



HAL
open science

Développement d'un appareil permettant de prédire la maturité du raisin par spectroscopie proche infra-rouge(PIR)

V. Geraudie, J.M. Roger, H. Ojeda

► **To cite this version:**

V. Geraudie, J.M. Roger, H. Ojeda. Développement d'un appareil permettant de prédire la maturité du raisin par spectroscopie proche infra-rouge(PIR). *Revue Française d'Oenologie*, 2010, 240, p. 2 - p. 8. hal-00647105

HAL Id: hal-00647105

<https://hal.science/hal-00647105v1>

Submitted on 1 Dec 2011

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

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

Développement d'un appareil permettant de prédire la maturité du raisin par spectroscopie proche infra-rouge. (PIR)

Geraudie V.^a, Roger J.M.^b, Ojeda H.^c

^a PELENC S.A., Route de Cavaillon, BP 47, 84122 Pertuis Cedex, France

^b Cemagref, UMR-ITAP, 361 rue J.-F. Breton, BP 5095, 34033 Montpellier Cedex 1, France.

^c UE999 Pech Rouge, INRA, 11430 Gruissan, France.

Avec la collaboration du Pôle Technique & Environnement du Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne, de la Direction Qualité et Développement de Moët & Chandon, de l'Institut Français de la Vigne et du Vin et des Domaines Bremerton et The Lane (Australie).

Résumé :

La qualité optimale des vendanges dépend étroitement du choix de la date des vendanges. Différents critères de qualité du raisin sont donc suivis au cours de sa maturation. La spectroscopie visible proche infrarouge (Vis-NIR) permet d'analyser rapidement la composition des produits de manière non-destructive. Cet article présente le développement d'un capteur basé sur l'utilisation de la spectroscopie Vis-NIR destiné au suivi de maturité, le SpectronTM. Il permet de connaître le taux de sucre, l'acidité totale, la teneur en eau et la concentration en anthocyanes du raisin, qui sont directement mesurés sur la parcelle. Il a été mis au point par la société Pellenc S.A. en partenariat avec l'équipe de l'UMR-ITAP du Cemagref de Montpellier.

Mots clefs : Spectroscopie visible proche infrarouge, composition du raisin, suivi de maturité.

Abstract :

Optimal harvest quality is closely dependent on the choice of harvesting date. Different grape quality criteria are therefore monitored over the course of the ripening of the fruit. Visible near spectroscopy allows rapid analysis of the composition of products in a non-destructive manner. This article presents the development of a sensor based on the use of Vis-NIR spectroscopy designed for the tracing of maturity, the SpectronTM. The SpectronTM measures the sugar level, total acidity, water content and the anthocyanine concentration of the grape, which are directly measured in the block. This tool has been developed by Pellenc S.A. in partnership with the UMR-ITAP team of the Cemagref in Montpellier.

Keywords: Visible near infrared spectroscopy, grape composition, maturity tracing.

1. Introduction et contexte social

La viticulture doit faire face depuis une vingtaine d'années à de nombreuses difficultés : apparition des vins du nouveau monde sur le marché de l'exportation, stagnation de la consommation de vin dans l'Union Européenne, abandon progressif par les consommateurs des vins dits de masse non identifiés vers des vins de qualité [7]. Afin de faire face à ces évolutions du marché et ainsi assurer les débouchés nécessaires à ses productions, le secteur viticole a engagé une profonde mutation. Cette évolution se traduit en partie par un changement d'objectif des exploitations viticoles. Le principal objectif n'est plus d'assurer seulement un volume de production mais une qualité de production afin d'accroître sa compétitivité. Cette volonté d'optimisation de la qualité, dans un cadre global d'amélioration de la performance, constitue encore à l'heure actuelle une priorité pour le monde viticole.

La qualité du raisin est une qualité multicritère. Cette multiplicité des critères impose d'aborder le raisin comme un système complexe où sont transportés, synthétisés, transformés ou stockés les éléments essentiels (eau, sucres, acides organiques, éléments minéraux et autres métabolites secondaires). Ce système est d'autant plus complexe que ses constituants peuvent varier de façon coordonnée ou indépendante et que la vigne est soumise à un environnement changeant durant la phase de maturation : température, rayonnement incident, état hydrique du sol, etc. En effet, la composition de la baie en sucres (glucose, fructose, saccharose), en acides (acides malique et tartrique) et en composés phénoliques (tanins, anthocyanes, etc.) est très dépendante des facteurs agro climatiques tels que l'état hydrique de la vigne, le microclimat des grappes et l'architecture de la végétation [2, 5, 8, 18].

Le viticulteur peut donc légitimement se poser de nombreuses questions sur la manière d'aborder la maturation et la maturité de ses parcelles d'un point de vue qualitatif [3] :

- La maturation se déroule-t-elle normalement ?
- La maturité phénolique est-elle atteinte ?
- La maturité technologique est atteinte mais pas la maturité phénolique ; faut-il vendanger ?
- La vendange est-elle hétérogène ?
- Quand vendanger par rapport à un style de vin donné ?

Dans ce contexte, un besoin d'informations fiables et rapidement disponibles sur les différents critères de maturité du raisin est apparu.

Aujourd'hui, afin d'obtenir les concentrations ou les quantités des différents critères de maturité, plusieurs analyses destructives faites en laboratoire doivent être réalisées. En fonction des informations souhaitées, ou de l'état d'avancement de la maturation, ces analyses seront plus ou moins nombreuses. Toutes ces analyses sont réalisées à l'aide de méthodes dites "classiques" dont les principales limites sont :

- d'être des méthodes destructives,
- d'obtenir les résultats après un certain délai,
- d'être relativement longues à mettre en œuvre,
- de nécessiter l'emploi de réactifs coûteux et souvent polluants,
- de ne pouvoir être appliquées que par des opérateurs qualifiés.

