

ÉTUDE COMPARATIVE DE LA PRÉCISION ET DE LA RAPIDITÉ DE MISE EN ŒUVRE DE DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ESTIMATION DE LA SURFACE FOLIAIRE DE LA VIGNE

SURVEY OF THE ACCURACY AND RAPIDITY OF SEVERAL METHODS FOR VINE LEAF AREA ASSESSMENT

O. TREGOAT¹ et ², N. OLLAT³, G. GRENIER¹ et C. VAN LEEUWEN¹ et ²

¹ ENITA de Bordeaux, 1 cours du Général de Gaulle, BP 201,
33175 Gradignan cedex, France

² Faculté d'Œnologie de Bordeaux, 351 cours de la Libération, 33405 Talence cedex, France

³ INRA UREFV, Domaine de la Grande Ferrade, Pont de la Maye,
33140 Villenave d'Ornon cedex, France

Résumé : La surface foliaire de la vigne est un paramètre viticole important, mais difficile d'accès. Pour son estimation, plusieurs techniques sont décrites dans la littérature. Celles-ci permettent de corréler des mesures effectuées sur la vigne à sa surface foliaire : poids frais ou poids sec des feuilles, somme des longueurs des nervures latérales supérieures ou somme des longueurs des rameaux. Dans ce travail, la précision et la rapidité de mise œuvre de ces techniques ont été comparées. Deux méthodes indirectes d'estimation de la surface foliaire ont également été testées : le pourcentage d'extinction de la lumière mesuré à l'aide d'un L.A.I. 2000 et le traitement d'images pris avec un appareil photo numérique.

Abstract: Vine leaf area is an important viticultural parameter. Because its assessment is difficult, leaf area is not frequently taken into account. In this survey, several techniques of vine leaf area estimation are compared for their accuracy and rapidity. Leaf area is highly correlated with leaf blade fresh or dry weight. This method is destructive, because all the leaves have to be removed, and thus it can only be applied after harvest. Leaf area can also be estimated by the measurement of the length of two upper lateral veins. This method is precise, but very time consuming. Sample size reduction to one leaf out of four measured does not affect the quality of the estimation, though sample reduction to one leaf out of ten does. For accurate assessment, samples must be taken from multiple shoots. The third method utilizes the correlation between leaf area and shoot length. This technique combines precision and rapidity, though a standard curve should be established for each cultivar and stage of vine development. The percentage of light extinction through the vegetation can be measured by means of an L.A.I. 2000 device. Values are closely correlated to leaf area index and vine leaf area can be deduced when vine density is known. This method is very rapid (only one to two minutes per vine) but it does not distinguish between the primary and secondary leaf area. Moreover, the L.A.I. 2000 device is very expensive. Digital photographs were taken of the vines studied. Assessment of the percentage of leaf surface area, after binarisation of the image, does not lead to an accurate estimation of vine leaf area. The choice of a technique for vine leaf area estimation among the ones tested, will depend on: a) required precision, b) time availability, c) the need to dispose separately of primary and secondary leaf area, d) the possibility to invest in equipment and e) the possibility to remove leaves.

Mots clés : vigne, surface foliaire, indice foliaire, L.A.I., échantillonnage, *Vitis vinifera*, Cabernet franc

Key words : vine, leaf area, leaf area index, L.A.I., sampling, *Vitis vinifera*, Cabernet franc

INTRODUCTION

La connaissance de la surface foliaire de la vigne présente un intérêt majeur. Il a été montré que le potentiel œnologique du raisin est étroitement lié au rapport entre la surface foliaire et la quantité de fruit (CHAMPAGNOL, 1984 ; MURISIER, 1996). Par ailleurs, la mesure de la surface foliaire constitue un bon moyen pour évaluer la vigueur de la vigne. La dis-

tinction entre la surface foliaire primaire (portée par les rameaux primaires, issus des bourgeons dormants) et la surface foliaire secondaire (portée par les rameaux secondaires ou entre-cœurs, issus de prompts bourgeons) permet une estimation précise de la vigueur. En effet, les souches vigoureuses sont caractérisées par un grand développement de rameaux secondaires et donc un rapport surface foliaire secondaire / surface foliaire totale élevé. Une importante surface foliaire secondaire

peut entraîner un entassement de la végétation préjudiciable au micro climat des grappes (moins éclairé et plus humide, SMART et ROBINSON, 1991). La mesure de la surface foliaire de la vigne, en distinguant la surface foliaire primaire de la surface foliaire secondaire, est un paramètre important pour évaluer les potentialités viticoles de systèmes de conduite ou de terroirs. Elle pourrait également être utilisée par le viticulteur dans la conduite raisonnée du vignoble, notamment dans le cadre d'une gestion parcellaire.

Malgré son intérêt évident, la surface foliaire de la vigne est un paramètre peu utilisé, tant en recherche qu'en pratique viticole, car il s'agit d'une grandeur difficilement accessible. Si de nombreuses méthodes d'estimation de la surface foliaire ont été développées, la plupart d'entre-elles sont cependant longues à mettre en œuvre. Les méthodes directes sont basées sur des corrélations entre la surface d'une feuille et la somme des longueurs des nervures latérales supérieures (CARBONNEAU, 1976a), entre la longueur d'un rameau et la surface foliaire portée par le rameau (MABROUK et CARBONNEAU, 1996) ou entre la surface foliaire et le poids des feuilles. D'autres méthodes, indirectes, sont basées sur l'extinction de la lumière par la végétation (OLLAT *et al.*, 1998) ou par la transmission de la lumière à travers la végétation. Nous proposons de comparer ces méthodes selon des critères de précision et de rapidité de mise en œuvre.

