

STRATEGIES DE PILOTAGE DE L'IRRIGATION DE LA VIGNE : COMPARAISON ENTRE LA MESURE DIRECTE ET LA MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme
D'ingénieur agronome

Spécialisation Production végétale Durable

David Berg
Septembre 2018



Mémoire de fin d'études

présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome
Spécialité : Production Végétale Durable

**Stratégies de pilotage de l'irrigation de la vigne : comparaison
entre la mesure directe et la modélisation du bilan hydrique**



par David BERG

Année de soutenance : 2018

Organisme d'accueil :

Advini
L'Enclos
34725 Saint-Félix-de-Lodez

ADVINI
DES VIGNOBLES & DES HOMMES

Mémoire de fin d'études

présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome
Spécialité : Production Végétale Durable

Stratégies de pilotage de l'irrigation de la vigne : comparaison entre la mesure directe et la modélisation du bilan hydrique



par David BERG

Année de soutenance : 2018

Mémoire préparé sous la direction de :

Hélène Marrou

Présenté le : 02/10/2018

devant le jury :

Rémi Gaudin

Aurélie Metay

Organisme d'accueil : Advini

Maître de stage : Gilles Gally

RESUME

La filière viticole du Languedoc-Roussillon fait face aux conséquences du réchauffement climatique depuis ces 20 dernières années. Les deux dernières années ont été des années particulièrement sèches avec des conséquences importantes sur les rendements. Pour s'adapter à cette contrainte, de plus en plus de viticulteurs ont recours à l'irrigation de la vigne qui permet d'améliorer à la fois le rendement et la qualité du raisin. La société AdVini souhaite améliorer l'utilisation de l'irrigation sur ses différents domaines, ce qui peut se faire en optimisant le pilotage de l'irrigation de la vigne.

Deux approches de pilotage de l'irrigation par la mesure directe de l'état hydrique de la vigne ont été testées, avec d'une part des mesures de tensiomètre en utilisant des sondes Watermark, et d'autre part en mesurant le potentiel hydrique foliaire de base avec une chambre à pression.

Après avoir réalisé une recherche bibliographique sur les modèles de bilan hydrique existant pour la vigne, l'un des modèles a été reproduit puis testé sur différentes parcelles pour évaluer l'efficacité du pilotage de l'irrigation par la modélisation.

L'analyse des résultats montre que l'utilisation de sondes Watermark est intéressante pour repérer la date de déclenchement de l'irrigation, mais la sonde ne permet pas un pilotage très précis pour la vigne. Les sondes étant enfouies à une profondeur maximale de 60cm, elles ne permettent pas de caractériser l'état hydrique du sol et donc du réseau racinaire au-delà de cette profondeur.

L'une des sorties du modèle est l'évolution du potentiel hydrique foliaire de base qui est reconnu comme un bon indicateur de l'état hydrique de la vigne. Les mesures de potentiel hydrique au champ et les valeurs de potentiel hydrique simulées par le modèle ont été comparées. L'évaluation du modèle a montré que la modélisation fonctionne bien. Certaines valeurs mesurées s'écartent beaucoup des prédictions du modèle et il sera pertinent de vérifier si cet écart provient d'une erreur de mesure ou bien d'une sous-estimation du modèle.

Le travail réalisé montre que la mesure directe au champ et la modélisation du bilan hydrique sont deux approches qui fonctionnent bien et qui sont complémentaires. A l'aide de ces outils il est possible de piloter l'irrigation avec une précision suffisante pour améliorer le rendement et la qualité de la production.

Mots clés

Vigne, irrigation, modélisation, sondes watermark, chambre à pression, bilan hydrique

Pour citer ce document : Berg, David, 2018. Stratégies de pilotage de l'irrigation de la vigne : comparaison entre la mesure directe et la modélisation du bilan hydrique. Mémoire d'ingénieur, diplôme ingénieur agronome, option production végétale durable, Montpellier SupAgro. 70 pages.

ABSTRACT

Strategies for managing vine irrigation: comparison between direct measurement and water balance modelling

The Languedoc-Roussillon wine sector has been facing the consequences of global warming for the past 20 years. The last two years have been particularly dry with significant consequences on yields. To adapt to this constraint, more and more winegrowers are resorting to vine irrigation, which makes it possible to improve both the yield and the quality of the grapes. AdVini wishes to improve the use of irrigation on its various vineyard, which can be done by optimizing the management of vine irrigation.

Two approaches to controlling irrigation by directly measuring the water status of the vine were tested with tensiometer measurements using Watermark probes and by measuring the basic foliar water potential with a pressure chamber.

After carrying out a bibliographical research on existing water balance models for vines, one of the models was reproduced and then tested on different plots to evaluate the effectiveness of irrigation management through modelling.

The analysis of the results shows that the use of Watermark probes is interesting to identify the date when irrigation starts, but the probe does not allow very precise control for the vine. Since the probes are buried at a maximum depth of 60cm, they do not make it possible to characterize the water status of the soil and therefore of the root system beyond this depth.

One of the outputs of the model is the evolution of the basic foliar water potential, which is recognized as a good indicator of the vine's water status. The field water potential measurements and the water potential values simulated by the model were compared. The model evaluation showed that the modelling works well. Some measured values differ significantly from the model predictions and it will be relevant to check whether this difference is due to a measurement error or an underestimation of the model.

The work carried out shows that direct field measurement and water balance modelling are two approaches that work well and are complementary. With the help of these tools, it is possible to control irrigation with sufficient precision to improve the yield and quality of production.

Key words

Vine, irrigation, modelling, watermark probes, pressure chamber, water balance

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier Gilles Gally et Jean Cucchi Giovanni qui ont pris le temps de m'accompagner du premier au dernier jour de ce stage. C'était très agréable de vous côtoyer pendant ces 6 mois avec cet esprit d'équipe. Merci pour votre disponibilité, la qualité de votre encadrement, et tous les échanges que nous avons pu avoir qui ont fait avancer notre problématique et ont surtout permis de rendre cette étude intéressante. Vous étiez présents tout en me laissant une grande autonomie, ceci m'a beaucoup appris sur mes capacités à travailler dans ces conditions.

Un grand merci aussi à Hélène Marrou pour m'avoir grandement aidé dans la rédaction de ce mémoire à travers ses conseils, ses relectures et ses corrections. Merci d'avoir été disponible tout au long du stage et en particulier pour l'aide apportée à l'approche de la soutenance.

Mes remerciements s'adressent également au reste de l'équipe que j'ai pu côtoyer dans les bureaux d'AdVini, Corinne, Loïc, Brigitte, Chantal. Merci pour votre accueil et votre présence.

Enfin je voudrais remercier l'ensemble des responsables des vignobles pour m'avoir permis d'accéder librement aux différents domaines pour faire mes mesures et pour les différents échanges que nous avons pu avoir à cette occasion. Merci en particulier à Guillaume, Léa, et surtout Damien qui a trouvé le temps de passer nous voir au bureau pour discuter de l'avancée des projets.

Merci à Paul Hublart et François Colin qui ont pu m'aiguiller au début du stage, qui ont apporté leur aide et m'ont invité à travailler davantage avec eux lorsque cela était pertinent pour le stage.

TABLE DES MATIERES

1	Introduction.....	13
1.1	L'effet de la contrainte hydrique sur la production d'un raisin de qualité	13
1.1.1	Effet du déficit hydrique sur le développement végétatif	13
1.1.2	Effet du déficit hydrique sur la qualité du raisin	14
1.1.3	Trajectoire hydrique souhaitée	16
1.2	Différentes techniques d'irrigation et outils de mesure ou d'évaluation de l'état hydrique	19
1.2.1	Les différents outils existant pour mesurer directement l'état hydrique du vignoble .	19
1.2.2	Méthodes basées sur des indicateurs au niveau de la plante.....	20
1.3	Synthèse de quelques modèles existants pour simuler le bilan hydrique de la vigne.....	22
1.4	Cadre de contrainte des domaines	27
1.5	Problématique de stage	27
2	Matériel et méthode	28
2.1	Mesures au champ	28
2.1.1	Description du site expérimental	29
2.1.2	Mesures tensiométriques du sol avec les sondes Watermark.....	30
2.1.3	Mesures de potentiel hydrique foliaire en continu.....	31
2.2	Modélisation.....	32
2.2.1	Les sources du modèle mis au point	33
2.2.2	Les principaux formalismes du modèle.....	34
2.2.3	Le paramétrage du modèle pour les parcelles 5, 13, 16 et 17.....	38
2.2.4	Evaluation du modèle.....	40
3	Résultats.....	42
3.1	Analyse des mesures effectuées par mesure directe.....	42
3.1.1	Observation de l'échantillon de données.....	42
3.1.2	Analyse de la relation entre les mesures de sondes et les mesures de chambre à pression	44
3.2	Résultats d'évaluation du modèle.....	46
	Discussion.....	52
3.3	Discussion des résultats	52
3.3.1	Exploitation des mesures	52
3.3.2	Performances du modèle	54
3.4	Discussion de la méthode.....	54
3.5	Discussion des perspectives	55

4	Conclusion	57
5	Références bibliographiques	59
6	Annexes	63
ANNEXE 1 : Présentation des relevés de potentiel hydrique foliaire de base et du parcellaire des exploitations avec en rouge les parcelles étudiées.....		63

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Concentration en anthocyanes en fonction du potentiel hydrique de tige à maturité. (Van Leeuwen et al. 2003)	15
Figure 2: Corrélation entre potentiel hydrique de tige à maturité et concentration en sucres réducteurs (Van Leeuwen et al. 2003).....	16
Figure 3: Influence de l'état hydrique sur les paramètres qualitatifs, quantitatifs et physiologiques du vignoble. (Ojeda and Saurin 2014).....	17
Figure 4 : relation entre potentiel hydrique de feuille et potentiel matriciel de sol pour deux parcelles différentes. (Centeno et al. 2010).....	18
Figure 5 : Différentes stratégies d'irrigation possibles pour contrôler l'état hydrique du vignoble en fonction de la période végétative et du type de produit recherché.....	18
Figure 6 : Traitement par logiciel de mesures de résistivité avec mise en évidence d'activité racinaire (BARBEAU 2006).....	20
Figure 7 : Localisation sur Google Earth des différents domaines étudiés.....	29
Figure 8 : dynamique du potentiel hydrique foliaire de base en fonction de l'heure solaire pour une modalité irriguée (S0) et une autre non irriguée (S2). (Carbonneau et al. 2004)....	32
Figure 9 : Les rayonnements pris en compte dans le modèle (construit à partir des informations sur le modèle de Riou).....	36
Figure 10 : Les principales composantes du bilan hydrique dans le modèle	37
Figure 11 : Fraction de la FTSW en fonction du potentiel hydrique foliaire (E Lebon et al. 2003).....	38
Figure 12 : Potentiel matriciel de sol à 30 et 60cm de profondeur sur l'ensemble des parcelles	42
Figure 13 : Ensemble des mesures de potentiel hydrique de base pour différentes parcelles	43
Figure 14 : Distribution de l'ensemble des mesures de sondes tensiométrique au cours de la saison aux profondeurs 30cm et 60cm	44
Figure 15 : Relation linéaire entre les mesures de sondes et les mesures de potentiel hydrique foliaire pour les parcelles 13 et 14. Pvalue : $1*10^{-6}$ R-squared : 0.86	45
Figure 16 : sorties du modèle pour la parcelle 13	46
Figure 17 : simulation de la FTSW pour la parcelle 5.....	47
Figure 18 : sorties du modèle pour la parcelle 5	48
Figure 19 : sorties du modèle pour la parcelle 16	49
Figure 20 : sorties du modèle pour la parcelle 17	50
Figure 21 : Vérification de l'effet de la pente sur une parcelle avec une pente de 7%.....	51

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des principaux systèmes d’irrigation de la vigne (source : IFV).....	19
Tableau 2 : Liste des méthodes de mesure de l’état hydrique principalement utilisées en viticulture	22
Tableau 3 : comparaison entre différents modèles à réservoirs issus de la bibliographie	23
Tableau 4 : Référencement des différentes parcelles équipées de sondes Watermark en fonction de leur localisation.....	29
Tableau 5 : Seuils préconisés d’irrigation pour les sondes Watermark en fonction du type de sol (Irmak et al. 2016).....	31
Tableau 6 : paramétrage initial du modèle pour les différentes parcelles.	39
Tableau 7 : Données pour les parcelles qui ont été modélisées	39
Tableau 8 : sensibilité du modèle aux différentes entrées météorologiques et aux différents paramètres	40
Tableau 9 : régression linéaire sur l’ensemble des parcelles aux deux profondeurs.....	44
Tableau 10 : relations linéaires entre potentiel matriciel de sol à 30cm et potentiel hydrique foliaire de base sur 13 parcelles différentes	45
Tableau 11 : évaluation des sorties du modèle pour la parcelle 13	47
Tableau 12 : évaluation des sorties du modèle pour la parcelle 5	48
Tableau 13 : évaluation des sorties du modèle pour la parcelle 16.....	49
Tableau 14 : évaluation des sorties du modèle pour la parcelle 17.....	50
Tableau 15 : Exemple de relevés indiquant un horizon superficiel sec sans conséquences pour la vigne.....	53

Avant-propos

Depuis plusieurs années le réchauffement climatique commence à causer des dégâts économiques en viticulture, avec des années très sèches au rendement faible, ce qui oblige les agriculteurs à s'adapter. Ce réchauffement est aujourd'hui largement mis en évidence à l'échelle mondiale (IPCC 2014), ces 15 dernières années ont été particulièrement sèches dans le Languedoc-Roussillon (Lelièvre et al. 2011). Ce stage de fin d'études portera sur le pilotage de l'irrigation de la vigne en région méditerranéenne et plus particulièrement au sein de la société AdVini. La vigne est une culture qui a des besoins en eau faibles, de l'ordre de 400mm par an, et le recours à l'irrigation pour cette culture est discutable, d'autant plus que la ressource en eau dans la région est faible. Toutefois la vigne a une importance majeure pour l'agriculture et l'économie régionales, et l'usage de l'irrigation pourrait permettre d'augmenter la qualité et le rendement. C'est dans ce contexte que la société AdVini a décidé d'améliorer l'usage de l'irrigation sur ses différents domaines en étudiant précisément la question et en développant des outils d'aide à la décision.

AdVini est une structure qui a deux activités principales : les « Produits de Service » sont les vins issus de l'activité de négoce, et les « Marques et Maisons de Vins » constituent l'activité de vigneron vinificateurs du groupe, qui exploite 2 300 hectares d'AOP et d'IGP en France et en Afrique du Sud. Mon stage est rattaché à cette dernière activité. Son siège social est situé à Saint-Félix-de-Lodez (Hérault), où la maison mère, Jeanjean, a vu le jour en 1870. Le groupe est le leader français des vins de terroir, et réalise un chiffre d'affaires annuel de 250 millions d'euros. L'entreprise est organisée par entités, appelées « Maisons », qui ont un ancrage fort dans leur bassin de production. Ainsi, j'ai pu travailler directement pour les maisons Vignobles Jeanjean et Laroche en Languedoc, et pour Gassier, en Provence. J'ai également été en contact avec la maison Cazes, en Roussillon. Je n'ai travaillé que sur certains vignobles, choisis pour leur variabilité parmi ceux que l'entreprise gère : ces quatre maisons exploitent 630 hectares de vignes, sur 13 domaines et 21 appellations et crus. Ces maisons, situées sur l'arc méditerranéen, sont les plus concernées par le changement climatique et par la thématique de l'irrigation.

Glossaire

Indicateur : un indicateur est une variable délivrant une information suffisante pour répondre à une question ou prendre une décision sur un système complexe. Il indique un aspect du système (état, flux, niveau d'un service ou d'un impact...) (Wery et al. 2012).

Contrainte hydrique modérée : elle est définie comme la plage du régime hydrique causant des perturbations du fonctionnement physiologique de la vigne allant du ralentissement de la vitesse de croissance des rameaux au dessèchement de quelques feuilles de la base des rameaux (Choné et al. 2001). Le premier signe visible d'une contrainte hydrique modérée est l'arrêt de croissance des rameaux primaires et secondaires.

Stress hydrique : l'expression « stress hydrique » dans le contexte de la viticulture est réservée à des situations où un manque d'eau excessif altère la qualité du raisin ou met en péril la pérennité de la vigne.

Sigles et acronymes

ETP : évapotranspiration Potentielle

ETO : évapotranspiration de référence

ETM : évapotranspiration maximale

Ψ_b : potentiel hydrique foliaire de base

Kc : coefficient cultural

Rgv : radiation globale absorbée par la canopée

Rg : radiation globale incidente

LAI : indice de surface foliaire

RIE : efficacité d'interception du rayonnement lumineux

FTSW : fraction de l'eau disponible qui est transpirable par la plante

REW : quantité totale d'eau évaporable

ATSW : quantité d'eau transpirable par la plante à un moment donné

WUE : efficacité d'utilisation de l'eau

1 Introduction

Dans le Languedoc-Roussillon, la fréquence des années à forte sécheresse et les températures moyennes sont en augmentation significative depuis 1950, comme l'indiquent différents rapports (Lelièvre et al. 2011)(Tondut et al. 2006). On observe une augmentation de 0,5°C/décennie, qui est accompagnée d'une hausse progressive de la demande climatique visible par la hausse de l'évapotranspiration maximale (ETM) de la vigne, qui représente les sorties d'eau du système par évaporation et transpiration en conditions hydriques non limitantes. De 1979 à 2008 l'ETO a augmenté de 73mm/décennie dans les plaines du Sud de la France et de 40mm/décennie sur les plateaux (Lelièvre et al. 2010). Les besoins en irrigation des cinq dernières années ont été au-dessus de la moyenne (BRL 2017b), les sécheresses de 2016 et de 2017 ont causé d'importantes pertes de rendement en viticulture.

Le viticulteur peut agir sur le régime hydrique à travers le choix du matériel végétal (cépage et porte-greffe), le système de conduite (notamment la surface foliaire) et l'entretien du sol. Avec les conditions pédoclimatiques particulièrement sèches de la région, lorsque le cahier des charges de l'appellation le permet, il peut avoir recours à l'irrigation jusqu'au 15 août (Deloire 2008). Une fois l'irrigation en place, il est possible de l'optimiser afin d'économiser la ressource en eau et contrôler la qualité du raisin. Pour produire un vin de qualité il est souhaitable de conserver une contrainte hydrique moyenne, l'irrigation en excès ne permettant pas d'obtenir un vin de qualité.

Un régime hydrique limitant induit des effets bénéfiques sur la qualité des vins produits : on parle dans ce cas de « contrainte hydrique ». Pour un cépage noir, une contrainte modérée est bénéfique pour la qualité du raisin, mais pas pour un cépage blanc. La situation de stress hydrique n'est jamais souhaitable, même pour un cépage noir.

L'installation de l'irrigation dans la région est en hausse, la société BRL fournisseur d'eau voit son réseau s'agrandir régulièrement, et de plus en plus de viticulteurs sont clients (à dire d'expert). En 2017 ce sont 170 viticulteurs qui ont participé à un programme d'accompagnement pour les nouveaux viticulteurs irrigants (BRL 2017b).

1.1 L'effet de la contrainte hydrique sur la production d'un raisin de qualité

Le stage portant sur les stratégies d'irrigation de la vigne, il convient dans un premier temps de rappeler le comportement de cette culture vis-à-vis de la ressource en eau, à savoir l'effet de l'alimentation hydrique sur la qualité du raisin et la trajectoire hydrique que l'on souhaite suivre tout au long de la culture pour répondre aux objectifs de production.