Ce sont toutefois celles utilisées traditionnellement par la profession.

Une alternative à ces méthodes "classiques" d'analyse est à présent disponible pour la profession. Il s'agit des méthodes mettant en œuvre la spectrométrie visible - proche infrarouge.

2. La spectroscopie visible - proche infrarouge (Vis-NIR)

De manière générale, la spectroscopie optique, quelle que soit la gamme de longueur d'onde utilisée (UV, visible, infra rouge, etc.), a pour objectif d'extraire des informations de la matière à partir de son interaction avec la lumière. En pratique, l'analyse peut être qualitative (identification d'un composé à partir de sa signature spectrale), ou quantitative (dosage d'une substance).

La spectroscopie Vis-NIR utilise la gamme des longueurs d'onde comprise entre 450 et 2500 nanomètres. Cette technique d'analyse permet de connaître, de manière rapide et non destructive, la composition chimique de nombreux produits. En laboratoire, la mesure est déjà performante pour un grand nombre de produits alimentaires. Son application à la mesure de la qualité des fruits connaît ces dernières années un important développement [17].

Les possibilités offertes par cette technique ont conduit au développement d'outils mobiles permettant des mesures au champ. Ces études visant à prédire la composition des fruits, directement au champ, dans le but d'évaluer leur qualité avant la récolte permettent de souligner les capacités de la spectroscopie Vis-NIR portable à "bas coût" [19].

2.1. Concepts de base de la spectroscopie Vis-NIR

La gamme de longueur d'onde utilisée en spectroscopie Vis-NIR fait partie du domaine de la spectroscopie vibrationnelle. Il est possible de représenter, de manière très simplifiée, une molécule comme un ensemble d'atomes reliés entre eux par des ressorts. Ces liaisons sont le résultat d'un équilibre des forces de liaisons. D'une part, il existe au sein d'une molécule une répulsion entre les noyaux chargés positivement et entre les nuages d'électrons chargés négativement. D'autre part, il existe une attraction entre le noyau des atomes et les électrons. Chaque ressort vibre à une fréquence qui dépend du groupe chimique impliqué dans la liaison. Cette vibration de dipôles électriques crée un champ électromagnétique local qui peut interagir avec celui des photons. L'énergie d'un rayon lumineux incident ne peut être absorbée que si la fréquence de la lumière est identique à la fréquence de la liaison chimique.

Les spectres sont acquis à l'aide de spectrophotomètres. Ils sont formés d'au moins 4 éléments :

- une source lumineuse,
- un système permettant de présenter l'échantillon,
- un système de séparation de lumière polychromatique en fonction des longueurs d'onde,
- un système de mesure photosensible.

L'échantillon est irradié et le rayonnement transmis, rétro-diffusé ou réfléchi (Voir fig. 1) est "chargé" en information. En effet, après avoir pénétré dans le produit, les caractéristiques spectrales du rayonnement incident sont modifiées en fonction des processus de diffusion et d'absorption. Ces changements sont fonction des longueurs d'onde, de la composition chimique du produit, ainsi que des propriétés du produit à diffuser de la lumière.

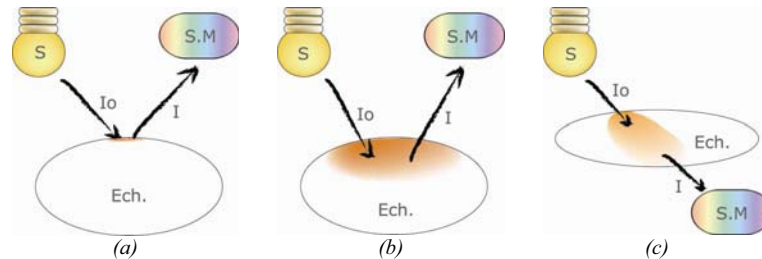


Figure 1 : Disposition de la source (S) de l'échantillon (Ech.) et du Système de mesure (SM) pour obtenir un spectre en : a) réflexion b) rétrodiffusion c) transmission.

L'absorption est modélisée par la loi de Beer-Lambert (Voir éq. 1). Cette loi relie l'intensité du rayonnement transmis, $I(\lambda)$, à celle du rayonnement incident, $I_0(\lambda)$, en fonction de la longueur du chemin optique, l exprimé en cm, et la concentration, c exprimée en mol.l^{-1} , du composé présent dans la solution :

$$I = I_0 e^{-k(\lambda)lc} \quad (1)$$

où $k(\lambda)$ est le coefficient d'extinction, fonction de la longueur d'onde λ ($\text{l. mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

Le spectre présente des pics d'absorption centrés sur des longueurs d'onde propres au composé étudié. L'ensemble forme un spectre caractéristique du composé chimique ayant interagi avec le rayonnement incident. Dans des conditions idéales, en utilisant une gamme de longueurs d'onde appropriée et en maîtrisant le chemin optique, il est possible de déterminer la concentration c à partir du spectre d'absorbance, théoriquement proportionnel au spectre caractéristique :

$$A(\lambda) = -\log_{10} (I/I_0) = k(\lambda)lc \quad (2)$$

où I/I_0 est la transmittance et $A(\lambda)$ est l'absorbance à la longueur d'onde λ (sans unité). Dans ce cas idéal, il n'est pas nécessaire d'utiliser un spectrophotomètre. La mesure de l'absorption à une longueur d'onde correctement choisie permet de connaître la concentration. Cette mesure simple est celle de la densité optique (DO).