La surface exacte d'une feuille de vigne peut être déterminée au laboratoire à l'aide d'un planimètre. Cette méthode requiert d'importantes manipulations et il n'est donc pas envisageable de mesurer avec la planimétrie la surface foliaire exacte de toutes les feuilles de plusieurs ceps. On peut en revanche mesurer avec cette technique la surface foliaire exacte d'un échantillonnage de plusieurs rameaux. Pour cette raison, dans un premier temps, les méthodes directes d'estimation de la surface foliaire qui peuvent s'appliquer à l'échelle d'un rameau ont été comparées à la planimétrie. La méthode donnant la meilleure corrélation a par la suite été retenue comme méthode de référence.

Dans un deuxième temps, différentes méthodes d'estimation de la surface foliaire, directes et indirectes, ont été appliquées à l'échelle du cep de vigne. Elles ont été comparées à la méthode de référence déterminée au cours de l'expérience précédente. L'intérêt des différentes méthodes testées est discuté sur la base de la précision de l'estimation de la surface foliaire et de la rapidité de leur mise en œuvre. Par ailleurs, la capacité d'une méthode à distinguer la surface foliaire primaire et la surface foliaire secondaire, ainsi que l'absence de prélèvement de feuilles (méthode non destructive) sont considérées comme des critères intéressants pour une technique d'estimation de la surface foliaire.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

I - MATÉRIEL VÉGÉTAL

L'étude a été réalisée sur du matériel végétal d'une parcelle de *Vitis vinifera* var. Cabernet franc plantée en 1963 à une densité de 6 000 ceps / ha (1,4 m de distance entre les rangs, 1,2 m de distance entre les ceps sur le rang) dans la région de Saint-Émilion (France). Les souches ont été taillées en Guyot simple et palissées en monoplan vertical ; la hauteur du tronc est de 0,4 m et la hauteur de végétation est de 1,1 m. Les mesures ont été réalisées au mois de juillet 1998 sur des rameaux et des ceps de vigueur variable.

II - MÉTHODES D'ESTIMATION DE LA SURFACE FOLIAIRE UTILISÉES À L'ÉCHELLE D'UN RAMEAU

Cinq types de mesures directes de la surface foliaire ont été appliqués à dix rameaux primaires et à dix rameaux secondaires :

- Mesure exacte de la surface de toutes les feuilles par planimétrie. Dans notre cas les mesures ont été réalisées à l'aide d'une caméra à digitaliser reliée à un ordinateur. Cette mesure nécessite un étalonnage préalable avec une surface de référence.

- Mesure de la somme des longueurs des nervures latérales supérieures de chaque feuille (les feuilles ayant leurs nervures d'une longueur inférieure à 2 cm ne sont pas prises en compte).

- Mesure de la longueur de chaque rameau primaire et de chaque rameau secondaire.

- Mesure du poids frais des limbes des feuilles.

- Mesure du poids sec des limbes des feuilles. Le séchage a été réalisé par le passage des feuilles pendant deux jours dans une étuve à 105°C.

Dans cette première partie de l'étude, la planimétrie sert de méthode de référence à laquelle sont comparées les autres méthodes. Plusieurs corrélations sont ensuite établies séparément pour les rameaux primaires et pour les rameaux secondaires :

- Corrélation entre la surface d'une feuille mesurée par planimétrie et la somme des longueurs des nervures latérales supérieures. Elle constitue la base d'une méthode d'estimation de la surface foliaire développée par CARBONNEAU (1976a).

- Corrélation entre la surface foliaire totale d'un rameau mesurée par planimétrie et sa longueur.

- Corrélation entre la surface foliaire totale d'un rameau mesurée par planimétrie et le poids frais de tous les limbes des feuilles du rameau.

- Corrélation entre la surface foliaire totale d'un rameau mesurée par planimétrie et le poids sec de tous les limbes des feuilles du rameau.

La méthode ayant donné le plus de précision (c'est-à-dire présentant la meilleure corrélation avec la planimétrie) a été utilisée comme méthode de référence dans la deuxième partie de l'étude.

III - MÉTHODES D'ESTIMATION DE LA SURFACE FOLIAIRE UTILISÉES À L'ÉCHELLE D'UN CEP

Plusieurs méthodes directes et indirectes d'estimation de la surface foliaire de la vigne ont été comparées sur un échantillonnage de douze ceps. Trois séries de quatre ceps ont été choisies dans l'objectif de constituer une gamme de vigueur : une série de vigueur faible, une série de vigueur moyenne et une série de vigueur forte. Sur chaque cep, les mesures suivantes ont été réalisées :

- La somme des longueurs des nervures latérales supérieures de toutes les feuilles.

- La longueur de chaque rameau primaire et de chaque rameau secondaire.

- Le poids frais de l'ensemble des limbes des feuilles primaires et de l'ensemble des limbes des feuilles secondaires du cep.

- Le poids sec de l'ensemble des limbes des feuilles primaires et de l'ensemble des limbes des feuilles secondaires du cep.

- L'extinction de la lumière par la végétation, mesurée près du sol au milieu de l'inter rang à l'aide d'un L.A.I. 2000 (Li-Cor, Lincoln, Nebraska, États-Unis.).