1.1.1 Effet du déficit hydrique sur le développement végétatif

Le rendement en viticulture dépend du nombre de rameaux, de la charge en bourgeons et du pourcentage de débourrement sur les rameaux, puis du nombre d'inflorescences, du nombre de fleurs, du nombre de baies et du poids de la baie. La charge

en bourgeons est contrôlée par le tailleur, mais les autres composantes peuvent toutes être affectées entre autres par la contrainte hydrique. L'initiation florale débute l'année N-1, c'est à ce stade que le nombre d'inflorescences par rameau est déterminé. Dans certains cas la structure des bourgeons peut provoquer un retard au moment du débourrement s'ils sont gros ou mal protégés contre le froid, ceci dépendant aussi de l'année N-1. Les autres composantes du rendement sont déterminées l'année N (Anne Pellegrino 2003).

L'état hydrique conditionne en partie le nombre de fleurs nouées et de cellules par baie entre la floraison et la véraison. Ces caractères sont fortement affectés si la vigne subit un déficit hydrique important en cette période (Faouzi 2007).

La contrainte hydrique diminue la taille des organes de la vigne. L'ensemble du phytomère est affecté avec la même intensité : la longueur et la taille des feuilles, l'entre-nœud et la vrille. Cette réduction dépend de l'intensité de la contrainte et de son positionnement dans le cycle phénologique.

Sur le rameau, ce déficit hydrique ralentit la vitesse de croissance et affecte la précocité d'arrêt de la croissance. Le nombre de jours entre le débournement et l'arrêt de croissance est corrélé au potentiel hydrique foliaire.

Le diamètre des organes tronc, tige et rameau ainsi que des fruit sont réduits par la contrainte hydrique.

L'ensemble de ces contraintes sur le développement végétatif a pour conséquence une réduction de la surface foliaire de la plante. Ceci limite la surface d'interception du rayonnement lumineux et donc le processus de photosynthèse. (Eric Lebon et al. 2006) Une croissance ralentie va aussi diminuer la compétition hydrique entre les puits végétatifs et les puits reproducteurs (Faouzi 2007).

L'effet de la contrainte hydrique sur le développement végétatif est double. Le stress hydrique provoque une déshydratation qui va ralentir la croissance. De plus pour limiter les flux d'eau, la vigne s'adapte principalement au stress par une diminution de l'ouverture des stomates pendant une partie de la journée, elle s'accompagne d'une diminution de l'entrée de CO₂ et de l'activité photosynthétique, ce qui provoque un ralentissement supplémentaire de la croissance (Simonneau et al. 2015).

1.1.2 Effet du déficit hydrique sur la qualité du raisin

Les composantes de la qualité de la vendange sont la quantité de sucres, d'acides, de composés phénoliques et de composés aromatiques que l'on va retrouver dans les baies. Les sucres et les acides se trouvent dans la pulpe, tandis que les composés phénoliques et aromatiques se situent plutôt au niveau de la pellicule de la baie et dans les pépins.

La taille des baies et leur rapport surface/volume vont déterminer la concentration de ces composés dans les moûts. La qualité du vin dépend d'un équilibre entre les sucres et l'acidité ainsi que de la diversité des composés aromatiques et phénoliques. En particulier les

anthocyanes et les composés phénoliques sont très importants pour une bonne qualité œnologique (Anne Pellegrino 2003).

Les vignes soumises à des contraintes hydriques insuffisantes ne sont pas aptes à produire des vins de qualité. Un développement végétatif important provoque une forte compétition pour les sucres entre les puits végétatifs et reproducteurs.

Une contrainte légère en fin de véraison-maturité n'affecte pas trop la taille des baies et la photosynthèse mais permet de favoriser l'accumulation de sucres et surtout de précurseurs d'arômes. Une contrainte hydrique modérée pendant la maturation favorise la réduction de la taille des baies, ce qui favorise la concentration et la synthèse des composés phénoliques comme les anthocyanes mais provoque une diminution du rendement. Une contrainte hydrique forte augmente significativement la concentration en phénols et permet d'avoir une belle couleur mais cela provoque une diminution de l'intensité aromatique et du rendement (Ojeda and Saurin 2014). Ces relations sont appuyées par la corrélation négative entre potentiel de tige et la concentration d'anthocyane.

Pour illustrer ceci, les deux graphiques ci-dessous présentent la dynamique de production des anthocyanes et des sucres réducteurs en fonction du déficit hydrique.

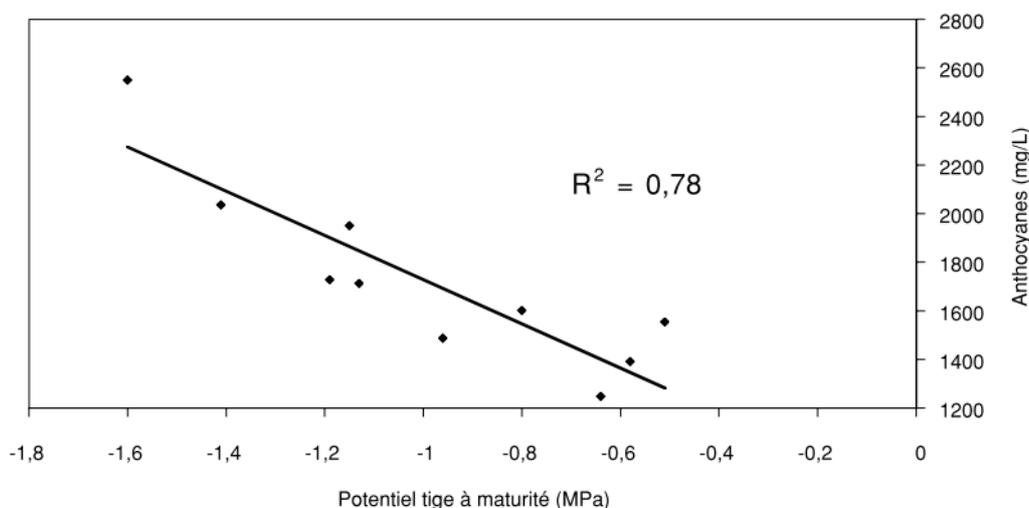


Figure 1: Concentration en anthocyanes en fonction du potentiel hydrique de tige à maturité. (Van Leeuwen et al. 2003)

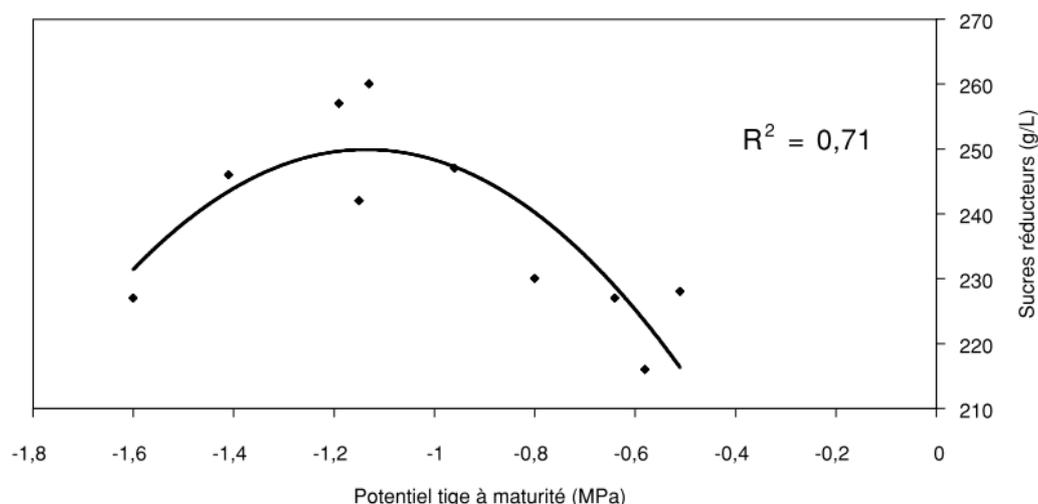


Figure 2: Corrélation entre potentiel hydrique de tige à maturité et concentration en sucres réducteurs (Van Leeuwen et al. 2003)

1.1.3 Trajectoire hydrique souhaitée

Pour une bonne irrigation, il est nécessaire de connaître précisément le statut hydrique souhaité pour les différentes phases du cycle végétatif. Le potentiel œnologique du raisin sera moindre, aussi bien en l'absence de contrainte hydrique, qu'en cas de stress hydrique excessif. En cas de déficit hydrique modéré, les effets positifs l'emportent sur les effets négatifs. Le régime hydrique idéal pour la production de raisin à fort potentiel œnologique correspond donc à une situation de contrainte hydrique modérée, qui intervient tôt dans la saison (avant la véraison). Il est préférable d'irriguer tardivement pour éviter une contrainte hydrique sévère tout en maintenant une contrainte hydrique modérée. Des arrosages précoces peuvent avoir pour conséquence d'effacer un déficit hydrique modéré.

À partir de la floraison, il est souhaitable que l'alimentation hydrique ait un effet inhibiteur sur la croissance végétative pour aboutir à la véraison à un arrêt de croissance, afin de limiter la compétition entre les puits végétatifs et reproducteurs et de favoriser la maturation.

La figure 3 résume l'effet de la trajectoire hydrique sur la qualité et le rendement obtenu.

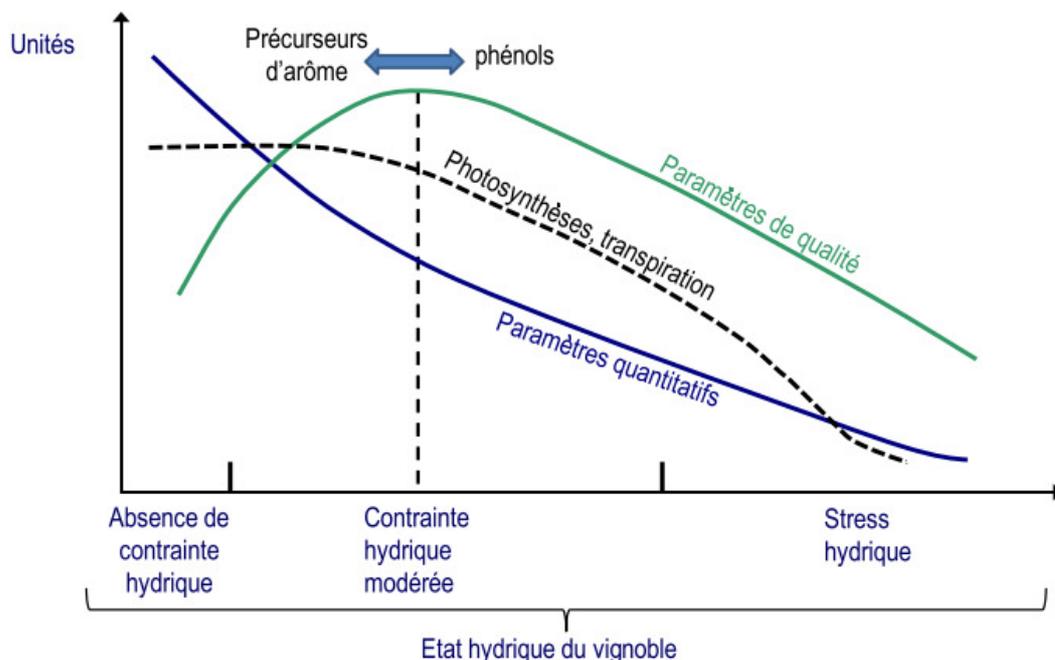


Figure 3: Influence de l'état hydrique sur les paramètres qualitatifs, quantitatifs et physiologiques du vignoble. (Ojeda and Saurin 2014)

La courbe verte qui représente la qualité et la courbe bleue qui représente la quantité ont deux optimums différents, ainsi le meilleur compromis économique que l'on peut trouver se situe dans la gamme de contrainte hydrique modérée.

La mesure du potentiel hydrique foliaire ou du potentiel hydrique de tige est très utilisée dans la littérature scientifique. L'invention de la chambre à pression remonte à 1965 (PMS Instrument Company, 2018) et son utilisation courante dans la recherche a commencé il y a plus de 25ans (McCutchan and Shackel 1992), cette mesure est un bon indicateur de la contrainte hydrique perçue par la vigne (IFV, 2018) (Van Leeuwen et al. 2003). Aujourd'hui encore cette mesure reste une référence incontestable et elle a été progressivement adoptée par les entreprises viti-vinicoles pour le pilotage de leur irrigation (Ojeda and Saurin 2014). Comme il y a une bonne corrélation entre l'état hydrique et le potentiel hydrique foliaire, il est possible d'utiliser directement le potentiel hydrique foliaire pour déterminer l'état hydrique de la vigne.

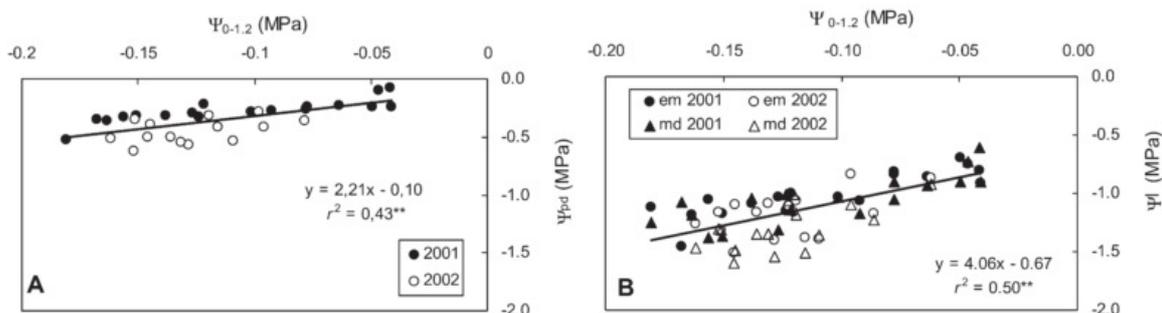


Figure 4 : relation entre potentiel hydrique de feuille et potentiel matriciel de sol pour deux parcelles différentes. (Centeno et al. 2010)

Des classes de potentiel hydrique ont été proposées par (Carbonneau, 1998) pour caractériser l'intensité de la contrainte hydrique : de 0 à -0.2 MPa absence de contrainte, de -0.2 à -0.4 Mpa contrainte légère, de -0.4 à -0.6 Mpa contrainte modérée et au-delà, la contrainte est forte. Toutefois cette classification est assez générale et il y a des variations d'un cépage à un autre.

La figure suivante reprend cette classification et illustre la trajectoire de potentiel hydrique souhaitée tout au long du cycle pour satisfaire différents objectifs de production.

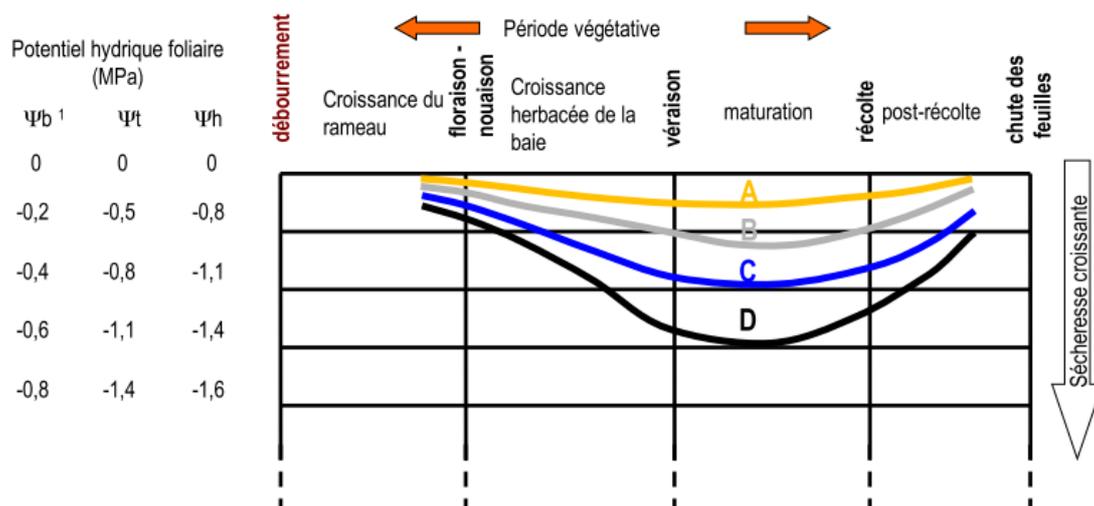


Figure 5 : Différentes stratégies d'irrigation possibles pour contrôler l'état hydrique du vignoble en fonction de la période végétative et du type de produit recherché.

A : jus de raisin, objectif rendement. B : vin blanc aromatique ou vin rouge fruité. C : vins plus concentrés de qualité, D : vins de qualité, vins de garde.

Potentiel hydrique de base (Ψ_b), potentiel de "tige" au zénith (Ψ_t), potentiel de feuille au zénith (Ψ_f) (Ojeda et al. 2014)

Selon l'objectif de production, la trajectoire suivie va beaucoup varier. Un vignoble qui s'oriente vers la production de jus de raisin avec un fort objectif de rendement choisira la situation A (figure 5) qui correspond au profil avec le déficit hydrique le plus faible, tandis

qu'un vignoble qui cherche un vin rouge très concentré de bonne qualité suivra la courbe D ou la courbe C (figure 5).

L'effet du déficit hydrique sur l'année N+1 est aujourd'hui bien connu (Guilpart et al. 2014), c'est pourquoi quelle que soit la production recherchée, il est souhaitable en fin de cycle d'avoir une contrainte hydrique minimale pour que la vigne puisse faire des réserves. En pratique cela est difficile à respecter dans le Sud de la France avec les restrictions en vigueur sur l'irrigation.

1.2 Différentes techniques d'irrigation et outils de mesure ou d'évaluation de l'état hydrique

Le tableau 1 présente l'ensemble des systèmes d'irrigation de la vigne que l'on retrouve au niveau mondial. L'usage du goutte-à-goutte s'est intensifié depuis le début des années 1990, il devient un système d'irrigation de référence. AdVini utilise exclusivement cette technique.

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des principaux systèmes d'irrigation de la vigne (source : IFV)

Systèmes	Principaux avantages	Principaux inconvénients	Efficiences qualitative
Irrigation à la raie	Faible coût, pas d'humidification du feuillage	Irrigation non uniforme sur la parcelle, temps perdu à surveiller l'avancée de l'eau et à déplacer le tuyau d'une raie à l'autre	Faible
Aspersion sur frondaison	Faible maintenance, facile à surveiller	Coûts de pompage et surpressage élevés, augmente le risque de maladies et/ou parasites, coût élevé	Faible
Aspersion proche du sol	Humidification des fruits et des feuilles très faible, coûts plus faibles	Surveillance difficile, demande beaucoup d'entretiens	Bonne
Irrigation localisée (goutte à goutte)	Faibles coûts de pompage, pas d'humidification du feuillage	L'eau doit être disponible sur une longue période, maintenance difficile	Très bonne

Pour suivre l'état hydrique de la vigne, on peut étudier le sol ou à travers des indicateurs de l'état physiologique de la vigne. Deux approches sont utilisées, la mesure directe et la modélisation.