En pratique, les spectres Vis-NIR contiennent donc des informations pertinentes sur les caractéristiques chimiques des échantillons mesurés mais ces dernières sont "cachées" dans les spectres. Des méthodes de chimiométrie doivent alors être mises en œuvre pour extraire correctement ces informations. La chimiométrie peut être définie comme étant : "la discipline qui utilise les mathématiques, les statistiques et la logique formelle (a) pour concevoir ou choisir des procédures expérimentales optimales ; (b) pour fournir le maximum d'informations chimiques d'intérêt en analysant les données chimiques, (c) et pour obtenir des connaissances sur les systèmes chimiques" [15]. Cette discipline est apparue à la suite du développement des instruments de mesure chimique rapides utilisés pour les analyses de routine. En effet, ces instruments fournissent des mesures indirectes représentées au sein d'importantes bases de données spectrales qui nécessitent d'être interprétées afin d'extraire l'information chimique souhaitée.

Cette technique présente de nombreux avantages :

- elle est rapide : quelques millièmes de seconde permettent de recueillir le spectre d'absorption d'une grappe pour prédire sa composition. Les méthodes d'analyses biochimiques classiques demandent plusieurs heures, en particulier pour mesurer la teneur en anthocyanes. De plus, elle ne nécessite pas de préparation de l'échantillon.
- elle est non destructive : le raisin est directement mesuré sur le cep et laissé intact après la mesure. Cette propriété est particulièrement intéressante car elle permet de réaliser ultérieurement des mesures sur une même grappe.
- elle est peu onéreuse : hormis l'investissement initial dans l'appareil et l'éventuelle constitution d'une base de données pour l'étalonnage. Une fois le spectrophotomètre correctement étalonné, de nombreux

critères permettant d'évaluer la maturité peuvent être obtenus à partir d'une même mesure sans coût additionnel.

Néanmoins, les critiques pouvant être formulées à l'encontre de la spectroscopie Vis-NIR sont :

- la nécessité de passer par une importante phase d'étalonnage. En effet, il faut collecter une grande quantité d'échantillons qui doivent être analysés avec les méthodes de référence. De plus, ces échantillons doivent être représentatifs de l'ensemble du raisin qui sera par la suite mesuré. Cette phase d'étalonnage représente une partie longue et onéreuse lors de la mise au point de ce type de mesure.
- l'impossibilité de mesurer les substances minérales. En effet, le rayonnement infrarouge est seulement absorbé par les composés organiques.
- le seuil de sensibilité de cette méthode de mesure.

2.2. La spectroscopie Vis-NIR en viticulture

La spectroscopie Vis-NIR est donc un principe de mesure prometteur pour suivre certains critères de maturité. Néanmoins, hors cadre de recherche, peu d'applications étaient jusqu'à présent recensées. En effet, les technologies associées ne permettaient pas de proposer des solutions commerciales grand public pour une application en routine et au champ. Mais grâce aux évolutions de ces technologies et à leur baisse des coûts, différents produits offerts aux viticulteurs commencent à apparaître sur le marché.

Au laboratoire, des modèles robustes, basés sur des spectres obtenus en transmission, permettent de prédire le taux de sucre avec de faibles erreurs de validation [9, 12]. Les modèles obtenus pour les raisins noirs semblent généralement de meilleure qualité que ceux obtenus pour les raisins blancs. Des essais ont également démontré la possibilité d'évaluer les propriétés de texture des baies sur du Cabernet Franc [14]. Enfin, des essais de mesure au champ, avec des prototypes portables, ont également montré leur potentiel. Ces résultats témoignent de l'intérêt de suivre directement au champ l'évolution de la teneur en sucre, le pH ou la teneur en anthocyanes. Ces essais ont été menés sur du Cabernet Sauvignon, Merlot, Pinot Noir, ou Chardonnay [13, 16]. Le tableau 1 présente certains de ces résultats.

Référence	Cépage	λ (nm)	Mode	Critère	SEP ^(a)
Jaren et al (2001) R	G. V.	800-2500	R	Sucre (°Brix)	1.04 à 1.59
Herrera et al (2003)	CS. Ca. Ch.	650-1100	RT	Sucre (°Brix)	1.34 à 2.96
Dambergs et al (2003)	CS. S. Me. G.	400-2500	R	Sucre (°Brix)	1
				pH	0.11
				Antho (mg.l ⁻¹)	0.05
Chauchard et al (2004)	Cg. Mo. UB.	680-1100	R	Acidité (g.l ⁻¹)	1.28
Arana et al (2005)	V. Ch.	500-800	R	Sucre (°Brix)	1.27
Cozzolino et al (2005)	CS. S. Me.	400-1100	R	Antho (mg.l ⁻¹)	0.06
				pH	0.045

Tableau 1 : Exemple de mesures de critère de maturité en spectroscopie proche infrarouge [6]. G. Grenache, V. Viura, CS. Cabernet Sauvignon, Ca. Carmenère, Ch. Chardonnay, S. Syrah, Me. Merlot, Cg. Carignan, Mo. Mourvèdre, UB. Ugni-Blanc.

Différentes études ont démontré la faisabilité de l'utilisation de la spectroscopie Vis-Nir au champ [11, 13, 16]. De telles applications posent néanmoins plusieurs problèmes. En effet, de nombreux facteurs ont une influence sur la mesure : variation de la température et de l'humidité, hétérogénéité de la distribution des composés au sein de la grappe et des baies, etc. [6, 11, 17].

3. Le Spectron™

3.1. Genèse du projet et ses acteurs

Au sein de l'UMR-ITAP (Information et Technologies pour les Agroprocédés) du Cemagref de Montpellier, l'équipe IODE (Image, Optique et Décision) étudie et met au point des systèmes de perception et de décision pour les produits, équipements et agro-procédés. Les systèmes de perception, développés par cette équipe, mettent en œuvre des capteurs optiques basés sur la spectrométrie et la vision artificielle. Comme nous venons de le voir, la spectrométrie Vis-NIR est une méthode d'analyse puissante et rapide pour "interroger" la matière de façon non destructive.

