

Suivi temporel du statut hydrique et aide à l'irrigation de la vigne

Enjeux et possibilités offertes par la télédétection spatiale Exemple des vignobles de climat méditerranéens

Eve Laroche-Pinel^{1,2,3}, Sylvie Duthoit¹, Michel Le Page⁴, Said Khabba^{5,6}, Jacques Rousseau⁷, Guillaume Rieu¹, Jérôme Hourdel⁷, Véronique Cheret^{2,3}, Harold Clenet^{2,3}

¹ TerraNIS – Ramonville Saint-Agne – France. ² École d'ingénieurs de Purpan – Toulouse – France.

³ Univ. de Toulouse – INRAE – UMR DYNAFOR – Castanet-Tolosan – France. ⁴ CESBIO (UPS/CNRS/INRA/IRD/CNES) – Toulouse – France.

⁵ LMFE – Faculté des sciences Semlalia – Univ. Cadi Ayyad – Marrakech – Maroc. ⁶ Center for Remote Sensing Applications (CRSA), Mohammed VI Polytechnic Univ. – Benguerir – Maroc. ⁷ Groupe institut coopératif du vin – Montpellier – France.

La gestion du statut hydrique de la vigne, un enjeu de plus en plus fort pour la filière viticole

Contrairement à la majorité des cultures pérennes, la vigne est presque toujours cultivée en dessous de son potentiel de rendement maximal afin de garantir la qualité des raisins et donc du vin. Il se trouve que le paramètre influençant le plus la composition des baies de raisin est l'eau (Van Leeuwen et al., 2009). Ces besoins hydriques varient fortement selon différents paramètres (figure 1) : la période végétative (Gary et al., 2005; Ramos et al., 2020; Zufferey et al., 2020), le type de vin souhaité (Ojeda et Saurin, 2014) ou l'âge de la vigne (Bou Nader et al., 2019).

Le climat méditerranéen était, jusqu'à la fin des années 90, un des plus favorables à la culture de la vigne avec des hivers humides et des étés chauds. Cependant, depuis les années 2000, on remarque une augmentation des épisodes de sécheresse et une raréfaction de la ressource en eau pendant le cycle végétatif de la vigne, entraînant un déficit hydrique quasi permanent (Saurin, et al., 2014).

Cette évolution du climat impacte grandement la production de vin en influençant le développement de la plante et la composition des baies (figure 2), et en modifiant l'avancement des stades de développement de la vigne (Quénol et al., 2017), ce qui décale la phase de maturation pendant des périodes encore plus chaudes (Payan, 2007; Van Leeuwen et Darriet, 2016). Ceci modifie la composition des baies en augmentant la concentration en sucre et donc en augmentant le

degré alcoolique des vins produits (Bernardo, et al., 2018; Costa et al., 2016). De plus, on assiste à une baisse des rendements, d'autant plus préoccupante dans les régions méditerranéennes que les rendements y sont déjà parmi les plus faibles de France (Boutin et Payan, 2012).