1.2.1 Les différents outils existant pour mesurer directement l'état hydrique du vignoble

- La tensiométrie : Avec cet outil, on a une information sur la disponibilité en eau au niveau de la sonde. Pour caractériser le profil entier, on utilise plusieurs sondes à différentes profondeurs. Cette mesure n'est que rarement utilisée au-delà de 80cm

de profondeur, dans notre cas il était plus difficile de creuser une fois que l'on avait dépassé les 60cm. Le coût du matériel est faible.

- La sonde à neutrons : la sonde est installée dans un tube qui est en permanence dans le sol sur toute la longueur du profil racinaire. La sonde envoie des neutrons qui vont ralentir au contact des atomes du sol, en particulier au contact des atomes d'hydrogène. Après collision les neutrons rebondissent et une partie est détectée par un capteur de neutrons lent au niveau de la sonde. Le compte des impulsions dans le temps renseigne sur la quantité d'hydrogène dans le sol, et donc d'eau. Cette sonde donne des informations précises mais le matériel est cher (Atomique 2003).
- Le résistivimètre : permet de mesurer la résistivité électrique égale à l'inverse de la conductivité qui désigne la capacité du sol à ralentir le courant grâce à différents facteurs comme la texture, la structure, le taux d'éléments grossiers, la profondeur. Parmi ces facteurs, on peut déduire la teneur en eau. Entre plusieurs situations homogènes, seules des variations de température et d'humidité peuvent modifier la résistivité. Les conditions d'utilisation de cette méthode sont restreintes car un sol trop sec induit des difficultés en terme de conductivité au niveau des électrodes (Goulet et al. 2006).
Avec cette méthode, on peut en théorie mettre en évidence l'activité racinaire dans les différents horizons du sol ce qui peut s'avérer très pertinent pour comprendre le comportement hydrique d'une parcelle.

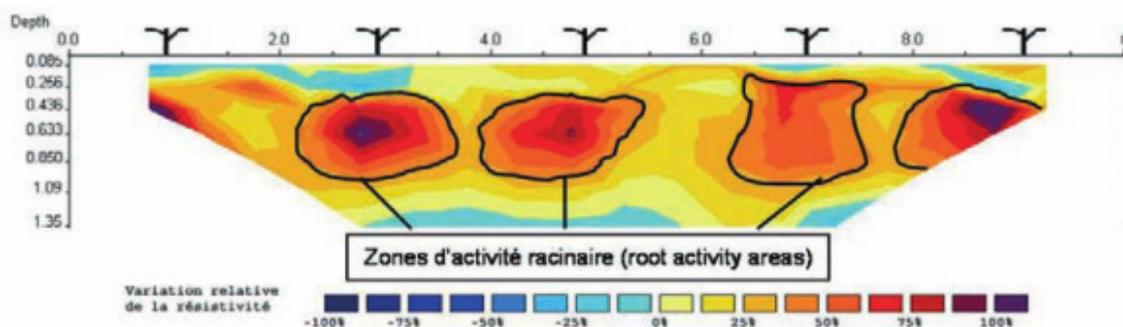


Figure 6 : Traitement par logiciel de mesures de résistivité avec mise en évidence d'activité racinaire (BARBEAU 2006).

- Les sondes capacitatives : le capteur envoie un courant électrique dans le sol et en retour il mesure la permittivité diélectrique du sol qui donne l'information précise sur l'humidité. La sonde peut être fixe dans un tube ou mobile, dans le second cas de figure des tubes sont déjà implantés dans le sol. Toutefois ces sondes sont chères et l'interprétation des mesures demande une expertise (Chambre d'agriculture du Tarn).

1.2.2 Méthodes basées sur des indicateurs au niveau de la plante

- Le potentiel hydrique foliaire : la méthode est simple et robuste, elle donne une indication directe sur l'état hydrique de la vigne au moment de la mesure. On

distingue le potentiel hydrique foliaire de base qui s'obtient en effectuant la mesure en fin de nuit et qui indique l'hydratation maximale de la plante lorsqu'elle est à l'équilibre avec la réserve hydrique. Le potentiel de tige qui se mesure plusieurs heures après le prélèvement des feuilles que l'on conserve dans un sachet, la précision de cette seconde mesure varie selon l'heure de la journée. Le potentiel hydrique journalier, mesuré à midi, qui reflète la dynamique d'assèchement de la plante au cours de la journée (Carbonneau, Deloire, and Costanza 2004) .

- La conductance stomatique : différentes études menées sur le coton ou encore les légumineuses ont mis en évidence la relation existant entre la conductance stomatique et la FTSW. Ceci fait de la conductance stomatique un indicateur intéressant pour l'étude de l'état hydrique de la vigne mais il y a moins de recherches à ce sujet que pour le potentiel hydrique foliaire (Lacape, Wery, and Annerose 1998).
- Les capteurs de flux de sève : cette mesure est robuste et permet d'étudier le comportement hydrique de la plante ainsi que son état au moment de la mesure. Le système installé permet d'obtenir des mesures en continu. La transpiration dépend du flux de sève des racines vers les organes aériens, en caractérisant le comportement de la sève, on peut utiliser une relation pour estimer la transpiration avec une bonne fiabilité (Fernández et al. 2001), (Ferreira et al. 2012).
- La dendrométrie permet de mesurer en continu les micro-variations du diamètre du tronc. Au cours de la journée, on observe des variations dans le diamètre du tronc qui correspondent à des contractions ou dilatations des cellules en fonction de leur turgescence et donc de leur état hydrique. La méthode permet de suivre en continu l'état hydrique et la croissance du végétal. Il est difficile de mesurer l'intensité du stress hydrique avec cette méthode, mais elle peut être utilisée pour détecter un début de déficit hydrique (Saurin, Tisseyre, and Lebon 2014).
- La détermination du delta C13 : l'absorption des isotopes ^{13}C et ^{12}C chez la vigne varie en fonction de la contrainte hydrique. On peut mesurer le rapport entre l'isotope ^{12}C et ^{13}C sur les sucres du moût et en déduire la contrainte hydrique perçue par la vigne pendant l'ensemble de la maturation. Évidemment, contrairement aux autres méthodes, celle-ci ne permet que l'obtention d'une vision postérieure, ce n'est donc pas une méthode de pilotage mais une méthode de synthèse.

D'après les études de la société BRL, les moyens d'évaluation ci-dessous sont les plus répandus en viticulture (BRL 2017a) :

Tableau 2 : Liste des méthodes de mesure de l'état hydrique principalement utilisées en viticulture

Moyen d'évaluation	Sondes capacitives	Tensiomètre	Bilan hydrique	Méthode des apex	Chambre à pression
Avantages	Mesures précises, données en continu	Matériel facile à utiliser, coût faible	Suivi en continu, gain de temps, pas d'achat de matériel	Rapidité de la mesure, pas de coût	Mesure précise, beaucoup de références
Inconvénients	Prix important de l'installation, profondeur de mesure limitée d'environ 80cm	Profondeur de mesure limitée d'environ 80cm, connaissance du sol requise, le relevé des valeurs prend du temps	Prise en main du logiciel, imprécisions de la modélisation	erreur possible : le ralentissement de croissance peut venir d'une carence azotée, peu de références pour l'interprétation, donne uniquement le seuil de début d'irrigation	Matériel chère, temps de mesure & horaires de mesures
Coût	300 à 2000€ pour les sondes	40€ pour les sondes	0 €	0 €	à partir de 3000€

Les autres techniques sont considérées comme difficilement appropriables par le plus grand nombre des viticulteurs ayant recours à l'irrigation (pour des raisons de complexité de mise en œuvre, de coût, d'aboutissement des outils d'interprétation...). Suite à ces recherches nous avons décidé d'investir dans une chambre à pression pour la suite de l'étude. Les sondes Watermark ne fournissant pas une indication suffisamment précise pour évaluer le modèle.

1.3 Synthèse de quelques modèles existants pour simuler le bilan hydrique de la vigne.

Parmi les composants du bilan hydrique, on retrouve principalement en entrée les précipitations et l'irrigation, les deux données sont mesurables. Pour les sorties on considère surtout l'évaporation du sol, la transpiration de la plante d'intérêt et du couvert éventuel, le ruissellement et le drainage. De manière générale, en considérant l'importance quantitative des flux d'eau, le ruissellement et le drainage sont négligeables à côté de l'évaporation et de la transpiration.

La sortie du modèle qui nous intéresse est la valeur simulée du potentiel hydrique foliaire de base. Cette donnée nous servira d'indicateur de l'état hydrique de la vigne. La précision dans le calcul de l'évaporation et de la transpiration par le modèle est donc importante pour la précision finale de l'indicateur.

Parmi les différents formalismes de modélisation existant pour calculer la transpiration et l'évaporation, nous avons fait le choix de nous limiter aux approches qui utilisent l'ETO pour des raisons pratiques. Ce n'est pas l'approche la plus robuste, mais cette méthode a l'avantage d'être bien comprise par les viticulteurs.

Tableau 3 : comparaison entre différents modèles à réservoirs issus de la bibliographie

Modèle	Formalismes du bilan hydrique	Précision relative des formalisme	Bibliographie
FAO	$ET_c = (K_e + K_{cb}) * ET_0$	+	Allen et al. 1998
Lebon	$TV = TV_p = \{R_{gv} / [(1 - \alpha)R_g]\} ETP$ $ES = ES_p = \{1 - [R_{gv} / (1 - \alpha)R_g]\} ETP$	+++	Riou et al. 1989 Lebon et al. 2003
Walis	Le modèle utilise les formalismes de l'article de Lebon et ajoute la présence du couvert végétal	+++	Riou et al. 1989 Lebon et al. 2003 Celette et al. 2010
STICS	Basé sur une approche résistive sous la forme d'une équation de Penman-Monteith	++	Shuttleworth et al. 1985 Brisson et al. 1998
Biswat	$T = RIE * ET_0 * WI$	+++	Bertrand et al. 2017

Le tableau 3 résume les différents modèles de bilans hydriques décrits ci-dessous et permet de comparer la précision relative des formalismes utilisés.

Les différentes approches du calcul de la transpiration qui utilisent l'ET₀ fonctionnent toutes de la même manière. Elles sont de la forme k*ET₀ où k représente surtout le développement végétatif de la vigne qui conditionnent sa transpiration.

Formalismes de la FAO : les formalismes reposent sur la détermination de K_c, le coefficient cultural, qui multiplie l'ET₀. Connaissant l'évapotranspiration il est ensuite possible de modéliser l'évolution d'une réserve en eau au cours du cycle. C'est toutefois un modèle simpliste avec des imprécisions, notamment sur l'estimation du K_c qui n'est pas bien adapté à la viticulture. (Allen et al. 1998)

Les étapes de calcul de l'évapotranspiration de la culture sont les suivantes : identifier les différents stades phénologiques de la culture, ajuster les valeurs de K_c réel ajusté (K_{cb}) aux conditions climatiques de la parcelle, puis déterminer l'évaporation journalière :

$$K_e = K_r * (K_{cmax} - K_{cb})$$

Où **K_e** est un coefficient d'évaporation,

K_{cb} le coefficient cultural de base,

K_{cmax} la valeur maximale de K_c suite à une irrigation ou aux précipitations,

K_r un coefficient de réduction de l'évaporation qui dépend de la quantité d'eau évaporée à la surface du sol.

Ayant déterminé K_e et K_{cb}, on obtient l'évapotranspiration de la culture :

$$ET_c = (K_e + K_{cb}) * ET_0$$

Où **ET_c** représente l'évapotranspiration réelle de la culture (en mm).

Pour l'évaporation, on détermine chaque jour la variation de la réserve en eau dans l'horizon du sol soumis à l'évaporation TEW. Un coefficient Kr permet de limiter l'évaporation.

$$K_r = \frac{TEW - D_e}{TEW - REW}$$

Où **TEW** représente la quantité d'eau totale transpirable (en mm),

REW la quantité d'eau facilement transpirable quand $K_r = 1$

D_e le cumul de l'eau réellement évaporée

Ce coefficient vaut 1 lorsque l'horizon supérieur du sol est humide puis il diminue linéairement jusqu'à atteindre 0 lorsque le sol est sec. C'est un formalisme assez simple qui semble reposer sur l'hypothèse que l'évaporation est proportionnelle au niveau de remplissage de la réserve d'eau évaporable. C'est un calcul assez générique et il faudrait vérifier si cette proportionnalité est toujours vraie pour tous types de sols. Le coefficient est toutefois nécessaire pour limiter les sorties d'eau par évaporation.

Un autre coefficient Ks vient limiter Kcb lorsque le niveau de la réserve est faible.

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{(1-p)*TAW}$$

Où **TAW** représente la quantité d'eau totale disponible dans la zone racinaire (en mm),

D_r l'appauvrissement en eau dans la zone racinaire (en mm),

p la fraction de TAW qu'une culture peut extraire sans subir de déficit hydrique,

Ks vaut 1 lorsque $D_r < RAW$, c'est-à-dire lorsque l'appauvrissement en eau est inférieur à la quantité d'eau facilement transpirable.

Shuttleworth Wallace : ce modèle date de 1985, mais les formalismes ont été repris dans le modèle **STICS** encore utilisé aujourd'hui (Garcia De Cortázar 2006).

Le calcul de l'évaporation repose sur une approche résistive qui s'écrit sous la forme d'une équation de Penman-Monteith en utilisant des données de résistance aérodynamique, de déficit de pression de vapeur, de l'énergie disponible (Shuttleworth et al. 1985). Ces formalismes ressemblent donc fortement à ceux proposés par la FAO qui utilisent également l'équation de Penman-Monteith. Il est toutefois plus précis car au lieu d'utiliser une valeur générique de Kc, il utilise les données de la parcelle pour caractériser la culture : le LAI, le rayonnement net, le déficit de pression de vapeur. L'ensemble des formalismes est présent dans l'article de (Brisson et al. 1998).

Eric Lebon a formalisé dans un article (Lebon et al. 2003) une modélisation du bilan qui reprend les formalismes du modèle de RIOU (Riou et al. 1989) qui permet de calculer séparément l'évaporation et la transpiration à partir du rayonnement absorbé par la vigne. En l'absence de déficit hydrique, la transpiration peut s'écrire :

$$TV = TV_p = \{R_{gv} / [(1 - \alpha)R_g]\}ETP$$

Où **TV** représente la transpiration journalière,
TVp la transpiration potentielle,
Rgv la radiation globale absorbée par la canopée,
Rg la radiation globale incidente,
ETP l'évapotranspiration potentielle

Deux équations se suivent pour l'évaporation, la première provient du modèle de Riou et est valide lorsqu'il y a de l'eau dans l'horizon de surface du sol :

$$ES = ES_p = \{1 - [R_{gv}/(1 - \alpha)R_g]\} ETP$$

Où **ES** représente l'évaporation à la surface du sol,
ESp l'évaporation potentielle

Le second formalisme proposé par (Brisson et al. 1991) est utilisé lorsqu'il y a un déclin de la réserve dans l'horizon superficiel :

$$\Sigma ES = (2b\Sigma ES_p + b^2)^{1/2} - b.$$

Où **b1** est un paramètre qui décrit le climat, **b2** décrit le sol.

Ce formalisme est l'équivalent du coefficient Kr utilisé par la FAO. Il prend en compte le dessèchement progressif du sol pour limiter l'évaporation. Il s'agit d'une fonction racine, donc plus le cumul de l'évaporation est grande et moins l'évaporation du jour j sera importante. Cette approche de l'évaporation est fonction de la texture du sol et du climat, ce qui est plus précis que le Kr utilisé par la FAO.

La croissance de la vigne est prise en compte avec la simulation de l'évolution de la hauteur, la largeur et la porosité de la vigne en fonction du temps thermique.

WALIS est un modèle qui utilise les mêmes formalismes de l'article (E Lebon et al. 2003) avec quelques modifications. Ce modèle permet de prendre en compte la présence d'une culture intercalaire en se basant sur les travaux de (Celette et al. 2008). Il calcule la croissance du couvert végétal avec un coefficient cultural qui est estimé à partir du LAI du couvert. (Allen et al. 1998)

Le rapport entre l'eau ruisselée et infiltrée est également implémenté en utilisant la méthode du CN (Gaudin et al. 2010).

Le modèle a fonctionné correctement pour la vigne lorsqu'il a été testé, la simulation du stress hydrique et sa dynamique était conforme avec les mesures directes réalisées (Celette et al. 2010).

SWATRE : Ce modèle assez ancien (Belmans 1983) a été réutilisé en partie pour le modèle BUDGET (Raes et al. 2006).

L'évaporation est calculée à partir du LAI

$$E = \exp(-0,6*LAI) *ETP$$

Où **ETP** représente le produit de l'ETO et d'un coefficient cultural

Lorsque le sol est sec un autre formalisme est utilisé (Black, Gardner, and Thurtell 1969) :

$$E = \lambda \sqrt{(t + 1)} + 1 - \lambda \sqrt{t}$$

Où λ est un paramètre qui dépend du sol,

t représente la durée depuis le début de la période sèche.

La transpiration est déterminée à partir de l'évaporation :

$$T = ETP - E, \text{ soit } T = [ETP * (1 - \exp(-0,6 * LAI))]$$

Ce calcul de la transpiration est plus proche de l'approche de la FAO que de l'approche de Riou, avec un coefficient cultural qui est impliqué. Je n'ai pas pu retrouver l'article qui expliquait comment était calculé ce coefficient.

VINTEL est un outil d'aide à la décision spécifique à la viticulture et un des rares modèles actuellement commercialisés dans le Languedoc Roussillon (ITK, 2018).

Le détail des formalismes utilisés n'est pas disponible mais il semble se baser sur le modèle de RIOU qui utilise le rayonnement incident pour déterminer la transpiration et l'évaporation.

BISWAT permet de simuler l'évolution du bilan hydrique au cours du cycle pour une culture seule ou en association. Ce modèle permet de paramétrer précisément le sol sur différents horizons. Il nécessite une expertise pour la prise en main (Roux, Bertrand, and J.Wery 2017).

Parmi les données d'entrée du modèle on a besoin de définir la Radiation Interception Efficiency (RIE), cette variable est une efficacité d'interception du rayonnement incident. Certains modèles comme le modèle de Riou peuvent aussi être utilisés pour simuler l'évolution de la RIE. A partir de cette RIE on calcule des coefficients de transpiration et d'évaporation qui interviennent dans les calculs (Bertrand et al. 2017).

$$RIE = 1 - \exp(-k * LAI)$$

Où k est le coefficient d'extinction qui représente l'architecture du feuillage et qui varie entre 0 et 1.

L'expression pour le calcul de l'évaporation est une adaptation du modèle de la FAO. Le formalisme initial est modifié pour qu'il puisse prendre en compte directement l'humidité de la portion évaporable du sol, de ce fait il semble plus précis.

Le calcul de la transpiration :

$$T = RIE * ETO * WI$$

WI un indice de stress hydrique calculé en fonction de la valeur de FTSW

Ce formalisme ressemble au produit du coefficient cultural et de l'évapotranspiration de la FAO, ici K est calculé à partir de mesures sur la parcelle, ce qui est plus précis que le k_c de la FAO qui est une valeur générique de référence qui ne varie pas selon le cépage.

1.4 Cadre de contrainte des domaines

Les objectifs de rendement et de qualité des différents domaines sont donnés par la société, les domaines sur lesquelles les données ont été relevées produisent du vin d'AOP, avec un objectif de rendement compris entre 45 et 50hL/ha. Ce rendement doit être atteint puisqu'il conditionne la performance économique des exploitations.

Les nouveaux investissements sont obtenus en faisant une demande auprès de la holding, la disponibilité ou non de fonds d'investissements pour du nouveau matériel dépend donc de la validation ou non du projet. Sur la période du stage un budget était disponible pour les investissements dans les sondes Watermark ainsi que pour la chambre à pression.