- Le pourcentage de la surface occupé par des feuilles dans le gabarit (hauteur x largeur) de la végétation du cep (mesuré par photographie numérique et traitement d'image).

Ces deux dernières méthodes constituent des mesures indirectes qui ne peuvent s'appliquer qu'à l'échelle d'un cep ou de plusieurs ceps. La précision de chacune des méthodes d'estimation de la surface foliaire d'un cep - directes et indirectes - a été évaluée par comparaison avec la méthode de référence déterminée à partir de l'expérimentation réalisée à l'échelle du rameau. Les corrélations suivantes ont été calculées :

- Corrélation entre la méthode de référence et la surface foliaire estimée à partir de la somme des longueurs des nervures latérales supérieures.

- Corrélation entre la méthode de référence et la somme des longueurs des rameaux.

- Corrélation entre la méthode de référence et le poids frais des limbes de toutes les feuilles du cep.

- Corrélation entre la méthode de référence et le poids sec des limbes de toutes les feuilles du cep.

- Corrélation entre la méthode de référence et l'indice foliaire (L.A.I.) déterminé avec le L.A.I. 2000.

- Corrélation entre la méthode de référence et le pourcentage de la surface occupée par des feuilles dans le gabarit de la végétation. Ce dernier est déterminé par photographie numérique et traitement d'image.

Les corrélations sont établies séparément pour la surface foliaire primaire et la surface foliaire secondaire, exceptées pour les méthodes indirectes qui ne permettent pas cette distinction.

La mesure de la somme des longueurs des nervures latérales supérieures de toutes les feuilles d'un cep est particulièrement longue et fastidieuse. CARBONNEAU (1976b) a montré qu'il est possible de réduire le nombre de feuilles mesurées en échantillonnant les feuilles de rang 1, 4, 8, 11, 15, 18, 23, 28, 33, 38, 43, c'est-à-dire environ une feuille sur quatre, sans perte de précision notable sur l'estimation de la surface foliaire. Dans ce travail, la perte de précision d'une diminution plus importante de la taille de l'échantillon des feuilles mesurées a été évaluée : a) en mesurant une feuille sur dix et b) en mesurant toutes les feuilles d'un rameau de vigueur moyenne, puis en multipliant la surface foliaire du rameau par le nombre de rameaux porté par le cep. Pour effectuer ces différents niveaux d'échantillonnage, tous les rameaux secondaires portés par un rameau primaire sont considérés comme un ensemble continu : si la dernière feuille d'un rameau secondaire est notée de rang n , la première feuille du rameau secondaire suivant est notée de rang $n + 1$.

IV - DÉTERMINATION DE L'INDICE FOLIAIRE (L.A.I. POUR LEAF AREA INDEX) À PARTIR DE LA MESURE DE L'EXTINCTION DE LA LUMIÈRE PAR LA VÉGÉTATION

À l'intérieur d'un peuplement végétal, la luminosité près du sol ne représente qu'une fraction de la luminosité incidente. Le pourcentage de l'extinction de la lumière est fonction de la densité de la végétation et il est donc corrélé à la surface foliaire par m^2 au sol

(indice foliaire). Le L.A.I. 2000 estime l'indice foliaire à partir de ce principe. Il était initialement conçu pour des mesures sur cultures couvrantes, mais il donne également de bons résultats sur des cultures en rangs, à condition de respecter un protocole de mesures précis (OLLAT *et al.*, 1998). Le L.A.I. 2000 est composé d'une tête de mesure comprenant un capteur de rayonnement composé de cinq anneaux sensoriels relié à un micro ordinateur portable assurant le calcul de l'indice foliaire et le stockage des données. Les mesures sont réalisées face au rang de vigne. Pour limiter « la vision » de l'appareil au couvert végétal, un masque limitant l'angle de vue à 45° est posé sur la tête de mesure. Pour limiter des erreurs induites par le rayonnement réfléchi, les mesures doivent être réalisées en l'absence de rayonnement direct. Dans ce travail, toutes les mesures ont été réalisées par temps clair au cours des vingt minutes suivant le coucher du soleil, sur la face exposée à l'Ouest du rang de vigne (soleil couchant dans le dos de l'opérateur). Après une mesure du rayonnement incident au-dessus de la végétation, dix mesures de rayonnement, espacées chacune de 10 cm, sont effectuées au milieu de l'inter rang au niveau du sol et distribuées de part et d'autre du cep.

V - DÉTERMINATION DU POURCENTAGE DE SURFACE OCCUPÉ PAR DES FEUILLES DANS LE GABARIT DE LA VÉGÉTATION OCCUPÉ PAR UN CEP.

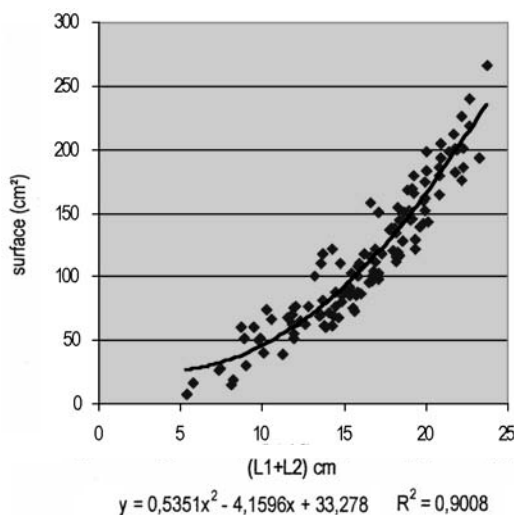


Fig. 1a - Corrélation entre la surface d'une feuille primaire de Cabernet franc, mesurée par planimétrie, et la somme des longueurs des deux nervures latérales supérieures.

