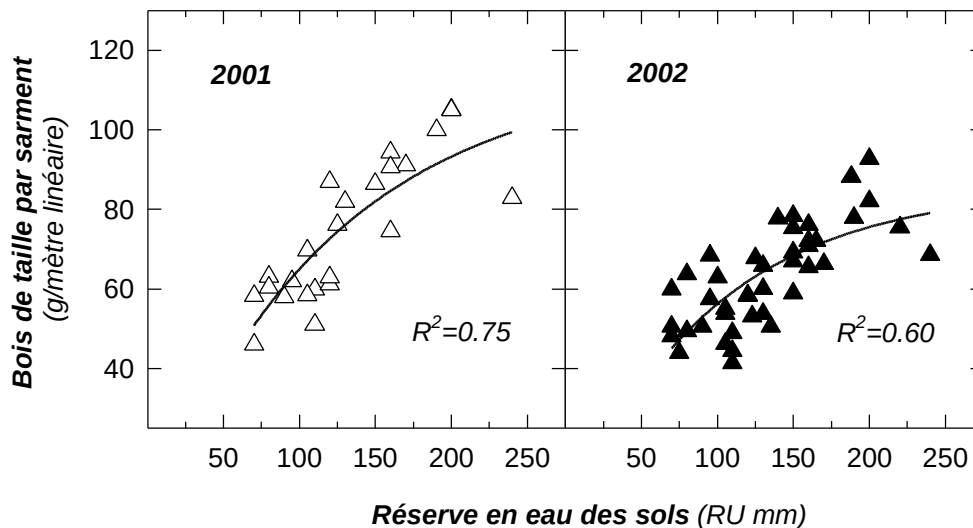


Fig. 46 : Relation établie entre la réserve en eau des sols (RU) et le poids des bois de taille par sarment sur l'ensemble du réseau de parcelles. Chasselas, 4 zones pilotes du Canton de Vaud (CH), 2001-2002.

De manière générale, le poids d'un sarment à la taille (dont la longueur a été ramenée à 1m) a été largement dépendant de la réserve en eau des sols. Les sites à forte RU ont affiché des poids de bois de taille supérieurs par rapport aux sites dont la RU est limitée. Le niveau d'alimentation hydrique de la vigne a ainsi joué un rôle prépondérant sur les caractéristiques de la végétation (vigueur des sarments). L'alimentation minérale des sols et de la plante détermine également le niveau de vigueur des sarments (pour autant que le mode de conduite soit identique, c.à.d. densité de plantation, charge en rameaux par cep, rendement par souche).

En considérant les quatre zones pilotes de façon séparée, on observe que la RU des sols a joué un rôle prépondérant sur le poids individuel du sarment à la taille en 2001 comme en 2002 (fig. 47).

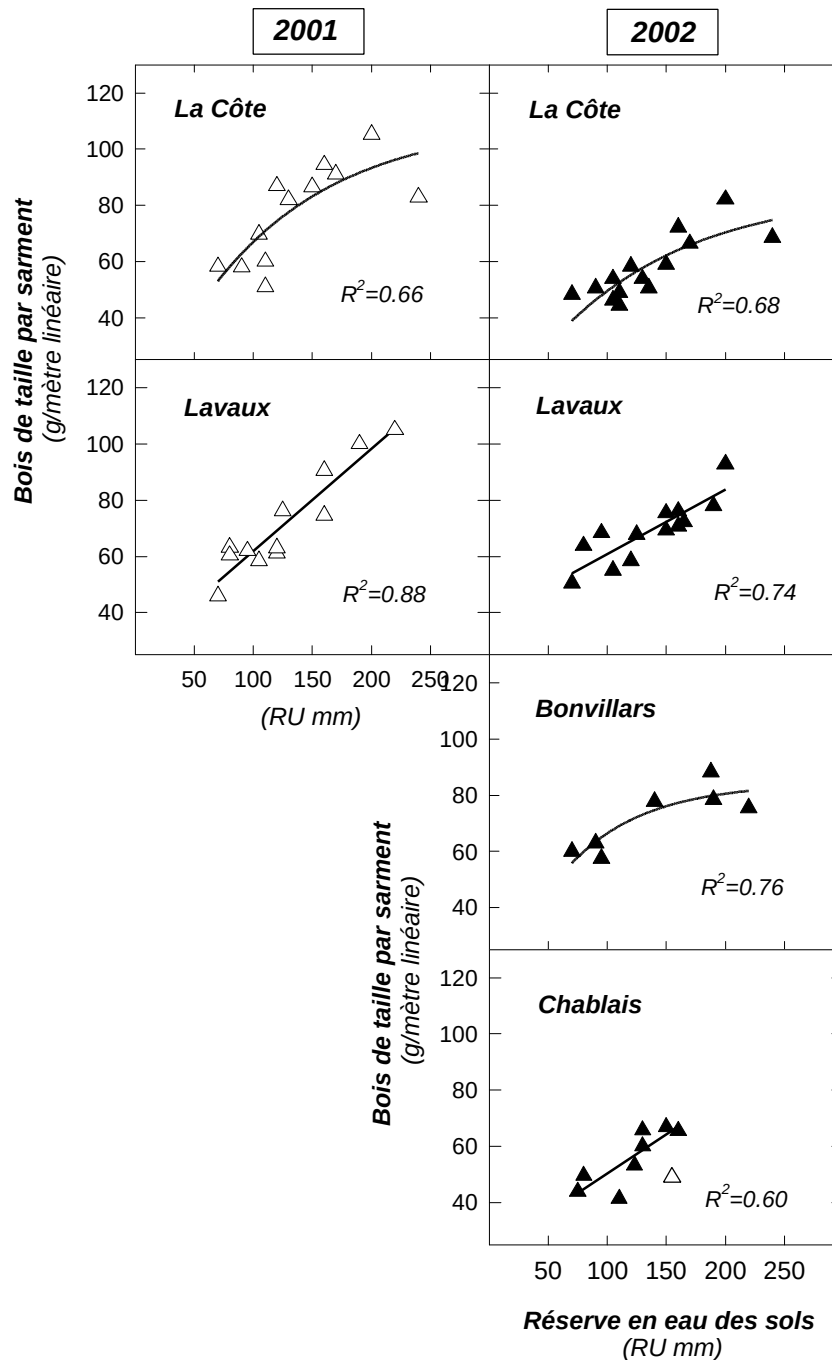


Fig. 47: Relation établie entre la réserve en eau des sols (RU) et les poids de bois de taille par zones pilotes (La Côte, Lavaux, Bonvillars, Chablais). Chasselas, Canton de Vaud (CH), 2001-2002.

Le poids des sarments s'est élevé de 50g/m.l. à plus de 100g/m.l. lorsque la RU augmentait de 70 à plus de 200 mm. Les valeurs du poids de bois de taille ont par ailleurs été un peu plus faibles en 2002 par rapport à 2001, année durant laquelle le déficit hydrique fut limité.

L'alimentation hydrique de la vigne, observée en cours de saison au moyen du Ψ_{base} , a été corrélée avec le poids des sarments à la taille (fig. 48). La valeur du potentiel de base moyen, mesuré durant la période de végétation, reflète globalement le régime

hydrique de la vigne : ce dernier a largement déterminé la vigueur individuelle des sarments. Le poids des sarments a diminué lorsque les valeurs du Ψ_{base} moyen devenaient de plus en plus négatives (augmentation de la restriction en eau) durant les saisons 2001 et 2002.

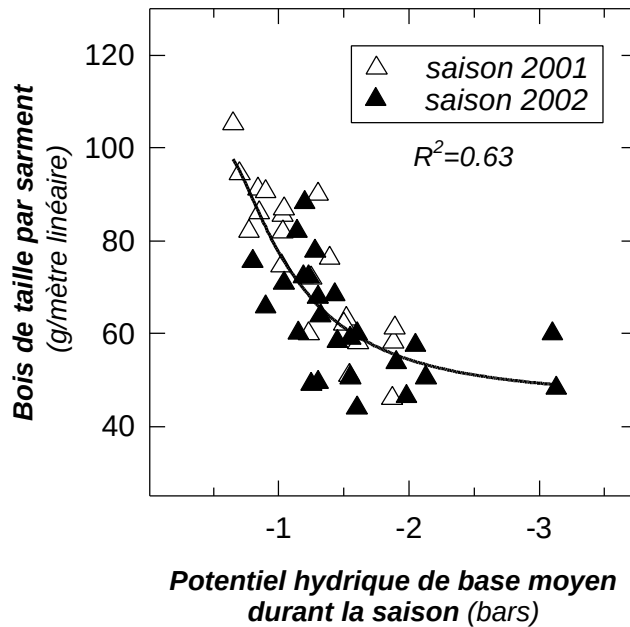


Fig. 48 : Relation entre le Ψ_{base} moyen, mesuré durant la saison, et les poids de bois de taille sur l'ensemble du réseau de parcelles. Chasselas, 4 zones pilotes du Canton de Vaud (CH), 2001-2002.

Dans les quatre zones pilotes à l'étude, la corrélation s'est avérée satisfaisante entre le Ψ_{base} moyen de la saison et le poids individuel des sarments à la taille (fig. 49). A Bonvillars, la relation a été un peu moins bonne que dans les autres régions viticoles. L'explication de ce phénomène réside en partie dans le fait que certains sites bénéficient d'une installation d'arrosage (goutte à goutte) dont l'utilisation même raisonnée permet d'éviter des contraintes hydriques trop fortes à la vigne et d'influer négativement sur les caractéristiques de la vendange. Pour cette raison, ces parcelles présentent une vigueur qualifiée de moyenne. Il est à noter que durant la saison 2002 aucun arrosage n'a été effectué sur le réseau expérimental. La meilleure corrélation observée entre le Ψ_{base} moyen et le poids des sarments a été remarquée à la Côte où le réseau de parcelles est plus important et où les caractéristiques hydriques des sites sont très différenciés.

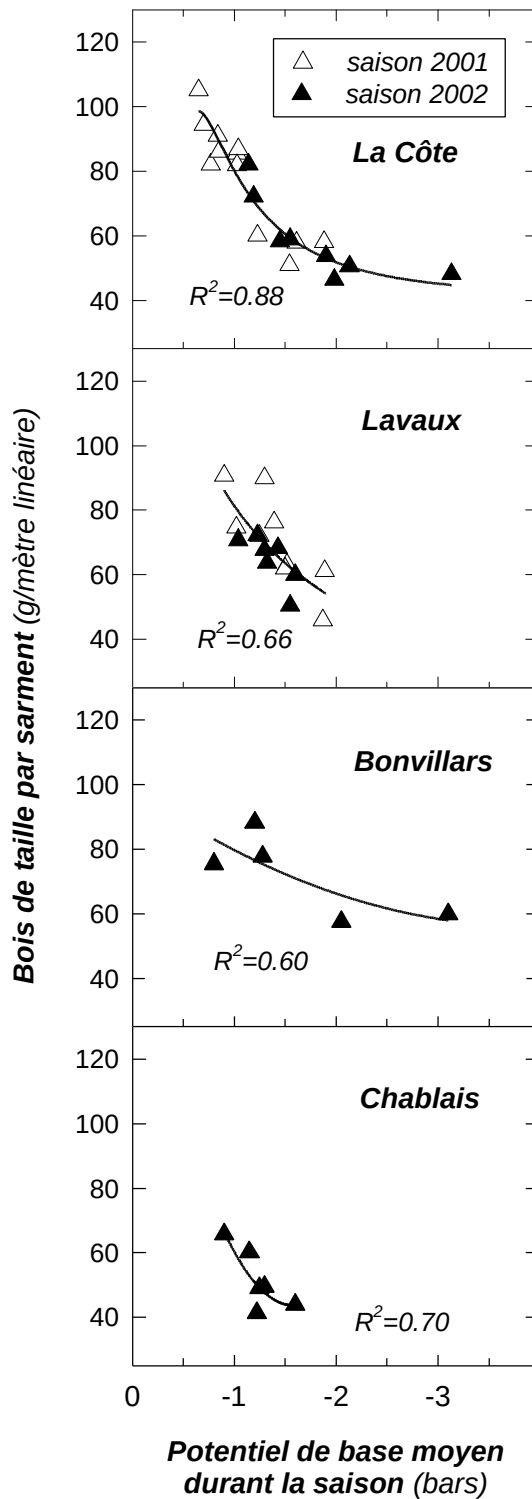


Fig. 49 : Relation établie entre le Y_{base} moyen, mesuré durant la saison, et les poids de bois de taille dans les 4 zones pilotes (La Côte, Lavaux, Bonvillars, Chablais). Chasselas, Canton de Vaud (CH), 2001-2002.

Mesures conduites sur un réseau élargi à la Côte

Des mesures de poids de bois de taille ont été réalisées sur un réseau d'une quarantaine de parcelles, réparties sur 100 ha à la Côte. Ce réseau de parcelles avait été choisi pour l'étude de la mesure du Ψ_{base} menée à grande échelle. Les résultats du poids individuel

des sarments à la taille ont été reportés sur la carte des réserves potentielles (ou estimées) en eau, établie à la suite de l'étude pédologique (résultats non présentés).

Les premiers résultats indiquent une bonne relation entre l'estimation de la RU d'une zone viticole et le poids individuel des sarments prélevés à la taille. Les entités pédologiques à faible RU ont affiché des valeurs de poids de bois de taille plus faibles que les entités à réservoir élevé en eau. Il faut néanmoins considérer ces résultats avec précaution car les facteurs susceptibles d'influer sur la vigueur d'un sarment sont nombreux (rendement par souche, alimentation minérale de la vigne...).

4.5 Composantes du rendement et maturation du raisin

4.5.1 Analyse de la production et de la maturation

Croissance et poids des baies

L'évolution du poids des baies, mesurée de la nouaison à la période des vendanges durant les années 2001 à 2003, est présentée à la figure 50.

En 2001, l'évolution du poids des baies a été suivie uniquement durant la maturation du raisin. A la Côte et à Lavaux, les sites à forte RU (> 150 mm) ont affiché les poids des baies les plus importants en fin de maturation. Suivent dans l'ordre des sites dont la RU se situe entre 100 et 150 mm, puis ceux dont la RU est inférieure à 100mm. A la vendange, le poids final des baies a atteint près de 4,0 g sur les parcelles à forte RU et 3,3 g sur les sites à la RU la plus faible.

Durant les saisons 2002 et 2003, la progression du poids des baies a été suivie depuis la nouaison jusqu'à la récolte. De manière générale, toutes les courbes de croissance des baies montrent une double sigmoïde qui rend compte des phénomènes de multiplication et de grandissement cellulaire. Dans une première phase (croissance herbacée), qui a duré environ 30 à 35 jours (n° de jour 185 à 215/220), l'augmentation du poids des baies a été rapide. Cette période a été suivie d'une phase de ralentissement de la croissance des baies durant une dizaine de jours peu avant la véraison. L'accroissement du poids des baies a repris durant la maturation du raisin puis s'est fortement atténué à la fin de cette même période (à partir de la mi-septembre jusqu'aux vendanges).

Les sites à forte RU (> 150 mm) ont affiché les poids de baies les plus élevés durant la saison 2002 et ceci dès la phase de ralentissement de la croissance des baies, située autour de la véraison. Les poids de baies les plus faibles ont été observés sur les sites dont la RU est inférieure à 100 mm. Une situation intermédiaire a prévalu sur les parcelles dont la RU se situe entre 100 et 150 mm.

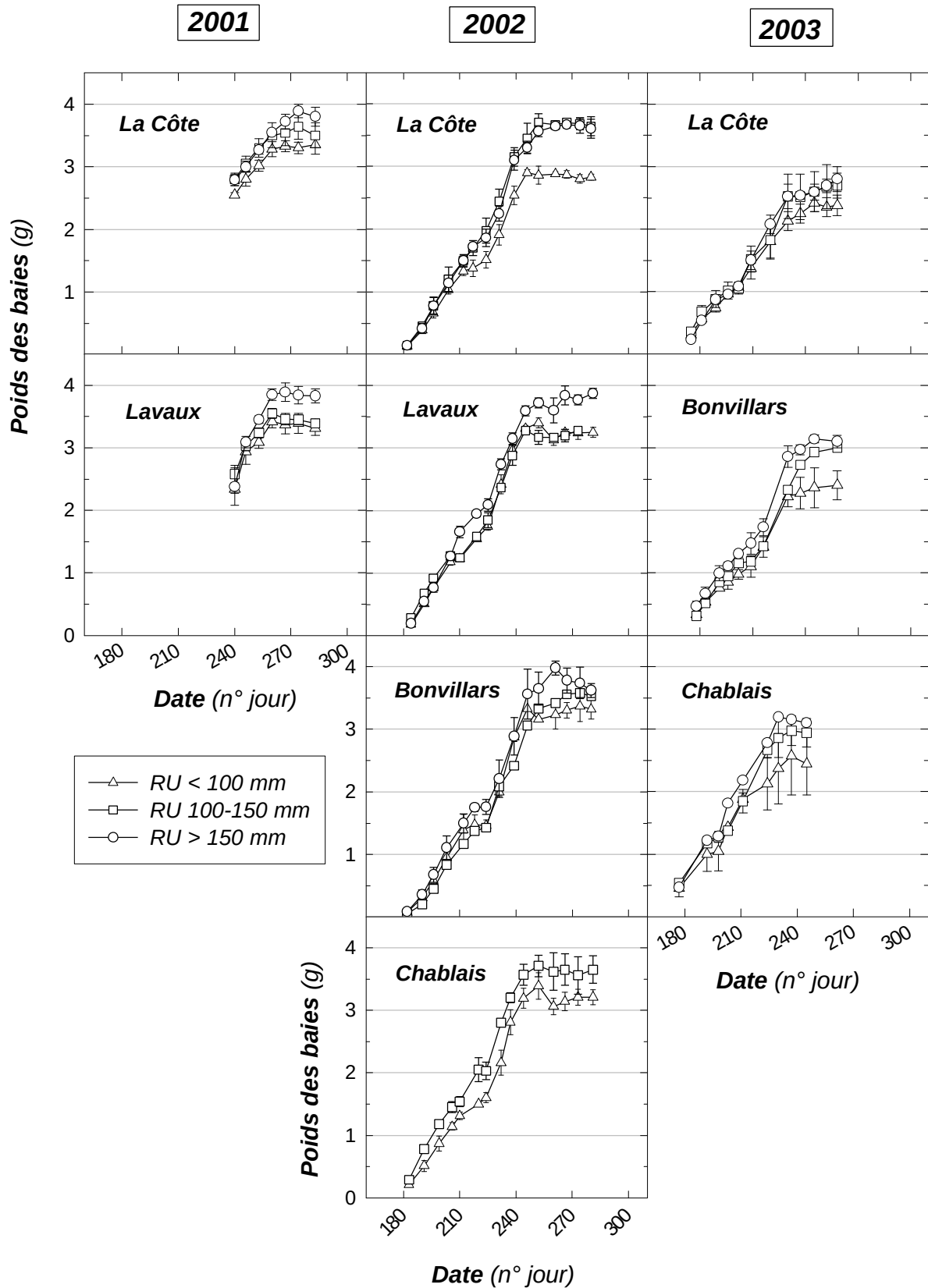


Fig. 50 : Evolution du poids des baies en cours de saison dans les 4 zones pilotes (La Côte, Lavaux, Bonvillars, Chablais) en fonction de la réserve en eau des sols (RU). Chasselas, Canton de Vaud (CH), 2001-2003.

Le poids final des baies, observé en 2003, a été nettement inférieur (- 25% environ) à celui des millésimes précédents en relation avec la contrainte hydrique subie par la vigne cette année-là. Le poids final des baies à la vendange a oscillé entre 2,2 g et 3,0 g en fonction de la RU des sols.

La dimension finale des baies dépend principalement des particularités génétiques, pédo-climatiques (température, précipitations, RU) et physiologiques des cépages (équilibre hormonal, régime hydrique, abondance des sucres), relève Champagnol (1984). L'alimentation en eau influe fortement sur la croissance et le développement des baies : elle intervient surtout sur l'équilibre hormonal et la capacité de photosynthèse beaucoup plus que par la contribution directe de l'eau en tant que constituant des baies (Champagnol, 1984).

Dans notre étude, l'alimentation hydrique, estimée soit par la RU des sols soit par le régime hydrique de la vigne (Ψ_{base} moyen), a exercé une influence prépondérante sur le poids final des baies à la vendange. En effet, une corrélation positive a été observée entre la RU des sols et le poids des baies à la récolte en 2001, 2002 et 2003 pour l'ensemble du réseau (résultats non présentés). Les poids de baies ont varié de 3,0 à 4,0 grammes pour des RU allant de 70 à 220 mm en 2001 et 2002, et de 2,0 à 3,0 g en 2003. Une relation étroite a également pu être établie entre le Ψ_{base} moyen des vignes, enregistré durant la saison, et le poids final des baies de 2001 à 2003 sur l'ensemble du réseau (fig. 51).

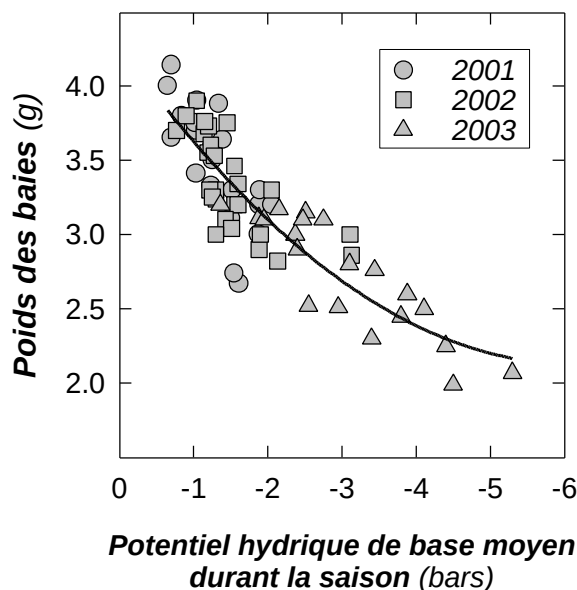


Fig. 51 : Relation établie entre le Ψ_{base} moyen, mesuré durant la saison, et le poids final des baies à la vendange dans les 4 zones pilotes (La Côte, Lavaux, Bonvillars, Chablais). Chasselas, Canton de Vaud (CH), 2001-2003.

Les vignes ayant subi une restriction en eau en cours de saison (valeurs les plus négatives du Ψ_{base}) ont affiché des poids de baies relativement faibles, se situant autour de 2,0 à 2.5 grammes. A l'inverse, les sites à fortes disponibilités hydriques (état proche de la turgescence) ont montré les poids de baies les plus importants s'élevant jusqu'à 4,0 grammes.

L'évolution du poids des baies a également été observée en relation avec les types de sols sur lesquels les vignes sont implantées (fig. 52-55).

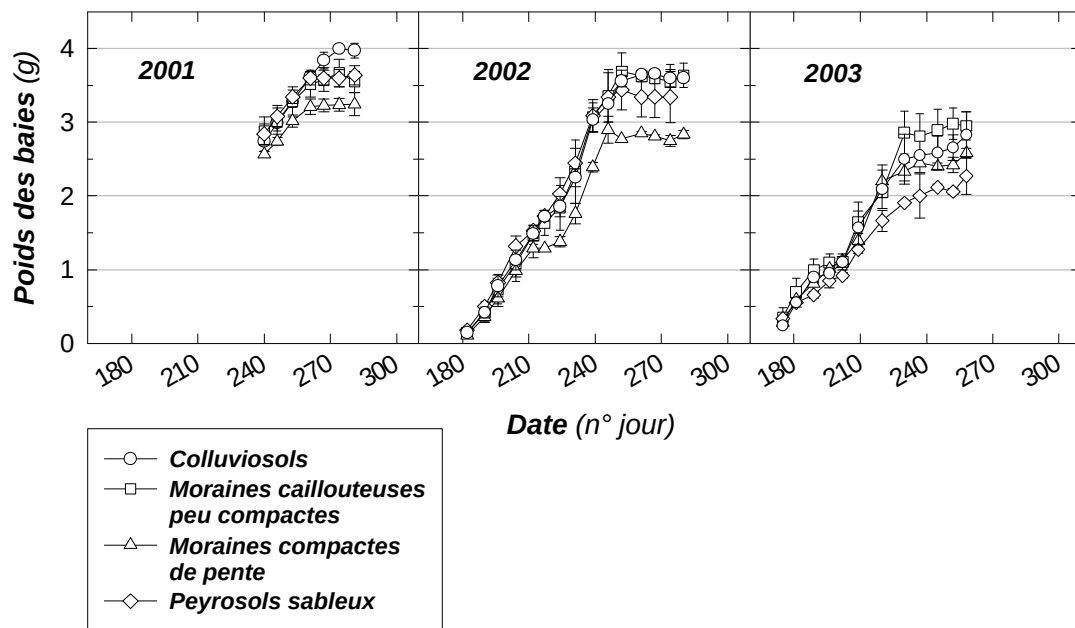


Fig. 52 : Evolution du poids des baies en cours de saison sur le réseau de parcelles à la Côte en fonction du type de sols. Chasselas, La Côte (CH), 2001-2003.

A la Côte, les vignes complantées sur des colluviosols de bas de pente et des moraines caillouteuses peu compactes ont présenté les poids des baies les plus élevés durant les 3 années d'observation. En 2001, année de fortes précipitations, les poids de baies les plus faibles ont été enregistrés sur des sites de moraines compactes de pente. Des résultats identiques ont été notés en 2002, année pendant laquelle la maturation du raisin s'est réalisée dans des conditions de contrainte hydrique modérée dans ces sols. Les peyrosols ont affiché une situation intermédiaire durant les années 2001 et 2002. En 2003, l'effet de la contrainte hydrique sévère, subie dès la nouaison par les vignes implantées sur des peyrosols, s'est manifesté par des poids de baies nettement

inférieurs à ceux des vignes situées dans des colluviosols et des moraines caillouteuses peu compactes. Une situation intermédiaire a prévalu sur les sites de moraines compactes de pente où la contrainte hydrique fut modérée pendant la période végétative et parfois forte à la véraison dans certains cas.