Les responsables des vignobles sont occupés par leurs différentes activités et ils n'ont donc pas beaucoup de temps pour réaliser de nouvelles mesures en continu sur les différentes parcelles au cours de l'année. C'est pourquoi l'orientation vers l'utilisation d'un modèle ou le recours à des méthodes de mesures automatisées est souhaitable. Une alternative qui permettrait d'obtenir des valeurs de potentiel hydrique foliaire en continu sur les différents domaines consisterait à embaucher une personne pendant la saison qui serait dédiée à cette activité. C'est d'ailleurs un des projets pour l'année prochaine afin de compléter l'étude qui a été réalisée.

L'une des contraintes au pilotage de l'irrigation est l'hétérogénéité de connaissances en pilotage de l'irrigation selon les domaines, sur certains domaines la fréquence des pluies et la date servent d'indicateur pour piloter les apports. Le stage de Ons MEJRI (SupAgro) consistait en une expertise de l'irrigation sur les différents domaines. Ce stage a mis en évidence le manque de données en général et le manque de suivis sur l'irrigation. Les mesures que j'ai pu réaliser contribuent beaucoup à l'acquisition de nouvelles données.

Dans l'ensemble les contraintes au niveau des différents domaines irrigués ne font pas obstacle à la mise en place de nouvelles stratégies d'irrigation, mais pour y parvenir il faut que les projets présentés soient convaincants auprès de la holding. Les viticulteurs n'ont quant à eux pas de désirs particuliers en terme de précision ou de type de matériel à utiliser, ils sont prêts à modifier leurs pratiques s'ils se sentent soutenus par la holding.

1.5 Problématique de stage

L'objectif de mon stage est de trouver de bons indicateurs de l'état hydrique de la vigne, de les mesurer et de les évaluer. A l'aide de ces indicateurs il a été possible de mettre au point des stratégies de pilotage de l'irrigation pour améliorer le rendement et la qualité des baies. L'entreprise souhaite développer des outils pratiques pour les viticulteurs et elle voudrait développer un modèle qui puisse simuler le bilan hydrique de la culture et l'utiliser

dans un maximum de domaines. Une revue littéraire des différents outils de mesure et de modélisation a été faite.

Ces informations viennent justifier le choix des indicateurs qui a été réalisé par la suite. Des outils et des méthodes d'évaluation de l'état hydrique de la vigne ont été testés et évalués. Des tensiomètres Watermark ont été installés, et des mesures de potentiel hydrique foliaire ont été réalisées. Un modèle a été reproduit, puis il a été paramétré sur différentes parcelles et évalué. Le potentiel hydrique foliaire étant un indicateur précis de l'état hydrique de la vigne, ces mesures ont été utilisées pour comparer les valeurs simulées par le modèle et les valeurs réelles afin de pouvoir évaluer le modèle.

La problématique du stage a été construite progressivement au cours des échanges avec les encadrants au sein de la société, l'objectif général consistait à l'amélioration du pilotage de l'irrigation sur les différents domaines.

A ce stade il a été possible de formuler plus précisément la problématique du stage.

Est-il possible d'améliorer le pilotage de l'irrigation sur les différents domaines d'AdVini en ayant recours à un modèle simulant l'évolution du bilan hydrique ?

Un modèle simple, adapté aux contraintes d'utilisateurs d'Advini, peut-il permettre un pilotage fin de l'irrigation qui puisse améliorer la qualité de la production ?

2 Matériel et méthode

2.1 Mesures au champ

Pour pouvoir mettre au point le modèle et répondre à la problématique, il est nécessaire d'avoir un bon indicateur de l'état hydrique de la vigne et ce tout au long de la culture. Des outils de mesures de l'état hydrique ont donc été utilisés. Le travail réalisé pour identifier les outils de pilotage de l'irrigation a guidé les choix. Bien qu'il existe de nombreux outils, peu d'entre eux sont à la fois facilement utilisables et avec un prix raisonnable pour l'irrigant.

Nous avons installé des sondes Watermark sur les domaines irrigués suivants : Cazes, Roquefeuille, Lunès, Valoussière, Gassier et Mas la Chevalière. Ce premier outil utilise le potentiel matriciel de sol comme indicateur de l'état hydrique de la parcelle. Nous nous sommes aperçus que cet outil n'était pas un indicateur assez précis pour connaître l'état hydrique de la vigne avec suffisamment de précision.

Un second appareil de mesure, la chambre à pression, a été utilisé pour compléter la collecte de données. La mesure de potentiel hydrique foliaire étant un indicateur plus précis, elle permet à la fois de déterminer le niveau de contrainte subi par la vigne tout au long de la saison et d'évaluer le modèle qui est mis au point. Les mesures de potentiel hydrique

foliaire de base réalisées ont été comparées aux valeurs de potentiel que l'on a obtenues avec la simulation.

Etant donné que l'on possédait à présent d'un indicateur fiable de l'état hydrique de la vigne, on a pu l'utiliser pour évaluer les performances des sondes Watermark qui avaient été installées. La comparaison des deux approches de mesures directes ainsi que les simulations du modèle et son évaluation sont présentées dans la suite du mémoire.

2.1.1 Description du site expérimental

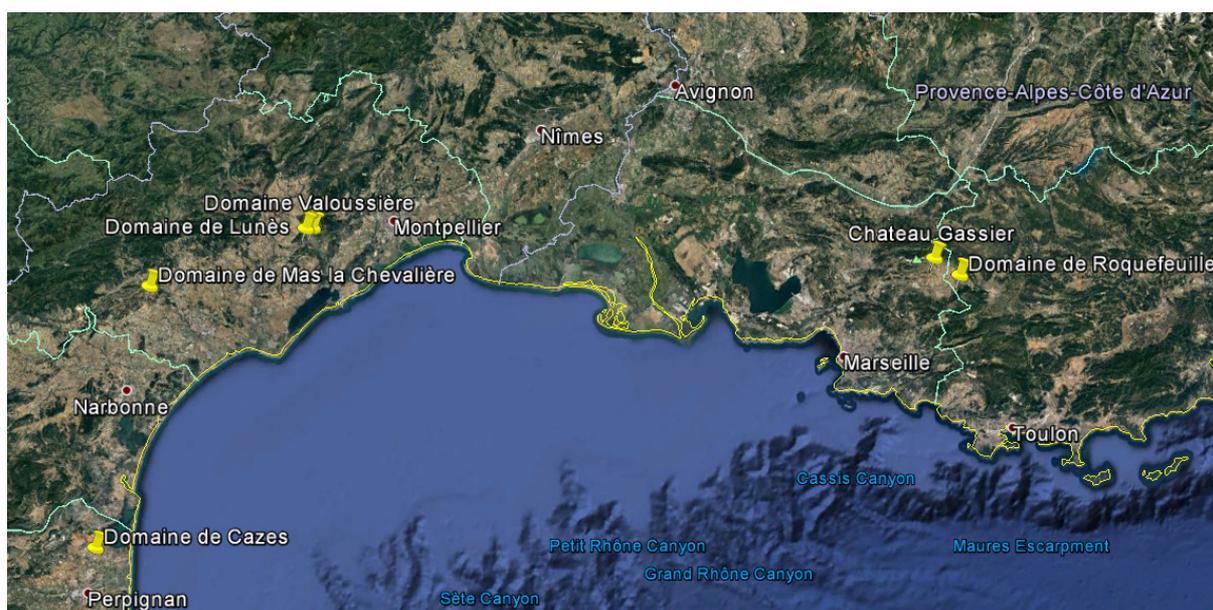


Figure 7 : Localisation sur Google Earth des différents domaines étudiés

La figure 7 représente la géolocalisation des différents domaines sur lesquelles des mesures de potentiel hydrique foliaire ont été effectuées ainsi que de relevés de sondes Watermark.

Tableau 4 : Référencement des différentes parcelles équipées de sondes Watermark en fonction de leur localisation

N°parcelle	1	2	3	4	5	6	7
Domaine	Cazes			Roquefeuille			

N°parcelle	8	9	10	11	12	13	14	15
Domaine	Gassier		Lunès		Mas la Chevalière			

N°parcelle	16	17
Domaine	Valoussière	

Chacune de ces parcelles est équipée de deux sondes Watermark et a aussi fait l'objet de mesures régulières de potentiel hydrique foliaire de base. Ces parcelles ont été choisies car elles représentaient bien l'hétérogénéité des situations que l'on pouvait rencontrer sur les domaines.

Parmi ces 17 parcelles, 4 ont été sélectionnées pour l'usage du modèle. Les 4 parcelles concernées par la modélisation sont les parcelles 5, 13, 16 et 17. Ces parcelles sont intéressantes car elles sont situées sur différents domaines et nous avons à disposition les données de cépage, de type de sol et de réserve utile. Le détail des données utilisées pour la modélisation est donné plus loin dans la partie 2.3.3.

2.1.2 Mesures tensiométriques du sol avec les sondes Watermark.

Les sondes tensiomètres Watermark ont été installées sur les différents domaines. C'est le premier outil de mesure directe au champ mis à disposition pour déterminer l'état hydrique de la culture au champ.

La société qui a fourni les sondes ne proposait pas de protocole d'installation, le mode opératoire d'installation est le fruit d'une réflexion que j'ai pu avoir avec les responsables de domaine et mes maîtres de stages.

Les responsables des vignobles ont décidé sur quelles parcelles ils souhaitent installer les sondes. Dans certains cas ils savaient déjà où les installer pour que cela soit représentatif de l'hétérogénéité du domaine, c'est le cas du domaine de Valoussière ou de château Gassier par exemple. Dans d'autres cas comme à Roquefeuille nous avons échangé avec le responsable de vignoble pour déterminer où étaient localisés les différents types de cépages et quelles étaient les différents types de sols de l'exploitation. Les différents lots de sondes sont répartis sur des parcelles dont le type de sol et le cépage n'étaient pas le même, pour pouvoir représenter l'hétérogénéité du domaine.

Les sondes sont positionnées à 30cm et 60cm, le choix de la profondeur maximale de 60cm était fixé par le matériel disponible. La seconde sonde était enfouie à la profondeur intermédiaire de 30cm.

Les sondes sont installées sur le second rang à partir du 4^{ème} pied. Ceci dans le but d'éviter les effets de bordure. Les parcelles étant presque toutes planes, le relief n'est donc pas une cause d'hétérogénéité sur ces parcelles. Il n'est pas possible de garantir que les sondes sont bien représentatives de l'ensemble de la parcelle car il peut y avoir des variations dans la texture et la profondeur de la parcelle selon l'endroit où l'on se situe, mais les données précises sur les caractéristiques de la parcelle n'étaient pas disponibles.

On a aussi fait le choix de positionner les sondes entre deux pieds de vigne, sur le rang, sachant qu'il y a un goutteur par pied de vigne, les sondes sont situées entre deux goutteurs en général. Toutefois pendant les périodes chaudes le matériel d'irrigation a tendance à se dilater ce qui peut faire bouger les goutteurs sur la ligne. On ne pouvait pas placer les sondes directement sur le pied de vigne au risque d'endommager les racines.

Utilisation des sondes : nous avons dans un premier temps essayé de caractériser l'état hydrique à l'aide des sondes en utilisant la documentation en ligne sur les sondes Watermark (Irmak et al. 2016).

L'appareil fournit une valeur dans une gamme allant de 0 à 200 qui caractérise le potentiel matriciel de sol. L'unité utilisée est le centibar ou le kilo pascal, 1bar = 100cb = 100 kPa (Irmak et al. 2016). La sonde prend une valeur 0kPa lorsqu'elle est imbibée d'eau et elle indique 200kPa lorsque l'humidité est très faible, si on la laisse au contact de l'air par exemple. Le comportement des sondes va varier selon le type de sol en fonction de la capacité de rétention d'eau.

Il est nécessaire de considérer le type de sol au moment d'interpréter la mesure :

Tableau 5 : Seuils préconisés d'irrigation pour les sondes Watermark en fonction du type de sol (Irmak et al. 2016)

Type de sol	Très argileux	Argilo-limoneux	Limono-sableux	sable fin
Seuil d'irrigation (kPa)	90-100	75-80	45-55	20-25

Il est important de noter que les valeurs extrêmes des valeurs de sondes de 200kPa ne sont pas des mesures exploitables, elles indiquent juste que le seuil de mesure de l'instrument a été dépassé, le potentiel matriciel de sol est à ce moment-là supérieur ou égal à 200kPa. Si l'on compare deux parcelles dont les sondes indiquent 200kPa, il est possible que dans un cas le potentiel hydrique foliaire associé soit de -0,6Mpa et que dans l'autre cas il soit de -0,9Mpa. Dans les deux cas la sonde indiquera la même valeur.

2.1.3 Mesures de potentiel hydrique foliaire en continu

Mode opératoire des mesures de chambre à pression :

Les mesures ont été prises entre 5h et 8h, certaines pendant la nuit, de manière générale les mesures ont été prises avant le lever du soleil lorsque les stomates sont encore fermés. Seules les mesures prises avant le lever du soleil ont été conservées.

La figure 8 montre que la variation du potentiel hydrique foliaire de base est minimale entre 4h30 et 8h30, elle accélère ensuite, d'après Carbonneau et al. (2004). Une autre représentation graphique pour le potentiel hydrique de tige cette fois, montrait une variation encore moins importante entre 4h30 et 8h30 que celle de la figure 8. (Carbonneau et al. 2004)

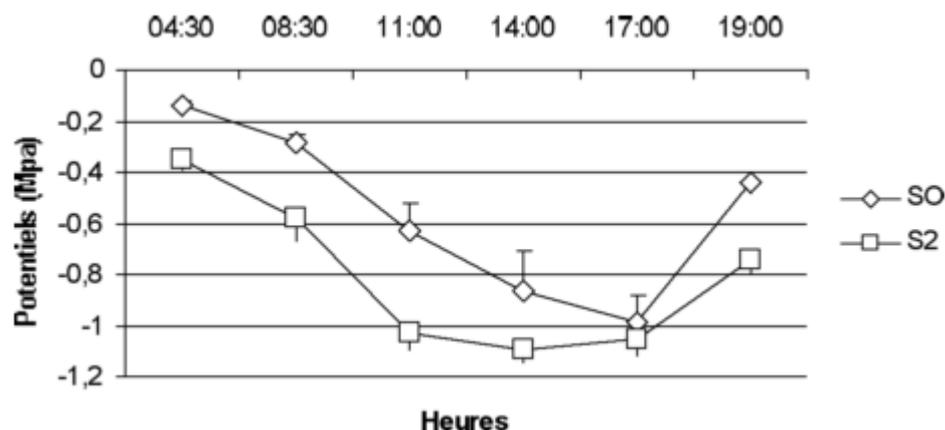


Figure 8 : dynamique du potentiel hydrique foliaire de base en fonction de l'heure solaire pour une modalité irriguée (S0) et une autre non irriguée (S2). (Carbonneau et al. 2004)

Les valeurs de potentiel hydrique foliaire utilisées sont la moyenne de plusieurs relevés, 5 feuilles au minimum sont prélevées par parcelle afin de lui donner une cohérence statistique. Il est arrivé que seules trois feuilles soient prélevées à cause d'un manque de gaz dans la bonbonne. Les feuilles sont prises le long du rang où sont installées les sondes, elles ont été prélevées à la base du rameau principal. Lorsque l'écart entre les valeurs était trop important, davantage de feuilles ont été prélevées, comme au Château Roquefeuille le 20 Juillet, où 10 mesures ont été prises.

Une mesure a été réalisée chaque semaine sur chacune des parcelles sélectionnées.

Les mesures ont été prises à chaque fois dans les mêmes rangs pour chaque parcelle afin d'éviter un biais qui pourrait provenir de l'hétérogénéité du sol en différents points de la parcelle.

Analyse des données

Les analyses faites sur les données issues des mesures au champ ont pour objectif de déterminer l'efficacité des mesures de sondes Watermark. Si l'on arrive à mettre en évidence que les valeurs de sondes sont bien corrélées au potentiel hydrique foliaire, on aura démontré que les mesures de sondes sont un bon indicateur de l'état hydrique de la vigne. Dans le cas contraire il faudra être plus prudent dans l'utilisation des sondes car elles ne seront pas un indicateur fiable de l'état hydrique réel de la vigne.

Les comparaisons statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (R, 2018). Les tests effectués sont un modèle linéaire simple et une Ancova.

Les résultats sont présentés sous forme de coefficients de corrélation (R-squared) et sous forme de P-value. Sur les tests effectués, la P-value est significative lorsqu'elle prend des valeurs inférieures à 5%, soit 0.05.

2.2 Modélisation

Nous avons discuté du cahier des charges du modèle de bilan hydrique. L'outil est destiné aux agriculteurs, il est attendu qu'il ne soit pas trop complexe et assez facile à prendre en main. De plus un outil complexe devient intéressant lorsque l'on a beaucoup de données, ce qui n'est pas le cas de la plupart des maisons. Pour la majorité des parcelles, les données s'arrêtent à la connaissance du type de sol et de la réserve utile. Le modèle doit pouvoir évoluer par la suite, c'est-à-dire que les différents formalismes choisis pourront être remplacés ou améliorés. Enfin l'entreprise souhaite pouvoir obtenir comme sortie du modèle le suivi du potentiel hydrique foliaire tout au long du cycle de la culture, cet indicateur étant une référence dans le domaine de la viticulture. Pour la précision, l'idéal est d'obtenir la précision maximale possible au regard des données qui sont disponibles pour le paramétrage. Ces discussions ont permis de choisir la forme qu'allait prendre le modèle et les formalismes qui pouvaient convenir.

2.2.1 Les sources du modèle mis au point

Le choix a été fait de se limiter aux modèles de bilans hydriques dont les formalismes pour la transpiration et l'évaporation utilisent l'ET₀. Cette méthode est bien connue par les vignerons et elle est utilisée couramment dans la littérature scientifique. Le modèle peut calculer l'ET₀ au pas de temps horaire. A terme les stations météorologiques pourront aussi donner directement la valeur.

Au cours du stage deux modèles ont été reproduits, le premier est celui de la FAO56 qui utilise l'approche $K_c \cdot ET_0$. Après réflexion nous avons essayé de reproduire un modèle qui fournirait un indicateur plus précis qu'avec le formalisme de la FAO. Nous n'étions pas satisfaits de la précision que donnait le K_c car c'est une valeur générique fournie dans un tableau, qui est censée être la même pour tous les cépages de vigne. Ce qui n'est pas le cas en réalité. Le coefficient cultural varie selon le stade phénologique avec 4 valeurs : $K_{c_{ini}} = 30$, $K_{c_{dev}} = 60$, $K_{c_{mid}} = 40$, $K_{c_{late}} = 80$ (Allen et al. 1998).

Le second modèle retenu est celui de Lebon qui reprend les formalismes de Riou, décrit ci-dessous dans la partie 2.3.2. L'évaporation et la transpiration sont toujours calculées sous la forme $k \cdot ET_0$, mais le coefficient k est cette fois-ci déterminé à partir du rayonnement incident calculé pour chaque parcelle et à partir de la géométrie du rang que l'on peut aussi suivre pour chaque parcelle. Ce niveau de précision de l'indicateur était plus satisfaisant.

Pour calculer la transpiration on a besoin de connaître précisément la surface qui va être capable d'intercepter le rayonnement pour pouvoir transpirer. On caractérise donc la géométrie de la végétation : la hauteur, la largeur, l'indice de surface foliaire principalement (Allen et al. 1998).