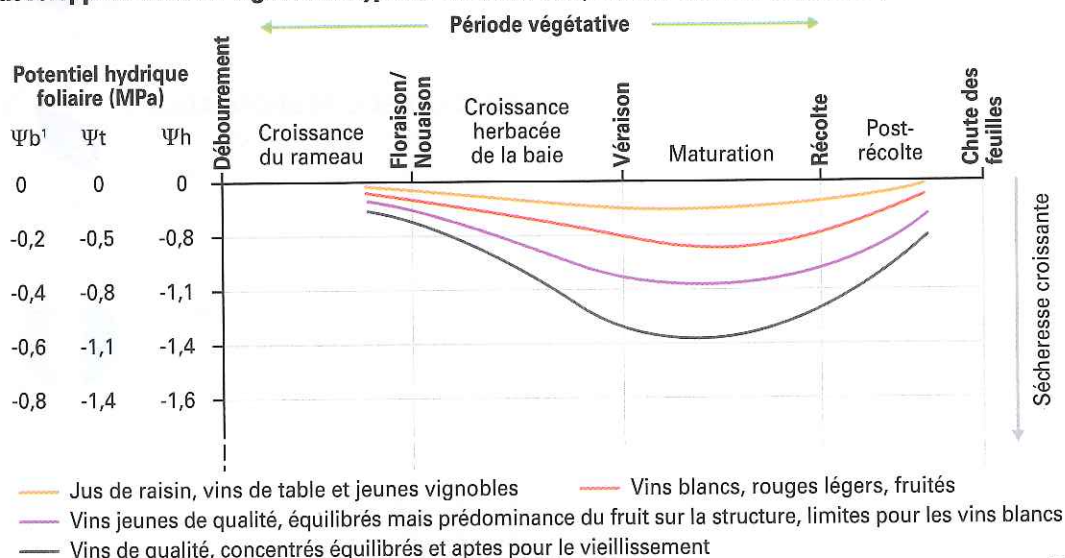
Réponses actuelles de la filière

Plusieurs méthodes de mesure *in situ* sont généralement utilisées en viticulture pour qualifier le statut hydrique de la vigne. La plus simple en termes de mise en œuvre est la méthode des apex qui consiste à mesurer un indice d'arrêt de croissance des apex des rameaux principaux (Salva, 2016). Cette méthode ne nécessite aucun matériel en particulier et a l'avantage de ne

pas être destructive, mais elle n'est plus utilisable après un écimage et ne permet pas une mesure très précise. Trois autres méthodes permettent de mesurer le statut hydrique de la plante de manière beaucoup plus précise mais nécessitent du matériel spécifique et du temps non négligeable de mise en œuvre : mesure du potentiel foliaire hydrique (Payan, 2007; Salva, 2016; Scholander et al., 1965), du flux de sève (Sakuratani, 1981) ou de la conductance stomatique (Simonneau et al., 2014). Il est cependant difficile, voire impossible avec ces méthodes d'établir une représentation de la variabilité spatiale et temporelle du statut hydrique à l'échelle d'un domaine ou d'un territoire.

Une fois la contrainte hydrique évaluée, plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre afin de la contrôler, et de limiter l'impact du stress hydrique sur les récoltes et les vins produits. L'irrigation permet de compenser les manques de pluie (Gaudin et Gary, 2012). En Europe, moins de 10 % des vignobles sont irrigués, mais ce chiffre tend à augmenter, notamment dans les régions méditerranéennes en France, en Espagne, au Portugal et en Italie (Costa et al., 2016). Pour autant, le recours à l'apport d'eau doit être réellement maîtrisé pour faire face aux enjeux environnementaux, œnologiques, économiques et réglementaires qui en découlent (Salva, 2016). L'objectif est d'arriver à une contrainte optimale (figure 2).

■ Figure 1 : Modèle de stratégies de contrôle de l'état hydrique de la vigne selon le stade de développement de la vigne et le type de vin futur (adapté selon Ojeda et Saurin, 2014).

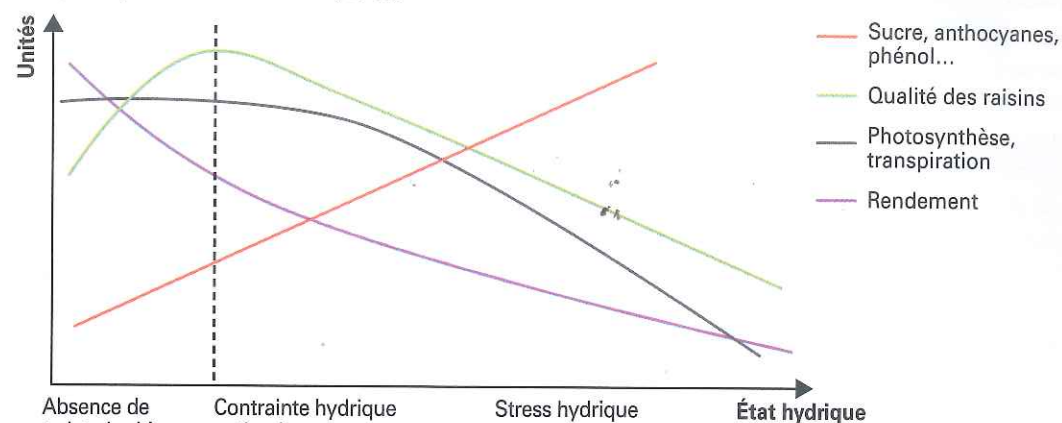


D'autres pratiques peuvent être mises en place pour limiter l'impact du stress hydrique: la gestion de l'enherbement et du travail du sol pour réduire la compétition avec d'autres espèces, l'amélioration de la retenue de l'eau par le sol, la taille des vignes et la gestion de la canopée pour limiter l'exposition des grappes au soleil, par exemple (Bernardo et al., 2018) ou l'avancement des vendanges pour limiter l'augmentation du degré d'alcool du vin (Costa et al., 2016). Enfin, des décisions à plus long terme peuvent également être adoptées avant même la plantation de nouvelles vignes (densité de plantation, orientation des rangs, choix des porte-greffe et des cépages) (Bernardo et al., 2018).