Le suivi des poids de baies à **Lavaux** montre que les sites implantés sur des colluviosols et des moraines caillouteuses peu compactes à grands réservoirs hydriques ont affiché les poids de baies les plus élevés se situant entre 3,7 et 4,0 g à la récolte en 2001 et 2002. Les baies ont été un peu moins volumineuses dans les vignes complantées sur des moraines compactes de pente ou situées sur la molasse conglomératique ou gréseuse.

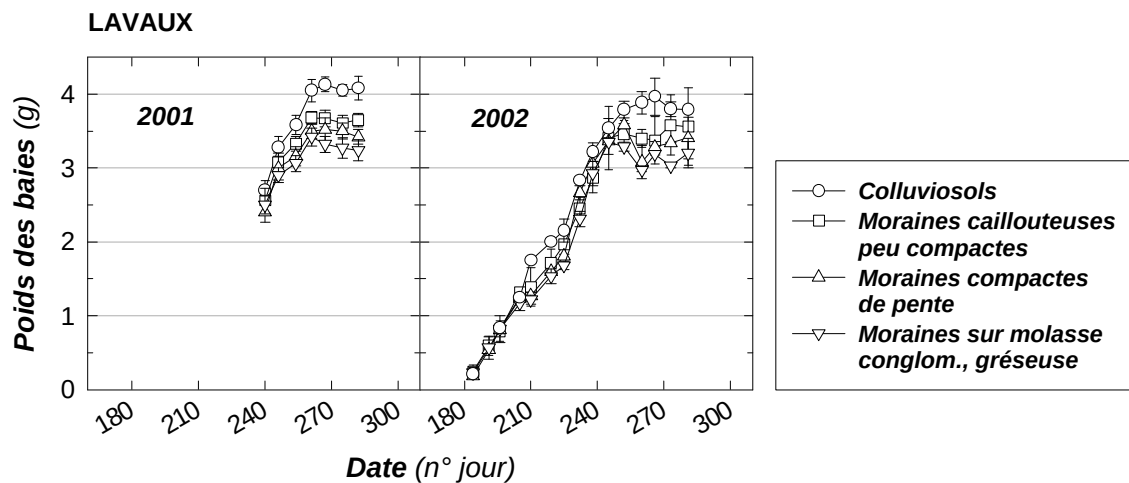


Fig. 53 : Evolution du poids des baies en cours de saison sur le réseau de parcelles à la Côte en fonction du type de sols. Chasselas, Lavaux (CH), 2001-2002.

A Bonvillars, les poids de baies les plus importants ont été observés dans les colluviosols et les moraines moyennement compactes. Les vignes situées sur le calcaire du Jura ont présenté par contre des poids des baies nettement inférieurs, notamment en 2003, année durant laquelle la contrainte hydrique a été marquée sur les sites.

Dans le Chablais, les vignes implantées dans la moraine locale caillouteuse ont affiché les poids de baies les plus élevés. Situées sur le gypse, les vignes ont présenté les poids de baies les plus faibles. Une situation intermédiaire a prévalu dans les sites implantés sur des sols issus de flysch.

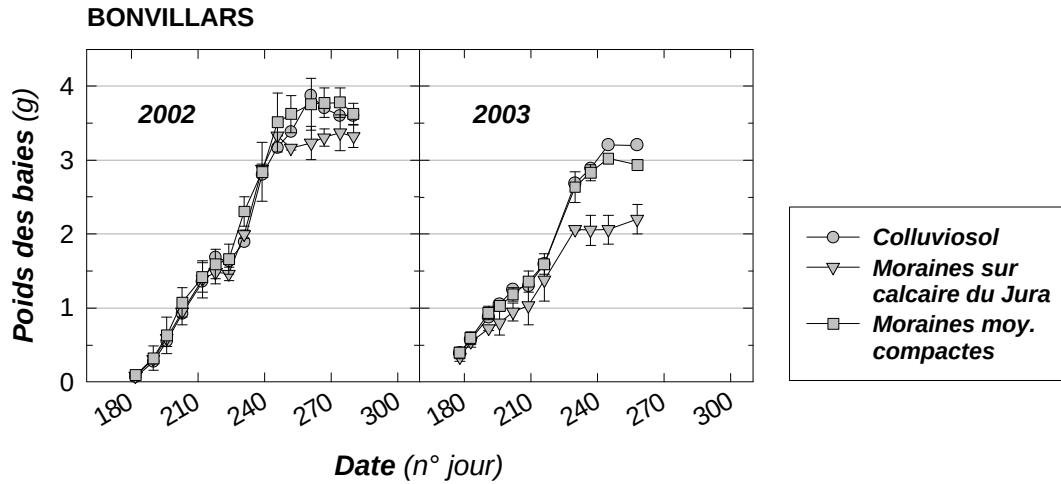


Fig. 54 : Evolution du poids des baies en cours de saison sur le réseau de parcelles à la Côte en fonction du type de sols. Chasselas, Bonvillars (CH), 2002-2003.

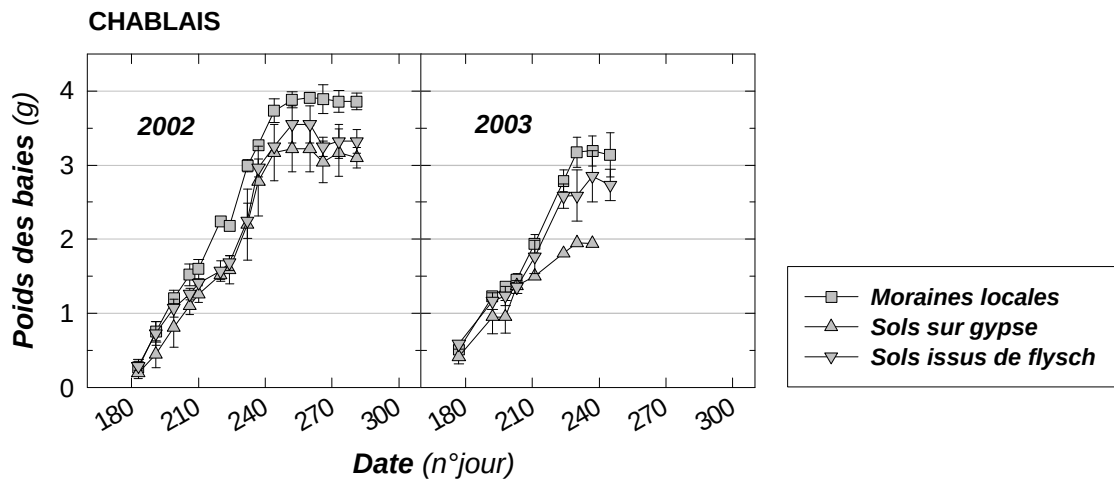


Fig. 55 : Evolution du poids des baies en cours de saison sur le réseau de parcelles à la Côte en fonction du type de sols. Chasselas, Chablais (CH), 2002-2003.

La croissance des baies de raisin a fait l'objet de nombreuses études, notamment celle très détaillée d'Ollat (1997) qui établit deux phases de développement des baies, correspondant chacune à un type de fonctionnement différent. Nous suggérons aux personnes intéressées par ce thème de prendre connaissance de cette étude très riche et très passionnante. Parmi les facteurs prépondérants du développement des baies, le statut hydrique de la vigne joue un rôle déterminant (Hardie et Considine, 1976). Divers auteurs ont montré par ailleurs que non seulement l'intensité d'une contrainte hydrique influait sur la taille des baies mais également l'époque d'apparition et la durée du déficit hydrique déterminait la croissance des baies (Ojeda *et al.*, 2001).

Maturation et qualité de la vendange

ZONE PILOTE DE LA CÔTE

- *Accumulation des sucres*

Le niveau de maturation du raisin demeure le premier facteur qui conditionne la qualité des vins. De nombreuses études (Jourjon *et al.* 1992 ; Morlat 1989 ; Lebon 1993 ; van Leeuwen et Seguin, 1994) ont montré que la qualité du raisin est étroitement liée aux conditions du milieu. L'analyse de l'accumulation des sucres dans les raisins au cours des maturations 2001-2003 a indiqué des différences de comportement entre les vignes établies sur les principaux terroirs viticoles à la Côte (fig. 56).

Durant la saison 2001, ces différences d'accumulation des sucres ont été dues essentiellement au niveau du rapport feuille-fruit (SFE /kg de raisin) et de la répartition des glucides dans la plante (influencée notamment par l'arrêt de la croissance végétative, la biomasse des rognages et des bois de taille) observés chez les vignes conduites sur les principaux types de sols. Etablies sur des colluviosols, les vignes ont présenté un potentiel de rendement (fertilité, poids des baies et des grappes) et de développement végétatif (rognages, bois de taille) importants qui a conditionné l'accumulation des sucres dans les raisins : les teneurs en sucres ont été un peu moins élevées que dans les vignes situées sur d'autres terroirs. Les parcelles implantées sur des moraines épaisses et peu compactes ont affiché les taux de sucres les plus importants.

En 2002, l'analyse de l'accumulation des sucres a montré que les teneurs en sucres étaient plus faibles dans les vignes implantées sur des colluviosols en comparaison avec les autres sites durant la période de maturation. Les parcelles établies sur des moraines de pente plus ou moins caillouteuses et compactes ainsi que sur les peyrosols sableux ont présenté des taux de sucres assez semblables entre elles, mais un peu supérieurs à ceux des vignes complantées sur des colluviosols. Durant la saison 2002, les rapports feuilles-fruits (SFE/kg de raisin) étaient supérieurs ou équivalents à 1.0 m²

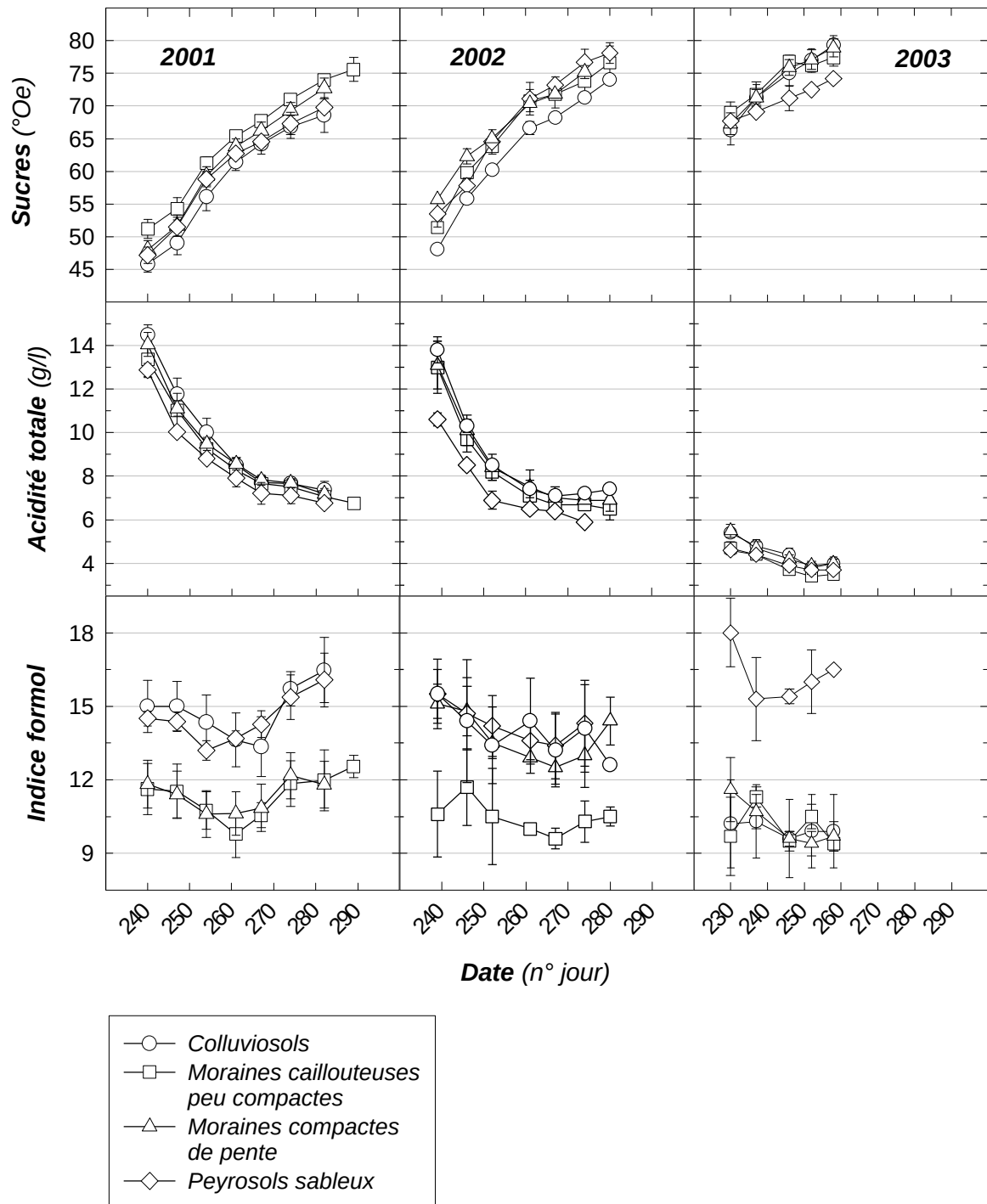


Fig. 56 : Evolution de l'accumulation des sucres dans les baies, de l'acidité totale et de l'indice de formol des raisins en cours de maturation sur l'ensemble du réseau de parcelles, regroupées par types de sols. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2001-2003.

sur l'ensemble des sites. Ce facteur ne permet pas, à lui seul, d'expliquer les différences de gains en sucres des baies observées sur les principaux types de sols à la Côte. Par contre, la vigueur des souches, estimée par les poids des bois de taille, a été

très élevée dans les sols à forte RU et notamment dans les colluviosols où aucune restriction hydrique n'a été constatée durant les deux saisons de mesure. La répartition des sucres entre la partie végétative et reproductive a pu être ainsi fortement influencée par le niveau de vigueur des vignes.

La maturation 2003 du raisin a été très précoce et caractérisée par une contrainte hydrique modérée sur la grande majorité des sites qui fut très favorable à l'accumulation des sucres dans les baies. A la vendange, des sondages se situant entre 75 et 82 °Oe ont été observés dans les parcelles établies sur des colluviosols, des moraines caillouteuses peu compactes et des moraines de pente très compactes. Seuls les sites implantés sur des peyrosols sableux ont présenté des teneurs en sucres plus modestes : la contrainte sévère, subie par la vigne durant l'été, a entravé la bonne accumulation des sucres dans les raisins sur ces sites.

- *Acidité totale et teneur en acide malique et tartrique*

De même que la teneur en sucres réducteurs, l'acidité totale, mesurée au moment des vendanges, constitue un des paramètres couramment utilisés pour évaluer la maturité du raisin. L'acidité totale des raisins a diminué fortement au cours de la maturation (fig. 56). Elle a été un peu plus élevée au début de septembre dans les vignes établies sur des colluviosols que dans les autres terroirs. L'acidité la plus basse des raisins a été observée en 2001 comme en 2002 dans les vignes situées sur des peyrosols, les moraines épaisses peu compactes ou les moraines compactes de pente présentant des acidités intermédiaires. Toutefois, les différences se sont avérées très faibles à la vendange entre les principaux terroirs. Une teneur plus élevée en acide malique des raisins a été constatée chez les vignes installées sur des colluviosols (résultats non présentés). Dans les autres types de sols, l'évolution de l'acide malique des baies a été quasi identique. La teneur en acide tartrique des raisins n'a présenté aucune différence notable entre les divers terroirs viticoles (résultats non présentés).

Les températures très élevées, enregistrées durant l'été et la maturation du raisin en 2003, ont entraîné des valeurs très basses en acidité totale sur l'ensemble des sites. Aucune différence n'a été relevée entre les divers terroirs. L'acide malique a été

fortement dégradé en raison des forts éclaircissements dans la zone des grappes (chute des feuilles provoquée par le stress hydrique) et des températures élevées.

La dégradation des acides dans la baie en cours de maturation dépend principalement des niveaux thermiques auxquels elle est soumise. Divers auteurs (Smart 1985 ; Smart *et al.* 1985, 1988) signalent que l'acide malique est principalement dégradé lorsque le microclimat lumineux et thermique des baies est très favorable. Le niveau d'acidité des moûts peut également être influencé par le microclimat lumineux des feuilles (Smart, 1985) : un faible éclaircissement du feuillage (entassement, index foliaire bas) peut entraîner un surplus d'accumulation de potassium dans les parties vertes et les baies à l'origine de la salification d'une partie des acides et de pH supérieur sur moût. Enfin, la vigueur favorise aussi la richesse en acide malique de trois manières selon Champagnol (1984) : en augmentant la synthèse foliaire, en retardant les diverses phases de développement (la maturation se déroule alors dans une période qui a des chances d'être plus froide) et en maintenant la vendange parmi des souches plus touffues (la proportion de grappes à l'ombre est augmentée).

- *L'indice de formol*

La figure 56 permet de suivre l'évolution de l'indice de formol des moûts en cours de maturation sur les principaux terroirs viticoles. La teneur en azote des moûts, reflète bien les conditions d'alimentation azotée auxquelles la vigne est soumise durant la période de végétation.

La détermination de l'indice de formol des moûts a été proposée par Aerny (1996) comme méthode rapide d'appréciation de l'azote assimilable par les levures dans les moûts. Pour des moûts de Chasselas prélevés à la vendange, Lorenzini (1996) propose trois paliers d'appréciation pour les valeurs de l'indice de formol :

- moûts fortement carencés en azote pour des valeurs d'indice de formol inférieures à 10 ;
- moûts modérément carencés pour des indices situés entre 10 et 14 ;
- moûts correctement pourvus en azote pour des indices de 14 et plus.

De manière générale, l'indice de formol est demeuré relativement stable durant la maturation du raisin en 2001 (une faible augmentation de l'indice a été observée à la fin de septembre). La même année, les vignes établies sur des colluviosols et des peyrosols sableux ont indiqué des taux plus élevés d'indice de formol que les vignes situées sur diverses moraines caillouteuses ou compactes. A la vendange 2001, les moûts de vignes installées sur les moraines épaisses et peu compactes ainsi que sur des moraines compactes ont été modérément carencés avec des indices compris entre 11 et 12,5. En 2002, seules les vignes établies sur les moraines caillouteuses et peu compactes ont présenté des indices de formol compris entre 10 et 12, indiquant que les moûts étaient moyennement carencés en azote. Les autres types de sols ont affiché par contre des moûts correctement pourvus en azote. La maturation 2003 du raisin a été caractérisée par des valeurs faibles de l'indice de formol sur une grande partie des sites : les moûts ont été moyennement carencés en azote dans les vignes implantées sur les colluviosols et les moraines compactes ou non de pente. Par contre, les valeurs de l'indice de formol ont été élevées dans les peyrosols sableux de la Côte.

L'évolution de la teneur en composés azotés dans les raisins en cours de maturation a été étudiée sur Riesling par Löhnertz (1988), Löhnertz *et al.* (1998) et Rodriguez-Lovelle et Gaudillère (2002). Löhnertz (1988) rapporte que la teneur en azote des raisins augmente de manière importante au cours des deux semaines suivant la véraison (indice réfractométrique des moûts situé entre 35 et 40 °Oechslé) et que cette accumulation se poursuit pour s'accélérer en fin de maturation. Le même auteur souligne que, de ce fait, des vendanges précoces ont pour corollaire des taux d'acides aminés plus faibles dans les moûts, susceptibles d'aggraver la conséquence de conditions de stress hydro-azoté sur la qualité des vins. Par ailleurs, de nombreux auteurs (Maigre *et al.*, 1995 ; Maigre et Aerny, 2000 ; Larchevêque *et al.* 1998,1999, Spring, 1999) ont mis en évidence des relations entre l'indice de formol du moût et l'azote foliaire, la concentration en alcools supérieurs des vins et la durée de fermentation alcoolique. L'expression de la vigueur des souches et le potentiel œnologique des raisins sont ainsi largement influencés par l'alimentation en azote de la vigne. Cette dernière est dépendante de la minéralisation de l'humus du sol et d'une éventuelle fertilisation azotée.

La vitesse de la minéralisation de l'azote est déterminée par de nombreuses caractéristiques du sol et du pédoclimat (teneur en eau des sols par exemple) et peut donc être considéré comme une composante de l'effet terroir (van Leeuwen *et al.* 2000). L'interprétation des teneurs en azote assimilable des moûts mise en relation avec l'alimentation en azote de la vigne nécessite l'établissement de valeurs seuils (Lorenzini, 1996). De manière générale, l'alimentation en azote de la vigne doit être modérée, notamment chez les cépages blancs. Si une alimentation trop élevée en azote peut entraîner une vigueur excessive et accroître la sensibilité aux maladies fongiques, une carence en azote est également préjudiciable à la composition aromatique du raisin (Choné, 2001) et à la qualité des vins (Spring 2002, 2003).

Caractéristiques des vendanges 2001-2003

- Vendanges 2001

Les différentes caractéristiques de la vendange 2001 (poids des baies et des grappes, rendement, rapport SFE/kg de raisin) ainsi que la qualité des raisins sont reportées dans les annexes 9 et 10.

Les vignes situées sur des colluviosols ont montré les poids de baies et de grappes les plus élevés : le rendement par souche a été par conséquent important et s'est élevé à près de 2,5 kg/cep. Les vignes établies sur des moraines compactes de pente à faible enracinement ont indiqué les valeurs de poids de baies et de grappes les plus faibles. Les vignes issues de moraines épaisses et peu compactes ainsi que sur peyrosols ont manifesté des résultats intermédiaires. Le maintien d'une grappe par bois (environ 7 grappes/souche), réalisé sur l'ensemble des parcelles, a entraîné un développement conséquent de la taille des baies et des grappes particulièrement sur les terroirs à forte réserve hydrique, sans limitation d'approvisionnement en cours de saison, et à enracinement profond (colluviosols, peyrosols, moraines épaisses). En fonction de la densité de plantation, le rendement estimé par m² de sol s'est élevé entre 1,5 et 1,7 kg sur les divers terroirs viticoles (rendement estimé sur les micro-parcelles de 50 ceps).

Dans ces conditions, le rapport feuille-fruit (SFE /kg de raisin) a atteint 0,8 m² environ dans les vignes établies sur des colluviosols et des peyrosols, et 1,0 à 1,1 m² dans les vignes situées sur les moraines à compacité importante ou faible. Ce résultat ne fut pas sans conséquence sur la teneur en sucres des raisins à la vendange 2001.

Les vignes implantées sur des colluviosols ont présenté aussi l'acidité totale et la teneur en acide malique des raisins les plus hautes : les autres terroirs indiquant des valeurs plus faibles mais assez semblables entre elles. La teneur en acide tartrique des moûts s'est avéré très proche dans les différentes parcelles. Les valeurs d'indice de formol à la vendange furent plus élevées dans les colluviosols et les peyrosols (indiquant que les moûts étaient bien pourvus en azote) que chez les vignes établies sur les moraines épaisses et peu compactes ou les moraines compactes (moûts modérément « carencés » avec des indices inférieurs à 14). A la vendange, les taux de pourriture ont été assez élevés dans les vignes vigoureuses établies sur les colluviosols, les peyrosols et les moraines épaisses et peu compactes. Les vignes à développement végétatif restreint, situées sur des moraines compactes, n'ont presque pas présenté de pourriture des raisins.

- Vendanges 2002

Le poids final des baies et des grappes a été le plus élevé dans les types de sols à forte réserve hydrique (annexe 11), sans limitation d'approvisionnement en eau au cours de la saison 2002 (colluviosols, moraines caillouteuses et peu compactes). Des poids de baies et de grappes un peu plus faibles ont été observés dans les sites implantés sur des peyrosols sableux et principalement sur des moraines compactes de pente à enracinement et RU limités. La limitation de la charge en raisins, menée à une grappe par bois (environ 7 grappes par souche) et réalisée sur l'ensemble des sites, a permis d'obtenir des rendements au m² de sol oscillant entre 1,0 et 1,4 kg (soit 1,5 à 2,3 kg par souche en fonction de la densité de plantation). Le rapport SFE/kg de raisin a été supérieur à 1,0 m² sur la majorité des sites (à l'exception de 3 sites) : ce rapport n'a pas été considéré comme un facteur limitant en 2002 pour l'accumulation des sucres dans les baies (tableau 42). La teneur en sucres des baies a été globalement semblable dans les sites établis sur des colluviosols, des moraines caillouteuses et peu compactes ainsi que sur des peyrosols sableux.

Néanmoins, des variations importantes ont pu être remarquées entre parcelles d'un même type de sol. Les sites implantés sur des moraines compactes de pente à faible RU ont affiché des concentrations un peu plus élevées en sucres des baies que dans les autres terroirs à l'étude.