^(a) Terme défini en annexes

L'UMR-ITAP a coordonné de 1998 à 2001 le projet européen de recherche Glove (FAIR PL97-3399) (Voir fig 2.a). Ce projet avait pour but de démontrer la faisabilité d'un gant instrumenté permettant de mesurer au champ, de manière non destructive, la qualité des fruits (teneur en sucre, maturité et calibre). Fort de ce succès, l'IFV (Institut Français de la Vigne et du Vin) a souhaité appliquer les résultats du projet Glove sur le raisin. Pour mener à bien ce nouveau défi, un programme de recherche Cemagref/IFV a été créé (financement ACTA). L'objectif était de développer et d'expérimenter sur le terrain un nouvel outil de mesure portable adapté au raisin, le Tromblon (Voir fig. 2.b). Ce premier pré-prototype a permis de valider le concept d'un appareil portable, capable de mesurer directement sur la grappe, sans la détruire, différents critères de maturité du raisin (sucre, acidité totale).

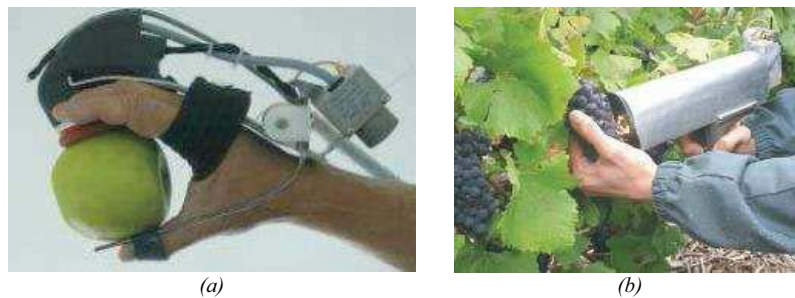


Figure 2 : Prototypes développés au Cemagref. a) Glove b) Tromblon.

La Société PELLENC S.A., spécialiste de la mécanisation en viticulture, conçoit et met au point des produits pertinents pour les viticulteurs afin d'être toujours en parfaite adéquation avec les demandes mouvantes de ce marché. Ce résultat est principalement dû à son service de Recherche et de Développement, qui reste à l'écoute des besoins de ses clients. A ce titre, plus de 250 brevets ont été déposés de par le monde par PELLENC S.A.

Forts de leur expertise, l'UMR - ITAP et la société PELLENC S.A. ont décidé de développer conjointement un système, portatif et autonome, de mesure par spectroscopie Vis-NIR permettant de suivre, de manière non destructive, l'évolution temporelle de certains critères de maturité du raisin. Ce système est baptisé SpectronTM. Ces critères sont : les teneurs en sucre, en anthocyanes et en eau ainsi que l'acidité totale.

3.2. Développement du capteur

Les principales spécifications du cahier des charges étaient :

1. de pouvoir mesurer :
 - la teneur en sucre,
 - l'acidité totale,
 - la teneur en anthocyanes,
 - et la teneur en eau
2. directement au champ sur grappe entière afin de n'avoir aucune préparation d'échantillon.
3. d'avoir un géo-référencement des mesures grâce à l'intégration d'un GPS.
4. pour un coût abordable pour la profession (prix inférieur à 5000 €).

Dans un premier temps, afin de diminuer les coûts, un travail de sélection de longueurs d'onde a été effectué. 13 longueurs d'onde comprises dans la gamme 400 - 1100 nm ont été retenues. Cette approche permet de s'affranchir de l'intégration d'un spectrophotomètre du commerce non conçu à l'origine pour une telle utilisation. Ainsi un spectrophotomètre à bas-coût, basé sur l'usage de filtres et de photodiodes, a été spécifiquement développé. Cette approche a également permis d'intégrer, dès les premiers instants de la conception, les contraintes liées à une utilisation au champ

Afin de récupérer un signal de qualité, nécessaire à l'obtention de mesures fiables, un important travail d'optimisation du capteur a été mené. L'un des défis était d'augmenter la quantité de signal récupérée (utilisation de grande surface captante et de sources lumineuses puissantes) tout en minimisant le bruit. Pour cela, une attention particulière a été portée à la conception électronique et la conception de l'architecture de la partie optique du capteur. Cette dernière a été conçue dans le but de limiter l'entrée directe de la lumière provenant de la réflexion spéculaire, source importante de bruit en spectroscopie Vis-NIR.

La conception a également été optimisée pour obtenir un système de mesure réellement portable. Tous les composants : batterie, spectrophotomètre, sources lumineuses et l'électronique de traitement sont contenus dans

un même boîtier. Au final, le système pèse moins de 700 g et est pleinement adapté à une utilisation au champ (c.-à-d. autonome, résistant aux chocs et aux éclaboussures). Les figures 3 présentent l'évolution de ce capteur ; d'un système contenu dans un sac-à-dos et nécessitant un ordinateur pour fonctionner à un système plus ergonomique tenu à une main.

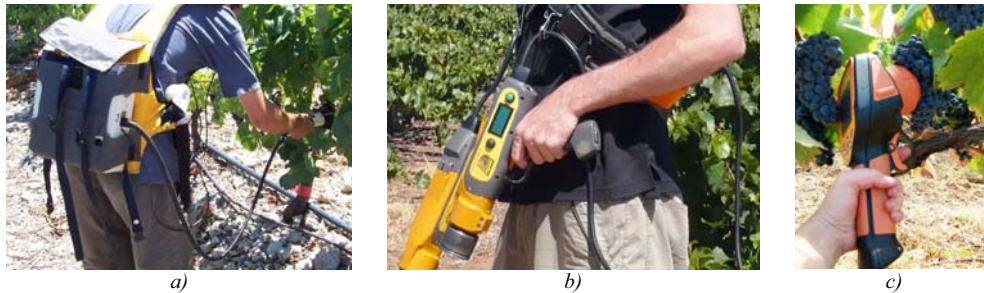


Figure 3 : Evolution des prototypes du Spectron™. a) 2006 b) 2007 c) 2008-09.