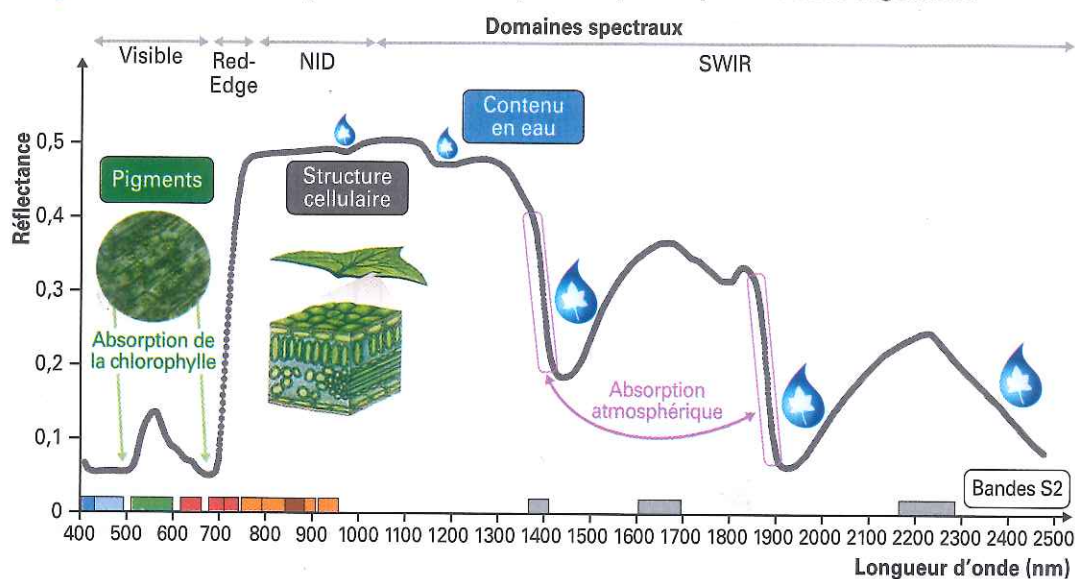
Les possibilités offertes par la télédétection et la modélisation pour le suivi du statut hydrique et l'aide à l'irrigation de la vigne

Le principe de la télédétection est la mesure des caractéristiques optiques d'un objet par un capteur. Ces caractéristiques étant impactées par les propriétés intrinsèques de l'objet en question (composition, structure...). Trois paramètres caractérisent les capteurs. Le premier est leur résolution spatiale, autrement dit la taille du plus petit objet visible. Le deuxième paramètre est la résolution temporelle, c'est-à-dire le temps de revisite entre deux images. C'est un paramètre important à prendre en compte quand on parle de suivi de la végétation puisqu'il faut pouvoir avoir des données régulièrement. Le dernier paramètre à prendre en compte est la résolution spectrale, autrement dit les longueurs d'onde dans lesquelles les réflectances vont être mesurées. On parle de capteur hyperspectral lorsque plus d'une centaine de bandes étroites (d'un à quelques nanomètres) sont mesurées à

■ **Figure 2: Impact du statut hydrique de la vigne sur son fonctionnement** (adapté selon Ojeda et Saurin, 2014; Van Leeuwen et Vivin, 2008).



■ **Figure 3: Illustration des paramètres influençant la réponse spectrale de la végétation.**



intervalles réguliers. La **figure 3** présente un exemple de signal hyperspectral avec des mesures tous les 1 nm du visible (400 nm) à la fin du SWIR (2500 nm). Ce type de mesure est pour l'instant très lourd à mettre en place et très coûteux. À l'inverse, les capteurs multispectraux ne mesurent les réflectances que dans certaines bandes données mais sont beaucoup plus abordables. Un exemple de signal multispectral, celui du satellite Sentinel-2 mesurant les réflectances dans 13 bandes spectrales est illustré dans la **figure 3**. La **figure 3** illustre également les paramètres influençant la réponse spectrale de la végétation dans les différents domaines spectraux. L'observation de la terre par satellite s'est considérablement intensifiée ces dernières années et