Fig. 1a - Correlation between the area of primary leaves, measured by a leaf area meter and the sum of the two upper lateral veins (*Vitis vinifera* var. Cabernet franc).

Chacun des douze ceps a été photographié en noir et blanc à l'aide d'un appareil photo numérique (CANON ION RC560). Un cadre rectangulaire couvert d'un drap blanc de la taille du gabarit occupé par la végétation (largeur : 1,2 m ; hauteur : 1,1 m) a été disposé derrière le cep. L'image ainsi obtenue a été découpée suivant les limites du cadre à l'aide du logiciel PAINT SHOP PRO (Jasc Inc). Les 256 niveaux de gris ont ensuite été binarisés avec le logiciel OPTIMAS (Bioscan Inc). La difficulté de cette opération réside dans le choix du seuil de la binarisation, qui nécessite un compromis entre « prendre toutes les jeunes feuilles et prendre certains plis ou zones d'ombre du drap » et « ne pas prendre de drap et perdre une fraction des jeunes feuilles ». Le pourcentage de surface occupé par des feuilles est déduit du rapport entre le nombre de pixels noirs et le nombre total des pixels de l'image.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

I - ESTIMATION DE LA SURFACE FOLIAIRE À L'ÉCHELLE DU RAMEAU

1) Estimation de la surface foliaire à partir de la somme des longueurs des deux nervures latérales supérieures

L'équation reliant la surface d'une feuille primaire (mesurée par planimétrie) à la somme de ses deux nervures latérales supérieures a été déterminée au laboratoire sur un échantillon de 150 feuilles, couvrant toute

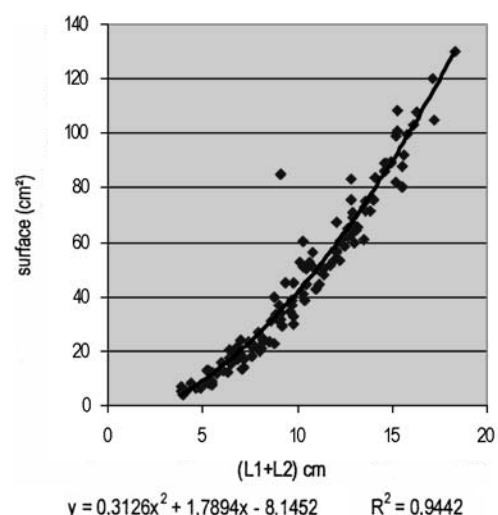


Fig. 1b - Corrélation entre la surface d'une feuille secondaire de Cabernet franc, mesurée par planimétrie, et la somme des longueurs des deux nervures latérales supérieures.

Fig. 1b - Correlation between the area of secondary leaves, measured by a leaf area meter and the sum of the two upper lateral veins (*Vitis vinifera* var. Cabernet franc).

la gamme des tailles rencontrées dans la parcelle (figure 1a). La même opération a été réalisée sur les feuilles portées par des rameaux secondaires (figure 1b).

La corrélation entre les surfaces foliaires obtenues par la mesure de la somme des nervures latérales supérieures des feuilles et la planimétrie est très bonne pour les rameaux primaires ($R^2 = 0,90$, figure 1a) ; elle est même excellente pour les rameaux secondaires ($R^2 = 0,94$, figure 1b).

2) Estimation de la surface foliaire à partir de la longueur du rameau

Une corrélation a été établie entre la surface foliaire d'un rameau, mesurée par planimétrie, et la longueur du rameau. Cette corrélation est satisfaisante pour les rameaux primaires ($R^2 = 0,78$, figure 2a) ; elle est très

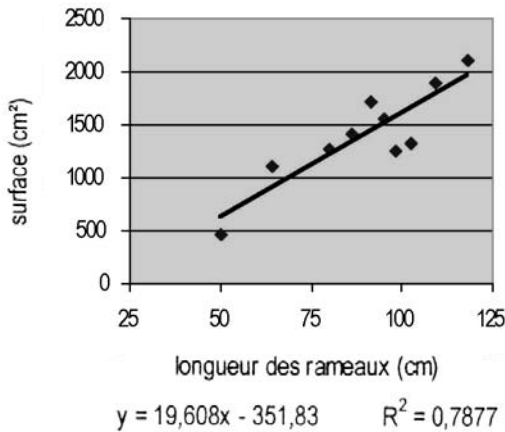


Fig. 2a - Corrélation entre la surface foliaire primaire d'un rameau de Cabernet franc, mesurée par planimétrie, et sa longueur

Fig. 2a - Correlation between the primary leaf area of a shoot, measured by a leaf area meter, and its length (*Vitis vinifera* var. Cabernet franc)

bonne pour la surface foliaire secondaire ($R^2 = 0,91$, figure 2b). Cette méthode donne de meilleurs résultats sur des rameaux secondaires. Les rameaux primaires sont écimés à leur extrémité, ce qui réduit la variabilité de leur longueur. De plus, il arrive fréquemment qu'une ou plusieurs feuilles primaires aient disparu (passage des engins agricoles, sécheresse), ce qui diminue la surface foliaire du rameau mais non sa longueur. En revanche, les rameaux secondaires présentent une gamme de longueurs plus étendue et la disparition de feuilles est plus rare, ce qui explique la meilleure corrélation pour la surface foliaire secondaire.