Types de sols	Parcelles	Rapport SFE/kg (m ²)	Brix	°Oe	Acidité totale (g/l)	Acide malique (g/l)	Acide tartrique (g/l)	Indice formol
Colluviosols	Begnins 06	1.15	18.0	74.0	7.4	4.4	5.5	12.6
	Begnins 07	1.17	17.3	71.3	6.8	4.0	5.2	15.9
	Bursinel 02	0.75	18.7	77.0	5.5	3.2	5.1	14.4
	Moyenne	1.02 ± 0.13	18.0 ± 0.4	74.1 ± 1.6	6.6 ± 0.6	3.9 ± 0.3	5.3 ± 0.1	14.3 ± 0.9
Moraines caillouteuses peu compactes	Begnins 01	2.15	19.2	79.3	6.9	3.8	5.5	10.1
	Vinzel 01	1.13	17.9	73.7	6.4	3.6	5.6	13.0
	Vinzel 03	1.13	17.5	72.0	6.3	3.5	5.3	11.2
	Moyenne	1.47 ± 0.34	18.2 ± 0.5	75.0 ± 2.2	6.5 ± 0.2	3.6 ± 0.1	5.5 ± 0.1	11.4 ± 0.8
Moraines compactes de pente	Begnins 02	1.02	19.2	79.4	6.9	3.8	5.5	14.8
	Begnins 03	1.38	17.7	72.7	7.1	3.9	5.5	14.2
	Vinzel 02	0.87	18.5	76.3	6.1	2.9	5.5	8.9
	Luins 01	1.62	19.3	79.7	6.4	3.6	5.5	13.4
	Luins 03	1.00	18.5	76.5	7.3	4.4	5.6	15.4
	Bursinel 01	1.85	19.4	80.1	5.3	2.8	5.2	12.4
	Moyenne	1.29 ± 0.16	18.8 ± 0.3	77.5 ± 1.2	6.5 ± 0.3	3.6 ± 0.2	5.5 ± 0.1	13.2 ± 0.9
Peyrosols sableux	Luins 02	1.34	18.5	76.1	5.8	3.4	5.3	16.0
	Dully 02	1.43	18.0	74.2	6.1	3.4	5.4	12.5
	Bursins 02	0.86	17.5	72.0	6.6	3.8	5.4	15.4
	Moyenne	1.21 ± 0.17	18.0 ± 0.3	74.1 ± 1.2	6.2 ± 0.2	3.5 ± 0.1	5.4 ± 0.1	14.6 ± 1.1

Tableau 42 : Résultats obtenus lors du dernier prélèvement de maturation effectué sur les différentes parcelles du réseau, regroupées par types de sols (SFE/kg, °Oe, acidité totale, acide malique et tartrique, indice de formol). Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2002.

Les vignes complantées sur des colluviosols ont présenté de manière générale des raisins à l'acidité totale et à la teneur en acide malique les plus élevées. A l'inverse, l'acidité totale et la teneur en acide malique les plus basses ont été enregistrées dans les sites établis sur des peyrosols sableux ; les vignes issues de moraines plus ou moins caillouteuses et/ou compactes présentant une situation intermédiaire. La teneur en acide tartrique s'est avérée assez proche dans les différentes parcelles. Les indices de formol, observés à la vendange, indiquent que les moûts ont été correctement pourvus en azote dans les colluviosols, les peyrosols sableux et à quelques exceptions près dans les moraines compactes de pente. Les trois parcelles établies sur des moraines caillouteuses et peu compactes ont affiché des teneurs en formol des baies indiquant des moûts modérément carencés en azote assimilable.

- Vendanges 2003

Les principales caractéristiques des vendanges 2003 résident dans les faibles poids des baies (annexe 12) et de rendement à la Côte ainsi que dans les teneurs élevées en sucres des raisins qui découlent de la restriction en eau subie par la vigne en cours de saison. Une contrainte hydrique modérée durant la maturation du raisin a en effet favorisé l'accumulation des sucres dans les baies (tableau 43). Seuls les sites ayant souffert d'une restriction en eau trop importante (peyrosols sableux) ont présenté des teneurs en sucres plus faibles. Les poids de baies y étaient aussi fortement réduits.

Les températures caniculaires de l'été ont également influé sur l'acidité totale des moûts à la vendange. Les très faibles valeurs d'acide malique des raisins, observées sur l'ensemble des sites, témoignent de l'effet des températures extrêmes qui ont prévalu dans la zone des grappes souvent dépourvue de feuilles durant la maturation (chute des feuilles due à la contrainte hydrique). Les moûts à la vendange ont été moyennement carencés en azote (indice de formol compris entre 10 et 14) voire fortement carencés sur certains sites. Dans les vignes implantées sur des peyrosols sableux, les indices de formol ont traduit par contre une bonne alimentation azotée des moûts.

Types de sols	Parcelles	Rapport SFE/kg (m ²)	Brix	°Oe	Acidité totale (g/l)	Acide malique (g/l)	Acide tartrique (g/l)	Indice formol
Colluviosols	Begnins 06	0.97	18.6	77.0	3.8	1.4	5.8	7.1
	Begnins 07	1.05	19.9	82.4	3.7	1.2	5.5	10.4
	Bursinel 02	0.87	19.0	78.7	4.5	1.8	6.0	12.2
	Moyenne	0.96 ± 0.05	19.2 ± 0.4	79.4 ± 1.6	4.0 ± 0.3	1.5 ± 0.2	5.8 ± 0.1	9.9 ± 1.5
Moraines caillouteuses peu compactes	Begnins 01	1.22	19.2	79.3	3.3	1.2	5.4	8.9
	Vinzel 01	1.05	18.2	74.9	3.5	1.5	5.8	9.5
	Vinzel 03	2.60	18.9	77.9	3.8	1.7	5.8	9.9
	Moyenne	1.62 ± 0.49	18.8 ± 0.3	77.4 ± 1.3	3.5 ± 0.1	1.5 ± 0.1	5.7 ± 0.1	9.4 ± 0.3
Moraines compactes de pente	Begnins 02	1.04	18.7	77.2	4.6	1.0	6.8	9.9
	Begnins 03	0.70	18.1	74.7	4.5	1.7	5.8	10.4
	Vinzel 02	0.80	18.7	77.0	3.6	1.3	6.1	11.4
	Luins 01	1.20	19.0	78.6	3.7	1.5	5.6	10.3
	Luins 03	1.66	20.2	84.1	3.7	1.3	5.8	8.4
	Bursinel 01	1.07	19.7	81.8	4.3	0.9	7.0	7.8
	Moyenne	1.08 ± 0.14	19.1 ± 0.3	78.9 ± 1.4	4.1 ± 0.2	1.3 ± 0.1	6.2 ± 0.2	9.7 ± 0.5
Peyrosols sableux	Luins 02	1.74	18.5	76.1	3.7	1.9	5.8	18.0
	Dully 02	grêle	-	-	-	-	-	-
	Bursins 02	1.02	17.7	72.7	3.8	1.5	6.2	14.7
	Moyenne	1.38 ± 0.36	18.1 ± 0.4	74.4 ± 1.7	3.7 ± 0.1	1.7 ± 0.2	6.0 ± 0.2	16.4 ± 1.6

Tableau 43 : Résultats obtenus lors du dernier prélèvement de maturation effectué sur les différentes parcelles du réseau, regroupées par types de sols (SFE/kg, °Oe, acidité totale, acide malique et tartrique, indice de formol). Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2003.

ZONE PILOTE DE LAVAUX

• Accumulation des sucres

L'évolution de l'accumulation des sucres au cours de la maturation 2001 à Lavaux montre que le type de sol n'a pas influencé de manière importante les teneurs en sucres des raisins (fig. 57). Seules les vignes conduites sur des moraines dont la molasse conglomératique ou gréseuse est sous-jacente ont montré des valeurs de concentration en sucres des baies un peu plus faibles que les autres terroirs. Ces mêmes parcelles ont par contre affiché durant la maturation 2002 des teneurs en sucres un peu plus élevées que les autres sites.

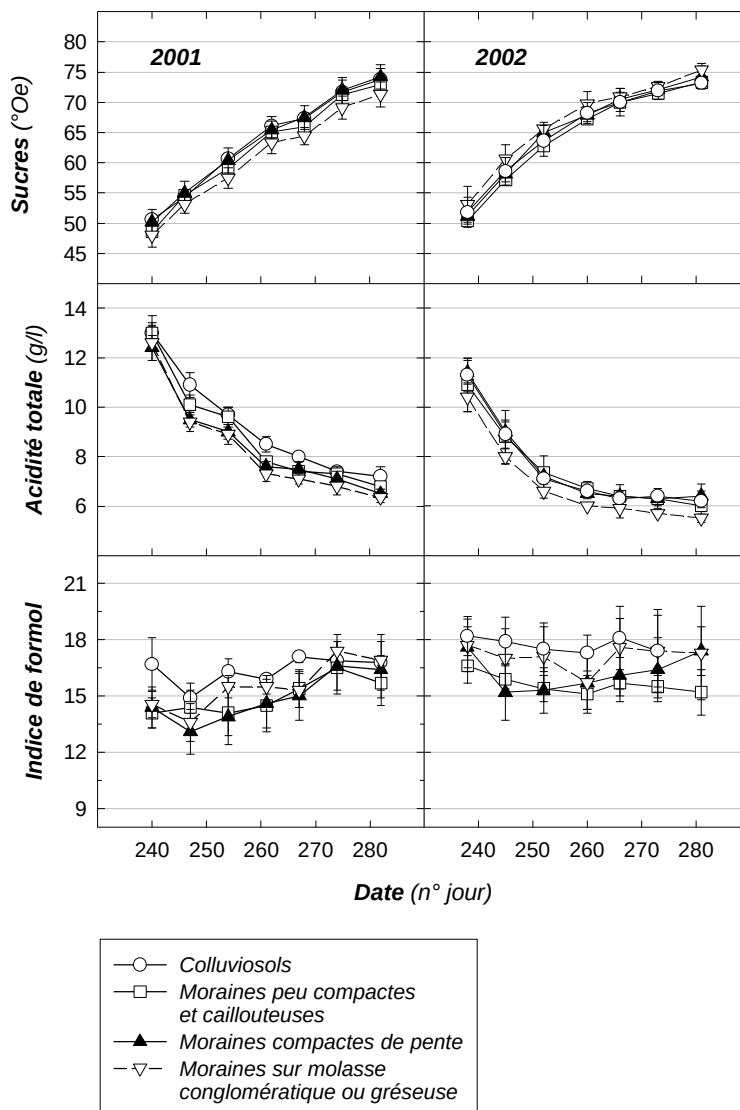


Fig. 57 : Evolution de l'accumulation des sucres dans les baies, de l'acidité totale et de l'indice de formol des raisins en cours de maturation sur l'ensemble du réseau de parcelles, regroupées par types de sols. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, Lavaux (CH), 2001-2002.

En début de maturation du raisin (début de septembre), la teneur en sucres de baies semble en partie dépendante de la situation des parcelles, notamment de leur altitude, quel que soit le type de sol (résultats non présentés). A la vendange, l'emplacement des vignes en fonction de l'altitude n'a plus joué un rôle déterminant sur la richesse en sucres des raisins en 2001 comme en 2002. Des phénomènes de « rattrapage » ont eu lieu dans les parcelles établies sur les hauteurs du vignoble.

- *Acidité totale et teneur en acide malique et tartrique*

Les vignes établies sur des colluviosols ont présenté des valeurs un peu plus élevées en acidité totale que les vignes situées sur d'autres types de sols durant la saison 2001 (fig. 57). Un phénomène identique a été observé dans l'évolution de la teneur en acide malique des baies chez les vignes conduites sur des colluviosols par rapport aux autres terroirs (résultats non présentés).

En 2002 par contre, l'évolution de l'acidité totale des baies a été identique sur les principaux types de sols à l'étude, à l'exception des vignes, menées sur des sols à molasse conglomératique ou gréseuse sous-jacente, qui ont montré des valeurs d'acidité totale plus faibles. Le niveau d'altitude des parcelles d'observation a conditionné en début de maturation (début septembre) la teneur en acide malique des raisins indépendamment des types de sols durant les 2 saisons (résultats non présentés). Les vignes, situées sur les hauteurs du vignoble, présentaient à cette époque de la saison des valeurs plus élevées en acide malique des baies que les vignes implantées au bord du lac. Cependant, l'emplacement des sites (altitude) ne jouait aucun rôle sur la teneur en acide malique des moûts à la vendange. L'évolution de la teneur en acide tartrique des baies n'a manifesté aucune différence dans les principaux terroirs.

- *L'indice de formol*

Le suivi de l'indice de formol, effectué en cours de maturation du raisin, indique que l'alimentation en azote des baies a été élevée (indice supérieur à 14) dans les différents terroirs (fig. 57). On peut remarquer également que cet indice a augmenté progressivement durant le mois de septembre 2001, confirmant les observations de Löhnertz *et al.* (1998). Durant la saison 2002, les indices de formol sont restées

stables. En début de maturation, les vignes conduites sur des colluviosols présentent des indices de formol un peu plus importants que les vignes établies sur les différents types de moraines.

Caractéristiques des vendanges 2001 et 2002

- Vendanges 2001

Les niveaux de rendement, estimés quelques jours avant la récolte 2001, ainsi que la qualité des raisins sont exposés dans les annexes 13 et 14.

Le rendement par souche a été très similaire sur les divers terroirs et s'est élevé entre 2,0 et 2,3 kg. Les poids de baies et de grappes ont été très importants chez les vignes établies sur des colluviosols ainsi que sur moraines épaisses et peu compactes. Les vignes issues de moraines compactes de pente ou sur molasse conglomératique ou gréseuse à RU et enracinement faibles ont manifesté des poids de baies et de grappes plus modestes. Le maintien d'une grappe par bois, réalisé sur l'ensemble du réseau de parcelles, a provoqué un développement important de la taille des baies et des grappes dans les terroirs à alimentation hydrique non limitative (colluviosols, moraines épaisses et peu compactes). Le rendement estimé par m² de sol a atteint 1,4 à 1,7 kg dans les principaux terroirs (rendement estimé sur les micro-parcelles de 50 ceps).

Le rapport feuille-fruit (SFE / kg de raisin) s'est établi en moyenne entre 0,9 et 1,1 m² sur les différents types de sols. Néanmoins, quelques parcelles ont présenté des rapports plus faibles. A Lavaux également, la SFE paraît être un bon critère pour expliquer l'accumulation des sucres dans les baies sur l'ensemble du réseau en 2001.

Les vignes conduites sur des colluviosols ont montré des valeurs en acidité totale et en acide malique et tartrique plus élevées que les vignes situées sur d'autres types de sols. Les teneurs les plus basses en acidité totale et en acide malique et tartrique ont été enregistrées dans les vignes issues de moraines sur molasse conglomératique ou gréseuse.

L'analyse de l'indice de formol indique que les raisins furent très largement pourvus en azote dans le réseau, à l'exception d'une parcelle (Corsier 02) établie sur molasse gréseuse où l'enherbement (couverture à 40% de la surface) a été manifestement trop concurrentiel pour la vigne. Une remarque identique peut être signalée pour la parcelle de Corsier 01. Le taux de pourriture s'est élevé en moyenne de 5 à 13% sur les principaux terroirs avec toutefois de fortes variations entre les parcelles.

- *Vendanges 2002*

Les différentes caractéristiques de la récolte 2002 à Lavaux sont présentées dans l'annexe 15 et le tableau 44 (poids de la baie et des grappes, rendement / souche).

Types de sols	Parcelles	SFE/kg de raisin (m ²)	°Oe	Acidité totale (g/l)	Acide malique (g/l)	Acide tartrique (g/l)	Indice formol
Colluviosols de bas de pente	Chardonne 03	0.99	73.2	6.2	3.8	5.2	19.6
	Rivaz 07	0.99	73.2	6.5	4.0	5.2	15.5
	Moyenne	0.99 ± 0.00	73.2 ± 0.0	6.3 ± 0.1	3.9 ± 0.1	5.2 ± 0.0	17.6 ± 2.0
Moraines épaisses peu compactes	Chardonne 06	1.22	72.0	6.1	3.4	5.6	17.2
	Chardonne 07	1.10	72.2	6.6	3.8	5.5	14.0
	Chardonne 10	0.88	70.5	6.4	3.6	5.3	14.1
	Rivaz 02	1.08	74.4	5.4	3.1	5.2	16.4
	Moyenne	1.07 ± 0.07	72.3 ± 0.8	6.1 ± 0.3	3.5 ± 0.1	5.4 ± 0.1	15.4 ± 0.8
Moraines compactes de pente	Chardonne 04	0.87	71.7	6.8	3.9	5.5	16.2
	Chardonne 08	1.07	77.8	6.3	3.6	5.5	20.1
	Rivaz 01	0.98	73.0	5.9	3.6	5.2	16.0
	Chexbres 01	1.02	72.3	5.7	3.5	5.7	20.3
	Corsier 01	0.98	72.6	6.9	3.9	5.5	10.9
	Moyenne	0.98 ± 0.03	73.5 ± 1.1	6.3 ± 0.2	3.7 ± 0.1	5.5 ± 0.1	16.7 ± 1.7
Moraines sur molasse conglom., gréseuse ou marneuse	St-Saphorin03	0.99	72.3	5.9	3.4	5.2	13.7
	Rivaz 04	0.85	74.0	5.4	3.2	5.1	22.1
	Rivaz 05	1.62	77.2	5.2	3.0	5.2	16.0
	Corsier 02	1.42	76.6	5.7	2.8	5.3	6.2
	Moyenne	1.22 ± 0.18	75.0 ± 1.1	5.6 ± 0.2	3.1 ± 0.1	5.2 ± 0.1	14.5 ± 3.2

Tableau 44 : Résultats obtenus lors du dernier prélèvement de maturation effectué sur les différentes parcelles du réseau, regroupées par types de sols (SFE/kg, °Oe, acidité totale, acide malique et tartrique, indice de formol). Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Lavaux (CH), 2002.

Les vignes implantées sur des colluviosols de bas de pente à RU élevée ont montré les poids de baies et de grappes les plus élevés de tous les types de sols à l'étude. Suivent dans l'ordre, les moraines caillouteuses et peu compactes, les moraines compactes de

penne et enfin les moraines de recouvrement sur la molasse conglomératique ou gréseuse dont le poids de baies et de grappes ont été les plus faibles. Néanmoins, on relève des variations assez importantes sur les différents sites en relation avec leur potentiel de réserve en eau. La limitation de la charge à 1 grappe/bois a permis d'obtenir des rendements s'élevant à environ 2,0 kg /souche (1,4 –1,5 kg/m²) sur les micro-parcelles.

Le rapport entre la végétation et la production (SFE/kg de raisins) a avoisiné 1,0 m² sur l'ensemble du réseau et n'a pas constitué un facteur limitant pour l'accumulation des sucres dans les baies. La teneur en sucres des moûts a d'ailleurs été proche sur les sites implantés dans les différentes moraines et les colluviosols. Des valeurs de sondage un peu plus élevées ont été observées dans des sites ayant présentés un rapport SFE/kg de raisin supérieur à 1,4m².

L'acidité totale et la teneur en acide malique des moûts ont été plus élevées dans les sites implantés sur des colluviosols. Les teneurs en acidité les plus faibles ont été enregistrées dans les vignes situées en couverture morainique sur la molasse conglomératique et gréseuse. Les parcelles complantées sur d'autres types de sols ont présenté une situation intermédiaire. Toutefois, le microclimat lumineux et thermique de la zone des grappes a pu influencer fortement selon les sites sur la dégradation des acidités dans les baies, indépendamment des types de sols et/ou de la vigueur des vignes. L'indice de formol des moûts à la vendange a été partout élevé, indiquant que les moûts étaient correctement pourvus en azote (à l'exception d'un site, Corsier 02 où les moûts ont été fortement carencés, en présence d'un enherbement trop concurrentiel pour l'azote vraisemblablement).

ZONE PILOTE DE BONVILLARS

- *Accumulation des sucres et acidité totale des baies*

L'évolution de l'accumulation des sucres dans les baies en 2002 montre que seule la parcelle établie sur un colluviosol a affiché des teneurs plus faibles en sucres du moûts par rapport aux autres terroirs (fig. 58). Les sites établis sur les différentes moraines ont présenté une évolution quasi identique des sucres en cours de maturation, l'acidité totale des baies a également été plus élevée dans la parcelle établie sur un colluviosol par rapport aux différents terroirs à l'étude.

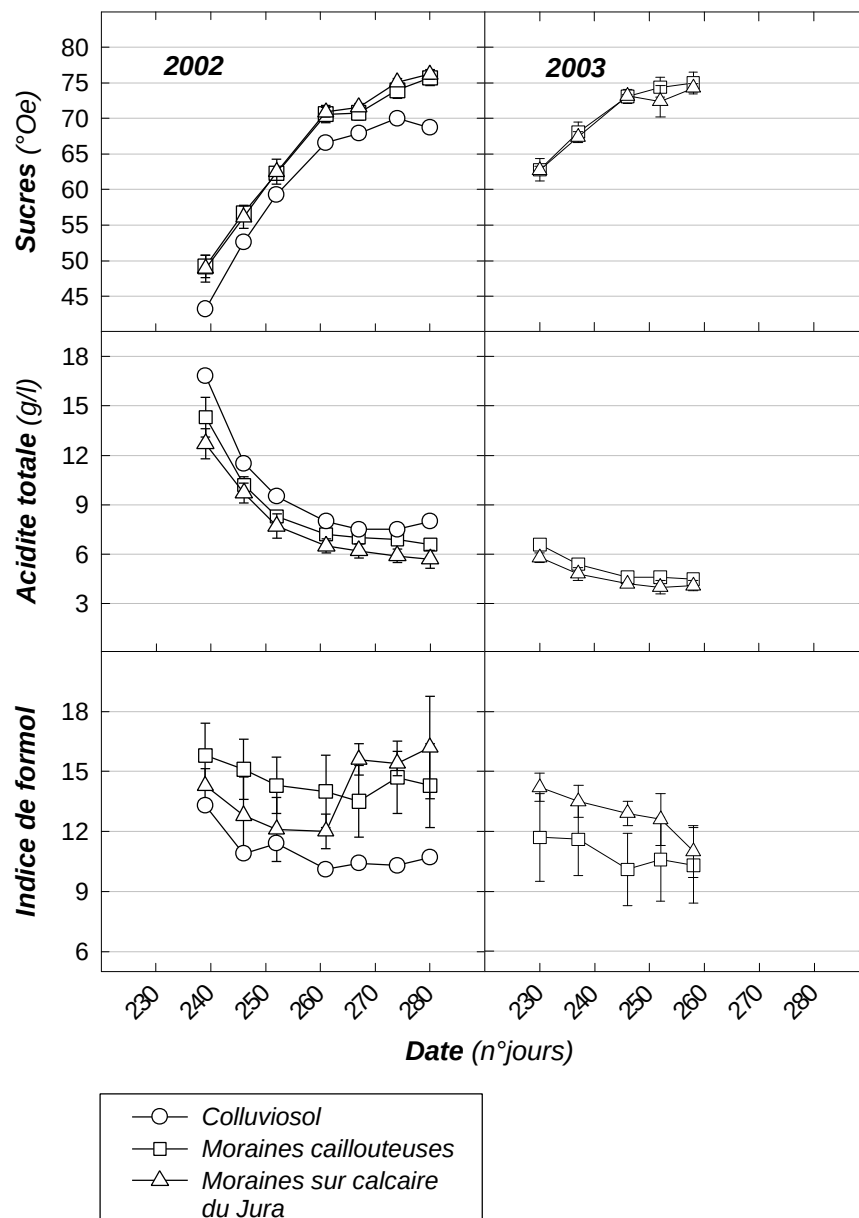


Fig. 58 : Evolution de l'accumulation des sucres dans les baies, de l'acidité totale et de l'indice de formol des raisins en cours de maturation sur l'ensemble du réseau de parcelles, regroupées par types de sols. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, Bonvillars (CH), 2002-2003.

En 2003, l'évolution de l'accumulation des sucres a été identique sur les différents sites quel que soit le type de sol. La grêle a provoqué d'importants dégâts sur quelques parcelles d'observation, notamment dans un site implanté sur un colluviosol dont les raisins ont été totalement endommagés. Le suivi de la maturation n'a pas été présenté pour cette parcelle (colluviosol). L'acidité des raisins a été particulièrement basse sur l'ensemble des sites. Aucune différence n'a été notée entre les types de sol pour ce critère.

- *L'indice de formol*

L'évolution de l'indice de formol a été stable durant la maturation du raisin en 2002. La parcelle située sur un colluviosol a manifesté des valeurs plus faibles de l'indice de formol que les parcelles implantées dans des moraines caillouteuses ou en recouvrement du calcaire du Jura. Les sites complantés dans la moraine sur calcaire du Jura ont affiché des indices de formol en augmentation à partir de mi-septembre, période pendant laquelle une contrainte hydrique élevée s'est installée. Il est probable que la contrainte hydrique a eu une influence prépondérante sur l'élévation des valeurs d'indice de formol des raisins par le biais d'un arrêt de la croissance végétative au début de septembre et d'une redistribution de l'azote dans la plante au profit des raisins.

Les mesures de l'indice de formol réalisées en 2003 ont indiqué que les moûts étaient moyennement carencés en azote en fin de maturation du raisin. L'indice de formol a été un peu plus élevé dans les vignes complantées sur les dalles de calcaire du Jura que sur les moraines caillouteuses et profondes.

Caractéristiques des vendanges 2002 et 2003

- Vendanges 2002

Les différentes caractéristiques de la récolte 2002 sont présentées dans l'annexe 16 et le tableau 45 .

Type de sol	Parcelles	Rapport SFE/kg (m ²)	Brix	°Oe	Acidité totale (g/l)	Acide malique (g/l)	Acide tartrique (g/l)	Indice formol
Colluviosol	Bonvillars 03	0.99	16.8	68.7	8.0	5.6	4.5	10.7
	Moyenne	0.99	16.8	68.7	8.0	5.6	4.5	10.7
Moraines caillouteuses assez compactes	Concise 02	1.24	18.8	77.5	6.3	3.9	5.4	19.9
	Onnens 01	1.01	17.8	73.4	6.9	3.9	5.4	11.5
	Corcelles 02	0.83	18.0	74.2	6.9	4.0	5.5	14.9
	Bonvillars 02	0.87	18.8	77.5	6.2	3.1	5.5	10.7
	Moyenne	0.99 ± 0.09	18.3 ± 0.3	75.6 ± 1.1	6.6 ± 0.2	3.7 ± 0.2	5.4 ± 0.1	14.2 ± 2.1
Moraines sur calcaire du Jura	Bonvillars 01	0.84	18.3	75.5	6.2	3.5	5.3	13.7
	Champagne 02	0.97	18.6	76.9	5.1	2.9	4.9	18.8
	Moyenne	0.91 ± 0.05	18.4 ± 0.4	76.2 ± 0.7	5.6 ± 0.5	3.2 ± 0.3	5.1 ± 0.2	16.2 ± 2.5

Tableau 45 : Résultats obtenus lors du dernier prélèvement de maturation effectué sur les différentes parcelles du réseau, regroupées par types de sols (SFE/kg, °Oe, acidité totale, acide malique et tartrique, indice de formol). Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Bonvillars (CH), 2002.