cette tendance se poursuivra très probablement durant les prochaines décennies. Les données fournies par des constellations publiques (par exemple, le programme européen Copernicus) ou privées (par exemple, la constellation de nanosatellites de Planet) fournissent aujourd'hui des données de haute résolution spatiale à des fréquences qui vont de la journée à la semaine. En agriculture, on va privilégier des données multispectrales dites de très haute résolution spatiale (0,5 à 1 m) jusqu'à la haute résolution spatiale (< 30 m) avec une fréquence d'observation de 5 à 10 jours. Les programmes d'observation dits « opérationnels » comme Landsat (USGS) et Sentinel (ESA) fournissent gratuitement des données prêtes à l'usage, c'est-à-dire avec un positionnement très précis du pixel et les corrections dues aux perturbations atmosphériques qui permettent de travailler sur des séries temporelles cohérentes. Sentinel-2, avec ses images en libre accès, combiné à sa résolution spectrale 13 bandes dans les régions du visible (VIS) à l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) temporelle (5 jours de revisite avec les deux satellites A et B) et spatiale (10 m à 20 m) est un outil particulièrement intéressant pour de nombreuses applications en agriculture. Les bandes spectrales des images peuvent être utilisées directement ou après calcul d'indices de végétation pour estimer la teneur en eau des plantes ou son impact sur la structure cellulaire ou la concentration en pigments des feuilles (chlorophylle, anthocyanes...). Concernant la vigne, de récentes études ont porté sur l'impact des vagues de

chaleur sur les vignobles irrigués (Cogato et al., 2019) ou leur état hydrique via l'estimation du coefficient de culture (Rozenstein et al., 2018). Une publication récente montre des corrélations intéressantes entre le potentiel hydrique des tiges et les images Sentinel-2 (Cohen et al., 2019). Ce genre d'étude a mis en avant le potentiel intérêt de ce type d'imagerie pour suivre le statut hydrique sur de grands territoires avec une très bonne fréquence temporelle, ce qui pourrait être d'un réel intérêt pour la filière pour, par exemple, prioriser les parcelles à irriguer, légitimer les demandes d'autorisation d'irrigation auprès de l'INAO, identifier les zones qui doivent mettre en place des solutions à long terme selon les évolutions sur les différents millésimes, vérifier la bonne gestion globale de l'eau au niveau d'un domaine ou d'une appellation, adapter le parcours hydrique de parcelles en fonction du produit final souhaité, etc. Cependant, une résolution spatiale de 10 m ne peut pas permettre de distinguer le rang de vigne de l'interrang ce qui peut être une contrainte, notamment dans les vignobles enherbés. Il sera alors nécessaire de contrôler également la vigueur de la vigne.

L'utilisation de modèles agrométéorologiques associée à l'utilisation d'image satellite, constitue une autre méthode pour estimer le statut hydrique des plantes de manière plus fine et à une fréquence journalière, ce qui permet d'aider à la gestion de l'irrigation au niveau intraparcélaire. Cette modélisation est potentiellement capable de fournir des informations sur le moment, l'endroit et la quantité d'eau à appliquer sur le vignoble afin d'optimiser les apports d'eau.

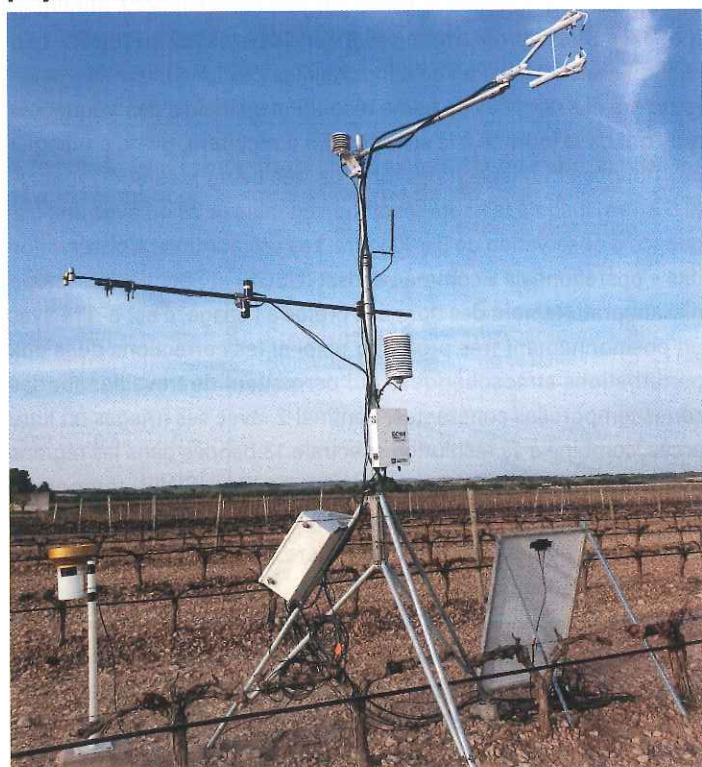
Recherche en cours, premiers résultats et services envisagés