Le modèle de Riou est reconnu dans la bibliographie comme étant une bonne référence. Il est réutilisé dans plusieurs articles scientifiques de référence et les formalismes ont été repris dans d'autres modèles de bilan hydrique.

2.2.2 Les principaux formalismes du modèle

L'évapotranspiration (ET) est le phénomène combiné de pertes d'eau par transpiration et par évaporation directe de l'eau du sol et des surfaces d'eau libres. On a besoin de déterminer l'évapotranspiration de référence pour obtenir ensuite la transpiration et l'évaporation de la vigne.

En partant des échanges d'énergie sur la surface d'une végétation, on peut estimer l'évapotranspiration par échange d'énergie sur le couvert végétal

L'ET₀ est recalculée dans le modèle à l'aide de l'équation simplifiée de Penman-Monteith :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Avec **ET₀** l'évapotranspiration de référence (mm * jour⁻¹),

T la température de l'air à 2m de hauteur (°C),

R_n, rayonnement net (MJ * m⁻² * jour⁻¹),

G, flux de chaleur du sol (MJ * m⁻² * jour⁻¹),

u₂ la vitesse du vent à 2m de hauteur (m * s⁻¹),

e_s - e_a le déficit de pression de vapeur à saturation (kPa),

Δ, la pente de la courbe de tension de vapeur saturante (kPa * °C⁻¹),

γ, la constante psychrométrique (kPa * °C⁻¹),

En suivant les formalismes décrits dans l'article (Allen et al. 1998), le modèle calcule directement **G, e_s, e_a, R_n, Δ**.

Pour **γ**, la valeur constante de 0.067 a été choisie.

T et **u₂** sont mesurés par la station météo.

- Détermination de la transpiration et de l'évaporation

Pour le calcul de la transpiration et de l'évaporation, le modèle de Lebon a été choisi (Eric Lebon et al. 2003)

Transpiration en l'absence de déficit hydrique :

$$TV_p = [R_{gv} / ((1 - \alpha) * R_g)] * ETP$$

Avec **TV_p** la transpiration potentielle (mm)

R_{gv} la radiation globale absorbée par la vigne,

α l'albédo de la vigne,

R_g la radiation globale

- Prise en compte de la régulation stomatique en situation de déficit hydrique :

$$TV = (ATSW / \varphi * TTSW) * TV_p$$

Où **TV** représente la transpiration journalière (mm),

ATSW est l'eau transpirable restante dans la réserve (mm),

TTSW la quantité d'eau totale transpirable (mm)

ϕ le seuil de remplissage en deçà duquel la vigne subit un stress

Calcul de l'évaporation en absence de déficit hydrique. Le déficit hydrique apparaît lorsque la réserve en eau facilement évaporable est vide, soit $REW < 0$:

$$Esp = [1 - (Rgv / (1 - \alpha) * Rg) * ETP]$$

Prise en compte du déficit hydrique, formalisme de (Nadine Brisson and Perrier 1991) :

$$\sum ES = (2b * \sum ES_p + b^2)^{1/2} - b$$

b est un paramètre a deux composants, l'un climatique (**b1**) et l'autre dépend du sol (**b2**)

$$b = 0,5 * b1 * b2$$

L'étape clef dans les calculs de transpiration et d'évaporation est la détermination de R_{gv} , le rayonnement absorbé par la vigne, qui n'est pas mesurable directement par la station météo. Pour obtenir la valeur R_{gv} , le modèle utilise l'ensemble des calculs du modèle de Riou permettant, entre autres, de calculer les différentes valeurs de R_i en fonction de l'heure de la journée, suite aux modifications du rayonnement incident (Riou et al. 1989).

$$R_{gv} = (1 - a_f) * R_i + a_s * n_d * (1 - a_f) * (R_g - R_i)$$

Où a_f représente l'albédo du feuillage,

R_i le rayonnement intercepté par la vigne ($W * m^{-2}$),

a_s l'albédo du sol,

n_d le coefficient d'interception du rayonnement diffus par la vigne.

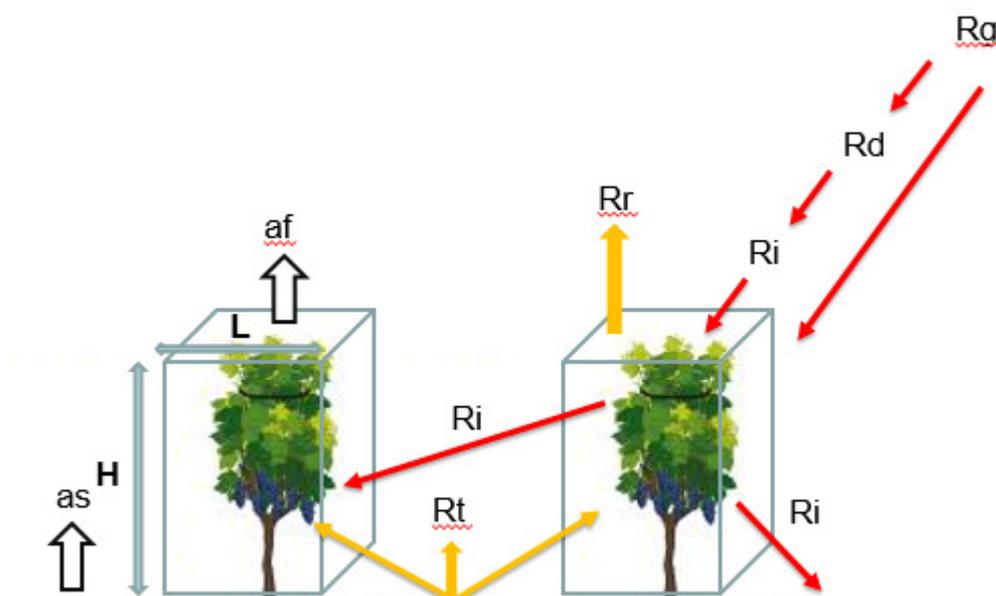


Figure 9 : Les rayonnements pris en compte dans le modèle (construit à partir des informations sur le modèle de Riou).

Les différents rayonnements qui sont source d'énergie pour la vigne sont :

- La part du rayonnement global qui arrive directement sur la vigne.
- La part du rayonnement global qui est diffus par des composants atmosphériques.
- Une partie du rayonnement du feuillage voisin parvient à la vigne.
- Une partie du rayonnement réfléchi par le sol est retransmis à la vigne.

Le développement racinaire n'est pas calculé par le modèle. Il y a peu de parcelles où le développement n'est pas déjà maximal. De plus les données sont manquantes sur la profondeur maximale du sol. L'hypothèse faite est que les racines sont présentes sur tout le profil, ce qui correspond assez bien à la réalité pour cette culture.

Si l'on souhaite paramétrer la croissance racinaire, il est possible de s'appuyer sur les références disponibles dans le manuel du modèle Biswat (Bertrand et al. 2017). À l'implantation la vigne a des racines d'environ 10cm, puis 30cm la seconde année. À partir de la 3^{ème} année l'enracinement est sur 1m de profondeur et puis sur toute la profondeur jusqu'à 3,5m la 4^{ème} année.

- Le calcul du bilan hydrique avec FTSW, la TEW réserve évaporable, le ruissellement, drainage

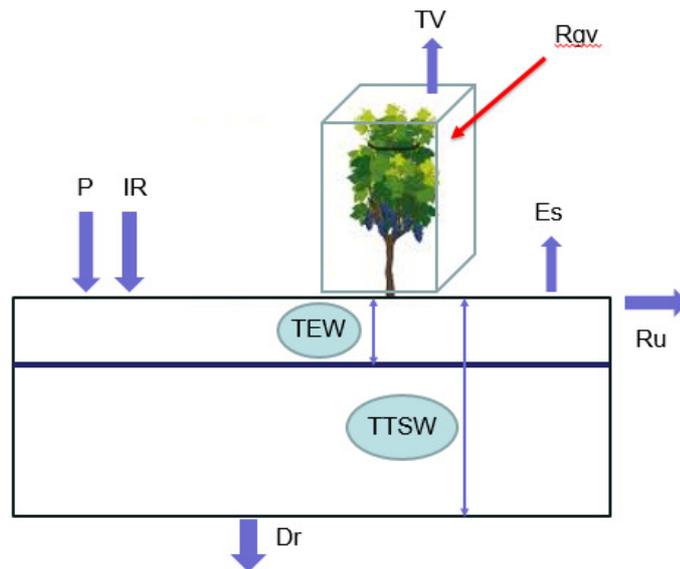


Figure 10 : Les principales composantes du bilan hydrique dans le modèle

Les derniers calculs présents dans le modèle permettent de simuler l'évolution de la réserve hydrique. La réserve est subdivisée en deux compartiments, TTSW qui représente la quantité d'eau totale transpirable par la plante et TEW qui est incluse dans TTSW et qui représente la quantité d'eau totale évaporable par le sol.

Une variable U est ajoutée, elle permet de suivre l'évolution de réserve en eau transpirable.

$$U_j = \text{MAX}(U_{j-1} - ES ; 0)$$

Le drainage : une fois la réserve pleine, l'excédent apporté par les pluies ou l'irrigation est drainé en profondeur et n'est pas exploitable par la culture.

Le drainage va dépendre de la charge en éléments grossiers, de la texture du sol et du taux de matière organique

$$Dr = \text{si}(\text{ATSW}_{j-1} + P_j + \text{IR}_j - ES - TV - RU > \text{TTSW} ; \text{ATSW}_{j-1} + P_j + \text{IR}_j - ES - TV - RU - \text{TTSW} ; 0)$$

Calcul du niveau de remplissage de la réserve hydrique :

$$\text{ATSW}_j = \text{ATSW}_{j-1} + P_j + \text{IR}_j - ES - TV - Dr - Ru$$

P_j les précipitations du jour en mm

IR_j les apports par irrigation en mm

$$\text{FTSW} = \text{ATSW} / \text{TTSW}$$

Où **FTSW** est la fraction d'eau disponible qui est transpirable par la plante

À ce stade on connaît le niveau de remplissage de la réserve, mais à partir de cette information il n'est pas évident de donner des préconisations à l'agriculteur pour l'irrigation.

On sait qu'en théorie lorsque la FTSW est inférieure à 0,4, la vigne subit un effet de stress (Roux, Bertrand, and J.Wery 2017). On pourrait donc au mieux suivre l'évolution de la FTSW et éviter de descendre en dessous de 0,4 pour éviter qu'elle ne subisse un stress.

Avec les recherches sur le potentiel hydrique foliaire, on sait que c'est un indicateur intéressant et fiable pour caractériser l'état hydrique de la vigne. C'est pourquoi la relation de la figure 11 a été intégrée au modèle.

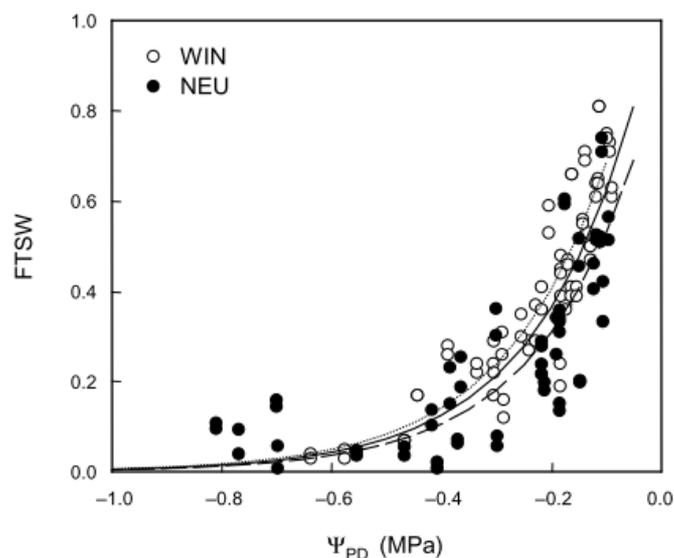


Figure 11 : Fraction de la FTSW en fonction du potentiel hydrique foliaire (E Lebon et al. 2003)

La relation $FTSW=f(\Psi_b)$ nous permet de suivre l'état hydrique de la vigne au travers de son potentiel hydrique foliaire dont on connaît la valeur souhaitée et dont on a réalisé des mesures directes sur différentes parcelles. Aussi, cette relation est suffisamment stable pour permettre d'utiliser la FTSW comme un indicateur de l'état hydrique de la vigne (A. Pellegrino et al. 2005).

2.2.3 Le paramétrage du modèle pour les parcelles 5, 13, 16 et 17

Depuis cette année les différents domaines sont équipés de stations météo, les données sont disponibles en continu au pas de temps horaire ou journalier. Le modèle utilise les données horaires des précipitations, du rayonnement incident, de l'humidité de l'air, de la vitesse du vent et de la température.

Tableau 6 : paramétrage initial du modèle pour les différentes parcelles.

Paramètres d'entrée à mesurer ou à estimer			
Signe	Nom	Valeur	Unité
L	Largeur de la vigne	0,3	m
H	Hauteur du feuillage	1,5	m
D	Ecartement des rangs	2	m
p	Porosité des parois verticales de la vigne	0,333333	N/A
af	Albédo du feuillage	0,2	N/A
as	Albédo du sol	0,18	N/A
Φ	Latitude du lieu	variable	rad
b1	Paramètre à composante climatique (Brisson and Perrier 1991)	14	N/A
b2	Paramètre a composante sol (Brisson and Perrier 1991)	0,1	N/A
Altitude	Altitude de la parcelle	variable	m
Seuil stress	Taux de remplissage de la réserve en deça duquel la vigne est stressée	0,4	N/A
TTSW	Total Transpirable Soil Water, la quantité d'eau totale transpirable par la plante	variable	mm
TSWini	Niveau de remplissage initial de la réserve	variable	mm
REW	Fraction de la réserve utile facilement transpirable	9	mm

Les valeurs de L, H et D sont les mêmes pour les différentes parcelles étudiées. En réalité le développement végétatif varie selon le cépage et les objectifs de production. Dans notre contexte l'objectif de rendement et de qualité sont les mêmes sur les parcelles simulées. La hauteur et la largeur n'ont pas été mesurées précisément dans le cadre de l'étude mais si le modèle venait à être utilisé comme outil d'aide à la décision, il faudrait déterminer plus précisément ces paramètres pour chaque parcelle.

La porosité des parois verticales est une mesure particulière que nous n'avons pas réalisée, nous avons repris une valeur qui revenait dans la littérature (Lebon, 1995). Les valeurs de b1 et b2 proviennent de l'article (E Lebon et al. 2003). Pour le paramétrage de REW, différentes valeurs ont été testées et la valeur fixe de 9mm donne de bons résultats.

Le niveau de remplissage initial de la réserve peut être déterminé à l'aide d'une valeur de potentiel hydrique foliaire ou simplement après des précipitations importantes on peut estimer que ATSW = TTSW. Avec les fortes pluies de la saison 2017-2018, les réserves utiles de toutes les parcelles expérimentées étaient pleines en avril au début de cycle.

Tableau 7 : Données pour les parcelles qui ont été modélisées

Le tableau 7 présente les différentes données disponibles pour les 4 parcelles qui ont été modélisées, ces données nous ont été fournies par les responsables des domaines. À l'exception de la valeur de la TTSW qui est obtenue en paramétrant le modèle. La TTSW est une valeur difficile à déterminer. Pour obtenir cette valeur la société paramètre la parcelle dans un premier temps avec l'ensemble des données disponibles et en utilisant la valeur de la réserve utile comme TTSW. Dans un second temps des mesures de potentiel hydrique foliaire sont réalisées et le modèle est ajusté cette fois en modifiant la valeur de réserve utile jusqu'à ce que la courbe soit calée sur les points de mesures. Cette nouvelle valeur de réserve utile correspond à la TTSW.

Cette manière de faire est une approximation et il existe des méthodes permettant de calculer la TTSW comme l'a montré (Gaudin et al. 2017), mais c'est une mesure délicate à obtenir.

Tableau 8 : sensibilité du modèle aux différentes entrées météorologiques et aux différents paramètres

	< 0,1 Mpa	0,1 - 0,2 Mpa	> 0,2 Mpa
Paramètres			
L		x	
H		x	
D		x	
p	x		
af	x		
as	x		
TTSW		x	
REW		x	
b1	x		
b2	x		
seuil stress	x		
Météo			
Rg			x
Pluie		x	
Vent	x		
Température		x	
Humidité	x		

Afin de tester la sensibilité du modèle aux variations des paramètres et des entrées météo, les valeurs de chacune de ces entrées ont été modifiées à 50% et on a observé l'importance des variations du potentiel hydrique foliaire en sortie. Certaines entrées ont peu d'impact sur le modèle, d'autres, comme le rayonnement global, ont une importance plus grande.

2.2.4 Evaluation du modèle

On utilise le biais, l'efficacité, la RMSE Root Mean Square Error (N. Brisson et al. 2002) pour quantifier la dispersion entre le modèle et les données. Plusieurs critères sont utilisés pour cette évaluation car l'utilisation d'un seul pourrait être mal interprété.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{simi} - Y_{obsi})^2}{n}}$$

Où Y_{simi} représente les valeurs de potentiel hydrique foliaire simulées par le modèle (Mpa), Y_{obsi} représente les valeurs obtenues avec les mesures de chambre à pression (Mpa) n représente le nombre de mesures réalisées

$$\text{Valeur de la RMSE relative aux données (en \%)} = \frac{RMSE}{Y_{observé}}$$

La valeur absolue de la RMSE est calculée. La RMSE en elle-même est délicate à interpréter, c'est pourquoi on utilise la RMSE apparente qui donne une valeur en pourcentage. La RMSE est un indicateur de précision qui évalue la distance entre les points mesurés et simulés. On peut considérer que si la valeur relative de RMSE est inférieure à 20%, les prédictions du modèle sont satisfaisantes.

$$\text{Biais} = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_{simi} - Y_{obsi})^2}{n}$$

Le biais est un indicateur de l'exactitude, un biais négatif indique que les points de mesures se situent en moyenne sous la courbe et que le modèle surestime le potentiel hydrique foliaire par rapport à la réalité. Et inversement lorsque le biais est positif.

$$\text{Efficience} = 1 - \frac{\sum_1^n (Y_{simi} - Y_{obsi})^2}{\sum_1^n (\overline{Y_{obs}} - Y_{obsi})^2}$$

L'efficience du modèle permet d'évaluer la performance du modèle par rapport à la moyenne expérimentale. Elle est calculée sur la base de la relation entre l'écart moyen simulé observé et l'écart moyen expérimental. Si l'efficience est proche de zéro, ou si elle prend des valeurs négatives, cela signifie que la valeur moyenne des mesures est plus fiable que la simulation. Si l'efficience est proche de 1, l'utilisation du modèle est plus pertinente que la moyenne des observations.