Le poids final des baies à la vendange a été quasi identique sur l'ensemble des parcelles, à l'exception de Champagne 02, site sur lequel une contrainte hydrique forte a été enregistrée durant la maturation du raisin et dont les baies ont été moins volumineuses que sur les autres terroirs. Le rendement au m² de sol a avoisiné 1,2 à 1,4 kg, et le rapport SFE/kg de raisins s'est approché de 1,0 m². La teneur en sucres des raisins a été élevée à Bonvillars sur la majorité des sites quel que soit le type de sols à l'exception de la parcelle établie sur un colluviosol qui a présenté une teneur plus faible en sucres des baies. La valeur d'acide malique des raisins a été plus élevée dans ce dernier type de sol (colluviosol) que dans les autres terroirs étudiés. L'indice de formol y fut par contre plus faible que dans les autres sites.

- Vendanges 2003

Les données de la vendange 2003 sont indiquées dans l'annexe 17 et le tableau 46.

Les poids de baie observées en 2003 ont été nettement moins élevés qu'en 2002, tout particulièrement dans les vignes implantées sur le calcaire du Jura. Les rendements par souche ont été modestes et assez proches sur les différents sites à l'exception de la

parcelle, nommée Champagne 02, qui a subi une contrainte hydrique modérée à forte en cours de saison et dont les rendements ont été très faibles.

Le rapport SFE /Kg de raisin a avoisiné $1,0\text{m}^2$ en moyenne sur les différents types de sols. La contrainte hydrique fut modérée dans la majorité des sites et a entraîné une bonne maturation des raisins. Les valeurs d'acide malique des raisins ont été très basses à la vendange sur l'ensemble des sites. Les indices de formol des moûts à la récolte traduisent une alimentation moyennement carencée en azote des raisins dans la majorité des cas, à l'exception du site Concise 02 dont la valeur de l'indice est élevée. Les résultats d'analyses concernant la parcelle Bonvillars 03 (colluviosol) doivent être regardés avec prudence en raison des dégâts causés par la grêle sur ce site.

Type de sol	Parcelles	Rapport SFE/kg (m ²)	Brix	°Oe	Acidité totale (g/l)	Acide malique (g/l)	Acide tartrique (g/l)	Indice formol
Colluviosol	Bonvillars 03	élevé	(19.7)	(81.4)	(4.5)	(1.9)	(6.0)	(9.2)
	Moyenne	élevé	19.7	81.4	4.5	1.9	6.0	9.2
Moraines caillouteuses assez compactes	Concise 02	1.07	19.2	79.3	4.4	2.3	6.0	15.9
	Onnens 01	0.70	18.1	74.8	4.2	1.5	6.0	7.2
	Corcelles 02	1.05	17.7	72.7	4.8	1.6	6.6	10.0
	Bonvillars 02	1.10	17.8	73.2	4.5	1.6	6.0	8.2
	Moyenne	0.98 ± 0.09	18.2 ± 0.3	75.0 ± 1.5	4.5 ± 0.1	1.7 ± 0.2	6.2 ± 0.2	10.3 ± 1.9
Moraines sur calcaire du Jura	Bonvillars 01	0.70	18.2	74.8	4.4	1.5	6.6	12.2
	Champagne 02	1.24	17.9	73.7	3.9	1.1	6.5	9.7
	Moyenne	0.97 ± 0.27	18.1 ± 0.2	74.3 ± 0.5	4.2 ± 0.3	1.3 ± 0.2	6.5 ± 0.1	11.0 ± 1.2

Tableau 46 : Résultats obtenus lors du dernier prélèvement de maturation effectué sur les différentes parcelles du réseau, regroupées par types de sols (SFE/kg, °Oe, acidité totale, acide malique et tartrique, indice de formol). Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Bonvillars (CH), 2003.

ZONE PILOTE DU CHABLAIS

- *Accumulation des sucres et acidité totale des raisins*

L'évolution de l'accumulation des sucres dans les baies en 2002 a montré un net ralentissement dès la mi-septembre sur l'ensemble des sites étudiés dans le Chablais (fig. 59). La teneur finale en sucres a été dans la majorité des cas inférieure ou égale à 70 °Oe. Seules les parcelles établies sur des sols issus de gypse ont manifesté des valeurs plus élevées que les sites implantés sur des moraines locales et caillouteuses ou des sols issus de flysch. L'évolution de l'acidité totale des baies a été identique quel que soit le type de sol sur lequel la vigne a été établie.

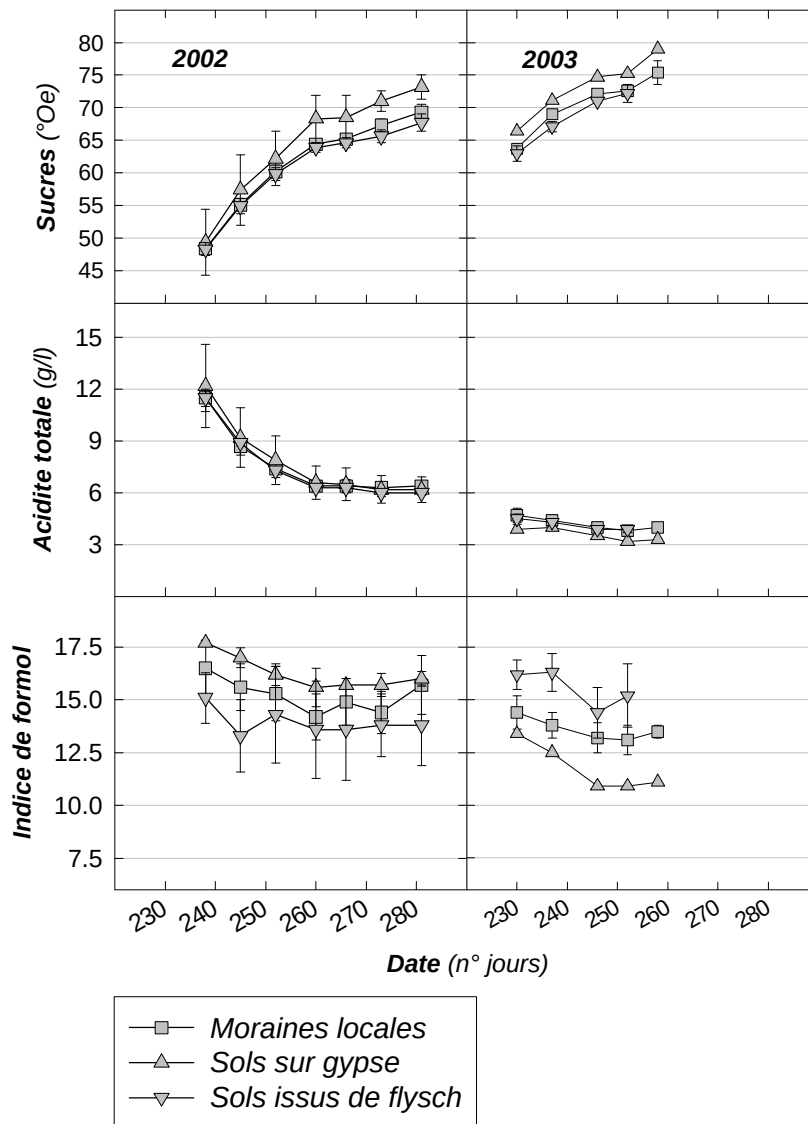


Fig. 59 : Evolution de l'accumulation des sucres dans les baies, de l'acidité totale et de l'indice de formol des raisins en cours de maturation sur l'ensemble du réseau de parcelles, regroupées par types de sols. Barres verticales : erreur standard. Chasselas, Chablais (CH), 2002-2003.

En 2003, l'accumulation des sucres a été un peu plus importante qu'en 2002 et a atteint 75 °Oe dans les vignes implantées sur des moraines caillouteuses et locales ainsi que sur les flysch. Les sites complantés sur le gypse ont affiché les taux les plus élevés en concentration en sucres avec près de 80 °Oe à la récolte. L'arrêt précoce de la croissance végétative ainsi qu'une restriction modérée en eau ont entraîné une bonne accumulation des sucres dans le raisin sur ces derniers sites. L'acidité totale des moûts a été très faibles sur l'ensemble des parcelles.

- *L'indice de formol*

Les valeurs de l'indice de formol sont restées stables au cours de la maturation du raisin en 2002 et relativement élevées. Elles ont été un peu plus élevées dans les vignes implantées sur du gypse par rapport aux parcelles établies sur des sols issus de flysch. Les sites complantés sur les moraines locales et caillouteuses ayant présenté une situation intermédiaire. L'indice de formol a eu tendance à diminuer en cours de maturation 2003. Les valeurs d'indice les plus basses ont été notées dans les vignes implantées sur le gypse. Partout ailleurs, les valeurs de l'indice de formol montrent que l'alimentation azotée des moûts a été satisfaisante à bonne (moraines locales et sols sur flysch).

Caractéristiques des vendanges 2002 et 2003

- Vendanges 2002

Le poids final des baies et des grappes a été le plus faible dans les sites établis sur des sols issus de gypse en 2002 (annexe 18). Les vignes situées sur les moraines locales caillouteuses ont par contre affiché les baies et les grappes les plus volumineuses. Une situation intermédiaire a été observée dans les vignes implantées sur des sols issus de flysch. Les rendements par m² de sol se sont élevés entre 1,3 et 1,5 kg. Le rapport SFE/kg de raisins était partout supérieur à 1,0 m² (tableau 47).

Types de sols	Parcelles	SFE/kg de raisin (m ²)	°Oe	Acidité totale (g/l)	Acide malique (g/l)	Acide tartrique (g/l)	Indice formol
Moraines locales caillouteuses	Ollon 01	0.98	66.9	6.7	4.2	5.2	16.1
	Ollon 03	1.01	70.8	6.4	3.8	5.4	18.0
	Ollon 06	1.18	70.1	6.6	3.9	5.3	13.0
	Ollon 08	1.08	68.7	5.2	2.9	5.1	11.2
	Moyenne	1.06 ± 0.04	69.1 ± 0.9	6.2 ± 0.3	3.7 ± 0.3	5.2 ± 0.1	14.6 ± 1.5
Sols sur gypse	Ollon 04	1.04	71.4	6.9	3.8	5.8	15.6
	Bex 06	1.39	75.1	5.4	3.0	5.4	16.3
	Moyenne	1.21 ± 0.17	73.3 ± 1.9	6.1 ± 0.8	3.4 ± 0.4	5.6 ± 0.2	16.0 ± 0.3
Sols issus de flysch	Bex 01	1.09	65.1	5.8	3.2	4.9	11.5
	Bex 02	1.10	68.4	6.0	3.3	5.3	12.3
	Bex 03	1.03	69.6	6.1	3.7	5.4	17.6
	Moyenne	1.07 ± 0.02	67.7 ± 1.3	6.0 ± 0.1	3.4 ± 0.2	5.2 ± 0.1	13.8 ± 1.9

Tableau 47 : Résultats obtenus lors du dernier prélèvement de maturation effectué sur les différentes parcelles du réseau, regroupées par types de sols (SFE/kg, °Oe, acidité totale, acide malique et tartrique, indice de formol). Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Chablais (CH), 2002.

La teneur en sucres des raisins à la vendange était inférieure à 70 °Oe dans les vignes implantées sur des moraines locales et caillouteuses ainsi que sur des sols issus de flysch. Seules les sites établis sur des sols issus de gypse ont montré des teneurs un peu plus élevées que dans les autres terroirs. Les teneurs en acidité totale et en acide malique des moûts sont demeurées proches sur les divers types de sols. Des variations inter-parcellaires ont été toutefois observées et ont été induites sans doute par le microclimat thermique de la zone des grappes, propre à chaque site. L'indice de formol a été élevé dans la majorité des sites à l'étude. L'influence du foehn sur la maturation du raisin a été insignifiante en 2002.

- Vendanges 2003

Les poids des baies et des grappes à la vendange ont été faibles en 2003 particulièrement sur le site implanté sur le gypse (annexe 19). Les vignes situées sur les moraines locales ont présenté des poids de baies et de grappes les plus importants de toutes les parcelles à l'étude. Une situation intermédiaire a prévalu sur les sols issus de flysch.

La concentration en sucres de raisins a été plus élevée sur les sites ayant subis une contrainte modérée durant la maturation (sols sur gypse et quelques sites sur moraines

locales) tableau 48. En l'absence de contrainte hydrique, les vignes ont affiché des taux de sucres moindres dans les raisins. L'acide malique des moûts a été basse sur l'ensemble du réseau alors que les valeurs de l'indice de formol à la vendange indiquaient une alimentation en azote moyennement carencée pour la grande majorité des sites.

Types de sols	Parcelles	SFE/kg de raisin (m ²)	°Oe	Acidité totale (g/l)	Acide malique (g/l)	Acide tartrique (g/l)	Indice formol
Moraines locales caillouteuses	Ollon 01	1.45	73.6	3.9	2.1	5.5	13.4
	Ollon 03	1.16	77.3	4.3	2.2	5.8	13.7
	Ollon 06	1.13	71.3	3.7	1.9	5.5	13.7
	Ollon 08	1.06	74.5	3.3	1.4	5.7	11.0
	Moyenne	1.20 ± 0.08	74.2 ± 1.2	3.8 ± 0.2	1.9 ± 0.2	5.6 ± 0.1	13.0 ± 0.6
Sols sur gypse	Ollon 04	1.95	79.2	3.3	1.4	5.4	11.1
	Bex 06	grêle	-	-	-	-	-
	Moyenne	1.95	79.2	3.3	1.4	5.4	11.1
Sols issus de flysch	Bex 01	1.25	70.8	3.7	1.9	5.1	13.6
	Bex 02	1.22	71.3	3.8	1.7	5.5	12.8
	Bex 03	1.09	73.6	4.0	2.0	5.7	16.7
	Moyenne	1.19 ± 0.05	71.9 ± 0.9	3.8 ± 0.1	1.9 ± 0.1	5.4 ± 0.2	14.4 ± 1.2

Tableau 48 : Résultats obtenus lors du dernier prélèvement de maturation effectué sur les différentes parcelles du réseau, regroupées par types de sols (SFE/kg, °Oe, acidité totale, acide malique et tartrique, indice de formol). Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Chablais (CH), 2003.

Alimentation en eau et teneur en sucres des raisins

Dans le cadre de l'étude des terroirs viticoles vaudois, le suivi de l'alimentation hydrique de la vigne mené sur une trentaine de parcelles du vignoble a permis d'établir une relation étroite entre le régime hydrique des vignes et l'accumulation en sucres des raisins en 2002 (fig. 60).

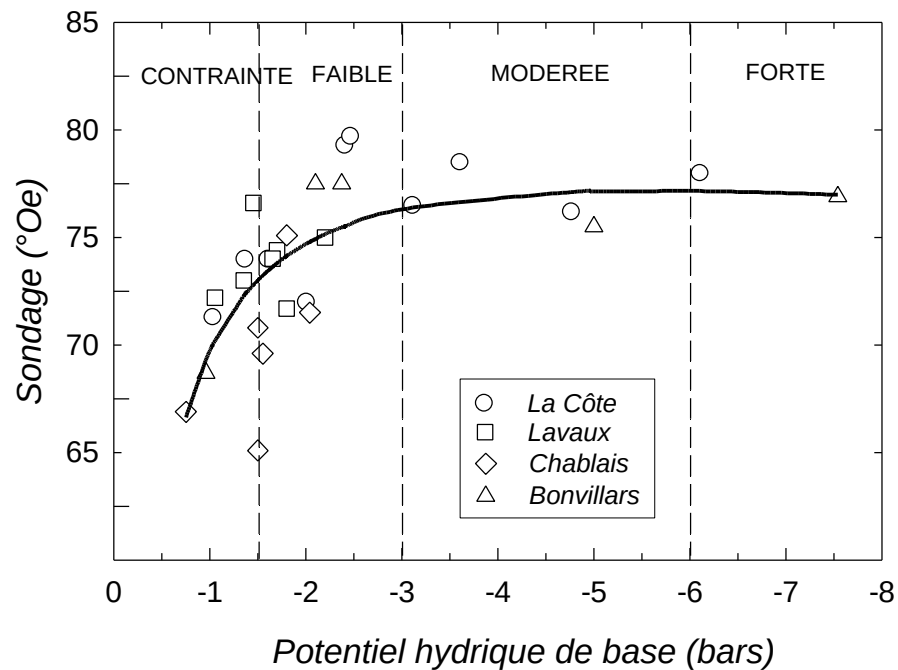


Fig. 60 : Relation établie entre le Y_{base} durant la maturation et la teneur en sucres des raisins (°Oe) à la vendange sur différentes parcelles du réseau à la Côte, à Lavaux, à Bonvillars et au Chablais. Chasselas, Canton de Vaud (CH), 2002.

Les parcelles qui ont « bénéficié » d'une abondante alimentation en eau durant la maturation 2002 (absence ou faible contrainte) ont présenté des raisins moins riches en sucres et des arrêts plus tardifs de la croissance végétative. Les vignes soumises à une contrainte modérée ont par contre produit des raisins avec des teneurs plus élevées en sucres.

Un flétrissement des grappes (ou partie de la grappe) a pu être observé également durant la saison 2002 dans certaines zones du vignoble romand (Chablais, Valais), particulièrement où les vignes ont été largement alimentées en eau. Ce phénomène de « folletage des baies » assez rare est caractérisé par des grappes apparemment saines, aux manches et pédoncules sains et verts, sans nécrose contrairement au dessèchement de la

rafle, mais dont les baies sont flétries ou desséchées et très faiblement sucrées. Les causes de ce phénomène sont à rechercher dans un déséquilibre de l'alimentation en eau et en sucres des baies à la suite d'un contraste thermique important (températures fraîches suivies brutalement de températures élevées) qui perturbent l'alimentation des raisins. Un fort contraste thermique pendant la maturation du raisin peut créer une rupture de l'alimentation en eau et en sucres en provoquant « des thyloses », c'est à dire l'occlusion des vaisseaux. Ce phénomène est observé surtout dans des vignes turgescentes (absence de contrainte hydrique). Il s'agit d'un accident physiologique très rare, mais possible en année humide et chaude ! Les cépages sont aussi diversement sensibles à ces phénomènes.

En 2003 également, les conditions de restriction modérée en eau de la vigne (contrainte hydrique modérée) durant la maturation a favorisé l'accumulation des sucres dans les baies (fig. 61). Des situations de trop forte restriction en eau (contrainte forte) a par contre pénalisé la concentration des moûts d'autant plus nettement que la contrainte hydrique était précoce. La chute des feuilles prématurée dans la zone des grappes a entraîné une diminution de la surface foliaire et de l'activité photosynthétique du couvert végétal par voie de conséquence. Une alimentation trop généreuse en eau a conduit à des raisins moins riches en sucres et des arrêts tardifs de la croissance végétative.

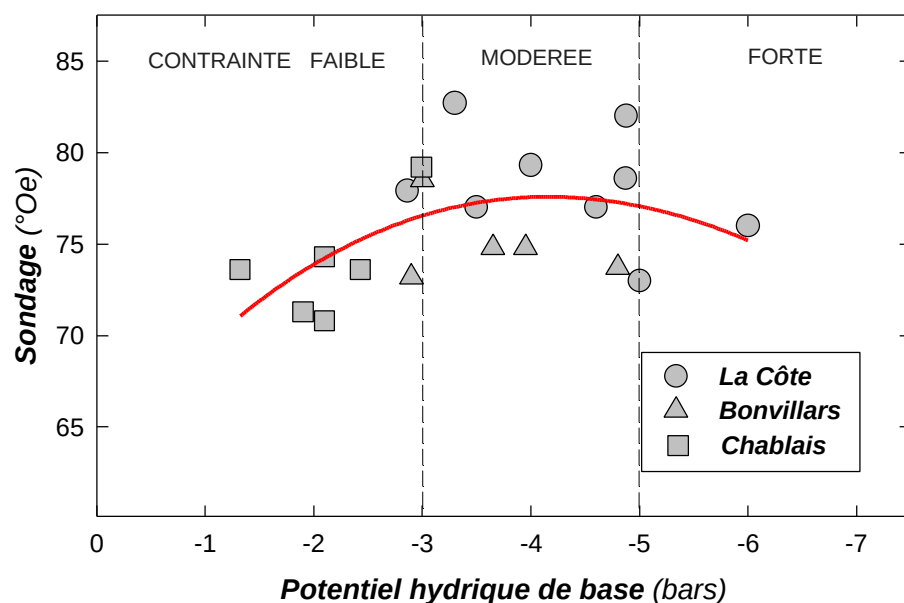


Fig. 61 : Relation établie entre le Y_{base} durant la maturation et la teneur en sucres des raisins (°Oe) à la vendange sur différentes parcelles du réseau à la Côte, à Bonvillars et au Chablais. Chasselas, Canton de Vaud (CH), 2003.

La mesure de la discrimination isotopique du carbone ($\Delta C13$), réalisée sur les sucres des moûts à maturité permet d'estimer le niveau de contrainte hydrique subie par la vigne durant la maturation du raisin (phase d'accumulation des sucres dans les baies). Des seuils provisoires ont été établis entre les valeurs du $\Delta C13$ et le niveau de contrainte hydrique, mesurée sur la vigne. Globalement, la figure 62 montre qu'une contrainte hydrique modérée, estimée par la méthode du $\Delta C13$ correspond aux moûts les plus riches en sucres. En situation de contrainte forte, les sondages des raisins ne sont plus aussi élevés qu'en contrainte modérée. Sur les sites où aucune restriction en eau n'a été observée, la teneur en sucres des baies a été moins élevée également.

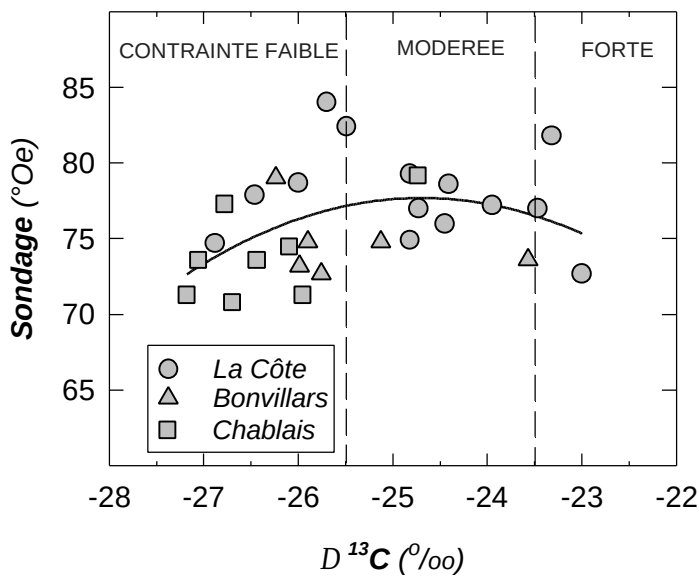


Fig. 62 : Relation établie entre la discrimination isotopique du C dans les sucres des raisins ($\Delta C13$) et la richesse en sucres des moûts à la vendange. Chasselas, La Côte, Bonvillars et Chablais (CH), 2003.

L'intérêt de cet indicateur ($\Delta C13$) pour la contrainte hydrique réside dans sa simplicité et sa grande accessibilité par rapport aux approches classiques que sont les mesures des potentiels foliaires. Des études complémentaires s'avèrent toutefois nécessaires pour valider l'application et la fiabilité de cet outil de diagnostic.

On relève fréquemment le rôle bénéfique d'une contrainte hydrique modérée pendant la maturation pour l'accumulation des sucres et pour un arrêt précoce de la croissance végétative (autour de la véraison). En effet, une abondante alimentation en eau (et en azote) de la vigne favorise généralement la croissance végétative et racinaire ainsi que la vigueur des souches. Les sucres formés par la photosynthèse sont alors engagés pour la croissance au détriment d'une accumulation dans les fruits et les organes de réserve.

Les déficits hydriques ayant eu des effets positifs sur la constitution des raisins sans affecter le feuillage sont empiriquement qualifiés de déficits hydriques modérés. L'apparition d'une contrainte modérée après la floraison est considérée comme un facteur qui accroît le potentiel œnologique de la récolte (Seguin, 1970 ; van Leeuwen et Seguin, 1994 ; Choné *et al.*, 2001 ; Spring et Burgos, 2002 ; Tregoat, 2003 ; Tregoat *et al.*, 2002 , Spring 2004 ; Spring et Murisier 2004.).

Indice chlorophyllien du feuillage et nutrition azotée des raisins

Une relation a été observée entre l'indice chlorophyllien du feuillage et la teneur en azote des raisins à la vendange durant les saisons 2001-2003 sur l'ensemble du réseau (fig. 63).

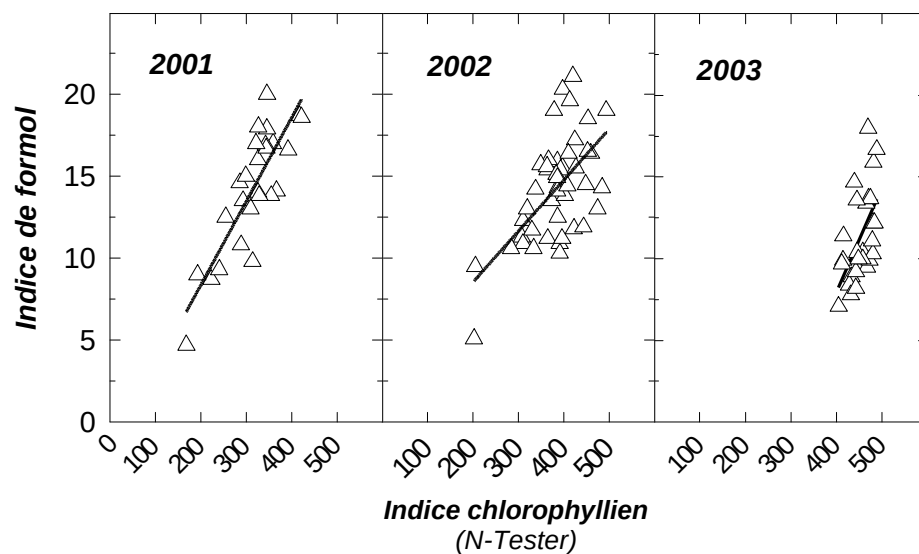


Fig. 63 : Relation établie entre l'indice chlorophyllien (N-tester), mesuré à la mi-septembre, et l'indice de formol des raisins à la vendange sur l'ensemble du réseau des terroirs vaudois. Chasselas, 4 zones pilotes du Canton de Vaud (CH), 2001-2003.