3) Estimation de la surface foliaire par la mesure du poids frais des limbes

La surface d'un rameau, mesurée par planimétrie, est très bien corrélée au poids frais de toutes les feuilles portées par le rameau ($R^2 = 0,98$ figure 3a pour les

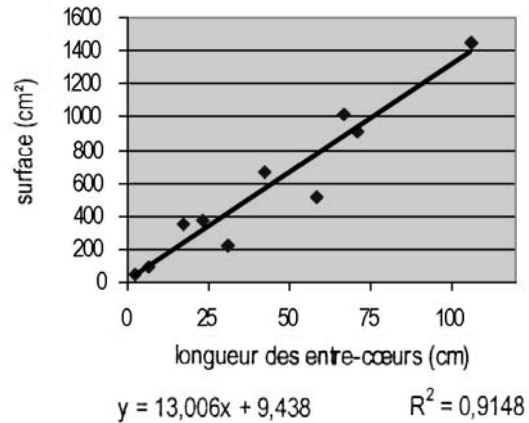


Fig. 2b - Corrélation entre la surface foliaire secondaire d'un rameau de Cabernet franc, mesurée par planimétrie, et sa longueur

Fig. 2b - Correlation between the secondary leaf area of a shoot, measured by a leaf area meter, and its length (*Vitis vinifera* var. Cabernet franc).

TABLEAU I

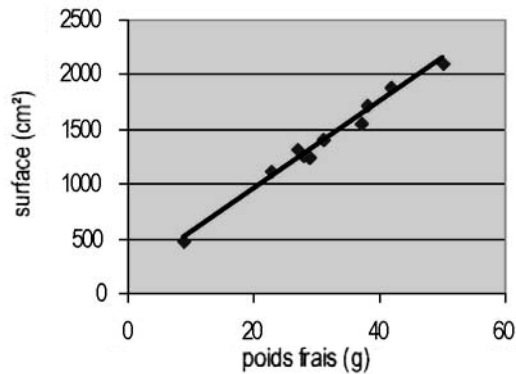
Comparaison de différentes méthodes d'estimation de la surface foliaire primaire et secondaire de la vigne à l'échelle d'un rameau. Corrélations avec la mesure de la surface foliaire par planimétrie.

Table II - Comparison of several methods for primary and secondary shoot leaf area assessment. Correlations with leaf area measured by a leaf area meter.

Méthode utilisée/planimétrie	Coefficient de détermination / Surface foliaire I	Coefficient de détermination / Surface foliaire II
Somme des longueurs des nervures de toutes les feuilles	0,90	0,94
Longueurs des rameaux (et entre cœurs)	0,78	0,91
Poids frais	0,98	0,99
Poids sec	0,90	0,99

rameaux primaires ; $R^2 = 0,99$, figure 3b pour les rameaux secondaires). Cette méthode est précise et rapide, mais elle présente néanmoins l'inconvénient d'être destructive.

4) Estimation de la surface foliaire par la mesure du poids sec des limbes

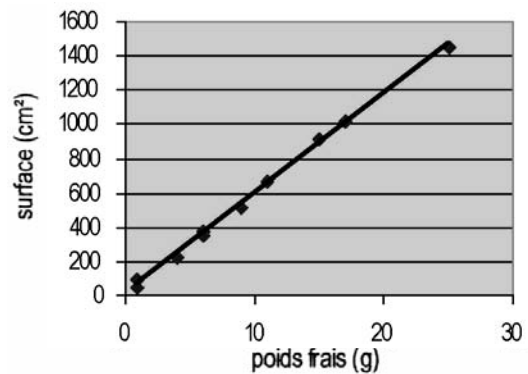


$$y = 39,933x + 152,14 \quad R^2 = 0,9848$$

Fig. 3a - Corrélation entre la surface foliaire primaire d'un rameau de Cabernet franc, mesurée par planimétrie, et le poids frais des limbes des feuilles primaires du rameau.

Fig. 3a - Correlation between the primary leaf area of a shoot, measured by a leaf area meter, and the total fresh weight of the leaf blades of primary leaves of the shoot (*Vitis vinifera* var. Cabernet franc).

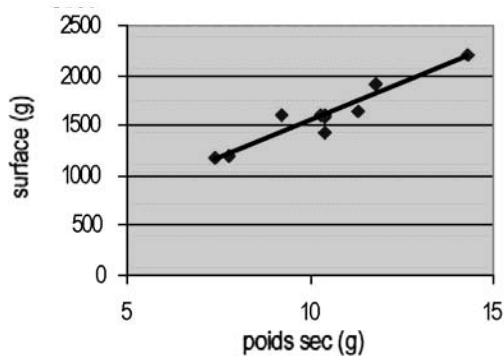
La corrélation entre la surface foliaire et le poids sec des limbes des feuilles n'est pas meilleure que celle réalisée avec le poids frais des limbes des feuilles ($R^2 = 0,90$, figure 4a pour les rameaux primaires ; $R^2 = 0,99$, figure 4b pour les rameaux secondaires). Cette méthode nécessite une étuve ; elle est donc plus longue à mettre en œuvre. On peut néanmoins émettre l'hypo-



$$y = 58,559x + 6,1344 \quad R^2 = 0,9977$$

Fig. 3b - Corrélation entre la surface foliaire secondaire d'un rameau de Cabernet franc, mesurée par planimétrie, et le poids frais des limbes des feuilles secondaires du rameau.