3 Résultats

3.1 Analyse des mesures effectuées par mesure directe

3.1.1 Observation de l'échantillon de données

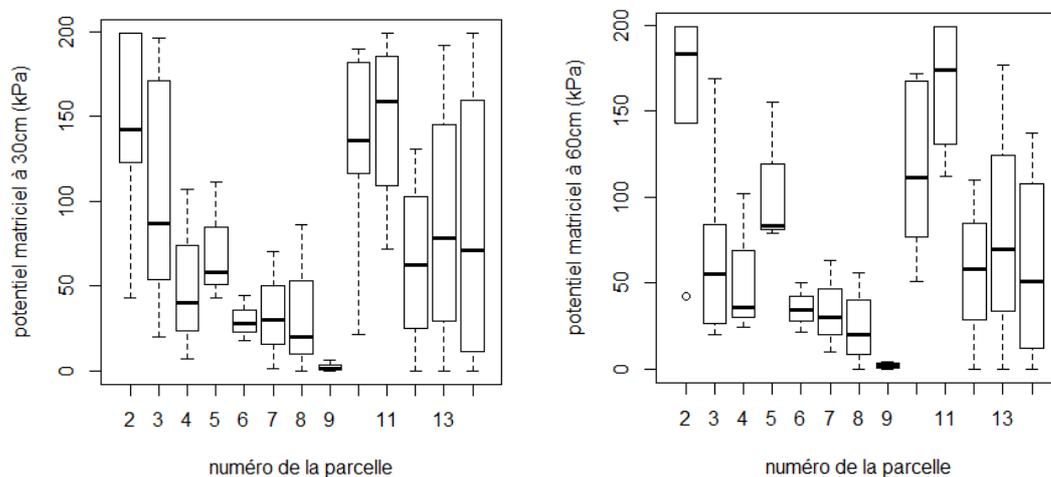


Figure 12 : Potentiel matriciel de sol à 30 et 60cm de profondeur sur l'ensemble des parcelles

La figure 12 représente pour chaque parcelle la distribution des valeurs de potentiel matriciel du sol à 30 et 60cm mesurées sur la période de prélèvement sur les mois de juillet et d'août en fonction du numéro de la parcelle. On peut observer qu'il y a peu de variation en fonction de la profondeur. Ceci peut s'expliquer par l'état hydrique qui était globalement identique aux deux profondeurs. Cette homogénéité peut s'expliquer par la texture du sol qui varie peu entre ces deux profondeurs.

On peut aussi voir des similitudes entre parcelles du même domaine, en effet les parcelles 8 et 9 sont sur le domaine de Gassier, les parcelles 12, 13 et 14 sur le domaine de Mas la Chevalière. La différence de valeurs entre les domaines peut s'expliquer par la météo et les types de sols différents. Les similitudes au sein d'un domaine peuvent s'expliquer par un type de sol identique pour les différentes parcelles.

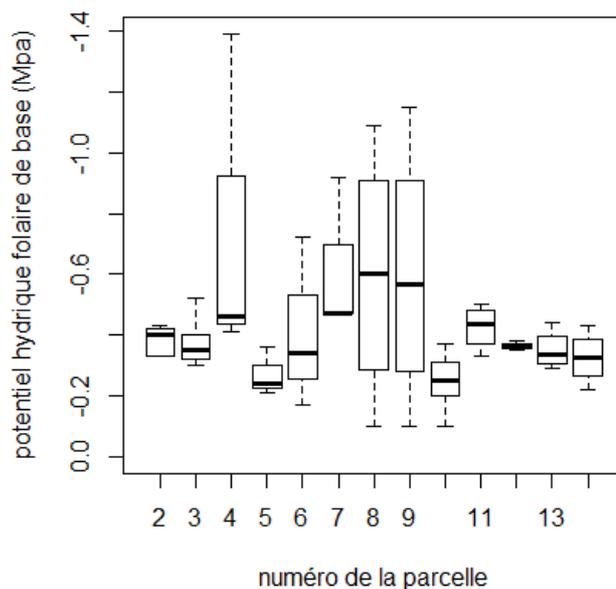


Figure 13 : Ensemble des mesures de potentiel hydrique de base pour différentes parcelles

On peut observer sur la figure 13, l'état hydrique moyen de la vigne pour chaque parcelle. Sur une moitié des parcelles le potentiel n'est jamais descendu sous le seuil des - 0.4Mpa ce qui correspond à une vigne bien alimentée en eau. Certaines mesures ont mis en évidence un potentiel pouvant descendre en dessous de -1Mpa. Dans ce cas la vigne connaît un stress important.

3.1.2 Analyse de la relation entre les mesures de sondes et les mesures de chambre à pression

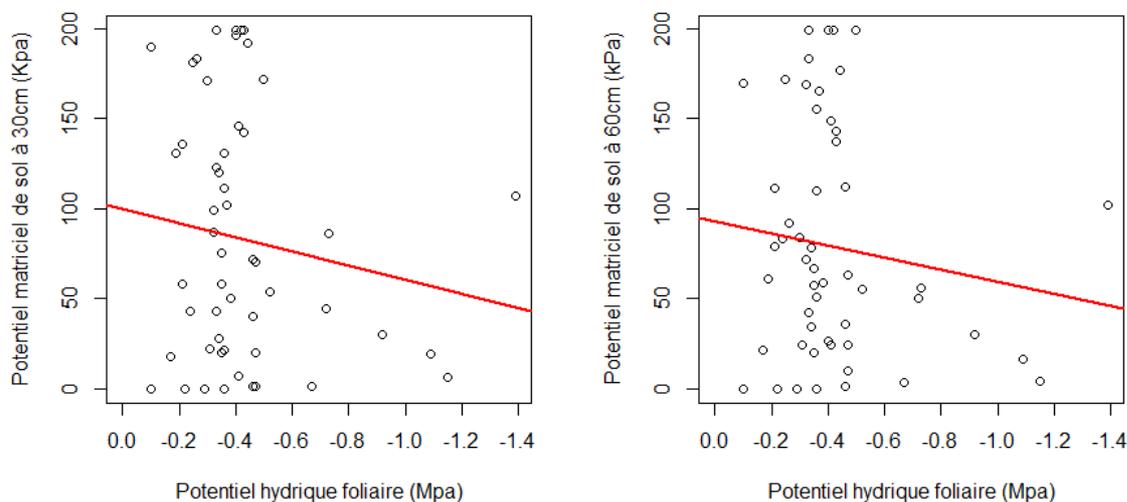


Figure 14 : Distribution de l'ensemble des mesures de sondes tensiométrique au cours de la saison aux profondeurs 30cm et 60cm

L'idée de la figure 14 est de mettre en évidence une relation entre le potentiel matriciel de sol et le potentiel hydrique foliaire toutes parcelles confondues. Si l'on peut trouver une corrélation cela signifie que les mesures des sondes sont bien corrélées à l'état hydrique de la vigne quelle que soit la parcelle, et dans le cas contraire, que les mesures de sondes ne représentent pas bien l'état hydrique de la vigne et/ou que l'effet de la parcelle est important.

Les droites de régression linéaires sont tracées en rouge, on observe que l'on ne peut pas mettre en évidence de relation linéaire. En vérifiant les hypothèses on se rend compte que les variables ne sont probablement pas normales.

Tableau 9 : régression linéaire sur l'ensemble des parcelles aux deux profondeurs

	PROFONDEUR 30CM	PROFONDEUR 60CM
PVALUE	0.280	0.626
R-SQUARED	0.02	0.08
PUISSANCE	0.19	0.08

En observant le nuage de points on peut se douter que l'on ne trouvera pas de corrélation avec ce jeu de données. On observe des valeurs de potentiel hydrique foliaire inférieures à -1Mpa pour des mesures de sondes comprises entre 0 et 50 kPa. Pour un potentiel aussi faible, dans la majorité des cas le sol devrait être sec et les sondes devraient indiquer 200 kPa.

Cependant, en ne retenant que les points pour lesquels le potentiel hydrique foliaire varie uniquement entre 0 et -0,6Mpa, il n’a tout de même pas été possible de mettre en évidence une quelconque relation.

Bien qu’il ne soit pas possible de mettre en évidence cette relation sur l’ensemble des parcelles, on peut toutefois l’observer sur certaines parcelles comme le montre le graphique ci-dessous. C’est le cas des parcelles 13 et 14 du domaine de Mas la Chevalière. Les deux parcelles ont un sol aux propriétés identiques sur les deux profondeurs de 30cm et 60cm.

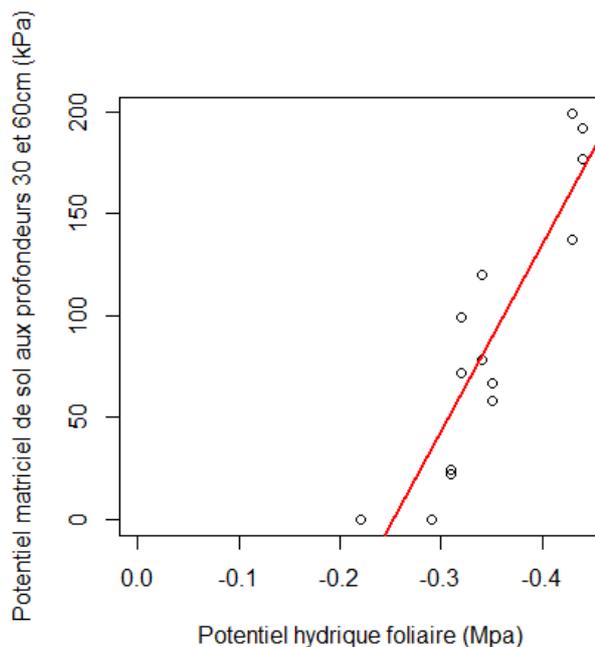


Figure 15 : Relation linéaire entre les mesures de sondes et les mesures de potentiel hydrique foliaire pour les parcelles 13 et 14. Pvalue : $1 \cdot 10^{-6}$ R-squared : 0.86

Les hypothèses sur les résidus semblent vérifiées pour les parcelles 13 et 14 mais il y a peu de points donc ce n’est pas précis. Les graphiques permettant de vérifier les hypothèses sont présentés en annexe 2 et en annexe 3.

Il n’a été possible de mettre en évidence cette relation avec suffisamment de points de mesure que sur les parcelles 13 et 14. De plus dans ce cas précis, la relation est mise en évidence que l’on prenne séparément les données de chacune des parcelles ou que l’on mélange les deux jeux de données.

Sur les autres parcelles la relation n’est pas aussi clairement établie comme le montre le tableau 10. La relation est également présente sur les parcelles 2, 6 et 9.

Tableau 10 : relations linéaires entre potentiel matriciel de sol à 30cm et potentiel hydrique foliaire de base sur 13 parcelles différentes

Parcelle	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Pvalue	0,09	0,67	0,18	0,26	0,05	0,940	0,61	0,08	0,08	0,53	0,81	0,09	0,06
Rsquared	0,83	0,07	0,93	0,85	0,99	0,01	0,15	0,84	0,49	0,22	0,07	0,83	0,87

Une Ancova a été envisagée pour voir s'il était possible de montrer un effet de la parcelle ou du potentiel hydrique foliaire sur l'ensemble des données. Les p-value obtenues n'étaient pas significatives.

Effet de la parcelle sur les données à la profondeur 30cm : P-value = 0,74

Effet de la parcelle sur les données à la profondeur 60cm : P-value = 0,45

Il n'a pas été possible de mettre en évidence un effet la parcelle sur l'échantillon de données total comprenant toutes les mesures et toutes les parcelles confondues.

3.2 Résultats d'évaluation du modèle

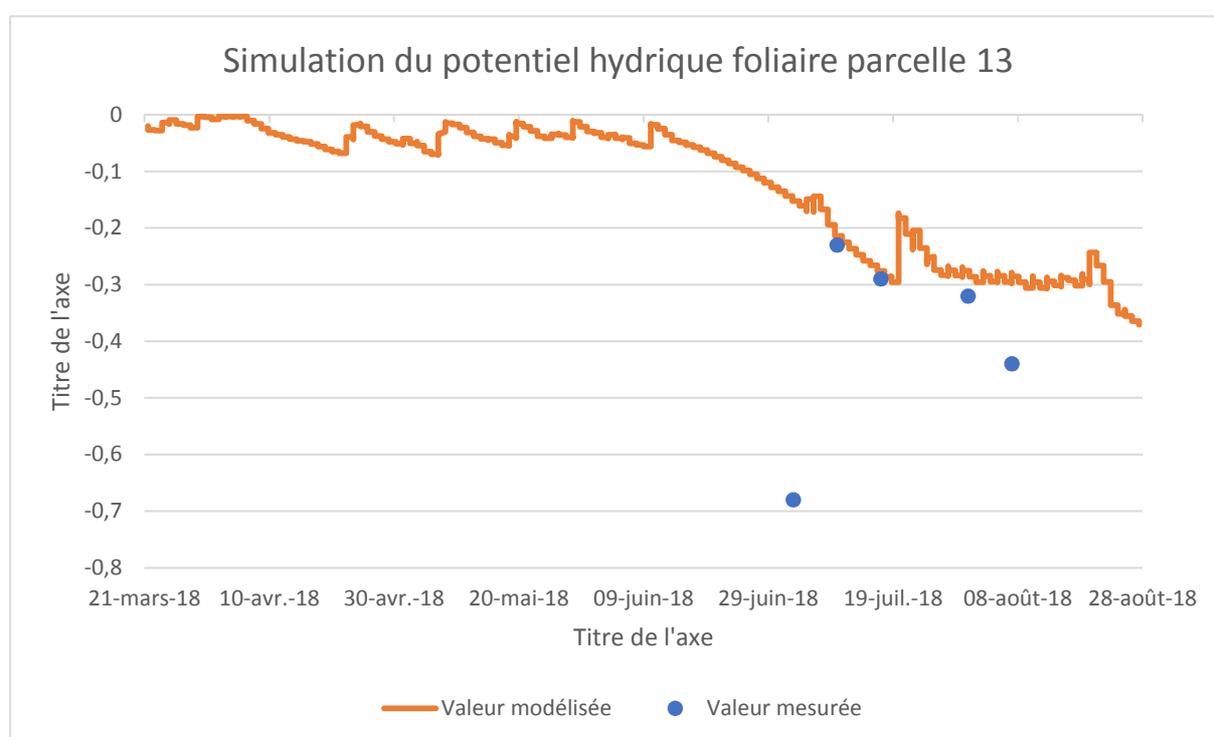


Figure 16 : sorties du modèle pour la parcelle 13

La parcelle 13 du Mas la Chevalière est plane et le sol est profond, elle est adaptée pour la modélisation. On peut voir sur le second graphique que les valeurs simulées du potentiel hydrique foliaire correspondent bien aux valeurs mesurées à l'exception d'un point.

L'évaluation de la sortie graphique a été faite à deux reprises, avec et sans le point très éloigné de la courbe.

Tableau 11 : évaluation des sorties du modèle pour la parcelle 13

	Avec le point éloigné	Sans le point éloigné
RMSE (Bar)	2,92	0,21
RMSE apparent (%)	74	7
Biais (Mpa)	0,12	0,02
Efficienc	-1,29	0,08

En considérant le point éloigné daté du 3 juillet on peut observer que le RMSE relative vaut 74% ce qui est bien supérieur aux 15-20% que l'on souhaite. Le modèle fait une erreur de prédiction. Il y a un biais important de 0.12 qui montre une surévaluation du modèle et l'efficience est négative ce qui montre que le modèle n'est pas performant.

En revanche si l'écart de ce point s'explique par une erreur de mesure et que l'on évalue une seconde fois en ne considérant pas le point, on obtient un résultat satisfaisant avec une RMSE relative de 7%, un biais faible. L'efficience en revanche n'est pas encore satisfaisante.

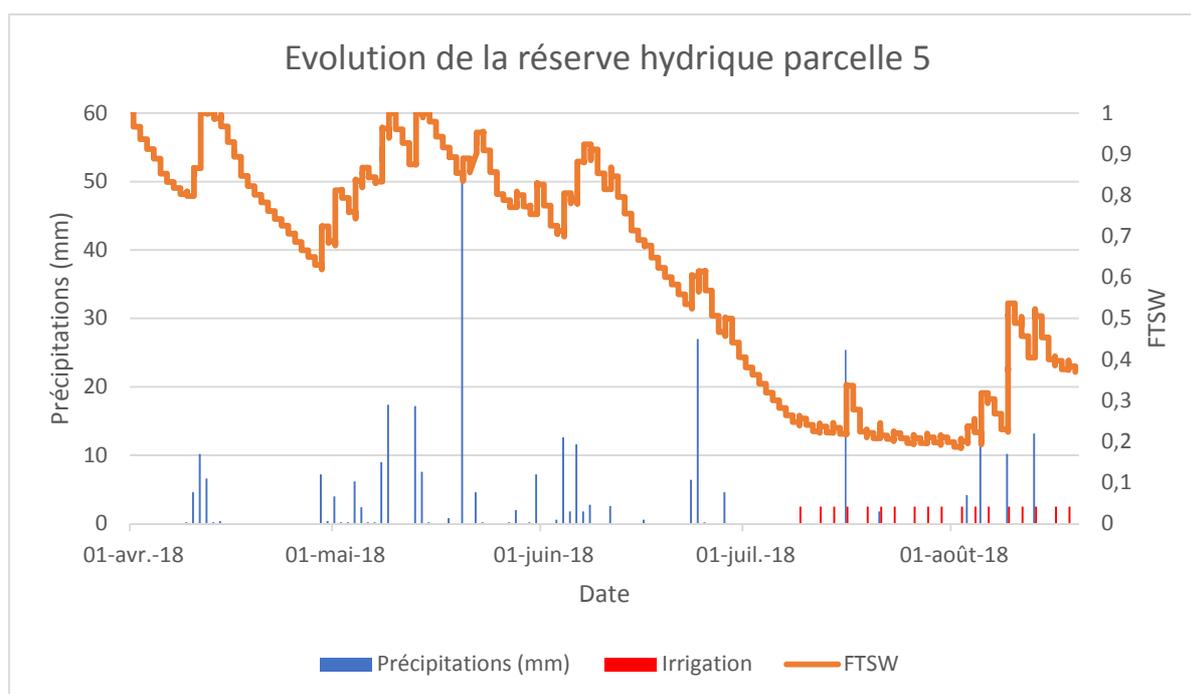


Figure 17 : simulation de la FTSW pour la parcelle 5

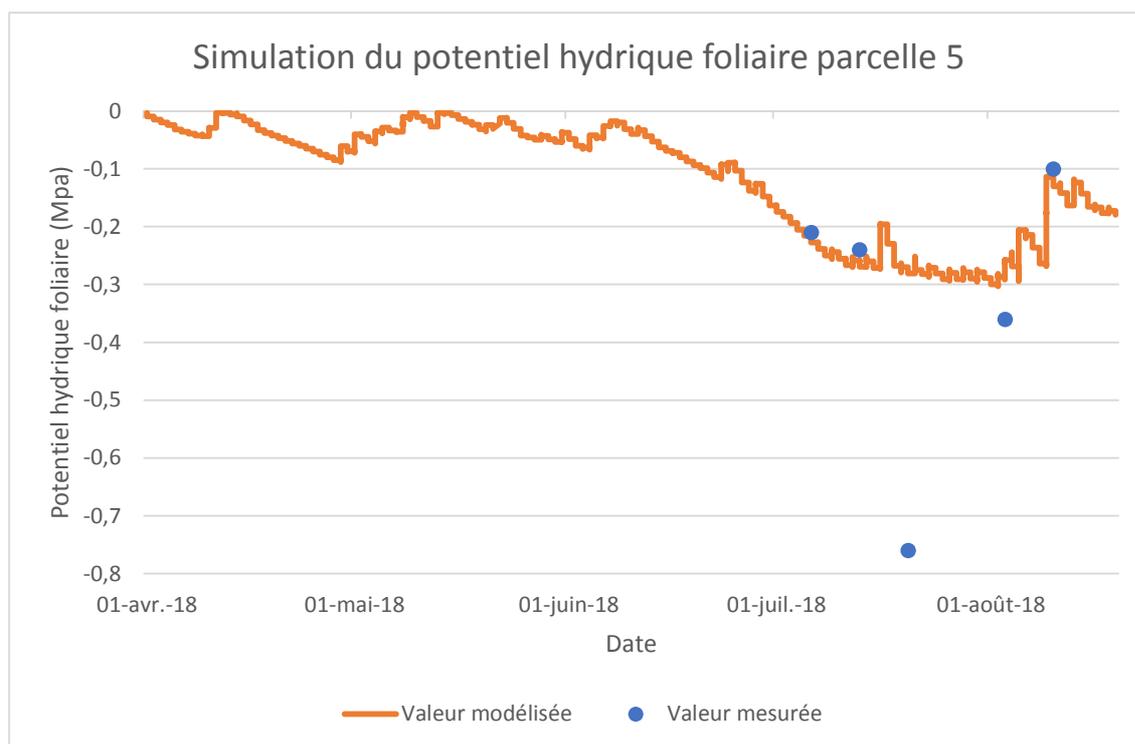


Figure 18 : sorties du modèle pour la parcelle 5

Tableau 12 : évaluation des sorties du modèle pour la parcelle 5

	Avec le point éloigné	Sans le point éloigné
RMSE (Bar)	1,62	0,1
RMSE apparent (%)	49	4
Biais (Mpa)	0,04	-0,04
Efficience	0,38	0,69

Sur la parcelle 5 également, on observe que si l'on ne considère pas le point éloigné, le modèle donne une bonne prédiction. L'efficience du modèle est ici assez satisfaisante comme elle est proche de 1.