Un projet de thèse CIFRE (entreprise TerraNIS/laboratoire Dynafor-INRAE Purpan), en partenariat étroit avec le groupe ICV, a été mis en place en 2018 pour arriver à construire et mettre en place un service opérationnel de suivi du statut hydrique de la vigne à grande échelle

et à moindre coût. Dans un premier temps, il fallait comprendre comment s'expriment les symptômes du stress hydrique sur la végétation, et caractériser les gammes de longueurs d'onde où des modifications spectrales peuvent être observées à l'aide de mesures hyperspectrales (Laroche-Pinel et al., 2021). Par la suite, il était nécessaire de vérifier si les réponses apportées par ces mesures étaient transposables aux mesures acquises par les capteurs des satellites actuellement en service et notamment Sentinel-2, dont les caractéristiques (gratuité des images et résolution spatiale, spectrale et temporelle) en font un outil particulièrement adapté à l'observation de la végétation et à la mise en place d'un service opérationnel. Ce travail s'est appuyé sur des jeux de données uniques, combinant à la fois mesures *in situ* du statut hydrique, grâce au potentiel de tige (sur 3 ans dans 36 parcelles, de juin à septembre), et observations multispectrales et hyperspectrales. Cette étude a fait ressortir le domaine SWIR pour accéder

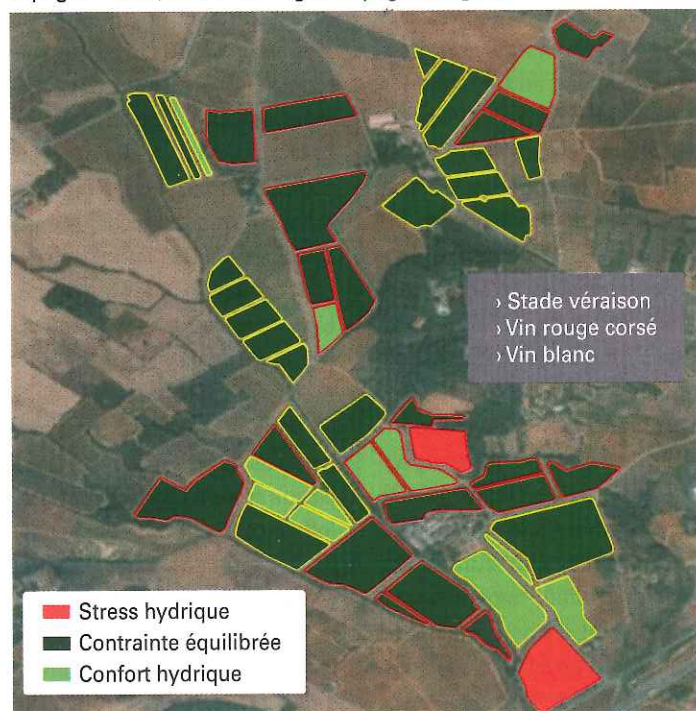
au contenu en eau des feuilles, mais a également permis de confirmer l'utilité des bandes Red-Edge et NIR comme révélatrices de l'impact du contenu en eau sur la structure de la feuille et sur son contenu en chlorophylle. Un modèle prometteur de prédiction du statut hydrique de la vigne a été mis en place (Laroche-Pinel et al., 2021). Ce modèle a pu être testé en 2020 sur des parcelles de 5 domaines viticoles du sud de la France avec de nombreux échanges réguliers avec les viticulteurs pour vérifier la cohérence des résultats au niveau spatial mais également temporel. Ces premiers retours sont plus qu'encourageants pour la mise en place d'un outil de suivi spatial et temporel du statut hydrique de la vigne à partir des images Sentinel-2. Les derniers tests sont en cours pour intégrer le modèle dans une plateforme de traitement automatique et de distribution de données en ligne au sein de l'entreprise partenaire (TerraNIS). Une première phase de distribution préopérationnelle du service est prévue pour l'été 2021. Un exemple de carte