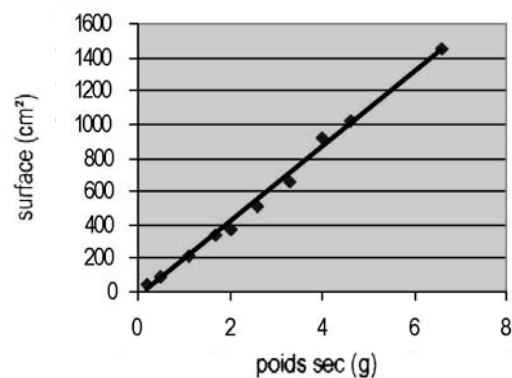
Fig. 3b - Correlation between the secondary leaf area of a shoot, measured by a leaf area meter, and the total fresh weight of the leaf blades of secondary leaves of the shoot (*Vitis vinifera* var. Cabernet franc).



$$y = 147,27x + 71,738 \quad R^2 = 0,8961$$

Fig. 4a - Corrélation entre la surface foliaire primaire d'un rameau de Cabernet franc, mesurée par planimétrie, et le poids sec des limbes des feuilles primaires du rameau.

Fig. 4a - Correlation between the primary leaf area of a shoot, measured by a leaf area meter, and the total dry weight of the leaf blades of primary leaves of the shoot (*Vitis vinifera* var. Cabernet franc).



$$y = 224,09x - 33,487 \quad R^2 = 0,9947$$

Fig. 4b - Corrélation entre la surface foliaire secondaire d'un rameau de Cabernet franc, mesurée par planimétrie, et le poids sec des limbes des feuilles secondaires du rameau.

Fig. 4b - Correlation between the secondary leaf area of a shoot, measured by a leaf area meter, and the total dry weight of the leaf blades of secondary leaves of the shoot (*Vitis vinifera* var. Cabernet franc).

thèse que l'équation qui relie le poids sec des limbes à la surface foliaire est plus stable dans le temps que l'équation qui relie le poids frais des limbes à la surface foliaire, car la première fait abstraction d'éventuelles variations de la teneur en eau des tissus de la feuille qui peuvent se produire au cours de la saison.

Dans cette expérimentation, la mesure du poids frais des limbes a donné les meilleurs résultats pour estimer la surface foliaire à l'échelle d'un rameau, après étalonnage, par rapport à la planimétrie (tableau 1). Elle est rapide et facile à mettre en œuvre, mais elle présente l'inconvénient d'être destructive. La mesure du poids frais des limbes a été retenue comme méthode de référence pour la deuxième partie de ce travail.

II - ESTIMATION DE LA SURFACE FOLIAIRE À L'ÉCHELLE DU CEP

Différentes méthodes directes et indirectes d'estimation de la surface foliaire à l'échelle d'un cep ont été comparées avec la surface foliaire du cep estimée à partir du poids frais des limbes. Les méthodes directes, qui avaient déjà été testées à l'échelle du rameau, permettent d'obtenir une distinction entre la surface foliaire primaire et la surface foliaire secondaire.

1) Méthodes directes

L'estimation de la surface foliaire à partir de la mesure des longueurs des nervures latérales supérieures

de toutes les feuilles permet d'obtenir une bonne estimation de la surface foliaire secondaire (tableau II). L'estimation de la surface foliaire primaire est moins précise avec cette technique, en raison de l'existence d'une proportion non négligeable de feuilles âgées plus ou moins abîmées dans l'échantillon. Le résultat reste néanmoins tout à fait satisfaisant pour l'estimation de la surface foliaire totale du cep. Cette méthode est longue (une heure et demie par cep) et nécessite un étalonnage préalable avec une mesure par planimétrie sur un échantillon d'une centaine de feuilles (environ une demi-journée de travail).

Il est confirmé dans ce travail que la réduction de la taille de l'échantillon de feuilles mesurées proposée par CARBONNEAU (1976b) n'affecte pas la qualité de la réponse. Elle permet le gain d'environ un tiers du temps de travail. Une diminution de un à dix permet une réduction des deux tiers du temps d'exécution. La précision de l'estimation de la surface foliaire est cependant diminuée. Il serait intéressant de déterminer à partir de quelle taille d'échantillon, la précision commence à diminuer. La mesure de toutes les feuilles d'un seul rameau par cep présente un temps de travail équivalent à la mesure d'une feuille sur dix. En raison de l'hétérogénéité de vigueur entre rameaux d'un même cep, cette méthode est très peu précise et ne présente donc pas d'intérêt. Cette méthode pourrait sans doute être améliorée en calculant la surface moyenne d'une feuille à partir des mesures réalisées

TABLEAU II
Comparaison de différentes méthodes d'estimation de la surface foliaire primaire, secondaire et totale, à l'échelle d'un cep.

Corrélations avec l'estimation de la surface foliaire par la mesure du poids frais des limbes de toutes les feuilles (méthode de référence). Temps de travail approximatif pour réaliser la mesure au niveau d'un cep de vigueur moyenne avec une surface foliaire établie.

Table II - Comparison of several methods for primary, secondary and total vine leaf area assessment.

Correlations with leaf area assessed by measurement of primary, secondary and total leaf blade fresh weight (reference method). Approximate time needed for leaf area assessment of one vine of moderate vigour with full leaf area established.