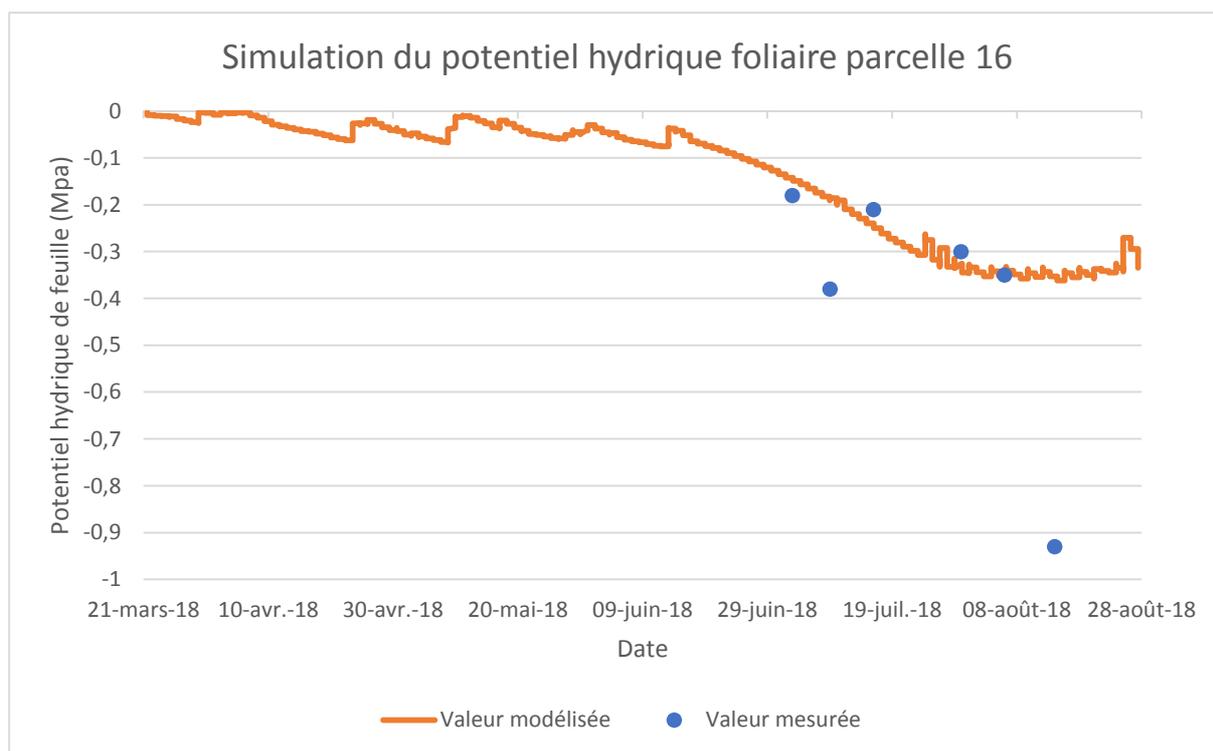


Figure 19 : sorties du modèle pour la parcelle 16

Tableau 13 : évaluation des sorties du modèle pour la parcelle 16

	Avec le point éloigné	Sans le point éloigné
RMSE (Bar)	3,28	0,33
RMSE apparent (%)	84	12
Biais (Mpa)	0,1	-0,01
Efficiencie	-0,04	-0,10

Pour la parcelle 16, si l'on ne considère pas le point éloigné, le modèle a une évaluation plutôt bonne. Mis à part l'efficiencie qui n'est pas très bonne pour cette parcelle.

Application du modèle pour une parcelle en pente :

Domaine de Valoussière, simulation pour une parcelle dont la pente est de 10% :

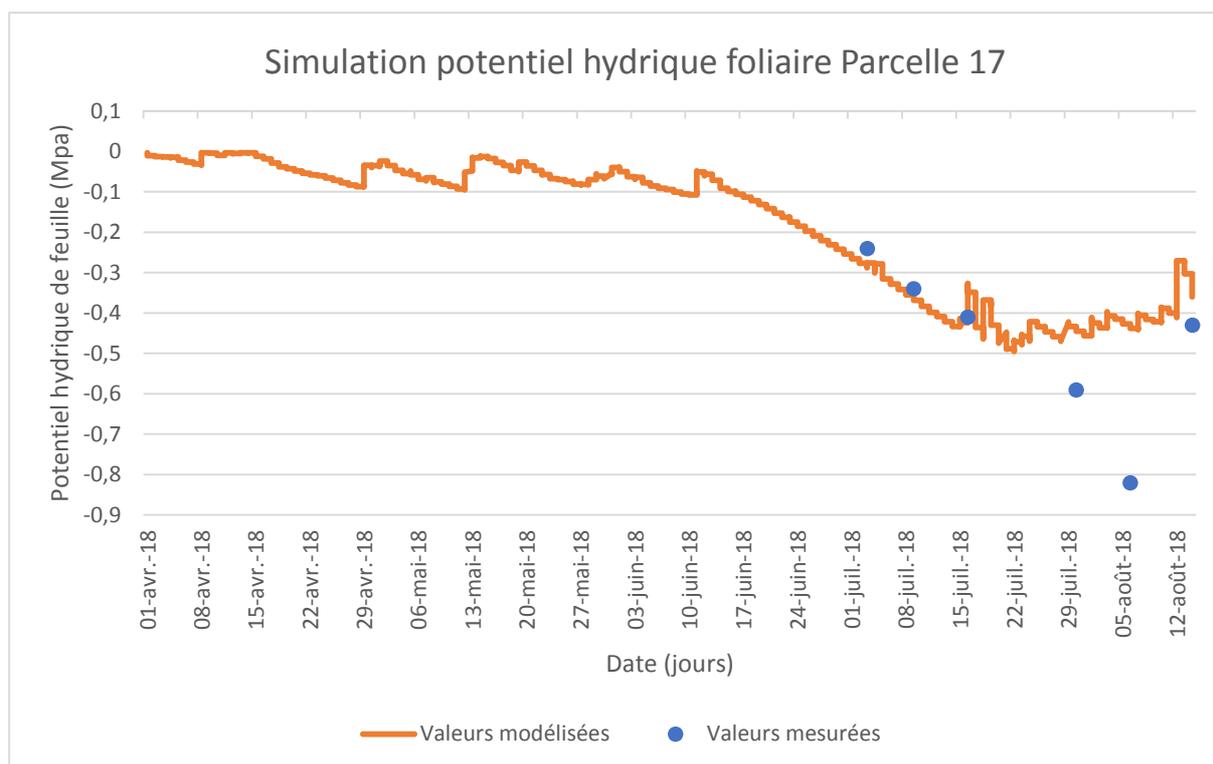


Figure 20 : sorties du modèle pour la parcelle 17

Tableau 14 : évaluation des sorties du modèle pour la parcelle 17

	Avec le point éloigné	Sans le point éloigné
RMSE (Bar)	1,66	0,39
RMSE apparent (%)	35	10
Biais (Mpa)	0,10	0,04
Efficience	0,06	0,41

On pourrait penser que l'on peut utiliser la modélisation pour cette parcelle, cependant les mesures ont toutes été effectuées en bas de la parcelle et l'effet de la pente n'est donc pas représenté sur le graphique. On ne peut pas généraliser ce résultat à l'ensemble de la parcelle. Les besoins hydriques en haut de la pente ne sont pas les mêmes que ceux en bas de la pente comme le montre la figure 21 où 10 mesures ont été réalisées en haut de pente et 10 mesures en bas de pente à deux dates différentes, le 22 août et le 29 août :

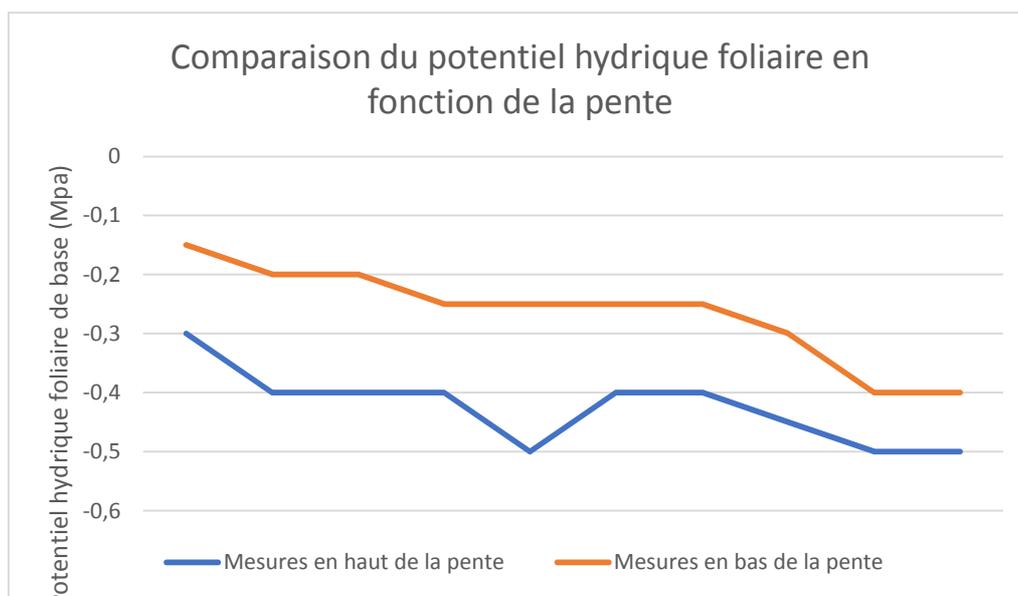


Figure 21 : Vérification de l'effet de la pente sur une parcelle avec une pente de 7%

Discussion

3.3 Discussion des résultats

3.3.1 Exploitation des mesures

Nous n'avons pas pu mettre en évidence une relation générique qui relie les valeurs de sondes à l'état hydrique de la vigne pour l'ensemble des parcelles, c'est un résultat auquel on s'attendait puisque la capacité de rétention d'eau et le type de sol influencent les valeurs indiquées par les sondes.

Ce qui est plus surprenant en revanche c'est qu'il soit assez difficile d'établir la corrélation entre l'état hydrique d'une parcelle et le potentiel de sol, lorsque l'on observe les données parcelle par parcelle ce qui permet d'éliminer l'effet de la parcelle. Ceci montre la limite dans l'utilisation des sondes Watermark pour le pilotage de l'irrigation. Les vignes ont leurs racines implantées au-delà de la limite de mesure des sondes à 60cm ce qui est très probablement à l'origine de nos observations.

Le matériel dont nous disposions ne permettait pas d'enterrer des sondes au-delà des 60cm. La première limite vient de la longueur des tubes de PVC fournis avec les sondes qui était de 60cm. La seconde limite vient du matériel utilisé pour creuser : au-delà de 60cm il est plus difficile de creuser, car lorsque l'on rencontre un caillou en profondeur on ne peut pas creuser plus profondément.

Le tableau 14 ci-dessous montre plusieurs parcelles sur lesquelles les sondes indiquaient 199 aux profondeurs 30cm et 60cm ce qui signifie que le sol est entièrement sec sur cette profondeur. La mesure complémentaire du potentiel foliaire a mis en évidence que la vigne n'était pourtant pas dans un état de stress hydrique. Au contraire elle était dans un optimum de contrainte hydrique légère.

Si l'on n'est équipé de sondes que sur une partie du profil racinaire, on peut interpréter la valeur en pensant qu'il faut irriguer rapidement et abondamment la culture, ce qui aurait pour effet une perte de qualité et une perte de la ressource en eau.

Tableau 15 : Exemple de relevés indiquant un horizon superficiel sec sans conséquences pour la vigne

Domaine Cazes		
Date	Potentiel matriciel de sol à 30 et 60 cm de profondeur (kPa)	Potentiel hydrique foliaire (Mpa)
13-juil	199	-0,4
	199	
19-juil	199	-4,2
	199	
Domaine Mas la Chevalière		
31-juil	199	-0,37
	128	
07-août	199	-0,34
	199	

La relation de la figure 15 qui a été trouvée sur les parcelles 13 et 14 montre que pour certaines parcelles l'usage des sondes peut tout de même donner des informations précises et ce pour un prix très raisonnable. Cette relation est établie pour une gamme de potentiels hydriques foliaires s'étalant entre 0 et -0.4Mpa. Au-delà de -0.4Mpa, les sondes devraient toujours indiquer 199. Pour une sonde indiquant 199, on sait uniquement que le potentiel hydrique foliaire correspondant est supérieur à -0.4Mpa, sans en connaître la valeur exacte.

Pour un cépage dont l'objectif de production est la production d'un vin blanc ou d'un rosé ce type d'équipement est parfait, comme on ne souhaite de toute manière pas dépasser la valeur de -0,4Mpa au cours de la saison.

La sonde n'est pas un indicateur précis pour le suivi précis de l'état hydrique de la vigne, par contre lorsque les sols ont commencé à se dessécher on a pu observer un dérèglement dans la lecture des sondes, notamment chez château Gassier. Les valeurs des sondes ont augmenté soudainement en passant de 30kPa à 150kPa. En constatant cette augmentation sur deux parcelles du domaine à la date du 28 juin, nous avons supposé que cela pouvait être un indicateur de l'approche de la date de début d'irrigation. Ces perturbations dans la lecture nous ont aidé à décider en indiquant que les besoins en irrigation pouvaient être plus importants. Cette indication supplémentaire apportée par les sondes n'est pas visible à l'œil nu sur la parcelle.

Il est fort probable que la sonde enfouie à 30cm entre deux goutteurs ne puisse pas détecter les apports fractionnés d'irrigation de l'ordre de 1mm. Les sondes ne rendent pas compte précisément de l'état hydrique du réseau racinaire.

Le principal usage des sondes durant le stage est l'observation de l'évolution continue des valeurs sur les différents domaines. On a ainsi pu identifier le moment où la contrainte hydrique légère est apparue sur différentes parcelles et à partir de là, être vigilant pour déclencher l'irrigation au bon moment. En réalisant les mesures de chambre à pression

par la suite, on s'est rendu compte que la contrainte hydrique était bel et bien présente. L'outil était d'autant plus utile qu'il y a eu cette année des précipitations importantes pendant la période de développement végétatif. Les réserves étaient remplies et il était délicat de prédire à partir de quand nous allions manquer d'eau.

3.3.2 Performances du modèle

Les valeurs du potentiel hydrique foliaire simulées par le modèle correspondent bien aux valeurs mesurées en condition de contrainte hydrique modérée, le modèle reproduit bien la réalité avec un biais assez faible et des valeurs de RMSE satisfaisantes.

On peut observer sur les parcelles simulées que l'allure de la courbe répond bien aux objectifs de production jusqu'à la fin de la maturité pour un vin rouge. La vigne connaît un déficit hydrique modéré pendant la saison sans qu'il n'atteigne des valeurs critiques en dessous de -0.8Mpa . En fin de saison cependant, on peut voir que les réserves utiles sont vides et la vigne commence à stresser. Ceci a un effet négatif sur la mise en réserve et donc le développement végétatif pour l'année $N+1$.

Sur les simulations des parcelles 5, 13 et 16, on observe un point aberrant au potentiel hydrique très négatif par rapport à la simulation. Sur la parcelle 13 la mesure est datée du 3 juillet, avec une valeur de -0.68Mpa . La mesure suivante au 10 juillet indique $-0,23\text{Mpa}$, pourtant il n'y a pas eu de précipitations importantes entre ces deux dates. Cette valeur ressemble à un biais qui provient d'une erreur de mesure.

Sur les parcelles 16 les mesures réalisées ont indiqué un potentiel de -0.93Mpa à la date du 14 août, cependant il y a eu d'importantes précipitations le 12 août avec $12,8\text{mm}$. De ce fait il est peu probable que la vigne soit autant stressée deux jours après des précipitations de cet ordre de grandeur. Ici aussi il est possible qu'il y ait un biais qui provient de la mesure. Les parcelles 16 et 17 sont sur le même domaine à Valoussière. Si l'on avait trouvé deux valeurs très négatives le même jour sur les deux parcelles, il aurait été très probable que l'erreur vienne du modèle, mais ce n'est pas ce que nous avons observé. Lorsque la valeur de potentiel était très négative sur une parcelle, ce n'était pas le cas sur l'autre parcelle aux dates du 6 août et du 14 août.

Cela fait tout de même plusieurs points aux valeurs assez éloignées du modèle. Par conséquent, il faut être prudent avant de l'utiliser pour piloter une culture : un biais qui proviendrait de l'un des formalismes est toujours possible. Aussi, il faudrait vérifier le bon fonctionnement du modèle en réalisant une autre série de mesures l'année qui vient. Il est possible aussi que le formalisme utilisé pour convertir la FTSW en potentiel hydrique foliaire ne soit pas tout à fait adapté lorsque la FTSW est inférieure à $0,2$ et que dans ce cas le modèle surestime le potentiel hydrique foliaire.

3.4 Discussion de la méthode

La relation $\text{FTSW}=f(\Psi_b)$ a été testée et mise en évidence dans deux régions différentes et elle était identique dans les deux contextes. Cependant la relation a été testée sur peu de

cépages et il est possible que la relation varie d'un cépage à l'autre. Ce serait bien de pouvoir tester cet effet. Il faut rester prudent sur les interprétations faites en se basant sur les sorties du modèle. (Lavoie-Lamoureux et al. 2016) montre qu'en situation de stress les différents cépages réagissent très différemment. Le choix du cépage est discuté ci-dessous dans les perspectives, car certains d'entre eux ont un comportement isohydrique, tandis que d'autres ont un comportement anisohydrique.

L'utilisation de la modélisation ne permet pas de représenter la situation hydrique d'une parcelle en pente puisque celle-ci va varier selon notre position dans la parcelle. La simulation avec un modèle serait identique pour le haut et le bas de la pente alors que dans la réalité on observe une hétérogénéité.