■ **Photo 1 : Dispositif de mesure des flux énergétiques et du contenu en eau du sol installé en Espagne, dans le cadre du projet WineEO.**



© MICHEL LE PAGE

■ **Figure 4 : Carte de prédiction du stress hydrique issue du modèle développé pour le 26 juillet 2020 sur un domaine pilote. Classement en trois grandes catégories selon le stade de développement de la vigne et le type de vin souhaité (contours jaunes: cépages blancs, contours rouges: cépages rouges).**



■ Photos 2: Près de 600 mesures de chambre à pression entre 2018 et 2020 ont permis de caler le modèle de prédiction du statut hydrique avec S2.



© E. E. LAROCHE PINEL

distribuée sur un domaine pilote est présenté dans la **figure 4**. En parallèle, un outil d'aide au pilotage de l'irrigation des grandes cultures WAGO a été développé dans le cadre d'un partenariat franco-marocain (CESBIO, UCAM). Cet outil est basé sur la méthode FAO-56 dual crop (Allen et al., 1998) et la relation entre l'indice de végétation NDVI, le coefficient cultural de base (Kcb) et la couverture du sol par la végétation (Le Page et al., 2014). Cet outil n'est pas encore adapté à la vigne, caractérisé par une faible densité de couverture et une grande variabilité de la géométrie liée aux techniques de gestion. Dans le cadre du projet WineEO financé par l'Agence spatiale européenne (ESA), l'objectif de TerraNIS et du CESBIO est d'adapter le modèle de bilan hydrique utilisé dans WAGO aux spécificités de la vigne en prenant en compte (1) la notion de rang et d'interrang et (2) la diversité des pratiques culturales (destruction de l'enherbement, rognage, etc.). Plusieurs sources de données spatiales seront testées (Sentinel-2, Spot 6-7, Pléiades) afin d'évaluer la capacité de chaque capteur à caractériser la végétation du rang et de l'interrang. L'objectif est de pouvoir estimer avec précision les coefficients culturaux et la couverture du sol à utiliser dans le modèle. Un dispositif expérimental a été déployé en 2021 sur plusieurs parcelles (Chili, Portugal, Italie, Espagne) afin de mesurer

le NDVI et l'humidité du sol sur le rang et l'interrang ainsi que les flux d'évapotranspiration et de carbone sur la parcelle. Ces données permettront de calibrer et de valider le modèle développé dans le cadre du projet. À terme, l'outil permettra d'estimer le déficit hydrique de la culture en comparant quotidiennement les flux d'eau entrants (pluviométrie et irrigation) et sortants (évapotranspiration du rang et de l'interrang). Le pilotage de l'irrigation (date et quantité des apports en eau) ou l'adaptation des pratiques culturales (destruction de l'enherbement) se fera lorsque le déficit hydrique dépassera un seuil critique (impact sur la quantité et la qualité du vin). Les deux approches permettent d'envisager deux types de services complémentaires. L'un adapté à une évaluation rapide, à grande échelle et à moindre coût du statut hydrique des vignobles afin de faciliter les réflexions sur les adaptations des pratiques culturales ou d'apporter une aide au ciblage de l'irrigation dans les zones concernées. L'autre permet de piloter l'irrigation et les pratiques culturales de manière plus fine en cours de campagne en estimant le niveau de déficit hydrique de la culture et en apportant au viticulteur des recommandations sur l'irrigation. ■

NDLR: Les références bibliographiques concernant cet article sont disponibles sur le site internet de la Revue des Œnologues : search.oeno.tm.fr

INVISIBLE SENTINEL®



DÉTECTEZ LES FLORES D'ALTÉRATION
PRÉSERVEZ LA VALEUR VOTRE VIN



BIOMERIEUX, leader mondial de la microbiologie en sécurité alimentaire dispose aujourd'hui de solutions pour les professionnels de la vinification.

Découvrez notre solution
VERIFLOW® pour la détection de
Brettanomyces bruxellencis

⊙ Résultats rapides
< 4 heures

⊙ Sensibilité / Précision
< 10 cellules/mL

⊙ Simplicité
Mise en oeuvre facile

PIONEERING DIAGNOSTICS

www.biomerieux-industry.com
contact-industry@biomerieux.com