Méthode utilisée/ poids frais	Coefficient de détermination / surface foliaire I	Coefficient de détermination / surface foliaire II	Coefficient de détermination / surface foliaire totale	Temps de travail néces- saire pour une per- sonne par cep de vigne
Somme des longueurs des nervures de toutes les feuilles	0,524	0,898	0,864	1 heure 30 mn
Somme des longueurs des nervures (méthode Carbonneau)	0,521	0,901	0,868	1 heure
Somme des longueurs des nervures d'une feuille/10	0,531	0,826	0,70	1/2 heure
Somme des longueurs des nervures des feuilles d'un rameau	0,407	0,696	0,35	1/2 heure
Somme des longueurs des rameaux (et entre-cœurs)	0,499	0,888	0,83	20 mn
Poids sec	0,84	0,98	0,95	1 heure
LAI 2000			0,77	1 à 2 mn
Photo numérique			0,44	2 à 3 mn

sur toutes les feuilles d'un rameau, puis en multipliant cette surface par le nombre de feuilles effectivement comptées sur chaque rameau d'une souche.

Nos résultats confirment que l'estimation de la surface foliaire d'un cep à partir de la longueur des rameaux primaires et secondaires, proposée par MABROUK et CARBONNEAU (1996), combine rapidité d'exécution et précision. Cette méthode nécessite en principe un étalonnage préalable pour les rameaux primaires et pour les rameaux secondaires. La relation entre la longueur d'un rameau et sa surface foliaire varie en fonction du stade de développement de la vigne et du cépage. Cependant, d'après les auteurs précédemment cités la méthode est suffisamment robuste pour pouvoir être appliquée avec une équation « standard », sans grande perte de précision dans l'estimation de la surface foliaire.

L'estimation de la surface foliaire à partir du poids sec des limbes est logiquement très fortement corrélée à l'estimation de la surface foliaire à partir du poids frais. La méthode est rapide, mais présente l'inconvénient d'être destructive, ce qui limite son utilisation à une mesure par an, réalisée peu après la récolte.

2) Méthodes indirectes

Parmi les deux méthodes indirectes d'estimation de la surface foliaire testées, l'utilisation du L.A.I. 2000 donne de bons résultats pour une manipulation simple et très rapide ($R^2 = 0,77$, tableau II). Il est donc possible d'échantillonner un grand nombre de ceps dans une parcelle, ce qui ne l'est pas avec des méthodes plus contraignantes. Ceci permet de mieux prendre en compte la variabilité de la surface foliaire entre ceps à l'intérieur d'une parcelle et donc d'obtenir une estimation plus précise de la surface foliaire au niveau de la parcelle. La méthode n'est pas destructive, ce qui permet le suivi de la mise en place de la surface foliaire au cours de la saison (VAN LEEUWEN *et al.*, 1998). OLLAT *et al* (1998) signalent une meilleure précision de la méthode lorsque les mesures sont réalisées sur des ensembles de cinq ceps consécutifs. Les contraintes de la méthode se situent au niveau du coût de l'appareil et du créneau horaire de la mesure : seulement vingt minutes après le coucher du soleil, par temps clair. Le L.A.I. 2000 effectue une estimation globale de la surface foliaire du cep et ne distingue pas la surface foliaire primaire de la surface foliaire secondaire.

La deuxième méthode indirecte d'estimation de la surface foliaire testée dans ce travail a été le traitement d'image d'une photo numérique de la végétation, pour calculer le pourcentage de vide (non occupé par des feuilles) dans le gabarit de la végétation (hauteur x largeur). Les résultats médiocres obtenus par cette tech-

nique ($R^2 = 0,44$, tableau II) peuvent être expliqués par différentes raisons. Premièrement, la végétation de la souche peut dépasser le cadre de 120 cm de largeur et 110 cm de hauteur ; les branches qui dépassent le cadre ne sont évidemment pas prises en compte sur le cliché. Ensuite, les endroits couverts par une, deux, trois ou quatre couches de feuilles donnent des pixels noirs sur la photo et sont donc pris en compte de la même façon. Enfin, le matériel utilisé n'était pas particulièrement performant et il a souvent été difficile dans le traitement de l'image de distinguer des jeunes feuilles qui laissent une empreinte peu foncée sur la photo des parties ombragées ou des plis du drap tendu derrière la souche. Il serait intéressant de reconduire une telle expérimentation avec un appareil numérique ayant une meilleure résolution, car la technique est rapide et les photos peuvent être traitées dans des périodes moins chargées en travail. L'utilisation de la couleur permettrait également de lever l'ambiguïté entre le drap et les feuilles et donc d'augmenter la précision de la méthode. Cependant, il sera toujours difficile de comparer avec cette méthode des surfaces foliaires de vignes ayant des systèmes de conduite différents. Il paraît par ailleurs impossible de l'utiliser sur des systèmes de conduite à double plan de palissage.

CONCLUSIONS

Au cours de ce travail, différentes méthodes d'estimation de la surface foliaire ont été comparées pour leur précision et leur rapidité d'exécution. Dans un premier temps, quatre méthodes ont été comparées à l'échelle du rameau : la mesure de la somme des longueurs des nervures latérales supérieures des feuilles, la mesure de la longueur du rameau, le poids frais des limbes et le poids sec des limbes. Ces méthodes ont été comparées à la mesure de la surface foliaire du rameau par planimétrie. Toutes les méthodes testées ont donné satisfaction. La corrélation entre la surface foliaire réelle et le poids des limbes (poids frais ou poids sec) a été particulièrement bonne.