L'indice chlorophyllien a été mesuré autour de la mi-septembre. Spring (1999) a par ailleurs montré que la relation établie entre l'indice chlorophyllien et l'azote des moûts s'améliorait lorsque les mesures du N-tester étaient effectuées à l'approche des vendanges. Ce même auteur relève également que les conditions d'approvisionnement en eau influent sur l'accumulation des composés azotés dans les raisins. Le taux

d'azote mesuré dans les moûts (ou les raisins) constitue, pour le Chasselas, un bon indicateur du niveau de concurrence hydro-azotée auquel la vigne est soumise (Spring, 1999 ; Spring et Zufferey, 2000). Les observations effectuées par ces derniers auteurs montrent que l'obtention de moûts avec des indices de formol voisins de 14 ne semble possible que lorsque l'indice chlorophyllien à la véraison est égal, voire légèrement supérieur à 500. Des conséquences négatives sur les processus fermentaires et sur la qualité des vins sont susceptibles d'apparaître avec des valeurs d'indice de formol inférieures à 14 (Lorenzini, 1996 ; Maigre *et al.*, 1995).

5. Synthèse et conclusions

Les approches pédologiques et climatiques de l'étude ont permis de définir des entités homogènes du point de vue du sol et du climat. Les unités pédologiques et climatiques, représentatives du vignoble, ont entraîné des réponses pertinentes du végétal, notamment sur le comportement hydrique de la vigne, l'expression végétative, la vigueur des souches, le poids des baies et sur les caractéristiques qualitatives du raisin.

L'influence du terroir sur la vigne s'est traduite par des différences de fonctionnement physiologique de la plante. Les effets les plus importants ont touché principalement les conditions d'alimentation en eau de la vigne, le potentiel d'expression végétative et de précocité des terroirs. Ces différences de comportement physiologique ont conditionné les caractéristiques de la production et de la maturation du raisin.

□ Les conditions d'alimentation en eau de la vigne

Le régime hydrique de la vigne a été étudié par des mesures directes sur le végétal. Les indicateurs les plus pertinents qui permettent d'interpréter le comportement hydrique de la plante ont été les potentiels hydriques foliaires. Parmi ceux-ci, la mesure du potentiel hydrique de base (Ψ_{base}) constitue une approche physiologique des différents niveaux de contrainte auxquels la vigne est assujettie.

- Mesure du potentiel hydrique de base (Ψ_{base})

La mesure du Ψ_{base} indique l'état hydrique de la plante en fin de nuit quand les flux de sève à travers la vigne sont pratiquement inexistants (transpiration foliaire fortement réduite) et que la plante a pu rééquilibrer son état hydrique en relation avec l'eau du sol. Dans notre étude, une relation étroite a été mise en évidence entre les valeurs du Ψ_{base} et la réserve utile en eau des sols (RU) sur un réseau d'une trentaine de parcelles. Cette corrélation confortée au cours des 3 années d'observation a permis de valider la pertinence de la méthodologie utilisée dans l'estimation des RU des sols : ainsi, durant

les saisons végétatives 2001-2003, les conditions d'alimentation en eau de la vigne ont été étroitement liées à la RU des sols et à la pluviométrie estivale.

La saison 2001 a été caractérisée par une absence de contrainte hydrique jusqu'à la véraison sur l'ensemble du réseau d'observation. Durant la période de maturation du raisin, la restriction en eau s'est avérée faible sur la majorité des parcelles, voire nulle chez les vignes implantées dans les colluviosols à forte RU.

Si la contrainte hydrique a été faible en 2001, elle s'est avérée un peu plus importante durant la saison 2002 en raison d'un déficit hydrique plus élevé. Les vignes situées sur des colluviosols à forte réserve en eau ont présenté de très faibles variations de leur état hydrique : elles ont été caractérisées par une absence de contrainte hydrique tout au long de la saison 2002. Les vignes complantées sur des moraines latérales, peu compactes et caillouteuses, ont montré des valeurs de θ_{base} très proches de celles des colluviosols. Par contre, situées sur des moraines de fond à compacité élevée ou sur des peyrosols sableux, les vignes ont affiché durant la maturation des raisins des contraintes qualifiées de légères à modérées en 2002. L'enracinement superficiel, observé dans les moraines compactes de fond, et la teneur élevée en éléments grossiers des peyrosols expliquent en grande partie la faible capacité de réservoir en eau de ces sols ainsi que leur sensibilité au déficit et à la contrainte hydrique. Les sites implantés sur les sols de faible épaisseur et à RU limitée sur le calcaire du Jura (Bonvillars) ont également subi une restriction modérée à forte en eau durant la maturation.

En 2003, la contrainte hydrique a été plus importante que les deux années précédentes en raison d'un déficit hydrique élevé durant la période estivale et des températures caniculaires, enregistrées en juin et en août. Les valeurs de potentiel hydrique n'ont cessé de décroître de la floraison jusqu'à la mi-août quels que soient les sites et les types de sol. Les vignes situées sur des colluviosols et des moraines peu compactes et caillouteuses ont affiché des contraintes modérées durant la période estivale (juillet – août) et faibles en fin de maturation des raisins. Certains sites, implantés sur des colluviosols à enracinement superficiel (présence d'hydromorphie) ont présenté des stress hydriques importants à la fin du mois d'août. Complantées sur des moraines compactes de pente ou des peyrosols sableux à faible RU, les vignes ont souffert d'une contrainte hydrique élevée durant le mois d'août (sur certains sites dès la fin du mois

de juin). Des défoliations naturelles (chute de feuilles) ont pu être observées dans la zone basale du feuillage à cette même époque. Durant la maturation du raisin, la contrainte s'est avérée modérée sur ces mêmes sites. Une contrainte hydrique modérée a également prévalu sur les sites à enracinement superficiel sur le calcaire du Jura à Bonvillars depuis la mi-juillet jusqu'à la récolte. Les vignes situées sur des sols gypseux ou issus de flysch (Chablais) ont présenté une restriction modérée en eau durant le mois de juillet et le début d'août. Seules les moraines locales et caillouteuses ont offert des conditions moins contraignantes à cette même époque. Les mesures, réalisées à la fin d'août et durant le mois de septembre, ont permis d'observer que la contrainte a été faible sur l'ensemble des sites à l'étude dans le Chablais.

Ces diverses observations attestent que la réserve en eau (RU) des différents types de sol joue un rôle prépondérant sur l'état hydrique des plantes en relation avec le déficit hydrique cumulé en cours de saison.

- Mesure du potentiel hydrique de tige (Ψ_{TIGE})

Nos résultats ont aussi mis en évidence que la mesure du potentiel de tige minimum ($\Psi_{T\ MIN}$) pouvait rendre compte d'une contrainte hydrique diurne momentanée. La technique du $\Psi_{T\ MIN}$ autorise l'estimation de la tension de sève qui existe dans les vaisseaux conducteurs en situation de transpiration de la plante entière et de forte demande climatique. De ce fait, le $\Psi_{T\ MIN}$ s'avère un bon indicateur pour étudier l'émergence de déficits hydriques ou la persistance d'une contrainte après une pluie dans les terroirs viticoles.

Réalisées en l'absence de contrainte hydrique ou à des faibles niveaux de stress, la technique du $\Psi_{T\ MIN}$ a manifesté de manière plus fine et plus prompte un début de restriction hydrique ou des états d'alimentation en eau différents de la plante que la mesure du Ψ_{base} . Les mesures du $\Psi_{T\ MIN}$, effectuées en 2003, ont confirmé l'émergence progressive au cours de la saison d'un stress hydrique élevé chez la vigne durant la période la plus chaude de la journée. Des symptômes de sécheresse (décoloration des feuilles de la base, chute de feuilles) ont été observés sur les sites dont les $\Psi_{T\ MIN}$ indiquaient des valeurs inférieures à -11 bars. Les températures extrêmes, enregistrées

durant le mois d'août, ont de surcroît accentué la demande évaporatoire en milieu de journée : les valeurs très négatives du $\Psi_{T\ MIN}$ ont reflété la double contrainte thermique et hydrique.

Nos observations montrent par ailleurs qu'il existe une relation linéaire entre les valeurs du Ψ_{base} et celles du $\Psi_{T\ MIN}$: celle-ci a été établie dans des conditions climatiques bien définies (éclairage saturant, °C de l'air comprise entre 25-32°C, humidité relative mesurée entre 35-50%, ETPj comprise entre 4.5 et 5.5 mm). L'étude des gradients de potentiel hydrique ($\Delta\Psi$), observés entre le rameau (Ψ_{TIGE}) et les feuilles ($\Psi_{foliaire}$), a permis d'illustrer que la transpiration foliaire était liée à ces gradients de potentiel.

- Modèle de bilan hydrique

Un modèle de bilan hydrique (Riou et Payan, 2001) a été utilisé pour évaluer l'état hydrique de la vigne et la disponibilité en eau offerte par le milieu. Ce bilan repose sur un fonctionnement simple de type « réservoir » et reflète une estimation de la fraction d'eau du sol utilisable par la plante qui fluctue avec les gains issus des précipitations et les pertes par transpiration du couvert végétal et par évaporation directe du sol. Par la suite, la quantification de la disponibilité en eau dans le sol autorise une évaluation directe de l'intensité de la contrainte subie par la vigne au moyen de relations établies avec la mesure du Ψ_{base} .

Le paramétrage du modèle de bilan hydrique utilise ainsi la vigne comme indicateur de l'état hydrique du milieu, à travers la mesure du potentiel hydrique de base. Cette approche tient compte des principales caractéristiques parcellaires que sont les paramètres édaphiques, climatiques et physiologiques (Riou et Payan, 2001).

La validation du modèle a été réalisée sur un réseau de parcelles à la Côte: les résultats obtenus sont très encourageants et permettent de discriminer les niveaux de contrainte hydrique au travers de ses trois composantes principales que sont la précocité, la durée et l'intensité. Il s'avère possible, grâce au modèle, de visualiser en temps réel le suivi de l'alimentation en eau de la plante en cours de saison.

L'estimation de la quantité totale d'eau du sol utilisable par la vigne (TTSW) a été déterminée par couplage du modèle du bilan hydrique avec les valeurs du Ψ_{base} : une bonne concordance a été observée entre les estimations de la TTSW et la RU des différents sites de l'étude.

- *Discrimination isotopique (DC13)*

Les résultats de notre étude ont indiqué que la technique de discrimination isotopique du carbone ($\Delta C13$) dans les sucres des raisins était étroitement corrélée au régime hydrique observé chez la vigne durant la maturation (phase d'accumulation des sucres dans les baies). La corrélation obtenue entre le rapport $\Delta C13$ et les valeurs du Ψ_{base} moyen ou le $\Psi_{T \text{ MIN}}$, mesurés à plusieurs reprises en cours de maturation du raisin, a été très significative en 2003. L'intérêt de cet indicateur ($\Delta C13$), qui nécessite des investigations supplémentaires à l'avenir, réside de toute évidence dans sa grande accessibilité (et son coût d'analyse relativement modeste) en comparaison avec les indicateurs classiques du régime hydrique que sont les potentiels hydriques foliaires. Cette technique pourrait constituer un outil de choix à l'avenir pour l'étude des terroirs viticoles.

□ **Le potentiel d'expression végétative et de précocité des terroirs**

- *Précocité des stades de développement de la vigne*

Les facteurs qui semblent susceptibles d'influer sur la précocité des stades de développement de la vigne se rattachent principalement au mésoclimat thermique (très localement au microclimat), au pédoclimat thermique et hydrique ainsi qu'au niveau de la vigueur de la plante.

L'élaboration d'un indice climatique modélisé (Pythoud et Caloz, 2003) a permis d'esquisser les paramètres-clés qui accréditent la précocité d'un stade phénologique (notamment le débourrement) en relation avec des situations géographiques plus ou moins favorisées d'un point de vue climatique. Cet indice climatique prend en compte

l'influence de l'altitude, du rayonnement potentiel reçu par une surface de sol (en fonction de sa déclivité, de son orientation et des effets d'ombrage projeté par le paysage environnant) ainsi que de l'exposition aux vents dominants. Les observations, réalisées sur la vigne, ont clairement indiqué que des effets liés à des courants locaux (descente d'air froid ou chaud provenant de vallons ou de combes, foehn printanier ou automnal) et à des situations microclimatiques particulières (effets des murs, terrasses, réflexion lumineuse d'un plan d'eau) étaient déterminants également. Enfin, les facteurs se rapportant au sol tel que le pédoclimat thermique (qui n'a pas fait l'objet d'une étude spécifique) et hydrique sont autant d'éléments qui interagissent avec le comportement de la plante.

La nécessité d'affiner et de valider cet indice climatique par le comportement de la vigne est évidente ; néanmoins, les résultats préliminaires d'une telle étude et les possibilités offertes par les systèmes d'informations géographiques (SIG) laissent présager des applications intéressantes dans le domaine de la climatologie qui a été très peu exploré jusqu'à présent dans les études de terroirs viticoles.

- Le potentiel d'expression végétative

Les mesures de l'expression végétative de la vigne ont porté sur la vitesse et l'arrêt de la croissance des rameaux, sur l'estimation des surfaces foliaires et des poids frais des rognages exportés par écimage, sur les analyses foliaires ainsi que sur les poids de bois de taille.

La vitesse de croissance printanière des rameaux a été fortement dépendante des conditions de température de l'air et d'alimentation hydrique de la vigne. La vitesse d'allongement des rameaux a été ralentie dans des situations de contrainte hydrique modérée sur quelques sites. L'arrêt de la croissance végétative a été largement tributaire du réservoir en eau des sols et des conditions d'alimentation hydrique de la plante durant la saison. L'arrêt de la croissance a été de manière générale plus précoce en 2003 que durant les millésimes précédents en raison des fortes contraintes hydriques et thermiques, observées au cours de la période estivale. En fin de saison, l'arrêt de la croissance végétative est sous l'influence prépondérante des conditions de

température (vignobles septentrionaux) qui autorisent plus ou moins la croissance des apex et de l'équilibre hormonal de la plante. Le vieillissement de la végétation annuelle, accentué par des conditions du milieu peu favorables (contrainte hydrique, photopériode réduite...) entraîne l'arrêt de la croissance végétative.

L'estimation des surfaces foliaires montre que des différences assez importantes peuvent apparaître entre les parcelles à l'étude, notamment pour la surface foliaire totale. Par contre, la SFE, exprimée par m² de surface de sol, a peu varié entre les sites en 2001 et 2002 : cette constatation permet d'affirmer que la surface foliaire évaporatoire (principalement la SFE) était relativement comparable entre les sites tant que la contrainte hydrique s'est avérée faible à modérée. En 2003 par contre, de nombreux sites ont présenté des pertes de feuilles importantes dans la zone des grappes et des SFE réduites en raison du stress hydrique élevé. Dans ce cas, la consommation en eau de la vigne a pu être différente selon les situations et influencer sur l'état hydrique des vignes par voie de conséquence.

La mesure du poids frais des rognages cumulés durant la période de végétation montre que les vignes implantées sur des sites à faible RU ont présenté une capacité de croissance plus faible que celles complantées dans des situations à fort réservoir en eau.

Les analyses foliaires, effectuées sur l'ensemble du réseau, indiquent qu'aucune carence manifeste en azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium n'a été observée. Les différents types de sols ne semblent pas avoir influé de manière significative sur les taux d'éléments minéraux des feuilles. L'indice chlorophyllien qui représente un bon indicateur du statut de nutrition azotée chez la vigne a été élevé durant les périodes estivales 2001-2003 dans la grande majorité des situations.

Le poids individuel d'un sarment à la taille a été corrélé à la réserve en eau des sols et à l'alimentation hydrique de la vigne. Les situations de forte restriction en eau ont entraîné des poids de bois de taille inférieurs par rapport à des situations où l'alimentation en eau n'était pas restrictive (absence de contrainte hydrique) et où les poids de bois de taille étaient élevés.

❑ **Caractéristiques de la production et de la maturation du raisin**

- Poids des baies

Dans notre étude, l'alimentation hydrique, estimée soit par la RU des sols soit par le régime hydrique de la vigne, a exercé une influence prépondérante sur le poids final des baies à la vendange. Les vignes ayant subi une restriction en eau modérée à forte en cours de saison ont affiché des poids de baies relativement faibles, se situant autour de 2.0 à 2.5 grammes. A l'inverse, les sites à fortes disponibilités hydriques (état proche de la turgescence) ont montré les poids de baies les plus importants s'élevant jusqu'à 4.0 grammes. Le poids final des baies à la vendange, observé en 2003, a été nettement inférieur (-25% environ) à celui des millésimes précédents en relation avec la contrainte hydrique subie par la vigne cette année-là.

- Maturation du raisin

Le régime hydrique de la vigne, observé durant la maturation du raisin, a influé fortement sur la concentration en sucres réducteurs des moûts. Les vignes soumises à une contrainte modérée ont obtenu des teneurs plus élevées en sucres des baies que les vignes caractérisées par une absence de stress hydrique. Ce résultat atteste le rôle bénéfique d'une contrainte hydrique modérée pendant la maturation du raisin pour l'accumulation des sucres et pour un arrêt précoce de la croissance végétative (autour de la véraison). Des situations de trop forte restriction en eau (contrainte forte) ont par contre pénalisé la concentration des moûts d'autant plus nettement que la contrainte hydrique était précoce. La chute des feuilles prématurée dans la zone des grappes a entraîné une diminution de la surface foliaire et de l'activité photosynthétique du couvert végétal par voie de conséquence. Une alimentation trop généreuse en eau a conduit à des raisins moins riches en sucres et des arrêts tardifs de la croissance végétative.

L'acidité totale des moûts ainsi que la teneur en acide malique et tartrique des raisins ont été globalement comparables sur les différents sites. Les situations propices à développer une vigueur excessive de la vigne (forte RU) ont eu tendance à afficher des moûts un peu plus acides que les sites à faible vigueur. Néanmoins, les différences

sont demeurées modestes au cours des millésimes 2001-2002. Les températures caniculaires, enregistrées durant l'été et la maturation du raisin en 2003, ont entraîné des valeurs très basses en acidité totale et en acide malique des moûts sur l'ensemble du réseau. L'acide malique a été fortement dégradé en raison des éclaircissements élevés dans la zone des grappes (chute des feuilles provoquée par le stress hydrique) et des températures extrêmes.

Les suivis de l'indice de formol en cours de maturation du raisin et à la vendange indiquent si les moûts ont été carencés ou pas en azote assimilable par les levures. De manière générale, les sites étudiés n'ont pas présenté de carence élevée en azote durant les 3 années d'observation. Seules quelques parcelles ont fait exception à la règle (couverture herbeuse importante, faible profondeur d'enracinement), notamment à la Côte en 2003. Partout ailleurs, les moûts ont été correctement pourvus en azote. Les vignes implantées sur des sols pierreux et profonds ont affiché chaque année des valeurs élevées de l'indice de formol.

La croissance de la baie et les phénomènes de concentration-dilution de certains constituants du raisin sont directement dépendants du pédo- et du mésoclimat, ainsi que de l'état hydrique du végétal. Il est important de considérer l'évolution de certains métabolites dès le stade herbacé de croissance de la baie (nouaison-véraison). Il faut également raisonner les relations « état hydrique de la vigne – expression végétative – composantes de la baie » en considérant pour une contrainte hydrique donnée, sa période d'apparition, sa durée et son intensité. Enfin, Il s'avère nécessaire d'apprécier la gestion des ressources hydriques d'un terroir avec le type de production souhaité, le niveau de rendement escompté et le revenu économique attendu.

□ Identification des terroirs validée par la plante

La méthode de travail, retenue pour la caractérisation des terroirs viticoles vaudois, tente d'intégrer l'ensemble des paramètres susceptibles d'expliquer le fonctionnement d'un terroir : d'une part, les facteurs naturels (géologie, pédologie et climat) et d'autre part le comportement de la vigne qui est le principal révélateur de la valeur d'un terroir.

L'étude du comportement de la vigne, réalisée sur un réseau d'environ cinquante parcelles de Chasselas réparties dans les quatre zones pilotes du Canton (environ 1000 ha), a indiqué une très bonne corrélation entre le comportement de la plante (développement végétatif, poids des baies, accumulation des sucres) et la réserve en eau des sols. Cette observation permet d'affirmer que la méthode utilisée pour la caractérisation des sols est pertinente. La carte des réservoirs hydriques a été établie sur l'ensemble du canton. Il ressort que les réservoirs en eau peuvent varier de 50 à 350 mm selon les situations : ces observations s'avèrent précieuses, notamment pour la gestion des techniques culturales (ex. couverture des sols, choix des porte-greffes) en relation avec les réserves hydriques des terroirs. La mise en valeur des stades phénologiques (ex. débourrement) avec les entités climatiques identifiées a donné des résultats encourageants. L'étude de la plante a, entre autres, mis en évidence le rôle bénéfique d'une contrainte hydrique modérée durant la maturation du raisin pour l'accumulation des sucres avec un arrêt précoce de la végétation.

Pour beaucoup, le terroir ne se limite pas uniquement aux seuls facteurs naturels. Le vigneron va chercher à tirer le meilleur profit possible de ses sols et des climats. Il intervient déjà au niveau du choix du cépage et des techniques culturales (alimentation de la vigne, couverture des sols, systèmes de conduite) qui vont influencer directement le comportement de la vigne et la qualité de ses produits.

Par ailleurs, une étude de terroirs doit s'inscrire dans une dynamique à long terme. Les grandes différences climatiques observées durant la période d'étude du comportement de la plante (année 2001 très humide et 2003 très sèche) ont montré que les points faibles d'un terroir pouvaient se transformer en facteurs de qualité en année particulière. Ainsi, en année très sèche (2003), les sols à bon réservoir hydrique ont permis à la vigne d'éviter de subir des stress trop marqués. La caractéristique des grands terroirs viticoles réside dans l'expression de grands vins de qualité quelles que soient les conditions climatiques du millésime. Ces grands terroirs ont en particulier la capacité de limiter à la fois les effets des excès et des manques d'eau. L'aptitude à réguler l'alimentation hydrique apparaît comme le principal facteur qualitatif d'un terroir.

□ Des perspectives passionnantes

Il est envisagé de poursuivre le projet dans deux directions : La première consiste à étudier l'adaptation des cépages aux différents terroirs du vignoble vaudois. Pour cela, un réseau de plus de 130 parcelles a été implanté en 2003 avec différents cépages rouges et blancs répartis dans les principaux types de sol. Le suivi de ses parcelles qui ira jusqu'à la vinification, commencera en 2006 et devrait permettre d'établir des cartes de recommandation pour l'encépagement du vignoble.

La deuxième orientation a pour objectif la création d'un réseau viticole interactif en profitant des possibilités offertes aujourd'hui par le Web. Le développement d'un site Internet interactif au service des entreprises vitivinicoles du canton permettra de collecter une quantité importante d'informations techniques au niveau des entreprises ou des parcelles viticoles. La mise en valeur de ces données au moyen d'outils performants (SIG) permettra d'établir des relations intéressantes soit pour le producteur, soit pour l'ensemble d'une région. L'objectif principal est de donner au vigneron un outil d'orientation et d'aide à la décision.

6. Bibliographie

Aerny J. 1996 : Composés azotés des moûts et des vins. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **28** (3), 161-165.

Ameglio T. ; Archer P. 1996 : Représentativité du potentiel de base sur sols à humidité hétérogène. *Agronomie* **16**, 493-503.

Ameglio T. ; Archer P. ; Cohen M. ; Valancogne C. ; Daudet F.A. ; Dayas S. ; Cruiziat P. 1999 : Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant and soil*, **207**, 155-167.

Archer P. ; Ameglio T. 1995: Potentiel de base sur sols à humidité hétérogène: cas des jeunes noyers. Séminaire du GEA « l'eau dans la vie de l'arbre » Theix 1994/04/14-15, pp. 305-313.

Avice J. ; Ourry A. ; Lemaire G. ; Boucaud J. 1996 : Nitrogen and carbon flows estimated by ^{15}N and ^{13}C pulse-chase labeling regrowth of alfafa. *Plant physiol.*, **112**, 281-290.

Baggiolini M. 1952 : Les stades de repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. *Rev. Romande Agric. Vitic.*, **8**, 4-6.

Baize D. ; Jabiou B. 1995: Guide pour la description des sols, INRA, 375 p.

Bavaresco L. 1995 : Utilisation d'un compteur non destructif pour déterminer la concentration de chlorophylle dans les feuilles de vigne. *Bulletin O.I.V.* **68** (771-772), 406-414.

Becker N.J. 1985 : Einfluss von Standortfaktoren auf Beerenreifung und Ertragsbildung. *Die Wein-wissenschaft* **40**, 291-318.

Becker N.J. ; Morgenschweis G. ; Luft G. 1983 : Standortfaktoren von zwölf Anlagen der Sorte Ruländer in Südbaden und ihr Einfluss auf vegetatives Wachstum und Entwicklung der Reben. *Die Wein-wissenschaft*, **38**, 3-27, 75-107.

Begg J.E. ; Turner N.C. 1970 : Water potential gradients in field tobacco. *Plant Physiology* **46**, 343-346.