Différentes campagnes de mesures ont été conduites pour d'une part créer une base de données spectrales dans un but d'étalonnage et d'autre part, tester en grandeur nature les prototypes. Ces campagnes se sont déroulées en collaboration avec différents partenaires techniques : en Languedoc Roussillon (domaine de l'INRA et IFV), en Champagne (Moët & Chandon et Comité Interprofessionnel des Vins de Champagne) et en Australie (domaine The Lane et Bermerton). Différents cépages ont été testés : Syrah, Merlot, Cabernet, Chardonnay, Pinot Noir, Meunier, etc.

Les résultats de ces campagnes de mesures ont été présentés au symposium international "Frutic Chile 2009" [10].

4. Etalonnage du Spectron™

L'un des objectifs des campagnes de mesures était l'étalonnage de l'appareil. Durant ces campagnes, des lots de grappes étaient quotidiennement collectés de la véraison à quelques jours après les vendanges (surmaturité). Les raisins étaient prélevés aléatoirement dans les vignes puis assemblés en lots de maturité homogène. Ils étaient ensuite ramenés au laboratoire pour être mesurés avec le Spectron™ puis analysés avec les méthodes destructives de référence.

Cette base de données spectrales a permis d'étalonner les modèles de prédiction des critères de maturité.

Les prétraitements appliqués sur les spectres sont ceux appliqués classiquement en spectroscopie Vis-Nir : moyenne des spectres d'un même lot, calcul de la dérivée seconde et normalisation. Les modèles sont ensuite calculés par une régression linéaire multiple. Afin d'évaluer la performance de la modélisation, une validation croisée est réalisée et le SECV^(b) et le R²^(b) sont ensuite calculés.

Après les premières campagnes, les résultats obtenus avec les variétés de raisin blanc n'étaient pas satisfaisants (SECV = 1,63 °Brix et R² = 0,78) mais de bons résultats étaient obtenus avec les variétés rouges (SECV = 1,12 °Brix et R² = 0,95).

Lors de la construction de la base d'étalonnage, l'une des principales difficultés est d'avoir des grappes homogènes (du point de vue de leur maturité) au sein d'un même lot. Ces lots sont constitués en fonction de la couleur des grappes qui les composent. En effet, la couleur est un bon moyen d'évaluer rapidement leur degré de maturité.

Toutefois, cette approche est moins aisée pour les blancs. De plus, il existe de manière intrinsèque une grande hétérogénéité au sein d'une même grappe pour les blancs [1, 4].

Par conséquent, un soin particulier a été apporté à la constitution des lots lors des campagnes suivantes, en particulier pour les variétés de raisin blanc.

Les tableaux 2 et 3 présentent l'évolution des résultats d'étalonnage pour le sucre.

^(b) Terme défini en annexes

Variétés	SECV	R ²
Rouge, Aust. 2007	1,32	0,95
Rouge, Aust. 2008	1,1	0,94
Rouge, Fr. 2008	1	0,92
Rouge, Fr. 2009	0,71	0,92

Tableau 2 : Critères de qualité des étalonnages obtenus sur cépages rouges pour la teneur en sucre (SECV en °Brix, Fr. campagne de mesure française, Aust. campagne de mesure australienne)

Variétés	SECV	R ²
Blanc, Fr. 2007	1,7	0,72
Blanc, Aust. 2008	1,6	0,81
Blanc, Fr. 2008	1,3	0,83
Blanc, Fr. 2009	1	0,87

Tableau 3 : Critères de qualité des étalonnages obtenus sur cépages blancs pour la teneur en sucre (SECV en °Brix, Fr. campagne de mesure française, Aust. campagne de mesure australienne)

Il en ressort une nette amélioration des résultats. Cette amélioration doit également être mise en relation avec les progrès faits sur le capteur.

Différents modèles ont pu être développés. De manière générale, les meilleurs résultats sont obtenus en construisant des modèles spécifiques par cépage. Mais les résultats obtenus pour des modèles génériques "rouge" ou "blanc" sont encore très bons.

Les figures 4 et 5 présentent les résultats d'étalonnage.