Dans un deuxième temps, différentes méthodes directes et indirectes de l'estimation de la surface foliaire ont été testées à l'échelle du cep de vigne. La mesure de la somme des longueurs des deux nervures latérales supérieures est une technique non destructive, qui permet d'obtenir une estimation très précise de la surface foliaire. Elle permet en outre une distinction entre la surface foliaire primaire et secondaire. Sa mise en œuvre est cependant longue et il est nécessaire d'établir une courbe d'étalonnage. Un gain important dans l'exécution de la mesure peut être obtenu par une réduction de l'échantillonnage. La mesure d'une feuille sur trois n'entraîne aucune perte d'information. Une diminution de la taille de l'échantillon à une feuille sur dix

permet un gain de temps d'exécution plus important, mais elle aboutit à une estimation de la surface foliaire moins précise. La mesure de toutes les feuilles d'un seul rameau nécessite un temps de mesure équivalent à un échantillonnage d'une feuille sur dix mais l'estimation de la surface foliaire est beaucoup moins bonne.

L'estimation de la surface foliaire par la mesure des longueurs des rameaux est non destructive et permet de distinguer la surface foliaire primaire et secondaire. Cette technique est intéressante car elle combine une bonne précision à une rapidité d'exécution. Elle nécessite cependant en principe un étalonnage spécifique pour les rameaux primaires et pour les rameaux secondaires, en fonction du stade de développement de la vigne et du cépage.

Il existe une très bonne corrélation entre le poids sec ou le poids frais des limbes de toutes les feuilles et la surface foliaire du cep. Le poids des limbes est une grandeur facilement accessible, qui peut être obtenue séparément sur les rameaux primaires et les rameaux secondaires. Le principal inconvénient de cette technique est d'être destructif et de nécessiter l'établissement d'une courbe d'étalonnage. Une mesure réalisée peu de temps après la récolte permet de connaître la surface foliaire établie par une souche avec une bonne précision, à condition qu'un effeuillage ou des dégâts de sécheresse ou de grêle n'aient pas provoqué une défoliation partielle de la souche.

Le principal intérêt des méthodes indirectes et globales est la rapidité de leur mise en œuvre. La mesure de la surface foliaire à l'aide d'un L.A.I. 2000 permet d'obtenir une bonne précision de l'estimation de la surface foliaire, sans étalonnage préalable. L'inconvénient est le prix élevé de l'appareil et les conditions particulières de son utilisation (faible créneau horaire pour effectuer les mesures). Le traitement d'images de photos numériques de la végétation a donné de résultats moins probants dans cette expérimentation, mais d'autres essais méritent d'être réalisés avec un équipement plus performant. Ces deux techniques globales ne sont pas destructives, mais elles ne permettent pas la distinction entre la surface foliaire primaire et la surface foliaire secondaire.

Parmi les méthodes d'estimation de la surface foliaire comparées dans ce travail, plusieurs nécessitent l'établissement d'une ou plusieurs courbes d'étalonnage. Il serait intéressant d'étudier si, pour certaines d'entre elles, des courbes « standard » peuvent être pro-

posées, applicables dans des conditions variées de cépage et de système de conduite. Ceci augmenterait encore l'accessibilité de la grandeur « surface foliaire », qui pourrait alors être plus souvent prise en compte dans des recherches sur la vigne ou dans la pratique viticole.

Remerciements : Nous remercions Agnès Brotons, Philippe Friant, Blandine Cassagne et David Pergant pour leur participation à ce travail.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CARBONNEAU A., 1976a. Principes et méthodes de mesure de la surface foliaire. Essai de caractérisation des types de feuilles dans le genre *Vitis*. *Ann. Amélior. Plantes*, **26**, 327-343.
- CARBONNEAU A., 1976b. Analyse de la croissance des feuilles du sarment de vigne : estimation de sa surface foliaire par échantillonnage. *Connaissance Vigne Vin*, **10**, 141-159.
- CHAMPAGNOL F., 1984. *Eléments de Physiologie de la Vigne et de Viticulture générale*. Eds Dehan, Montpellier, 351 p.
- MABROUK H. et CARBONNEAU A. 1996. Une méthode simple de détermination de la surface foliaire de la vigne (*Vitis vinifera* L.). *Prog. Agric. Viti.*, **18**, 392-398.
- MURISIER F., 1996. Optimisation 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*, École Polytechnique de Zurich.
- OLLAT N., FERMAUD M., TANDONNET J.-P. et NEVEUX M., 1998. Evaluation of an indirect method for leaf area index determination in the vineyard: Combined effects of cultivar, year and training system. *Vitis*, **37**, 73-78.
- SMART R. et ROBINSON M., 1991. *Sunlight into wine. A handbook for winegrape canopy management*. Winetitles Eds, Adelaide, 88 p.
- VAN LEEUWEN C., RENARD R., LERICHE O., MOLOT C. et SOYER J.-P., 1998. Le fonctionnement de trois sols viticoles du Bordelais : conséquences sur la croissance de la vigne et sur le potentiel œnologique du raisin en 1997. *Rev. Fr. Œnol.*, **170**, 28-32.

Reçu le 23 octobre 2000
 accepté pour publication le 12 décembre 2000