Bertamini, M. ; Iacono, F. ; Scienza, A. 1991 : Manipolazione dei rapporti sink-source mediante il diradamento dei grappoli e riflessi sulla qualità (cv. Cabernet Sauvignon). *Vignevini* **10**, 41-47.

Bessis R. ; Adrian M. 2000 : Alimentation hydrique de la vigne : un facteur de l'expression du terroir. *P.A.V.*, **117**, 15-16 : 345-350.

Bouard J. ; Pouget R. 1971: Physiologie de la croissance et du développement. Dans : Traité d'ampélographie, Sciences et Techniques de la vigne de Ribéreau-Gayon et E. Peynaud. Tome I : Biologie de la vigne et des sols, chapitre 5, 349-359.

Boyer, J.S. 1970 : Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean and sunflower at various leaf water potentials. *Plant Physiology* **46**, 233-235.

Bowes B.G. 1998 : Structure des plantes. Atlas en couleur. Version française. INRA, Paris, 1998, 192 p.

Branas J. ; Vergnes A. 1957 : Morphologie du système racinaire. *Prog. Agric. Vitic.* **3** (4), 29-104.

Breda N.; Cochard H.; Dreyer E.; Granier A. 1993: Seasonal evolution of water transfer in a mature oak stand (*Quercus petraea* Matt. Liebl.) submitted to drought. *Can. J. For. Res.*, **23**, 1136-1143.

Breda N.; Granier A.; Barataud F.; Moyne C. 1995: Soil water dynamics in an oak stand. Part I. Soil moisture, water potentials and root water uptake. *Plant and soil*, **172**, 17-27.

Brix, H. 1962 : *Physiologia Pl.* **15**, 10-20.

Brown, K.W. ; Thomas, J.C. 1980 : The influence of water stress preconditioning on dark respiration. *Physiologica Plantarum* **49**, 205-209.

Buttrose M.S. ; Hale C.R. 1973 : Effect of temperature on the development of grapevine inflorescence after bud burst. *Amer. J. Enol. Vitic.* **24** (1), 14-16.

Carbonneau, A. 1976 : Principes et méthodes de mesure de la surface foliaire. Essai de caractérisation des types de feuille dans le genre *Vitis*. *Ann. Amél. Plantes* **26** (2), 327-343.

Carbonneau, A. 1976 : Analyse de croissance des feuilles du sarment de la vigne : estimation de la surface foliaire par échantillonnage. *Conn. Vigne Vin* **10** (2), 141-159.

Carbonneau, A. 1976 : Mise au point bibliographie sur la photosynthèse chez la vigne. *Connaissance Viticole* **10**, 3, 249-267.

Carbonneau, A. 1980 : Recherche sur les systèmes de conduite de la vigne : essai de maîtrise du microclimat et de la plante entière pour produire économiquement du raisin de qualité. Thèse docteur-ingénieur. Université de Bordeaux II. 235 p.

Carbonneau, A. 1983 : Méthodes de mesures simples de la surface foliaire exposée par hectare, élément déterminant du système de conduite de la vigne. *Conn. Vigne Vin* **17** (4), 281-285.

Carbonneau, A. 1989 : L'exposition utile du feuillage : définition du potentiel du système de conduite. Systèmes de conduite de la vigne et mécanisation. OIV Ed. Paris 13-33.

Carbonneau A. 1998 : Irrigation, vignoble et produits de la vigne. Chapitre IV, Traité d'irrigation, Jean-Robert Tiercelin, Editions TEC DOC Lavoisier, Paris, 257-276.

Carbonneau A. 2001 : Gestion de l'eau dans le vignoble. Théorie et pratique. Comptes Rendus du GESCO, 12^{ème} Journées Montpellier 3 au 7 juillet 2001, Journée professionnelle : gestion de l'eau dans le vignoble, 3-21.

Carbonneau A. ; Riou C. ; Guyon D. ; Riou J. ; Schneider C. 1992 : Agrométéorologie de la vigne en France. Ed. Commission des Communautés Européennes, 165 p.

Champagnol F. 1984 : Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale. Ed. Champagnol F., Impr. Dehan, Montpellier, 1984, 351 p.

Champagnol F. 1997 : Caractéristiques édaphiques et potentialités qualitatives des terroirs du vignoble Languedocien. Progrès Agricole et Viticole **114**, n° 7, 157-166.

Champagnol F. 2002 : Communications personnelles. Elaboration des Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale (2^{ème} édition), en préparation.

Chone X. 2001 : Contribution à l'étude des terroirs de Bordeaux : Etude des déficits hydriques modérés, de l'alimentation en azote et de leurs effets sur le potentiel aromatique des raisins de *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon blanc. Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux 2. 188 p.

Chone X. ; Tregoat O. ; van Leeuwen C., Dubourdieu D. 2000 : Déficit hydrique modéré de la vigne : parmi les 3 applications de la chambre à pression, le potentiel tige est l'indicateur le plus précis. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **34**, n°4, 169-176.

Chone X., van Leeuwen C., Chery Ph. ; Ribéreau-Gayon P. 2001a : Terroir influence on water status and nitrogen status of non irrigated Cabernet-Sauvignon (*Vitis vinifera*) : vegetative development, must and wine composition. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* **22**, n°1, 8-15.

Chone X. ; van Leeuwen C., Dubourdieu D. ; Gaudillère J.-P. 2001b : Stem water potential is a sensitive indicator for grapevine water status. *Annals of Botany* **87**, n°4, 477-483.

Cochard H. 1992: Vulnerability of several conifer to air embolism. *Tree Physiol* **11**, 73-83.

Cochard H. 1995: L'embolie hivernale et estivale: données actuelles et mécanismes. Séminaire du GEA « l'eau dans la vie de l'arbre », Theix 1994/04/14-15, pp 67-99.

Cochard H.; Breda N.; Granier A.; Aussenac G. 1992: Vulnerability to airembolism of three European oak species (*Quercus petraea* Matt. Liebl., *Q. pubescens* Willd, *Q. robur* L.). *Ann. Sci. For.*, **49**, 225-233.

Codis S. 2000: Elaboration d'un outil de diagnostic du stress hydrique de la vigne à partir d'un modèle de bilan hydrique et de la température foliaire. Application à la typologie d'un réseau de parcelles. Mémoire de fin d'études, E.N.S.A. Montpellier-E.N.E.S.A. Dijon, 65 p.

Cruziat P. 1992 : L'état hydrique des plantes : Rappels et utilisation, 1-16. Dans : Fonctionnement hydrique des plantes. Relations avec la physiologie. Séminaire INRA en bioclimatologie, Paris 24-25/10/1990. 118 p.

Cruziat P. 1997 : Les relations plante-eau, de la cellule à la plante entière, 1-40. Dans : L'eau dans l'espace rural, production végétale et qualité de l'eau. Universités francophones. Riou C. ; Bonhomme R. ; Chassin P. ; Neveu A. ; Papy F. Editions INRA, Paris, 1997, 411 p.

Davies, W.J. ; Zhang, J. 1991 : Root signals and the regulation of growth and development in drying soil. *Ann. Rev. Plant. Phys. and Mol. Biol.* **42**, 55-76.

Deloire A.; Lopez F., Carbonneau A. 2002 : Réponses de la vigne et terroirs. Eléments pour une méthode d'étude. *Le Progrès Agricole et Viticole*, **4**, 78-86.

Deloire A. ; Carbonneau A. ; Federspiel Brigitte ; Ojeda H. ; Wang Z. ; Costanza P. 2003 : La vigne et l'eau. *Le Progrès Agricole et Viticole*, **4**, 79-90.

Dry P.R. ; Loveys B.R. 1999 : Grapevine shoot growth and stomatal conductance are reduced when part of the root system is dried. *Vitis*, **38** (4), 151-156.

Düring H. ; Scienza A. 1980 : Drought resistance of some vitis species and cultivars. Proc. 3rd Intern. Symposium on Grape Breeding, University of California, Davis, 179-189.

Düring, H. ; Loveys, B.R. 1982 : Diurnal changes in water relations and abscisic acid in field grown *Vitis vinifera* cvs. *Vitis* **21**, 223-232.

Duteau J. 1982 : Alimentation en eau de la vigne dans le Bordelais en période estivale sèche. Exemple de l'année 1980 à Saint-Emilion et Pomerol. *Sci. Sol*, **1**, 15-29.

Farquhar G.D.; O'Leary M.H.; Berry J.A. 1982: On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Aust. J. Plant Physiol.* **9**, 121-137.

Farquhar G.D.; Ehleringer J.R.; Hubick K.T. 1989: Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* **40**, 503-539.

Garnier E. ; Berger A. 1987: The influence of drought on stomatal conductance and water potential of peach trees growing in the field. *Scientia Horticultura*, **32**, 249-263.

Gaudillère J.-P. ; van Leeuwen C. 2000 : Mieux évaluer la contrainte hydrique. Agronomie et écophysiologie : discrimination isotopique du carbone du sucre et des moûts. *VITI*, n° **249**, 20-22.

Gaudillère J.-P. ; van Leeuwen C. ; Ollat N. ; Goutouly F., Champagnol F. 1999 : ¹³C/¹²C. Discrimination measured in tartrate and sugars in mature grapevine berries. *Acta Hort.* **493**, 63-68.

Gollan, T. ; Schurr U.; Schulze E.D. 1992 : Stomatal response to drying soil in relation to changes in the xylem sap composition of *Helianthus annuus* L. The concentration of cations, anions, aminoacids , and pH of the xylem sap. *Plant, Cell and Environment* **15**, 551-559.

Greenspan M.; Schultz H.R.; Matthews M.A. 1996: Field evaluation of water transport in grape berries during water deficits. *Physiologia Plantarum*, **97**, 55-62.

Guilioni L.; Lacroute J.; Queral C. ; Riou Ch. 2001 : Utilisation de la température des feuilles comme indicateur de déficit hydrique chez la vigne (*Vitis Vinifera* L.). Comptes Rendus du GESCO, 12^{ème} Journées Montpellier 3 au 7 juillet 2001, 57-62.

Hack H. ; Bleiholder H., Buhr L. ; Meier U. ; Schnock-Fricke U. ; Weber E., Witzemberger A. 1992 : Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyledoner Pflanzen. Erweiterte BBCH-Skala, Allgemeine. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. **44** (12), 265-270.

Hardie W.J. ; Considine J.A. 1976 : Response of grapes to water deficit stress in particular stages of development. *Amer. J. Enol. Viticult.* **27** (2), 55-61.

Huglin P. 1986 : Biologie et écologie de la vigne. Ed. Payot Lausanne, Technique et Documentation, Paris, 371 p.

Huglin P. ; Schneider C. 1998 : Biologie et écologie de la vigne. 2^{ème} édition, Lavoisier Tec et Doc, Paris, 370 p.

Jourjon F. ; Morlat R., Seguin G. 1992 : Développement de la vigne et maturation du raisin dans différents terroirs viticoles de la moyenne vallée de la Loire (1). *J. Int. Sci. Vigne et Vin* **26** (2), 51-62.

Katerji N. ; Hallaire M. 1984 : Les grandeurs de référence utilisables dans l'étude de l'alimentation en eau des cultures. *Agronomie* **4**, 10, 999-1008.

Koundouras S. ; van Leeuwen C. ; Seguin G. ; Glories Y. 1999 : Influence de l'alimentation en eau sur la croissance de la vigne, la maturation des raisins et les caractéristiques des vins en zone méditerranéenne (exemple de Némée, Grèce, cépage Saint-Georges, 1997). *J. Int. Sci. Vigne Vin* **33** (4), 149-160.

Kriedemann, P.E. ; Smart, R.E. 1971 : Effects of irradiance, temperature and leaf water potential on photosynthesis of vines leaves. *Photosynthetica* **5** (1), 6-15.

Larchevêque C. ; Casanova A. ; Dupuch V. 1998a. Relation entre la fermentescibilité des moûts et la teneur en composés azotés. Influence d'une fumure azotée sur la nature et la concentration des principaux acides aminés des moûts d'une vigne de *Vitis vinifera* L. var. Muscadelle avec enherbement permanent. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **32**, 137-151.

Larchevêque C. ; Casanova A. ; Dupuch V. 1999 : Influence de différents activateurs de la fermentation alcoolique sur la composition en acides aminés et la

fermentescibilité des moûts de *Vitis vinifera* L. var. Muscadelle provenant de vignes enherbées. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **93**, 161-175.

Lebon E. 1993 : De l'influence des facteurs pédo- et mésoclimatiques sur le comportement de la vigne et les caractéristiques du raisin. Application à l'établissement de zonage des potentialités qualitatives en vignoble à climat semi-continental (Alsace). Thèse de Doctorat, Centre des Sciences de la Terre, Université de Bourgogne, 165 p. + annexes.

Lebon E. 2001 : Shoot architectural responses induced by controlled soil water deficit in vine (*Vitis vinifera* L. cv. Grenache noir). Compte rendu du GESCO, 12èmes journées, Montpellier 3-7 juillet 2001, 229-235.

Lebon E. ; Schultz H. ; Dumas V. 1995 : Application d'un modèle d'interception du rayonnement solaire par la vigne pour la simulation du bilan hydrique et de la photosynthèse à l'échelle du couvert : résultats préliminaires. C.R. du GESCO, 31-38.

Lebon E. ; Dumas V. ; Pieri Ph.; Schultz H.-R. 2003: Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. CSIRO Publishing. *Functional Plant Biology*, **30**, 699-710.

Letessier I., Fermond C. 2004. Etude des terroirs viticoles vaudois (Suisse), Géo-pédologie. Zone pilote de La Côte : Appellations Bursinel, Vinzel, Luins et Begnins. Rapports SIGALES, Etudes de sols et de terroirs, Letessier-Fermond, 38410 St Martin d'Uriage, 70 p.

Liu, W.T. ; Pool, R. ; Wenkert, W. ; Kriedemann, P.E. 1978 : Changes in photosynthesis, stomatal resistance and abscisic acid of *Vitis labruscana* through drought and irrigation cycles. *Am. J. Enol. Vitic.* **29** (4), 239-246.

Löhnertz O. 1988 : Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf der Nährstoffaufnahme bei *Vitis vinifera* (cv. Riesling). Dissertation, Universität Giessen, 228 p.

Löhnertz O. ; Prior B. ; Bleser M. ; Linsenmeier A. 1998 : Einfluss von weinbaulichen Massnahmen auf die Aminosäuregehalte in Trauben und Most der Sorte Riesling. Actes du colloque « Intervitis », Stuttgart, 12 mai 1998, 1-23.

Lopes C. ; Vicente-Paulo J. ; Santos T., Rodrigues M.L. ; Barroso J., Chaves M.M. 2001 : An Attempt to quantify grapevine water stress in a mediterranean environment. Compte Rendu du GESCO, 12^{ème} Journées Montpellier 3 au 7 juillet 2001, 43-48.

Lorenzini F. 1996 : Teneur en azote et fermentescibilité des moûts. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **28** (3), 169-173.

Lovisol, C. ; Schubert, A. 1998 : Effects of water stress on vessel size and xylem hydraulic conductivity in *Vitis vinifera* L. *Journal of Experimental Botany* **49** (321), 693-700.

Mac Cutchan H.; Shackel K.A. 1992: Stem water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees. *Journal of American Society of Horticulture and Science* **117**, 607-611.

Maigre D. ; Murisier F. 2000 : Essai d'enherbement et de fumure azotée sur Gamay dans le bassin lémanique. Résultats agronomiques. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **32** (3), 145-151.

Maigre D. ; Aerny J. 2000 : Essai d'enherbement et de fumure azotée sur Gamay dans le bassin lémanique. 2. Résultats analytiques et organoleptiques. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **32** (5), 279-285.

Maigre D. ; Aerny J. ; 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 Vitic., Arboric., Hortic.* **27**, 237-251.

Matthews M.A.; Anderson M.M.; Schultz H.-R. 1987: Phenologie and growth response to early and late season water deficits in cabernet franc. *Vitis* **26**, 147-160.

Mc Cree K.J. 1986b. Whole-plant carbon balance during osmotic adjustment to drought and salinity stress. *Australian Journal of Plant Physiology* **13**, 33-43.

Meriaux S. ; Rollin H. ; Rutten P. 1979 : Effets de la sécheresse sur la vigne : I. Etudes sur Cabernet Sauvignon. *Ann. Agron.* **30** (6), 553-575.

Morlat R. 1989 : Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins. Application aux vignobles rouges de la moyenne vallée de la Loire. Thèse Doct. Etat, Bordeaux II, texte 289 p. + annexes.

Morlat R. 2001 : Terroirs viticoles : Etude et valorisation. Aux Editions Oenoplurimédia, dans la collection Avenir Oenologie, 120 p.

Morlat R. ; Hardy P. 1987 : Résultats concernant les variations de précocité de la vigne dans le Val de Loire. Importance du pédoclimat thermique. O.I.V. 3^{ème} Symposium international sur la Physiologie de la vigne. Bordeaux 1986, 332-338.

Morlat R. ; Penavayre M. ; Jacquet A. ; Asselin C. ; Lemaître C. 1992 : Influence des terroirs sur le fonctionnement hydrique et la photosynthèse de la vigne, en millésime exceptionnellement sec (1990). Conséquence sur la maturation du raisin. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **26** (4), 197-220.

Murisier, F. 1996 : Optimalisation du rapport feuille-fruit de la vigne pour favoriser la qualité du raisin et l'accumulation des glucides de réserve. Relation entre le rendement et la chlorose. Thèse de doctorat, ETH Zurich, 132 p.

Murisier, F. ; Ziegler, R. 1991 : Effets de la charge en bourgeons et de la densité de plantation sur le potentiel de production, sur la qualité du raisin et sur le développement végétal. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* **23** (5), 277-282.

Murisier, F. ; Zufferey, V. 1997 : Rapport feuille-fruit de la vigne et qualité du raisin. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 29 (6), 355-362.

Naor A. 1998: Relations between leaf and stem water potentials and stomatal conductance in three field-grown woody species. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 73, 431-436.

Naor, A. ; Bravdo, B. ; Gelobter, J. 1994 : Gas exchange and water relations in field-grown Sauvignon blanc grapevines. *Ann. J. Enol. Vitic.* Vol. 45 (4), 423-428.

Ojeda H. ; Deloire A., Carbonneau A. ; Ageorges Agnes ; Romieu C. 1999 : Berry development of grapevines : Relations between the growth of berries and their DNA content indicate cell multiplication and enlargement. *Vitis* 38 (4), 145-150.

Ojeda H. ; Deloire A. ; Carbonneau A. 2001 : Influence of water deficits on grape berry growth. *Vitis* 40 (3), 141-145.

Ojeda H. ; Ary C. ; Kraeva E., Carbonneau A., Deloire A. 2002 : Influence of pre and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* L., cv Shiraz. *Am. J. of Enol. And Vitic.* 53 (4), 261-267.

Ollat N. 1997 : Bases physiologiques et anatomiques de la croissance des baies de *Vitis vinifera* cv. Cabernet sauvignon. Thèse de doctorat en Sciences agronomiques. Ministère de l'agriculture. Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier. 131 p.

Payan J.-Ch. ; Salançon E. 2002 : Définition de la contrainte hydrique : incidences sur les caractéristiques de la vendange. Les Entretiens Viti-Vinicoles Rhône-Méditerranée, 17 avril 2002, Gruissan, 6-9.

Payan J.-Ch., Ramel J.-P.; Martinez A.-M.; Salançon E. 2003 : Sécheresse et canicule en 2003 : caractérisation climatique et méthodes d'identification au vignoble. Comptes rendus des Conférences EUROVITI du 26-27 novembre, 14^{ème} colloque viticole et œnologique 2003, Montpellier, France, 99-110.

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. Thèse ENSA, 138 p.

Pellegrino A. ; Lebon E. ; Codis S.; Riou C.; Wery J. 2001: Identification of diagnosis indicators for the evaluation of soil water deficit experienced by grapevine in a network of farmers fields. Comptes Rendus du GESCO, 12^{ème} Journées Montpellier 3 au 7 juillet 2001, 31-35.

Penavayre M. ; Morlat R. ; Jacquet A. ; Bimont F. 1991 : Influence des terroirs sur la croissance et le développement de la vigne en millésime exceptionnellement sec (1990). *J. Int. Sci. Vigne Vin* 25 (3), 119-131.

Pouget R. 1966 : Etude du rythme végétatif : caractères physiologiques liés à la précocité de débourrement chez la vigne. *Ann. Amélior. Plantes*, 81-100.

Pouget R. 1967 : Méthode d'appréciation de l'évolution physiologique des bourgeons pendant la phase de pré-débourrement : application à l'étude comparée du débourrement de la vigne. *Vitis*, 294-302.

Pouget R. 1968 : Nouvelle conception du seuil de croissance. *Vitis*, 201-205.

Pythoud K. ; Caloz R. 2003 : Base de données, SIG et modélisation du mésoclimat. Rapport du laboratoire de SIG : Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), CH-1015 Lausanne, 216 p.

Quereix A. 2001 : Analyse et modélisation du fonctionnement stomatique de la vigne *Vitis vinifera* L. Intégration de l'effet des puits de carbone sur les échanges gazeux de la plante. Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux 2. 132 p.

Riou C. 1992 : Le déterminisme climatique de la maturation du raisin. Application au zonage de la teneur en sucres dans la communauté Européenne. Ouvrages de la C.E.E., novembre.

Riou C. et al. 1994 : Le déterminisme climatique de la maturation du raisin : application du zonage de la teneur en sucre dans la communauté européenne. 319 p. Centre commun de recherche de la commission européenne, Luxembourg.

Riou C. ; Lebon E. 2000 : Application d'un modèle de bilan hydrique et de la mesure de la température du couvert au diagnostic du stress hydrique de la vigne à la parcelle. *Bull. O.I.V.* **73**, 4, 755-764.

Riou C. ; Payan J.C. 2001 : Outils de gestion de l'eau en vignoble méditerranéen. Application du bilan hydrique au diagnostic du stress hydrique de la vigne. Compte Rendu du GESCO. 12^{ème} journées, Montpellier 3 au 7 juillet 2001, 125- 133.

Riou C. ; Durand J.F. ; Carbonneau A. ; Lebon E. 1999 : Modèles qualité en viticulture. Modélisation de la qualité de la vendange à partir de l'analyse des données des millésimes 1994 à 1997. Rapport d'étape. ITV France, Paris, 74 p. + annexes.

Robert, D. ; Roland, J.-C. 1998 : Organisation cellulaire. Biologie végétale, Volume 1. Caractéristiques et stratégie évolutive des plantes. DOIN 2^{ème} édition, Paris, 367 p.

Rodrigues, M.L. ; Chaves, M.M. ; Wendler, R. ; David, M.M. ; Quick, W.P. ; Leegood, R.C. ; Stitt, M. ; Pereira, J.S. 1993 : Osmotic adjustment in water stressed grapevine leaves in relation to carbon assimilation. *Aust. J. Plant Physiol.* **20**, 309-321.

Rodrigues-Lovelle B. ; Gaudillière J.-P. 2002 : Carbon and nitrogen partitioning in either fruit and non-fruiting grapevines : effect of nitrogen before and after veraison. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **8** (2), 86-94.

Rupp D., Tränkle L. 1995 : Zur Anwendung einer zerstörungsfreien Chlorophyll-Messmethode beim Weinreben. *Mitteilungen Klosterneuburg* **45**, 139-145.

Salisbury, F.B. ; Ross, C.W. 1978 : Plant Physiology. Wadsworth Publishing Company, Inc. Second Edition , 422p.

Schmid J. 1997: Xylemflussmessungen an Reben. Dissertation Bonn, Geisenheimer Berichte, Band 33, pp. 151.

Scholander P.F. ; hammel H.T. ; Bradstreet E.D. ; Hemmingzen E.A. 1965 : Sap Pressure in Vascular Plants. *Science*, 148, 339-346.

Schultz H.-R. 1989 : CO₂-Gaswechsel und Wassertransport von Stark-und Schwachlichttrieben bei *Vitis vinifera* L. (cv. Riesling) in Abhängigkeit von Klima- und Pflanzenfaktoren - Ansatz eines empirischen Assimilationsmodells - Geisenheimer Berichte, Band 5, 221 p.

Schultz H.-R. 1996 : Water relations and photosynthetic responses of two grapevine cultivars of different geographical origin during water stress. *Acta Hort.* **427**, 251-266.

Schultz H.-R.; Matthews M.A. 1988: Resistance to water transport in shoots of *Vitis vinifera* L. *Plant physiology*, **88**, 718-724.

Schultz H.-R.; Matthews M.A. 1993: Xylem development and hydraulic conductance in sun and shade shoots of grapevine (*Vitis vinifera* L.): evidence that low light uncouples water transport capacity from leaf area. *Planta*, **190**, 393-406.

Schultz H.-R.; Matthews M.A. 1997: High vapour pressure deficit exacerbates xylem cavitation and photoinhibition in shade-grown *Piper auritum* H.B. & K. during prolonged sunflecks. I. Dynamics of plant water relations. *Oecologia*, **110**, 312-319.

Seguin G. 1970: Les sols viticoles du Haut Médoc. Influence sur l'alimentation en eau de la vigne et sur la maturation du raisin. Thèse de doctorat de l'université de Bordeaux, institut d'œnologie, 141 p.

Seguin G. 1975 : Alimentation en eau de la vigne et composition des moûts dans les grands crus du Médoc. *Connaiss. Vigne Vin* **9** (1), 23-33.

Seguin G. 1983 : Influence des terroirs viticoles sur la constitution et la qualité des vendanges. *Bull. O.I.V.*, **623**, 3-18.

Simonin G.; Cochard H., Delatour C., Granier A. Dreyer E. 1994: Vulnerability of young oaks (*Quercus robur*) to embolism during water stress and after an inoculation with *Ophiostoma querci*. *Ann. Sci. For.*, 493-504.

Smart, R.E. 1985 : Principles of grapevine canopy microclimate manipulation with implications for yield and quality. *Am. J. Enol. Vitic.* **36**, 230-239.