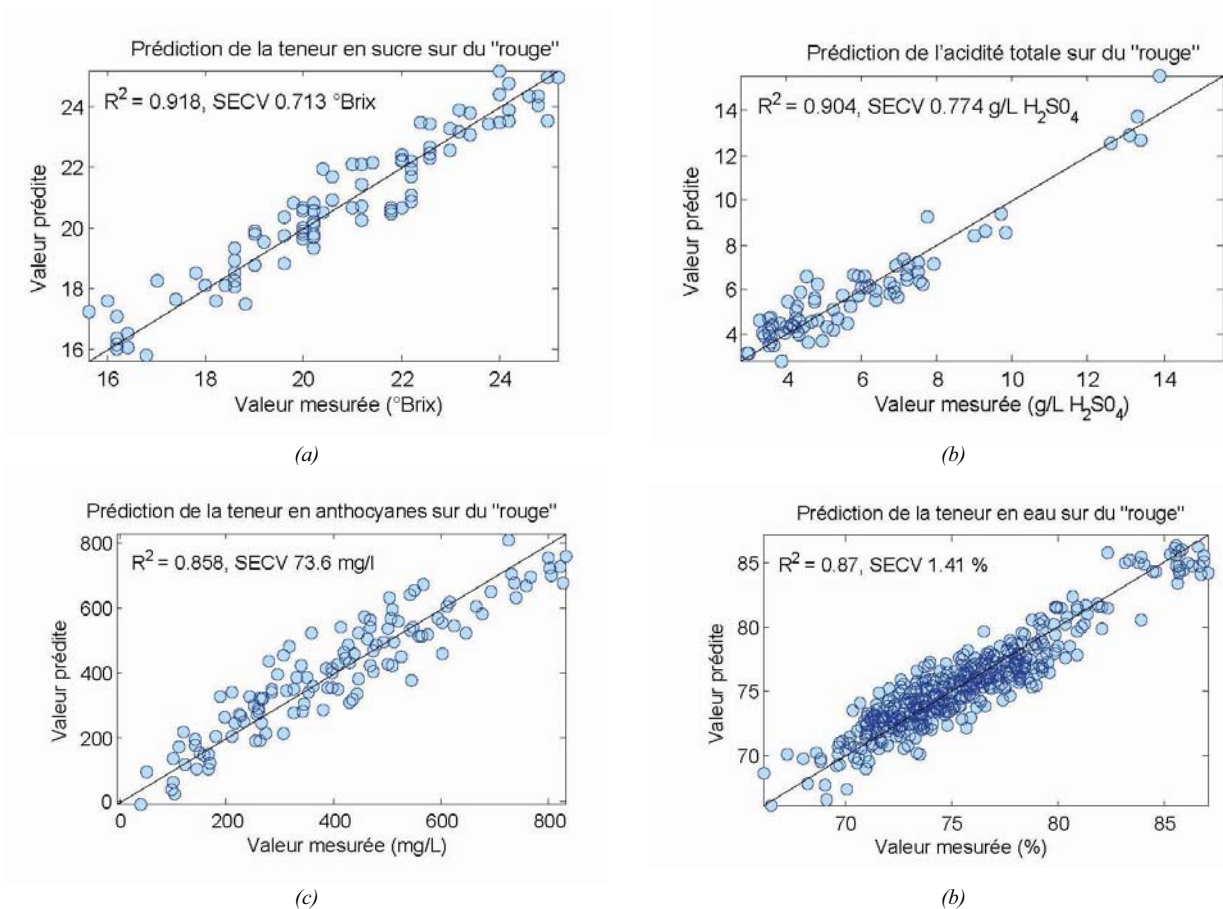


Figure 4 : Tests d'étalonnages pour les rouges. Valeurs prédites après validation croisée en fonction des valeurs réelles. a) teneur en sucre (INRA) b) acidité totale (INRA) c) teneur en anthocyanes (Moët & Chandon) d) teneur en eau (Cemagref).

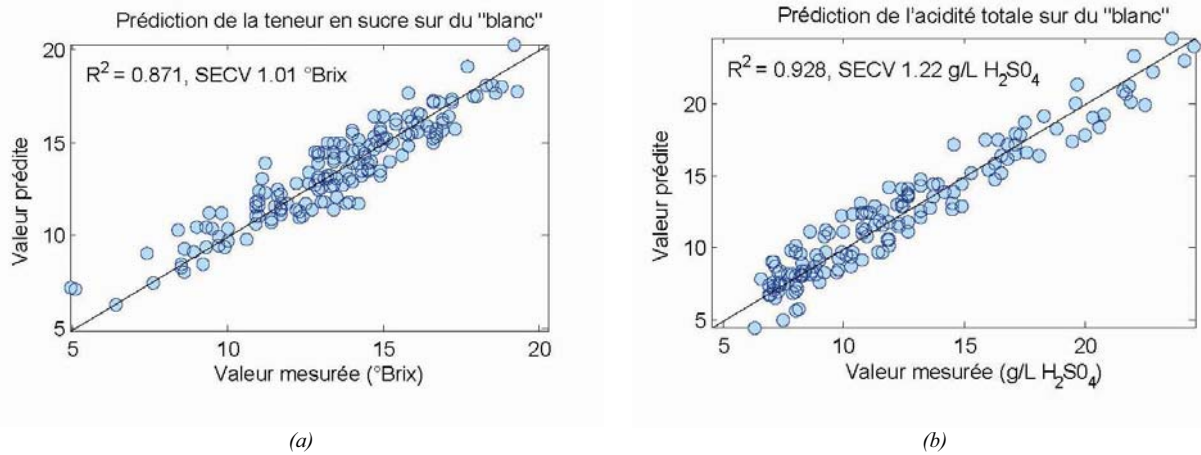
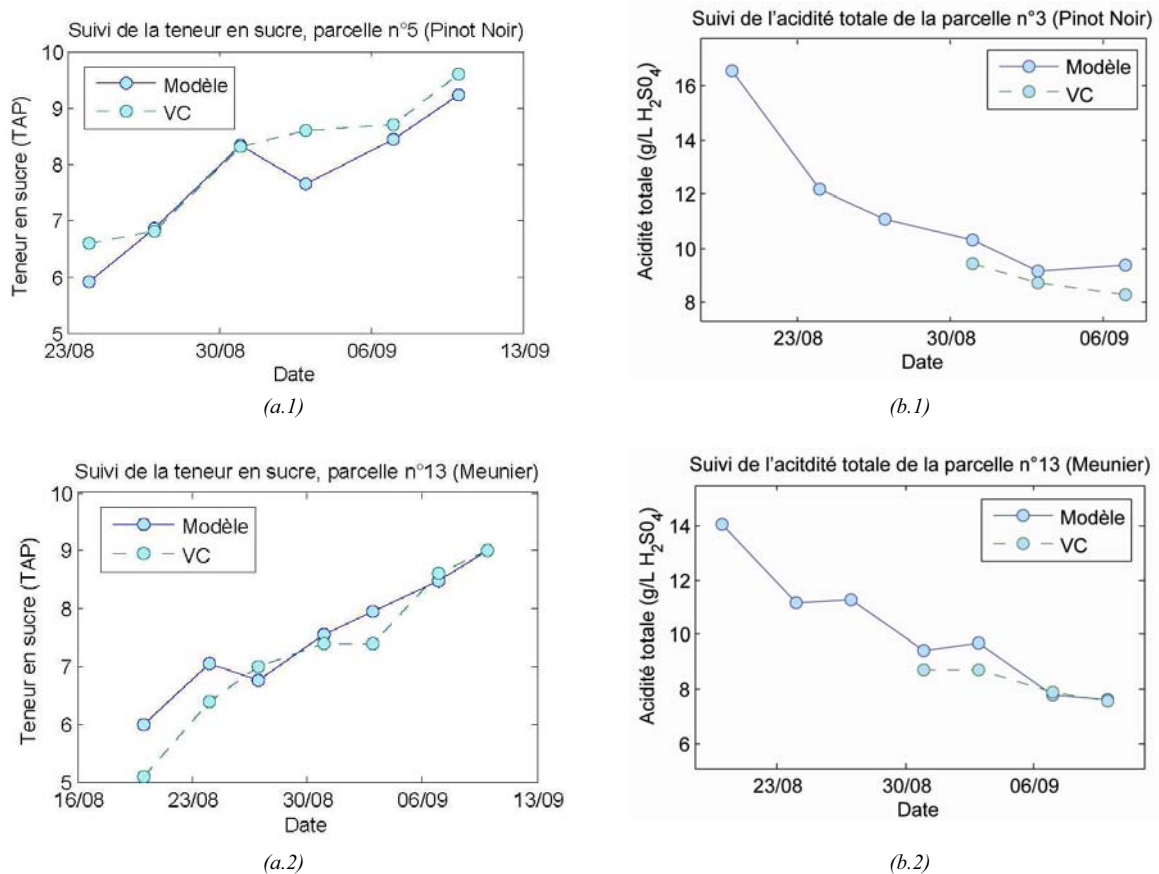


Figure 5 : Tests d'étalonnages pour les blancs. Valeurs prédites après validation croisée en fonction des valeurs réelles.
 a) teneur en sucre (CIVC) b) acidité totale (CIVC).

5. Application au suivi

En plus de cette phase d'étalonnage, des séries de mesures étaient réalisées dans les vignes. Entre 150 et 200 grappes étaient directement mesurées sur ceps (c.-à-d. non prélevées) en suivant le même chemin de suivi de maturité que celui du viticulteur. Cette autre base de données spectrales a permis de tester les modèles établis en confrontant les prédictions obtenues avec le SpectronTM aux analyses dites "classiques" faites par le viticulteur.

La figure 6 présente ces comparaisons pour le suivi de la teneur en sucre exprimée en taux d'alcool probable (TAP) ou en degré Brix et de l'acidité totale.



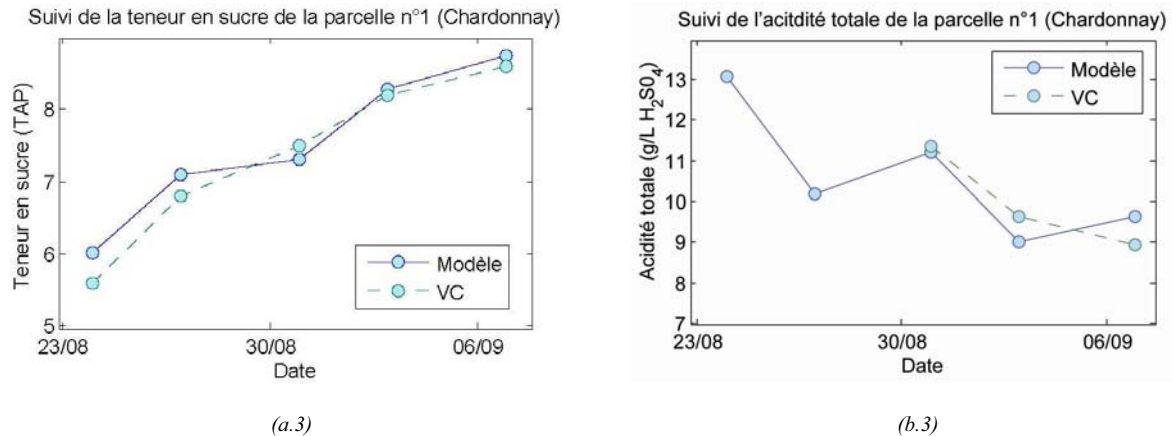


Figure 6 : Suivi de la teneur en sucre (a) et de l'acidité (b) sur du Pinot Noir, du Meunier et du Chardonnay (Moët & Chandon - 2009).
 Modèle : valeurs prédites. VC : valeurs chimiques de références.

6. Conclusion

Le SpectronTM est un spectrophotomètre portable capable de fournir des évaluations parcellaires du taux de sucre, de l'acidité totale, de la teneur en eau et de la concentration en anthocyanes. Il peut fournir un suivi temporel très fin de la parcelle pour ces quatre critères de maturité.

Il peut également fournir d'autres informations sur la parcelle. En effet, chaque mesure est enregistrée. Il est ainsi possible par la suite d'appréhender l'hétérogénéité de la parcelle en calculant la variance des mesures. En fonction de cette hétérogénéité et des critères prédéfinis par le viticulteur pour déclencher ses vendanges, une date optimale peut être fixée. Ces deux aspects permettent notamment d'approcher la qualité maximale de la parcelle et d'organiser le chantier de récolte au mieux.

De plus, chaque mesure est géo-référencée, il est donc possible d'établir une cartographie détaillée de la parcelle. En fonction des résultats, le viticulteur peut donc adapter la gestion de son parcellaire.

Enfin, grâce à son logiciel associé, le SpectronTM permet d'avoir une traçabilité complète et automatique des suivis maturité supprimant ainsi tout risque d'erreur de saisie.

Le projet SpectronTM a obtenu la médaille d'or du Palmarès de l'Innovation Sitevi 2009.