Smart R.E.; Turkington C.R.; Evans J.C. 1974: Grapevine response to furrow and trickle irrigation. *Am. J. Enol. Vitic.* **25** (2), 62-66.

Smart, R.E. ; Robinson, J.B. ; Due, G.R.; Brien, C.J. 1985 : Canopy microclimate modification for the cultivar Shiraz. II. Effects on must and wine composition. *Vitis* **24**, 119-128.

Smart, R.E. ; Smith, S.M.; R.V. Winchester 1988 : Light quality and quantity effects in fruit ripening for Cabernet Sauvignon. *Am. J. Enol. Vitic.* **39**, 250-258.

Spring J.-L. 1997 : Comportement physiologique des cépages Chasselas, Sylvaner, Gamay et Pinot noir dans les conditions sèches du Valais central. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* Vol. **29** (5), 265-271.

Spring J.-L. 1999 : Indice chlorophyllien du feuillage et nutrition azotée du cépage Chasselas. Premières expériences en Suisse romande. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **31** (3), 141-145.

Spring J.-L. 2001 : Influence du type d'enherbement sur le comportement de la vigne et la qualité des vins. Résultats d'un essai sur Chasselas dans le bassin lémanique. 1. Résultats agronomiques. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **33** (5), 253-260.

Spring J.-L. 2002 : Influence du type d'enherbement sur le comportement de la vigne et la qualité des vins. Résultats d'un essai sur Chasselas dans le bassin lémanique. 2. Résultats œnologiques. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **34**, 111-116.

Spring J.-L. 2002 : Nutrition azotée de la vigne : intérêt de la détermination de l'indice chlorophyllien pour les cépages Chasselas, Pinot noir et Gamay. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **34** (1), 27-29.

Spring J.-L. 2003 : Localisation de la fumure azotée sur l'intercep dans les vignes enherbées. Résultats d'un essai sur Chasselas dans le bassin lémanique. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **35** (2), 113-119.

Spring J.-L. 2004 : Influence de l'alimentation hydrique sur le comportement de la vigne et la qualité des vins de cépages rouges. Les conférences d'Agrovina, Journée d'information viticole, Martigny, 28 janvier 2004, 26-33.

Spring J.-L. ; Zufferey V. 2000 : Intérêt de la détermination de l'indice chlorophyllien du feuillage en viticulture. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **32** (6), 323-328.

Spring J.-L. ; Burgos S. 2002 : Alimentation hydrique : un élément clé du comportement de la vigne et de la qualité du raisin. Journée d'information viticole, les conférences d'Agrovina, 23 janvier 2002 de Martigny, 28-36.

Spring J.-L. ; Murisier F. 2004 : Comportement viticole et influence sur la qualité des moûts et des vins. Rapport sur le réseau de parcelles de Chamoson : VITI 2000 – Chamoson (CH). Résultats 1997-2000. Rapport de l'Agroscope RAC Changins, Centre viticole du Caudoz, CH-1009 Pully, 78 p.

Spring J.-L. ; Ryser J.-P.; Schwarz J.-J.; Basler P.; Bertschinger L.; Häseli A. 2003: Données de base pour la fumure en viticulture. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* **35** (4).

Tardieu F. 1993 : Will progresses in understanding soil-root relations and root signalling substantially alter water flux models ? *Ph. Trans. Royal Soc. London*, **341**, 57-66.

Tardieu, F.; Davies, W. J. 1992 : Stomatal response to abscisic acid is a function of current plant water status. *Plant Physiology* **98**, 540-549.

Tardieu F. ; Dreyer E. 1997 : Régulation des échanges gazeux par les plantes soumises à la sécheresse, 41-59. Dans : L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau., INRA Editions, C.Riou, R. Bonhomme, P. Chassin, A. Neveu, F. Papy, éd. 411 p.

Tardieu F.; Zhang J.; Katerji N.; Bethenod O.; Palmer S.; Davies W.J. 1992 : Xylem ABA controls the stomatal conductance of field-grown maize subjected to soil compaction or soil drying. *Plant, Cell and Environment* **15**, 193-197.

Tardieu F. ; Améglio T. ; Bréda N. ; Dayau S. 1995 : Regulation des transferts hydriques chez les plantes soumises à la sécheresse, 61-82. Dans : Actes de l'Ecole-Chercheurs INRA en bioclimatologie, Le Croisic, 3-7 avril 1995. Tome 1 : De la plante au couvert végétal. Editeur : Département de bioclimatologie INRA, F-78850 Thiverval-Grignon, 669 p.

Trambouze, W. 1996 : Caractérisation et éléments de modélisation de l'évapotranspiration réelle de la vigne à l'échelle de la parcelle. *Thèse de doctorat*, ENSA de Montpellier, 191 p.

Tregoat O. 2003 : Caractérisation du régime hydrique et du statut azoté de la vigne par des indicateurs physiologiques dans une étude terroir au sein de huit grands crus de Bordeaux. Influence sur le comportement de la vigne et la maturation du raisin. *Thèse de doctorat* de l'Université de Bordeaux 2, 285 p.

Tregoat O. ; Van Leeuwen C. ; Choné X.; Gaudillère J.-P. 2002: Etude du régime hydrique et de la nutrition azotée de la vigne par des indicateurs physiologiques. Influence sur le comportement de la vigne et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* L. cv. Merlot, 2000, Bordeaux). *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **36** (3), 133-142.

Turner, N.C. 1979 : Drought resistance and adaptation to water deficits in crop plants. In : Mussel, H. and Staples, R. C. (Eds.). *Stress physiology in crop plants*, 343-372. John Wiley and Sons, New York.

Turner, N.C. 1991 : Measurement and influence of environmental and plant factors on stomatal conductance in the field. *Agricultural and Forest Meteorology* **54**, 137-154.

Tyree M.T. ; Ewers 1991 : The hydraulic architecture of trees and other woody plants. *New Phytol.*, **119**, 345-360.

Tyree M.T. ; Cochard H. 1995: Summer and winter embolism in oak: impact on water relations. *Ann. Sci. for.*, **53**, 167-171.

Tyree M.T.; Cochard H.; Cruiziat P.; Sinclair B.; Améglio T. 1993: Drought induced leaf shedding in walnut: Evidence for vulnerability segmentation. *Plant, Cell and Environment* **16**, 879-882.

Urban L. 1997: Introduction à la production sous serre. Tome 2 : L'irrigation fertilisante en culture hors sols. Lavoisier Tec et Doc, Paris, 178 p.

Valancogne C. ; Nasr Z. 1993 : A heat balance method for measuring sap flow in small trees. In : *Water transport in plants under climatic stress*. International workshop, Firenze, 166-173. Cambridge University Press, Cambridge UK.

Van Leeuwen C. 1991 : Le vignoble de Saint-Emilion : Répartition des sols et fonctionnement hydrique, incidences sur le comportement de la vigne et la maturation du raisin. Thèse Doct. Nouveau régime, Bordeaux II, 154 p.

Van Leeuwen C. ; Seguin G. 1994 : Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement végétatif et la maturation du raisin. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **28**, 81-110.

Van Leeuwen C.; Renard R.; Leriche O.; Molot C.; Soyer J.P. 1998: Le fonctionnement de 3 sols viticoles du Bordelais: conséquences sur la croissance et sur le potentiel œnologique du raisin en 1997. *Revue Française d'œnologie*, **170**, 28-32.

Van Leeuwen C. ; Lerich O. ; Renard R. ; Tregoat O. ; Alla P.-L. 2000 : Micromorphometric changes in trunk diameter in relation to mild water stress in field grown vines. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **34**, n°2, 41-47.

Van Leeuwen C. ; Friant Ph. ; Soyer J.-P. ; Molot Ch. ; Chone X. ; 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. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **34**, n°2, 75-82.

Van Leeuwen C. ; Gaudillère J.-P. ; Tregoat O. 2001 : L'évaluation du régime hydrique de la vigne à partir du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. L'intérêt de sa mesure sur les sucres du moût à maturité. *J. Int. Sci. Vigne Vin* **35**, n°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. *S. Afr. Enol. Vitic.*, Vol. **8** (2), 45-50.

Yunianta ; Zhang B.L. ; Martin G.J., Asselin C. ; Schaeffer M. 1995 : Essai de caractérisation du cépage des vins par analyse isotopique des éléments légers. *J. Intern. Sci. Vigne Vin* **29**, n° 2, 89-98.

Zamboni, M. ; Iacono, F. 1988 : Etude des variations du potentiel osmotique et de l'élasticité cellulaire dans des vignes soumises à un stress hydrique (1). *Connaissance Vigne Vin* 22 (4), 241-249.

Ziegler R. 1990 : Einfluss von Pflanzendichte und Belastung (triebzahl) auf das Wachstum der Weinrebe, auf die Reifeentwicklung der Trauben und auf dem Ertrag. Travail de diplôme ETH, Zürich.

Zufferey V. 2000 : Echanges gazeux des feuilles chez *Vitis vinifera* L. (cv. Chasselas) en fonction des paramètres climatiques et physiologiques et des modes de conduite de la vigne. Thèse de doctorat, ETH Zürich, 335 p.

Zufferey V. ; Murisier F.; Bonnet Véronique; Verdun C., Loizeau D., Spring J.-L., Brigueot C. 2002 : Etude du comportement de la vigne (cv. Chasselas) sur divers terroirs viticoles vaudois (Suisse). IV Symposium International sur le zonage vitivinicole. 17-20 juin 2002, Avignon, France, Tome I, 439-450.

Rapports de stage (Terroirs viticoles vaudois)

Bonnet Véronique 2001 : Caractérisation des terroirs viticoles vaudois (Suisse). Etude du comportement de la plante. Rapport de stage ENSA Montpellier, 36 p.

Verdun C. 2001 : Caractérisation des terroirs viticoles vaudois (Suisse). Etude du comportement de la plante. Rapport de stage ENSA Rennes, 38 p.

Malle F. ; Sabadie L.-M. 2002: Caractérisation des terroirs viticoles vaudois (Suisse). Etude du comportement de la plante. Rapport de stage ENSA Montpellier, 51 p.

Prieto J. 2002 : Caracterizacion de terroirs viticolas del canton de Vaud (Suiza). Estudio de comportamiento de la planta. Rapport de stage, INTA Mendoza, Argentina, 59 p.

Almendros S. 2003: Caractérisation des terroirs viticoles vaudois (Suisse). Etude du comportement de la plante. Rapport de stage, Institut Jules Guyot, Dijon, 30 p.

7. ANNEXES

ANNEXE 1 - LA CÔTE (Analyses de terre, RU et remarques)

Types de sols et parcelles	Eléments grossiers (%)	Argile (%)	Calcaire total (%)	Calcaire actif (%)	CEC (meq/100 g)	RU (mm)	Remarques
<i>Colluviosols</i>							
Begnins 06	10-20	18	1	-	9-12	> 160	Calcisol colluvial rédoxique, 9135.3
Begnins 07	-	-	-	-	-	> 200	Calcisol réductique, 9134.4
Bursinel 02	6-22	10-17	0-14	-	8-10	135	Colluviosol calcique sur mor.compacte, 9135.2
Bursins 01	13-15	18-26	0	-	11-17	200	Sol complexe, colluviosol rouge, sain, 9146
<i>Moraines caillouteuses peu compactes</i>							
Begnins 01	20-30	18	3-13	-	10	155	Calcisol sableux-caillouteux, 2135.1
Vinzel 01	6-23	17-20	1-7	-	9-10	250	Calcisol profond peu caillouteux, 2135
Vinzel 03	30	13-15	14	-	9-10	115	Calcosol sain sur molasse gréseuse à 130 cm, 2115
Vinzel 04	20-30	16	16-21	8.7	9-10	220	Calcosol profond, sain, 2115
<i>Moraines compactes</i>	<i>de pente</i>						
Begnins 02	31	13	14	-	7	110	Calcosol, mor.caillouteuse très compacte, 2114.1
Begnins 03	25	12-14	10-20	4.2	7-8	100	Calcosol, mor.compacte, 2413.1
Vinzel 02	5-40	14-20	7-28	5.9	9-11	80-90	Calcosol, mor.sablo-caillouteuse compacte, 2114
Luins 01	20-25	12-17	4-28	6.4	9-11	115	Calcosol, mor.de fond, 2413.1
Luins 03	4-23	16-19	6-27	9.5	9-10	80-100	Calcosol, mor.de fond, 2413.1
Bursinel 01	9-10	22-28	1-26	11.8	10-11	140	Calcisol, mor.de fond rédoxique, 2433.2
<i>Peyrosols sableux</i>							
Luins 02	40-70	10-13	13-21	4.2	6-9	70	Peyrosol sablo-caillouteux calcaire, 2715
Dully 02	30-45	13-17	4-25	2.4	7-10	90	Calcisol sur Peyrosol sableux calcaire, 2736
Bursins 02	25-45	8-16	2-4-30	2.3-4.7	6-11	125	Calcisol caillouteux sur Peyrosol, 2736

ANNEXE 2 - LAVAUX (Analyses de terre, RU et remarques)

Types de sols et parcelles	Eléments grossiers (%)	Argile (%)	Calcaire total (%)	Calcaire actif (%)	CEC (meq/100 g)	RU (mm)	Remarques
<i>Moraines caillouteuses peu compactes</i>							
Chardonne 03	30-45	20-30	1-8	-	8-13	180	Calcosol de replat, peu caillouteux, rougeâtre, 2136
Chardonne 06	-	-	-	-	-	>145	Calcosol complexe, mouillère localisée, 2135.2
Chardonne 07	60-75	9-20	21-43	3.1-4.3	6-10	160	Calcosol très profond, mor.caillouteuse, 2115.X
Chardonne 10	27-60	20-27	5-20	-	11-13	135	Profil remanié à tendance calcique, 2115-2145.X
Rivaz 02	45-65	6-15	24-31	4-6.5	6-9	130	Calcosol profond sur mor.alpine, 2115
<i>Moraines compactes de pente</i>							
Chardonne 04	35-45	12-20	22-39	3-7	6-12	70-80	Calcosol sur mor.compacte sablo-caill., 2113
Chardonne 08	45-50	10-11	14-15	2	6-7	80	Arenosol calcaire sur mor. sablo-caill., 2115 S
Rivaz 01	55-60	12-17	22-25	2-3	7	75	Calcosol sur mor.sablo-caillouteuse, 2113 S
Chexbres 01	40-50	6-13	32-36	3-8	4-7	130	Calcosol issu de mor.sablo-caillouteuse, 2115 S
Chexbres 02	-	-	-	-	-	110	Calcosol issu de mor.sablo-caillouteuse, 2115 S
Corsier 01	55-70	10-20	26-43	3-5	6-11	140	Calcosol issu de mor.alpine, 2115/2135
<i>Moraines sur molasse conglomératique ou gréseuse</i>							
Rivaz 04	40-50	11-15	23-29	4.3-6	6-9	100	Calcosol sableux sur blocs de conglomérats, 3313
Rivaz 05	-	-	-	-	-	240	Calcosol profond issu de molasse marneuse, 3215
St-Saphorin 03	55	20	29	6	10	130	Profil de moraine sur grès molassique, marne, 3114
Corsier 02	50-55	15-20	18-45	2-8	7-9	75	Calcosol brun sur grès molassique, 3113

ANNEXE 3 - **BONVILLARS** (Analyses de terre, RU et remarques)

Types de sols et parcelles	Eléments grossiers (%)	Argile (%)	Calcaire total (%)	Calcaire actif (%)	CEC (meq/100 g)	RU (mm)	Remarques
<i>Moraines peu caillouteuses moy. compactes</i>							
Bonvillars 02	35-45	12-34	1-33	6.9	9-20	110-140	Calcisol rubéfié sur moraine compacte, 2444-DX
Concise 02	25-30	12-22	1-35	6.4	8-13	155	Calcisol peu caillouteux sur moraine comp., 2435
Onnens 01	40-45	7-12	14-41	3.1	8-11	90	Calcosol cailloutique sur moraine, 2115-DX
Corcelles 02	35-40	11-13	35-40	6-8	7	195	Calcosol à lit de sable sur moraine, 2315
<i>Moraines sur calcaire jaune du Jura</i>							
Bonvillars 01	20-30	19-23	0-1	-	10-12	95	Calcisol de colluvions de moraines sur dalle, 3432
Champagne 02	30-40	22	3	-	12	70	Calcisol de recouvrement morainique, 3431 (sur dalle de grès calcaire jaune, crétacé)
<i>Colluviosols</i>							
Bonvillars 03	10-60	13-21	1-30	3.1	8-11	> 220	Colluviosol calcique profond, 9136

ANNEXE 4 - **CHABLAIS** (Analyses de terre, RU et remarques)

Types de sols et parcelles	Eléments grossiers (%)	Argile (%)	Calcaire total (%)	Calcaire actif (%)	CEC (meq/100 g)	RU (mm)	Remarques
<i>Moraines locales caillouteuses</i>							
Ollon 01	45-50	4-10	8-19	-	3-6	> 100	Calcosol issu de moraine alpine, 2113 S
Ollon 03	50-60	9-13	40-50	7-9	5-8	135	Calcosol calcarique de moraine locale, 2625
Ollon 06	30-45	15-25	3-42	8	8-12	160	Calcosol sur moraine locale, 2645
Ollon08	50	10-16	33-41	6-9	6-9	140	Calcosol sur moraine sablo-caillouteuse, 2615
<i>Sols de formation gypso-calcaire</i>							
Bex 06	15-20	17-20	19-26	12	10-11	110	Sol très calcaire sur gypse, 3512
Bex 07	40-50	4-13	22-40	6-14	5-12	< 80	Sol mince, moraine sur gypse, 3512
Ollon 04	-	-	-	-	-	< 80	Arenosol très calcaire sur gypse, 3511
<i>Sols issus de flysch en feuillets (*)</i>							
Bex 01	70-80	10-23	5-19	-	9-13	75	Calcosol sur schiste noir en dalles obliques, 4512
Bex 02	55-60	14-27	1-17	-	10-14	120	Calcisol sur flysch à plaquettes friables, 4635
Bex 03	60	25-30	1-5	-	9-11	155	Calcisol sur plaques de schiste marno-grés., 4635

Zone pilote : La Côte

Types de sols	Analyses foliaires (% m.s.)				
	N	P	K	Ca	Mg
Colluviosols de bas de pente	2.05 ± 0.01	0.16 ± 0.01	1.90 ± 0.12	2.89 ± 0.17	0.25 ± 0.04
Moraines peu compactes	1.95 ± 0.14	0.17 ± 0.01	1.80 ± 0.04	3.17 ± 0.11	0.21 ± 0.01
Moraines compactes - pente	1.92 ± 0.09	0.16 ± 0.01	1.73 ± 0.12	3.25 ± 0.10	0.22 ± 0.02
Peyrosols, sols caillouteux	2.22 ± 0.05	0.19 ± 0.02	2.10 ± 0.14	3.04 ± 0.06	0.20 ± 0.01

Zone pilote : Lavaux

Types de sols	Analyses foliaires (% m.s.)				
	N	P	K	Ca	Mg
Colluviosols de bas de pente	2.16 ± 0.11	0.24 ± 0.04	2.38 ± 0.15	3.33 ± 0.16	0.22 ± 0.01
Moraines épaisses peu compactes	2.18 ± 0.08	0.19 ± 0.01	1.76 ± 0.09	3.40 ± 0.13	0.23 ± 0.02
Moraines compactes - pente	2.26 ± 0.05	0.21 ± 0.01	1.43 ± 0.13	3.69 ± 0.09	0.28 ± 0.03
Moraines sur molasse gréseuse...	2.02 ± 0.13	0.19 ± 0.01	1.95 ± 0.23	3.38 ± 0.10	0.23 ± 0.01

ANNEXE 5 : Analyses foliaires (N, P, K, Ca, Mg) réalisées sur les différents types de sols.
Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte et Lavaux (CH), 2001.

Zone pilote : La Côte

Types de sols	Analyses foliaires (% m.s.)				
	N	P	K	Ca	Mg
Colluviosols de bas de pente	1.77 ± 0.11	0.13 ± 0.01	1.48 ± 0.20	2.28 ± 0.10	0.25 ± 0.04
Moraines peu compactes	1.92 ± 0.10	0.13 ± 0.02	1.57 ± 0.14	2.67 ± 0.27	0.25 ± 0.03
Moraines compactes - pente	1.82 ± 0.06	0.13 ± 0.01	1.51 ± 0.03	2.60 ± 0.10	0.28 ± 0.02
Peyrosols, sols caillouteux	1.95 ± 0.11	0.15 ± 0.02	1.63 ± 0.08	2.26 ± 0.11	0.22 ± 0.03

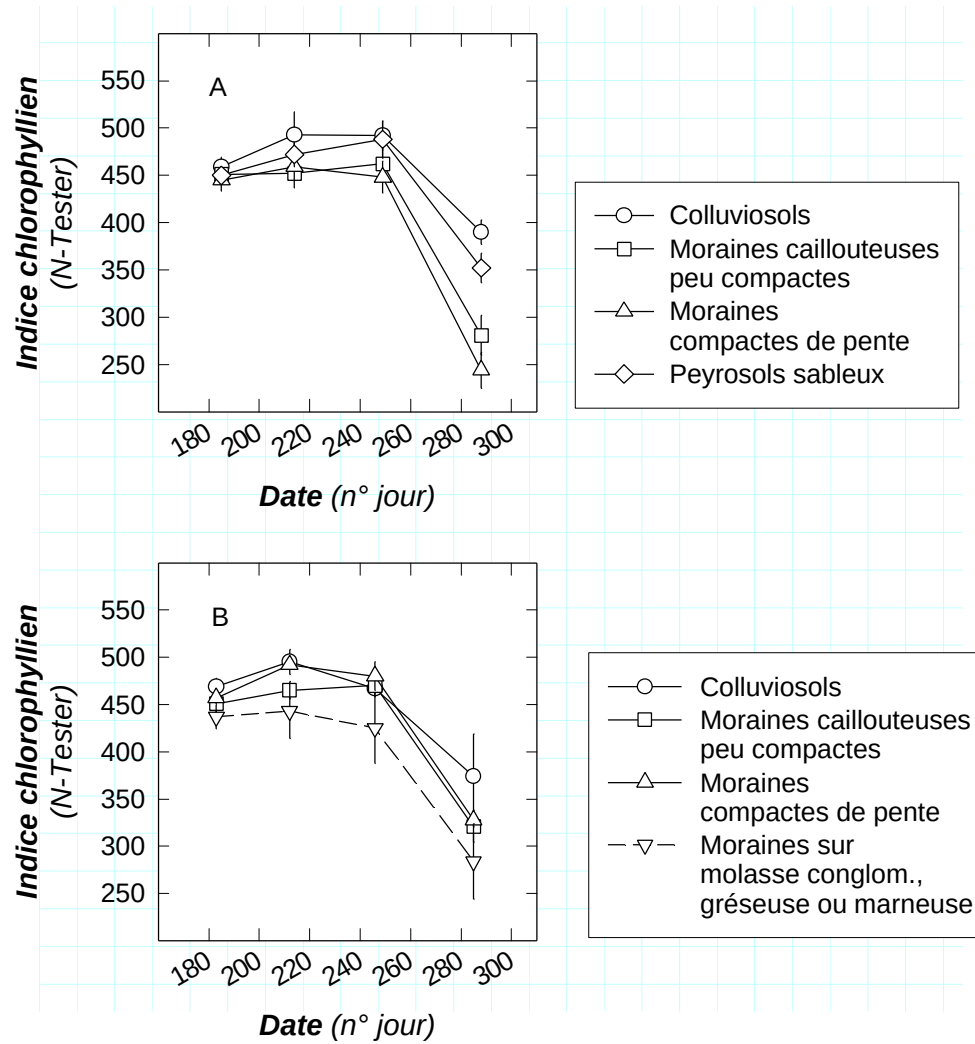
Zone pilote : Bonvillars

Types de sols	Analyses foliaires (% m.s.)				
	N	P	K	Ca	Mg
Colluviosol de bas de pente	1.91	0.21	1.29	3.65	0.28
Moraines moyen. compactes	1.99 ± 0.10	0.16 ± 0.02	1.50 ± 0.14	2.77 ± 0.38	0.23 ± 0.03
Moraines sur calcaire du Jura	1.99 ± 0.26	0.15 ± 0.02	1.66 ± 0.13	2.62 ± 0.24	0.25 ± 0.01

Zone pilote : Chablais

Types de sols	Analyses foliaires (% m.s.)				
	N	P	K	Ca	Mg
Moraines locales caillouteuses	2.04 ± 0.11	0.17 ± 0.02	2.03 ± 0.07	3.03 ± 0.24	0.26 ± 0.04
Sol sur Gypse	1.93	0.20	1.56	3.27	0.29
Sols issus De Flysch	2.09 ± 0.09	0.15 ± 0.01	1.71 ± 0.16	3.32 ± 0.20	0.31 ± 0.03

ANNEXE 6 : Analyses foliaires (N, P, K, Ca, Mg) réalisées sur les différents types de sols. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte, Bonvillars et Chablais (CH), 2003.



ANNEXE 7 : Evolution de l'indice chlorophyllien (N-Tester) en cours de saison dans les zones pilotes de l'étude en relation avec les types de sols. Moyennes $\pm$ erreur standard. Chasselas, A : La Côte, B : Lavaux (CH), 2001.