7. Remerciements

Les campagnes de mesures qui ont fourni les données utilisées pour ces travaux ont été menées au travers de différentes collaborations. Toute notre reconnaissance va donc à l'ensemble des personnes qui ont participé à l'obtention de ces données, particulièrement aux équipes de l'INRA de Pech-Rouge, de l'IFV, de Moët & Chandon et du Comité Interprofessionnel des Vins de Champagne. Nous tenons également à remercier l'ensemble de l'équipe de Pellenc Australia et des domaines Bremerton et The Lane pour l'accueil chaleureux qu'ils nous ont toujours réservé au cours des campagnes de mesures hémisphère sud.

8. Annexes

SEP : Standard Error of Prediction, ou erreur standard de prédiction, sur un ensemble de test définie comme :

$$SEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \text{ avec biais } \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \neq 0$$

où :

- y_i la valeur mesurée,
- \hat{y}_i la valeur prédite par le modèle,
- n le nombre de mesures.

SECV : Standard Error of Cross Validation, ou erreur standard de validation croisée, défini comme :

$$\text{SECV} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \text{ avec biais } \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} = 0$$

où :

- y_i la valeur mesurée,
- \hat{y}_i la valeur prédite par le modèle,
- n le nombre de mesures.

R² : coefficient de détermination. Il correspond au carré du coefficient de corrélation, R :

$$R^2 = \frac{\text{Cov}(\hat{y}_i, y_i)}{\sigma_{\hat{y}_i} \cdot \sigma_{y_i}}$$

où :

- $\text{Cov}(\hat{y}_i, y_i)$ la covariance des valeurs mesurées et prédites,
- σ_{y_i} l'écart-type des valeurs mesurées,
- $\sigma_{\hat{y}_i}$ l'écart-type des valeurs prédites par le modèle,

9. Bibliographie

- [1] B. L. Bishop, D. C. Ferree, J. F. Gallander, T. E. Steiner, D. M. Scurlock, and J. C. Schmid. Sources of variation in maturation soluble solids of three white grape cultivars. *Journal of the American Pomological Society*, 59(3) :153–160, 2005.
- [2] A. Carbonneau, P. Casteranp, and P. Leclair. Essai de détermination, en biologie de la plante entière, de relations essentielles entre la bioclimat naturel, la physiologie de la vigne et la composition du raisin. méthodologie et premiers résultats sur les systèmes de conduite. *Ann. Amélior. Plantes*, 28 :195–221, 1978.
- [3] A. Carbonneau, A. Deloire, and B. Jaillard. *La vigne. Physiologie, terroir, culture*. Dunod, 2007.
- [4] B. G. Coombe. Distribution of solutes within the developing grape berry in relation to its morphology. *American Journal of Enology and Viticulture*, 38 :120–127, 1987.
- [5] B. G. Coombe and M. G. McCarthy. Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6(2) :131–135, 2000.
- [6] D. Cozzolino, R. G. Damberg, L. Janik, W. U. Cynkar, and M. Gishen. Analysis of grapes and wine by near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 14(5) :279–289, 2006.
- [7] G. César. Rapport d'information sur l'avenir de la viticulture française. Technical report, Sénat, 2002.
- [8] A. Deloire, A. Carbonneau, Z. Wang, and H. Ojeda. Vine and water, a short review. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 37(4) :199–211, 2003.
- [9] J. Fernandez-Novales, M.-I. Lopez, M.-T. Sanchez, J. Morales, V. Gonzalez-Caballero, J. Fernandez-Novales, M.-I. Lopez, M.-T. Sanchez, J. Morales, and V. Gonzalez-Caballero. Shortwave-near infrared spectroscopy for determination of reducing sugar content during grape ripening, winemaking, and aging of white and red wines. *Food Research International*, 42(2) :285–291, 2009.
- [10] V. Geraudie, JM. Roger, JL Ferrandis, and JM. Gialis. A revolutionary device for predicting grape maturity based on nir-spectroscopy. In *Fruitic Chile 2009 - 8th International Symposium of Information for the Sustainable Production of Fruit and Vegetables, Nuts, Wines and Olives.*, 2009.
- [11] J. Herrera, A. Guesalaga, and E. Agosin. Shortwave-near infrared spectroscopy for non-destructive determination of maturity of wine grapes. *Measurement Science and Technology*, 14(5) :689–697, 2003.
- [12] C. Jaren, J. C. Ortuno, S. Arazuri, J. I. Arana, and M. C. Salvadores. Sugar determination in grapes using nir technology. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 22(10) :1521–1530, 2001.
- [13] M. Larrain, A. R. Guesalaga, and E. Agosin. A multipurpose portable instrument for determining ripeness in wine grapes using nir spectroscopy. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(2) :294–302, 2008.
- [14] M. Le Moigne, C. Maury, D. Bertrand, and F. Jourjon. Sensory and instrumental characterisation of cabernet franc grapes according to ripening stages and growing location. *Food Quality and Preference*, 19(2) :220–231, 2008.
- [15] D.L. Massart, B.G.M. Vandeginste, L.M.C. Buydens, S. De Jong, P.J. Lewi, and J. Smeyers-Verbeke. *Handbook of Chemometrics and Qualimetrics*, volume Part A. Elsevier, 1997.

- [16] P. Menesatti. In-field spectrophotometric measurement to estimate maturity stage of wine grapes. In Optics for Natural Resources, Agriculture, and Foods II, volume 6761, 2007.
- [17] B. M. Nicolai, K. Beullens, E. Bobelyn, A. Peirs, W. Saeys, K. I. Theron, and J. Lammertyn. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of nir spectroscopy : A review. *Postharvest Biology and Technology*, 46(2) :99–118, 2007.
- [18] H. Ojeda, C. Andray, E. Kraeva, A. Carbonneau, and A. Deloire. 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. Enol. Vitic.*, 53(4) :261–267, 2002.
- [19] K.B.Walsh, J.A. Guthrie, and J.W. Burney. Application of commercially available, low-cost, miniaturised nir spectrometers to the assessment of the sugar content of intact fruit. *Australian Journal of Plant Physiology*, 27(12) :1175–1186, 2000.