Zone pilote : La Côte

Types de sols	Indice chlorophyllien (N - Tester)			
	10 juin	31 juillet	19 août	3 octobre
Colluviosols de bas de pente	399 ± 47	454 ± 2	460 ± 6	356 ± 23
Moraines épaisses peu compactes	373 ± 60	446 ± 55	468 ± 36	290 ± 46
Moraines compactes - pente	296 ± 59	460 ± 9	452 ± 22	340 ± 17
Peyrosols, sols caillouteux	333 ± 25	490 ± 18	492 ± 14	371 ± 7

Zone pilote : Lavaux

Types de sols	Indice chlorophyllien (N - Tester)			
	20 juin	18 juillet	20 août	20 septembre
Colluviosols de bas de pente	376 ± 31	416 ± 5	452 ± 7	387 ± 9
Moraines épaisses peu compactes	386 ± 12	414 ± 10	427 ± 7	389 ± 13
Moraines compactes - pente	390 ± 37	448 ± 14	452 ± 19	389 ± 10
Moraines sur molasse gréseuse...	386 ± 22	378 ± 32	413 ± 56	342 ± 70

Zone pilote : Bonvillars

Types de sols	Indice chlorophyllien (N - Tester)			
	11 juin	22 juillet	20 août	26 septembre
Colluviosols de bas de pente	316 ± 4	426 ± 14	418 ± 12	392 ± 50
Moraines épaisses peu compactes	318 ± 13	460 ± 21	472 ± 13	427 ± 26
Moraines sur calcaire du Jura	326 ± 19	490 ± 7	502 ± 8	407 ± 45

Zone pilote : Chablais

Types de sols	Indice chlorophyllien (N - Tester)			
	18 juin	18 juillet	22 août	21 septembre
Moraines locales caillouteuses	438 ± 5	468 ± 6	466 ± 5	430 ± 13
Sols sur Gypse	326 ± 10	395 ± 9	416 ± 21	392 ± 7
Sols issus De Flysch	418 ± 4	456 ± 7	459 ± 9	440 ± 8

ANNEXE 8 : Valeurs d'indice chlorophyllien (N-Tester) en cours de saison dans les zones pilotes de l'étude en relation avec les types de sols. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, zones pilotes du Canton de Vaud (CH), 2002.

Types de sols	Parcelles	Densité de plantation (ceps/ha)	Nombre grappes/cep	Poids de la baie (g)	Poids de la grappe (g)	Rendement par souche (kg) *
Colluviosols de bas de pente	Begnins 06	5952	7.8	4.14	440	3.05
	Begnins 07	6250	6.6	3.99	502	2.80
	Bursins 01	8920	5.7	4.04	422	2.16
	Bursinel 02	6493	7.1	3.79	366	2.20
	Moyenne	6904 ± 782	6.8 ± 0.5	3.99 ± 0.10	432 ± 26	2.55 ± 0.18
Moraines épaisses peu compactes	Begnins 01	5050	6.6	3.41	395	2.48
	Vinzel 01	7812	7.4	3.43	293	2.00
	Vinzel 03	7812	5.8	3.97	324	1.60
	Vinzel 04	8920	6.6	3.38	300	1.78
	Moyenne	7398 ± 856	6.7 ± 0.4	3.56 ± 0.14	347 ± 24	1.97 ± 0.17
Moraines compactes de pente	Begnins 02	5050	6.9	3.48	308	2.08
	Begnins 03	6250	7.7	3.58	337	2.57
	Vinzel 02	7936	7.1	2.63	347	1.95
	Luins 01	7812	6.5	2.64	256	1.66
	Luins 03	5555	8.2	2.67	258	2.09
	Dully 01	5952	8.1	3.41	361	2.88
	Gland 01	5848	9.0	3.00	244	2.20
	Bursinel 01	5714	8.7	3.29	325	2.77
	Moyenne	6265 ± 508	7.5 ± 0.3	3.24 ± 0.15	305 ± 14	2.27 ± 0.16
Peyrosols, sols caillouteux	Luins 02	6250	9.0	3.40	360	2.90
	Dully 02	5681	6.7	3.85	460	2.47
	Bursins 02	6944	7.0	3.68	414	2.49
	Moyenne	6382 ± 294	7.5 ± 0.8	3.64 ± 0.13	411 ± 28	2.62 ± 0.12

ANNEXE 9 : Données concernant la densité de plantation, le nombre de grappes/cep, le poids moyen de la baie et de la grappe, et le rendement estimé quelques jours avant les vendanges sur les différentes parcelles, regroupées par types de sols. * Rendement par souche calculé moins le % de pourriture. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2001.

Types de sols	Parcelles	SFE/kg de raisin (m ²)	°Oe	Acidité totale (g/l)	Acide malique (g/l)	Acide tartrique (g/l)	Indice formol	% pourriture
Colluviosols de bas de pente	Begnins 06	0.72	63.4	7.8	5.0	5.6	16.6	10.3
	Begnins 07	0.85	70.2	7.7	4.7	5.4	18.7	16.8
	Bursins 01	0.82	69.0	7.1	4.5	5.6	15.5	-
	Bursinel 02	0.91	72.3	6.6	3.8	5.5	14.1	15.0
	Moyenne	0.83 ± 0.04	68.7 ± 0.4	7.4 ± 0.4	4.5 ± 0.4	5.5 ± 0.07	16.2 ± 1.3	14.0 ± 1.3
Moraines épaisses peu compactes	Begnins 01	1.05	74.1	7.9	4.8	5.7	13.5	4.8
	Vinzel 01	1.02	74.4	6.8	3.6	5.7	9.3	8.4
	Vinzel 03	1.30	74.8	7.0	4.0	5.7	13.5	25.0
	Vinzel 04	0.97	72.8	6.5	3.9	5.3	12.6	10.3
	Moyenne	1.08 ± 0.07	74.0 ± 0.4	7.1 ± 0.3	4.1 ± 0.3	5.6 ± 0.10	12.2 ± 0.8	10.8 ± 3.2
Moraines compactes de pente	Begnins 02	1.20	72.9	8.3	5.0	6.0	14.6	2.0
	Begnins 03	0.76	65.3	7.6	4.4	5.6	12.5	1.5
	Vinzel 02	1.05	74.8	6.9	3.9	5.7	12.8	-
	Luins 01	1.16	75.9	6.4	3.5	5.3	9.0	0.5
	Luins 03	1.18	78.3	7.2	4.3	5.7	15.8	1.0
	Dully 01	0.84	70.7	7.2	4.2	5.6	12.0	1.5
	Gland 01	0.92	70.0	7.2	4.1	5.7	9.0	1.0
	Bursinel 01	0.87	70.7	6.7	3.5	5.6	8.7	2.0
	Moyenne	1.00 ± 0.06	72.3 ± 1.4	7.2 ± 0.2	4.1 ± 0.2	5.7 ± 0.08	12.4 ± 1.4	1.3 ± 0.4
Peyrosols, sols caillouteux	Luins 02	0.77	68.2	6.9	4.3	5.5	16.9	10.0
	Dully 02	0.83	69.6	6.5	3.8	5.4	13.8	24.0
	Bursins 02	0.82	70.0	6.9	4.2	5.5	17.5	14.2
	Moyenne	0.81 ± 0.02	69.3 ± 0.6	6.8 ± 0.1	4.1 ± 0.2	5.5 ± 0.05	16.1 ± 1.1	16.0 ± 4.1

ANNEXE 10 : Résultats obtenus lors du dernier prélèvement de maturation effectué sur les différentes parcelles du réseau, regroupées par types de sols (SFE/Kg, °Oe, acidité totale, acide malique et tartrique, indice de formol et % de pourriture). Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2001.

Types de sols	Parcelles	Densité de plantation (ceps/ha)	Nombre de grappes/ cep	Poids final de la baie (g)	Poids de la grappe (g)	Rendement par souche (kg)	SFE (m ² /m ² de sol)	Rapport SFE / kg (m ²)
Colluviosols	Begnins 06	5952	6.1	3.55	343	2.08	1.41	1.15
	Begnins 07	6250	6.0	3.68	382	2.29	1.68	1.17
	Bursinel 02	6493	6.3	3.74	405	2.55	1.24	0.75
	Moyenne	6232 ± 156	6.1 ± 0.1	3.66 ± 0.06	377 ± 10	2.31 ± 0.14	1.44 ± 0.13	1.02 ± 0.14
Moraines caillouteuses peu compactes	Begnins 01	5000	6.0	3.46	244	1.45	1.56	2.15
	Vinzel 01	7813	4.9	3.59	407	1.97	1.74	1.13
	Vinzel 03	7812	5.9	3.81	375	2.21	2.09	1.13
	Moyenne	6875 ± 937	5.6 ± 0.4	3.62 ± 0.10	342 ± 50	1.88 ± 0.22	1.8 ± 0.16	1.47 ± 0.34
Moraines compactes de pente	Begnins 02	5050	6.8	3.00	322	2.18	1.12	1.02
	Begnins 03	6250	6.4	3.04	238	1.53	1.32	1.38
	Vinzel 02	7936	5.5	3.36	441	2.40	1.65	0.87
	Luins 01	7812	4.9	2.80	239	1.16	1.47	1.62
	Luins 03	5555	6.2	2.87	248	1.53	1.48	1.00
	Bursinel 01	5714	4.2	3.53	258	1.07	1.20	1.85
	Moyenne	6386 ± 496	5.6 ± 0.4	3.10 ± 0.12	291 ± 33	1.65 ± 0.22	1.37 ± 0.08	1.29 ± 0.16
Peyrosols sableux	Luins 02	6250	5.3	2.87	344	1.82	1.53	1.34
	Dully 02	5681	4.9	3.82	365	1.77	1.42	1.43
	Bursins 02	6944	7.6	3.83	314	2.39	1.42	0.86
	Moyenne	6292 ± 365	5.9 ± 0.8	3.50 ± 0.32	341 ± 15	1.99 ± 0.02	1.46 ± 0.04	1.21 ± 0.18

ANNEXE 11 : Données concernant la densité de plantation, le nombre de grappes/cep, le poids final de la baie et de la grappe, ainsi que le rendement estimé quelques jours avant la récolte et le rapport SFE/kg sur les différentes parcelles, regroupées par types de sols. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2002.

Types de sols	Parcelles	Densité de plantation (ceps/ha)	Nombre de grappes/ cep	Poids final de la baie (g)	Poids de la grappe (g)	Rendement par souche (kg)	SFE (m ² /m ² de sol)	Rapport SFE / kg (m ²)
Colluviosols	Begnins 06	5952	8.0	2.51	230	1.83	1.07	0.97
	Begnins 07	6250	7.6	3.10	260	1.97	1.29	1.05
	Bursinel 02	6493	8.0	3.08	344	2.65	1.48	0.87
	Moyenne	6232 ± 156	7.9 ± 0.1	2.90 ± 0.19	278 ± 34	2.15 ± 0.25	1.28 ± 0.12	0.96 ± 0.05
Moraines caillouteuses peu compactes	Begnins 01	5000	7.4	2.76	285	2.10	1.28	1.22
	Vinzel 01	7813	5.4	2.50	349	1.89	1.55	1.05
	Vinzel 03	7812	4.4	3.15	213	0.94	1.93	2.60
	Moyenne	6875 ± 937	5.7 ± 0.9	2.80 ± 0.18	282 ± 39	1.64 ± 0.35	1.58 ± 0.19	1.62 ± 0.49
Moraines compactes de pente	Begnins 02	5050	9.3	2.10	245	2.25	1.16	1.04
	Begnins 03	6250	8.5	2.82	350	2.90	1.25	0.70
	Vinzel 02	7936	5.6	2.45	340	1.90	1.20	0.80
	Luins 01	7812	5.5	2.60	250	1.38	1.29	1.20
	Luins 03	5555	6.3	2.50	205	1.29	1.20	1.66
	Bursinel 01	5714	8.3	2.00	195	1.62	1.00	1.07
	Moyenne	6386 ± 496	7.3 ± 0.7	2.41 ± 0.12	264 ± 27	1.89 ± 0.25	1.18 ± 0.04	1.08 ± 0.14
Peyrosols sableux	Luins 02	6250	5.7	2.07	187	1.06	1.15	1.74
	Dully 02	5681	-	-	-	-	-	-
	Bursins 02	6944	6.0	2.25	186	1.12	0.80	1.02
	Moyenne	6292 ± 365	5.9 ± 0.1	2.16 ± 0.09	186 ± 1	1.09 ± 0.03	0.98 ± 0.17	1.38 ± 0.36

ANNEXE 12 : Données concernant la densité de plantation, le nombre de grappes/cep, le poids final de la baie et de la grappe, ainsi que le rendement estimé quelques jours avant la récolte et le rapport SFE/kg sur les différentes parcelles, regroupées par types de sols. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, La Côte (CH), 2003.

Types de sols	Parcelles	Densité de plantation (ceps/ha)	Nombre grappes/cep	Poids de la baie (g)	Poids de la grappe (g)	Rendement par souche (kg) *
Colluviosols de bas de pente	Chardonne 03	7692	5.0	3.88	392	1.82
	Rivaz 07	8850	5.2	4.16	517	2.33
	Moyenne	8271 ± 579	5.1 ± 0.1	4.02 ± 0.14	455 ± 62	2.07 ± 0.25
Moraines épaisses peu compactes	Chardonne 06	6250	5.6	3.72	420	2.23
	Chardonne 07	8333	7.8	3.75	357	2.52
	Chardonne 10	6250	6.7	3.50	330	2.21
	Rivaz 02	8333	6.7	3.64	387	2.42
	Rivaz 06	6920	5.9	3.76	400	2.15
	Moyenne	7217 ± 471	6.5 ± 0.3	3.68 ± 0.05	380 ± 16	2.29 ± 0.06
	<i>St-Saph. 01*</i>	<i>11900</i>	<i>5.0</i>	<i>3.57</i>	<i>275</i>	<i>1.12</i>
Moraines compactes de pente	Chardonne 04	7352	5.4	3.56	327	1.35
	Chardonne 08	7812	6.4	3.80	254	1.38
	Rivaz 01	7142	5.7	3.36	425	1.94
	Chexbres 01	8928	7.0	3.36	358	2.05
	Chexbres 02	8928	7.0	3.26	374	2.28
	Corsier 01	6944	7.2	3.19	393	2.60
	Moyenne	7851 ± 436	6.4 ± 0.3	3.42 ± 0.09	355 ± 24	1.93 ± 0.21
Moraines sur molasse conglom., gréseuse ou marneuse	St-Saphorin03	6666	8.0	3.33	386	2.21
	Rivaz 04	9260	7.0	3.11	288	1.95
	Rivaz 05	9524	5.6	3.60	386	1.78
	Corsier 02	7812	9.5	3.01	255	2.40
	Moyenne	8315 ± 533	7.5 ± 0.8	3.25 ± 0.13	328 ± 27	2.09 ± 0.14

ANNEXE 13 : Données concernant la densité de plantation, le nombre de grappes/cep, le poids moyen de la baie et de la grappe, et le rendement estimé quelques jours avant les vendanges sur les différentes parcelles, regroupées par types de sols. * Rendement par souche calculé moins le % de pourriture. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Lavaux (CH), 2001.

Types de sols	Parcelles	SFE/kg de raisin (m ²)	°Oe	Acidité totale (g/l)	Acide malique (g/l)	Acide tartrique (g/l)	Indice formol	% pourriture
Colluviosols de bas de pente	Chardonne 03	1.04	75.7	7.5	4.6	6.0	18.6	7.3
	Rivaz 07	0.91	72.0	6.8	4.3	5.4	14.9	12.9
	Moyenne	0.98 ± 0.07	73.8 ± 1.8	7.2 ± 0.3	4.5 ± 0.2	5.7 ± 0.3	16.8 ± 1.8	10.0 ± 3.0
Moraines épaisses peu compactes	Chardonne 06	0.94	72.0	6.8	4.0	5.5	17.7	5.2
	Chardonne 07	0.85	72.0	6.9	4.0	5.5	13.8	6.8
	Chardonne 10	1.00	75.3	6.5	3.5	5.5	10.8	0.5
	Rivaz 02	0.85	72.5	6.8	4.2	5.4	17.9	3.7
	Rivaz 06	0.90	72.2	7.6	4.7	5.6	15.8	8.5
	Moyenne	0.91 ± 0.03	72.8 ± 0.6	6.9 ± 0.2	4.1 ± 0.2	5.5 ± 0.1	15.2 ± 1.3	4.9 ± 1.4
	<i>St-Saph. 01*</i>	<i>1.10</i>	<i>73.9</i>	<i>6.1</i>	<i>3.0</i>	<i>5.6</i>	<i>5.6</i>	<i>10.2</i>
Moraines compactes de pente	Chardonne 04	1.05	71.8	8.5	4.0	5.8	17.8	>25.0
	Chardonne 08	1.35	79.8	6.8	3.8	5.8	16.2	15.5
	Rivaz 01	1.23	74.5	6.1	3.8	5.4	18.1	20.2
	Chexbres 01	1.01	72.8	6.2	3.7	5.1	21.0	9.7
	Chexbres 02	0.80	67.5	6.9	4.3	5.5	17.8	3.0
	Corsier 01	1.04	76.5	6.6	3.4	5.7	8.9	7.8
	Moyenne	1.08 ± 0.07	73.8 ± 1.4	6.9 ± 0.3	3.8 ± 0.1	5.6 ± 0.1	16.6 ± 1.7	13.5 ± 3.3
Moraines sur molasse conglom., gréseuse ou marneuse	St-Saphorin03	0.85	65.6	6.9	4.0	5.6	16.6	25.0
	Rivaz 04	1.05	74.5	6.0	3.8	5.3	16.7	1.0
	Rivaz 05	1.07	74.7	6.4	4.0	5.4	17.3	15.5
	Corsier 02	0.90	70.3	6.2	3.1	5.5	4.7	0.0
	Moyenne	0.97 ± 0.05	71.3 ± 2.1	6.4 ± 0.2	3.7 ± 0.2	5.4 ± 0.1	13.8 ± 3.0	10.4 ± 6.0

ANNEXE 14 : Résultats obtenus lors du dernier prélèvement de maturation effectué sur les différentes parcelles du réseau, regroupées par types de sols (SFE/Kg, °Oe, acidité totale, acide malique et tartrique, indice de formol et % de pourriture). Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Lavaux (CH), 2001.

Types de sols	Parcelles	Densité de plantation (ceps/ha)	Nombre grappes/cep	Poids de la baie (g)	Poids de la grappe (g)	Rendement par souche (kg)
Colluviosols de bas de pente	Chardonne 03	7692	5.0	3.79	367	1.81
	Rivaz 07	8850	5.2	3.97	433	2.25
	Moyenne	8271 ± 579	5.1 ± 0.1	3.88 ± 0.10	400 ± 35	2.03 ± 0.22
Moraines caillouteuses épaisses peu compactes	Chardonne 06	6250	5.8	3.56	332	1.93
	Chardonne 07	8333	5.4	3.90	358	1.91
	Chardonne 10	6250	5.4	3.60	439	2.37
	Rivaz 02	8333	5.4	3.24	337	1.82
	Moyenne	7291 ± 471	5.5 ± 0.1	3.58 ± 0.13	366 ± 25	2.01 ± 0.12
Moraines compactes de pente	Chardonne 04	7352	4.2	3.20	417	1.94
	Chardonne 08	7812	5.3	3.65	366	1.92
	Rivaz 01	7142	6.0	3.30	380	2.28
	Chexbres 01	8928	6.0	3.19	362	2.16
	Corsier 01	6944	6.4	3.42	402	2.60
	Moyenne	7636 ± 436	5.6 ± 0.4	3.35 ± 0.09	383 ± 17	2.18 ± 0.12
Moraines sur molasse conglom., gréseuse ou marneuse	St-Saphorin03	6666	7.0	3.50	401	2.80
	Rivaz 04	9260	7.0	3.08	309	2.15
	Rivaz 05	9524	4.4	3.67	291	1.26
	Corsier 02	7812	5.9	3.04	229	1.35
	Moyenne	8315 ± 533	6.1 ± 0.6	3.32 ± 0.15	308 ± 35	1.90 ± 0.36

ANNEXE 15 : Données concernant la densité de plantation, le nombre de grappes/cep, le poids final de la baie et de la grappe, ainsi que le rendement estimé quelques jours avant la récolte sur les différentes parcelles, regroupées par types de sols. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Lavaux (CH), 2002.

Type de sol	Parcelles	Densité de plantation (ceps/ha)	Nombre de grappes/ cep	Poids final de la baie (g)	Poids de la grappe (g)	Rendement par souche (kg)	SFE (m ² /m ² de sol)	Rapport SFE / kg (m ²)
<i>Colluviosol</i>	Bonvillars 03	6250	5.6	3.50	348	1.95	1.21	0.99
	Moyenne	6250	5.6	3.50	348	1.95	1.21	0.99
Moraines épaisses caillouteuses	Concise 02	5952	5.4	3.73	435	2.35	1.74	1.24
	Onnens 01	7936	4.8	3.33	378	1.80	1.45	1.01
	Corcelles 02	5555	6.2	3.54	363	2.23	1.03	0.83
	Bonvillars 02	6250	7.0	3.53	375	2.63	1.43	0.87
	Moyenne	6423 ± 524	5.8 ± 0.5	3.53 ± 0.08	388 ± 16	2.25 ± 0.17	1.41 ± 0.14	0.99 ± 0.09
Moraines sur calcaire du Jura	Bonvillars 01	6802	5.4	3.43	479	2.23	1.28	0.84
	Champagne 02	6250	6.1	3.21	383	2.20	1.33	0.97
	Moyenne	6526 ± 276	5.7 ± 0.3	3.32 ± 0.11	431 ± 48	2.21 ± 0.02	1.31 ± 0.02	0.91 ± 0.05

ANNEXE 16 : Données concernant la densité de plantation, le nombre de grappes/cep, le poids final de la baie et de la grappe, ainsi que le rendement estimé quelques jours avant la récolte et le rapport SFE/kg sur les différentes parcelles, regroupées par types de sols. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Bonvillars (CH), 2002.

Types de sols	Parcelles	Densité de plantation (ceps/ha)	Nombre grappes/cep	Poids de la baie (g)	Poids de la grappe (g)	Rendement par souche (kg)
Moraines locales caillouteuses	Ollon 01	8333	6.3	3.80	370	2.17
	Ollon 03	8403	4.9	3.73	365	1.78
	Ollon 06	10500	5.4	3.56	294	1.57
	Ollon 08	6250	5.5	3.54	385	2.12
	Moyenne	8372 ± 867	5.5 ± 0.3	3.66 ± 0.06	354 ± 20	1.91 ± 0.14
Sols sur gypse	Ollon 04	11100	6.9	2.98	235	1.62
	Bex 06	10000	4.7	3.29	203	0.94
	Moyenne	10550 ± 250	5.8 ± 1.1	3.14 ± 0.16	219 ± 16	1.28 ± 0.34
Sols issus de flysch	Bex 01	12980	5.6	3.34	259	1.45
	Bex 02	11905	5.0	3.20	325	1.62
	Bex 03	7936	5.4	3.26	306	1.65
	Moyenne	10940 ± 1533	5.3 ± 0.2	3.27 ± 0.04	297 ± 20	1.57 ± 0.06

ANNEXE 18 : Données concernant la densité de plantation, le nombre de grappes/cep, le poids final de la baie et de la grappe, ainsi que le rendement estimé quelques jours avant la récolte sur les différentes parcelles, regroupées par types de sols. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Chablais (CH), 2002

Type de sol	Parcelles	Densité de plantation (ceps/ha)	Nombre de grappes/ cep	Poids final de la baie (g)	Poids de la grappe (g)	Rendement par souche (kg)	SFE (m ² /m ² de sol)	Rapport SFE / kg (m ²)
Colluviosol	Bonvillars 03	6250	4.2	3.17	-	< 0.3 (grêle)	0.93	élevé
	Moyenne	6250	4.2	3.17	-	< 0.3 (grêle)	0.93	élevé
Moraines épaisses caillouteuses	Concise 02	5952	6.1	3.10	375	2.28	1.45	1.07
	Onnens 01	7936	5.2	2.80	270	1.40	0.78	0.70
	Corcelles 02	5555	6.1	2.77	295	1.80	1.05	1.05
	Bonvillars 02	6250	5.2	3.00	345	1.79	1.23	1.10
	Moyenne	6423 ± 524	5.7 ± 0.3	2.92 ± 0.08	321 ± 24	1.82 ± 0.18	1.12 ± 0.15	0.98 ± 0.09
Moraines sur calcaire du Jura	Bonvillars 01	6802	7.5	2.30	364	2.50	1.15	0.70
	Champagne 02	6250	5.2	1.99	215	1.12	0.87	1.24
	Moyenne	6526 ± 276	6.3 ± 1.1	2.15 ± 0.15	290 ± 75	1.81 ± 0.70	1.01 ± 0.09	0.97 ± 0.27

ANNEXE 17 : Données concernant la densité de plantation, le nombre de grappes/cep, le poids final de la baie et de la grappe, ainsi que le rendement estimé quelques jours avant la récolte et le rapport SFE/kg sur les différentes parcelles, regroupées par types de sols. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Bonvillars (CH), 2003.

Types de sols	Parcelles	Densité de plantation (ceps/ha)	Nombre grappes/cep	Poids de la baie (g)	Poids de la grappe (g)	Rendement par souche (kg)
Moraines locales caillouteuses	Ollon 01	8333	7.1	3.20	233	1.65
	Ollon 03	8403	6.1	3.11	292	1.78
	Ollon 06	10500	6.3	3.10	284	1.79
	Ollon 08	6250	7.1	2.96	269	1.91
	Moyenne	8372 ± 867	6.6 ± 0.3	3.10 ± 0.05	270 ± 13	1.78 ± 0.05
Sols sur gypse	Ollon 04	11100	6.6	1.95	135	0.89
	Bex 06	10000	grêle	-	-	-
	Moyenne	10550 ± 250	6.6	1.95	135	0.89
Sols issus de flysch	Bex 01	12980	5.8	2.90	229	1.32
	Bex 02	11905	6.0	2.61	220	1.32
	Bex 03	7936	7.6	2.52	203	1.52
	Moyenne	10940 ± 1533	6.5 ± 0.6	2.68 ± 0.11	217 ± 8	1.39 ± 0.07

ANNEXE 19 : Données concernant la densité de plantation, le nombre de grappes/cep, le poids final de la baie et de la grappe, ainsi que le rendement estimé quelques jours avant la récolte sur les différentes parcelles, regroupées par types de sols. Moyennes ± erreur standard. Chasselas, Chablais (CH), 2003.