Dans la plupart des cas et en particulier chez Advini, les parcelles en pente sont irriguées de manière uniforme. On apporte les mêmes volumes d'eau que l'on soit en haut ou en bas de la parcelle. Par conséquent connaître le déficit hydrique en fonction de la pente n'a pas une grande pertinence pour piloter les apports d'eau puisque ceux-ci sont peu modulables. On pourrait envisager de modéliser la réserve hydrique pour le haut puis pour le bas de la parcelle, afin d'avoir une idée approximative de son état. Pour ce faire, il faudrait par exemple pouvoir mesurer la TTSW en haut et en bas du profil et pouvoir connaître précisément les flux d'eau par le ruissellement. Dans le cas d'une parcelle en pente le ruissellement n'est pas du tout négligeable.

Dans l'éventualité où l'on voudrait utiliser la modélisation, si par exemple l'objectif de production est de limiter au maximum les pertes de rendement, le plus pertinent serait probablement de modéliser pour la partie haute de la parcelle qui sera la zone la plus rapidement sujette à un stress. Si on s'assure de ne pas avoir de stress hydrique pour la partie haute, la partie basse ne sera pas stressée, mais elle aura des apports d'eau en excès et on risque de perdre en qualité pour les baies.

3.5 Discussion des perspectives

Suite à ce travail il est prévu de créer l'année à venir un emploi à mi-temps pour le relevé en continu de valeurs du potentiel hydrique foliaire. Ceci devrait permettre de valider les résultats obtenus pour le modèle et permettra de piloter avec précision l'irrigation.

L'étude assez ciblée menée sur le pilotage de l'irrigation et le travail de modélisation permettent à la société d'approfondir cette thématique et de se munir d'un premier outil de modélisation, mais il y a aussi d'autres bénéfices pour l'entreprise. Avant ce stage les domaines n'étaient pas équipés d'appareils de mesure, et des stations météorologiques venaient tout juste d'être installées. L'installation de sondes Watermark sur les différents domaines est un avancement valorisé par Advini. Les recherches effectuées pendant le stage ont relevé la pertinence d'utiliser une chambre à pression pour avoir un indicateur précis de l'état hydrique de la vigne. Ceci a permis de justifier l'achat d'une chambre à pression. Il y a eu des répercussions sur d'autres projets en cours. Des projets autour de l'irrigation étaient en suspens du fait du manque de données. Par exemple sur l'un des domaines les valeurs de potentiel hydrique foliaire ont apporté des arguments pour consolider un projet de

construction d'une retenue collinaire. Des tests de fractionnement de l'irrigation ont aussi été réalisés au château Roquefeuille et j'ai pu apprendre que les rendements et la qualité étaient bons cette année.

Dans une autre situation, il a été question de justifier le projet de construction d'un second forage en s'appuyant sur l'outil de modélisation et des valeurs de potentiel hydrique pour en justifier le besoin.

Les différentes discussions informelles et les réunions de groupes notamment avec les responsables des domaines permettent aussi de faire avancer ce cheminement collectif vers un meilleur pilotage de l'irrigation dans la structure.

Ce premier travail offre des perspectives pour approfondir et justifiera probablement la création d'autres stages par la suite, ce qui est aussi valorisé par l'entreprise.

Champs d'études complémentaires dans la perspective d'améliorer le pilotage de l'irrigation :

Le principal mécanisme d'économie d'eau de la vigne est le contrôle de sa transpiration par la régulation de l'ouverture des stomates en fonction de l'eau disponible et de l'heure de la journée. En effet les stomates se ferment lorsque la plante connaît un déficit hydrique mais également lorsque la demande évaporative est importante l'après-midi.

La recherche a démontré récemment qu'une diminution de la perte d'eau de nuit lorsque la photosynthèse n'est pas active en l'absence de lumière pourrait être un critère de sélection variétal intéressant (Coupel-Ledru et al. 2016). Des mesures de transpiration réalisées le jour et la nuit ont montré que les pertes d'eau nocturnes peuvent atteindre 10 à 20% de la quantité totale d'eau perdue au cours du cycle journalier (Mariano et al. 2013). Cette perte s'explique par une fermeture partielle des stomates. De plus, une réduction de cette perte d'eau la nuit serait sans conséquences sur la croissance de la vigne.

Une seconde adaptation repose sur le choix du cépage. Il a été démontré que selon le cépage, le comportement en conditions de déficit hydrique variait : certains cépages sont plutôt isohydriques alors que d'autres sont anisohydriques. Le comportement isohydrique provoque une fermeture des stomates face à l'augmentation de la température ou le dessèchement du sol, qui empêche l'augmentation de la transpiration. Dans le cas d'un comportement anisohydrique, il y a un maintien de l'ouverture stomatique, même lorsque la réserve s'épuise. Les plantes anisohydriques sont réputées plus vigoureuses, mais cet avantage se perd en cas de déshydratation avancée, ce qui peut alors entraîner des dégâts irréversibles. Dégâts que des cépages isohydriques ne subiront pas (Lovisolo et al. 2010)(Alsina et al. 2007).

L'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE en anglais) est un autre critère qui montre l'importance de la variabilité entre cépages. La WUE est définie comme la quantité de matière sèche produite par quantité d'eau évapotranspirée. Des études ont été faites et il est possible de classer les cépages selon leur WUE (Tomás et al. 2014). Cet indicateur donne aussi des pistes d'améliorations génétiques car plusieurs mécanismes dont dépend la WUE peuvent être optimisés, comme la résistance mésophyllienne qui freine l'entrée de CO₂ dans

les tissus chlorophylliens ou le métabolisme respiratoire qui pourrait être ralenti pour limiter les pertes de carbone assimilé par la plante (Simonneau et al. 2015).

Le choix du bon porte-greffe pour s'adapter au type de sol est aussi intéressant : du porte-greffe dépendent les caractéristiques du système racinaire, et donc la capacité à exploiter la ressource en eau. Les porte-greffes considérés comme résistants à la sécheresse ont la faculté de développer davantage de racines dans les couches profondes du sol. En situation de contrainte hydrique, le porte-greffe influence aussi la phénologie, la croissance, le rendement et la qualité des fruits. (Tandonnet et al. 2010). Le porte greffe 110 Richter est beaucoup utilisé dans le Sud de la France pour sa tolérance à la sécheresse. 140 RU et 44-53 sont aussi très résistants (Zhang et al. 2016).

L'alimentation en azote peut être un moyen de contrôler le développement végétatif. Une faible alimentation azotée réduit la surface foliaire et donc la transpiration. Ceci peut empêcher d'atteindre notre rendement potentiel, mais dans le cas où l'eau est limitante, il n'aurait de toute manière pas été possible d'atteindre ce rendement théorique.

4 Conclusion

Les deux approches, la mesure directe et la modélisation, peuvent donner de bons résultats. La mesure directe a souvent l'inconvénient de prendre beaucoup de temps (à travers la mesure mais aussi l'entretien) et il faut pouvoir investir dans le matériel. Mais la mesure donne une indication fiable si elle est correctement interprétée.

Si la contrainte de temps est trop importante, la modélisation devient très intéressante. Après avoir paramétré le modèle, il suffit d'actualiser le logiciel avec les données météo. Dans l'idéal il convient de mélanger les deux approches. Si l'on utilise uniquement la modélisation on ne peut pas savoir si le modèle reflète vraiment la réalité. On est obligé par moments d'avoir recours à une mesure pour vérifier que le modèle est correctement calibré.

Dans le cas où l'on a recours à beaucoup de mesures, il devient pertinent d'utiliser un modèle pour faire des économies de temps et de matériel. L'obstacle principal à la modélisation étant le manque de données, à partir du moment où l'on a beaucoup de données, il est facile de passer à la modélisation.

Les résultats ont montré que l'utilisation de sondes Watermark n'était pas adaptée à un pilotage précis en viticulture mais les sondes restent un indicateur intéressant. La modélisation, en revanche, se prête bien au suivi de la plupart des parcelles des différents domaines. Le modèle permet de suivre en continu le potentiel hydrique foliaire de la vigne et donc de voir si l'on suit l'objectif de production ou bien si l'on s'en éloigne.

Pour un pilotage optimal de l'irrigation, on se rend compte que l'on ne peut pas reposer entièrement sur la modélisation : celle-ci ne s'adapte pas bien aux parcelles en pente. Sur les autres parcelles on a besoin d'une mesure pour connaître le niveau de remplissage initial de la réserve en début de saison.

De même, l'utilisation exclusive de la mesure directe est contraignante car elle est requise tout au long de la saison pour connaître précisément l'état hydrique, ce qui demande du temps. Une alternative serait d'acheter un appareil de mesure à la fois précis et automatique, mais ceci a un coût important.

Le compromis est intéressant, l'usage couplé de la modélisation et de la mesure donne de bons résultats.

5 Références bibliographiques

- Allen, Richard G, Luis S Pereira, Dirk Raes, Martin Smith, and a B W. 1998. "Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements." *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*, no. March: 1–15.
- Alsina, M. M., F. De Herralde, X. Aranda, R. Savé, and C. Biel. 2007. "Water Relations and Vulnerability to Embolism Are Not Related: Experiments with Eight Grapevine Cultivars." *Vitis - Journal of Grapevine Research* 46 (1): 1–6.
- Agence internationale de l'énergie atomique. 2003. "Les Sondes À Neutrons et À Rayons Gamma : Leurs Applications En Agronomie Deuxième Édition."
- BARBEAU, Gérard. 2006. "Apports Des Mesures de Résistivité Électrique Du Sol Dans Les Études Sur Le Fonctionnement Hydrique Du Système Sol/vigne." *Journal International Des Sciences de La Vigne et Du Vin* 40 (2): 57–69.
- Belmans, C. 1983. "Simulation Model of the Water Balance of a Cropped Soil : SWATRE." *Journal of Hydrology* 63 (1): 271–86.
- Bertrand, Nicolas, Maé Guinet, Sébastien Roux, and Jacques Wery. 2017. "User Manual for BISWAT (Bispecific Intercropped System – Water Stress Dynamics Model)." *Non Publié*.
- Black, T.A., W.R. Gardner, and G.W. Thurtell. 1969. "The Prediction of Evaporation, Drainage, and Soil Water Storage for a Bare Soil1." *Soil Science Society of America Journal* 33 (5).
- Brisson, N., F. Ruget, P. Gate, J. Lorgeou, and B. Nicoulaud. 2002. "STICS : A Generic Model for Simulating Crops and Their Water and Nitrogen Balances. II. Model Validation for Wheat and Maize." *Agronomie* 22 (1): 69–92.
- Brisson, Nadine, Bernard Itier, Jean Claude L'Hotel, and Jean Yves Lorendeau. 1998. "Parameterisation of the Shuttleworth-Wallace Model to Estimate Daily Maximum Transpiration for Use in Crop Models." *Ecological Modelling* 107 (2–3): 159–69.
- Brisson, Nadine, and Alain Perrier. 1991. "A Semiempirical Model of Bare Soil Evaporation for Crop Simulation Models." *Water Resources Research* 27 (5): 719–27.
- BRL. 2017a. "Mémento Irrigation."
- BRL. 2017b. "Rapport D'activité & RSE BRL 2017."
- Carbonneau, A, A Deloire, and P Costanza. 2004. "Leaf Water Potential Meaning of Different Modalities of Measurements." *Journal International Des Sciences De La Vigne Et Du Vin* 38 (1): 15–19.
- Celette, Florian, Rémi Gaudin, and Christian Gary. 2008. "Spatial and Temporal Changes to the Water Regime of a Mediterranean Vineyard due to the Adoption of Cover Cropping." *European Journal of Agronomy* 29 (4): 153–62.
- Celette, Florian, Aude Ripoché, and Christian Gary. 2010. "WaLIS-A Simple Model to Simulate Water Partitioning in a Crop Association: The Example of an Intercropped Vineyard." *Agricultural Water Management* 97 (11). Elsevier B.V.: 1749–59.
- Centeno, Ana, and Pilar Baeza. 2010. "Relationship between Soil and Plant Water Status in

- Wine Grapes under Various Water Deficit Regimes.” *HortTechnology* 20 (3): 585–93.
- Choné, Xavier, Olivier Tregoat, and Cornelis Van Leeuwen. 2001. “Fonctionnement Hydrique Des Terroirs, Base de L’irrigation Raisonnée de La Vigne.” *Journal International Des Sciences de La Vigne et Du Vin* 35 (SPEC. ISS.): 47–51.
- CoupeL-Ledru, Aude, Eric Lebon, Angélique Christophe, Agustina Gallo, Pilar Gago, Florent Pantin, Agnès Doligez, and Thierry Simonneau. 2016. “Reduced Nighttime Transpiration Is a Relevant Breeding Target for High Water-Use Efficiency in Grapevine.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113 (32): 8963–68.
- Deloire, Alain. 2008. “L’Irrigation De La Vigne : Synthèse.”
http://obs.viti.herault.fr/viti/fiche_doc.jsp?idaction=null&id_doc=892&idtheme=0107.
- Faouzi, Attia. 2007. “Effet Du Stress Hydrique Sur Le Comportement Ecophysiologique et La Maturité Phénologique de La Vigne Vitis Vinifera L.: Etude de Cinq Cépages Autochtones de Midi-Pyrénées.”
- Fernández, J. E., M. J. Palomo, A. Díaz-Espejo, B. E. Clothier, S. R. Green, I. F. Girón, and F. Moreno. 2001. “Heat-Pulse Measurements of Sap Flow in Olives for Automating Irrigation: Tests, Root Flow and Diagnostics of Water Stress.” *Agricultural Water Management* 51 (2): 99–123.
- Ferreira, Maria Isabel, José Silvestre, Nuno Conceição, and Aureliano C. Malheiro. 2012. “Crop and Stress Coefficients in Rainfed and Deficit Irrigation Vineyards Using Sap Flow Techniques.” *Irrigation Science* 30 (5): 433–47.
- Garcia De Cortázar, Iñaki. 2006. “Adaptation Du Modèle STICS À La Vigne (Vitis Vinifera L.). Utilisation Dans Le Cadre D’une Étude D’impact Du Changement Climatique À L’échelle de La France.”
[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Adaptation+du+mod+le+STICS+?+la+vigne+\(/Vitis+vinifera/+L.\).+Utilisation+dans+le+cadre+d’une+tude+du+changement+climatique+?+l’?chelle+de+la+France.#0](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Adaptation+du+mod+le+STICS+?+la+vigne+(/Vitis+vinifera/+L.).+Utilisation+dans+le+cadre+d’une+tude+du+changement+climatique+?+l’?chelle+de+la+France.#0).
- Gaudin, Rémi, Florian Celette, and Christian Gary. 2010. “Contribution of Runoff to Incomplete off Season Soil Water Refilling in a Mediterranean Vineyard.” *Agricultural Water Management* 97 (10). Elsevier B.V.: 1534–40.
- Gaudin, Rémi, Sébastien Roux, and Bruno Tisseyre. 2017. “Linking the Transpirable Soil Water Content of a Vineyard to Predawn Leaf Water Potential Measurements.” *Agricultural Water Management* 182 (February 2018): 13–23.
- Guilpart, N., A. Metay, and C. Gary. 2014. “Grapevine Bud Fertility and Number of Berries per Bunch Are Determined by Water and Nitrogen Stress around Flowering in the Previous Year.” *European Journal of Agronomy* 54. Elsevier B.V.: 9–20.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014 - Mitigation of Climate Change - Technical Summary*.
- Irmak, Suat, J. O. Payero, B. VanDeWalle, Jennifer Rees, and G. L. Zoubek. 2016. “Principles and Operational Characteristics of Watermark Granular Matrix Sensor to Measure Soil Water Status and Its Practical Applications for Irrigation Management in Various Soil Textures.” *University of Nebraska-Lincoln Extension Circular EC783* 783 (February): 1–14,.

- Lacape, M.J., J. Wery, and D.J.M. Annerose. 1998. "Relationships between Plant and Soil Water Status in Five Field-Grown Cotton (*Gossypium Hirsutum* L.) Cultivars." *Field Crops Research* 57 (1): 29–43.
- Lavoie-Lamoureux, A., D. Sacco, P.A Risse, and C. Lovisolo. 2016. "Factors Influencing Stomatal Conductance in Response to Water Availability in Grapevine: A Metaanalysis." *Physiologia Plantarum* 159: 1–37.
- Lebon, E, V Dumas, P Pieri, and H R Schultz. 2003. "Modelling the Seasonal Dynamics of the Soil Water Balance of Vineyards." *Functional Plant Biology* 30: 699–710.
- Lebon, Eric, Vincent Dumas, Philippe Pieri, and Hans R. Schultz. 2003. "Modelling the Seasonal Dynamics of the Soil Water Balance of Vineyards." *Functional Plant Biology* 30 (6): 699.
- Lebon, Eric, Anne Pellegrino, Gaëtan Louarn, and Jeremie Lecoecur. 2006. "Branch Development Controls Leaf Area Dynamics in Grapevine (*Vitis Vinifera*) Growing in Drying Soil." *Annals of Botany* 98 (1): 175–85.
- Leeuwen, C Van, O Trégoat, X Choné, M-E Jaeck, and J P Gaudillere. 2003. "Le Suivi Du Régime Hydrique de La Vigne et Son Incidence Sur La Maturation Du Raisin." *Bulletin de l'OIV* 76: 367–78.
- Lelièvre, F., S. Sala, F. Ruget, and F. Volaire. 2011. "Evolution Du Climat Du Sud de La France 1950-2009." *PSDR - Projet CLIMFOUREL*.
- Lelièvre, F, S Sala, and F Volaire. 2010. "Climate Change at the Temperate-Mediterranean Interface in Southern France and Impacts on Grasslands Production." *Om.Ciheam.Org* 192: 187–92. <http://om.ciheam.org/om/pdf/a92/00801240.pdf>.
- Lovisolo, Claudio, Irene Perrone, Andrea Carra, Alessandra Ferrandino, Jaume Flexas, Hipolito Medrano, and Andrea Schubert. 2010. "Drought-Induced Changes in Development and Function of Grapevine (*Vitis* Spp.) Organs and in Their Hydraulic and Non-Hydraulic Interactions at the Whole-Plant Level: A Physiological and Molecular Update." *Functional Plant Biology* 37 (2): 98–116.
- Mariano, José, Sigfredo Fuentes, Magdalena Tomás, Sebastià Martorell, and Jaume Flexas. 2013. "Responses of Leaf Night Transpiration to Drought Stress in *Vitis Vinifera* L." *Agricultural Water Management* 118. Elsevier B.V.: 50–58.
- McCutchan, Harold, and K. A. Shackel. 1992. "Stem-Water Potential as a Sensitive Indicator of Water Stress in Prune Trees (*Prunus Domestica* L. Cv. French)." *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117 (4): 607–11.
- Ojeda, H., and N. Saurin. 2014. "L'irrigation de Précision de La Vigne : Méthodes, Outils et Stratégies Pour Maximiser La Qualité et Les Rendements de La Vendange En Économisant de L'eau." *Innovations Agronomiques* 38 (1): 131–41.
- Pellegrino, A., E. Lebon, M. Voltz, and J. Wery. 2005. "Relationships between Plant and Soil Water Status in Vine (*Vitis Vinifera* L.)." *Plant and Soil* 266 (1–2): 129–42.
- Pellegrino, Anne. 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.”

- Raes, Dirk, Sam Geerts, Emmanuel Kipkorir, Joost Wellens, and Ali Sahli. 2006. “Simulation of Yield Decline as a Result of Water Stress with a Robust Soil Water Balance Model.” *Agricultural Water Management* 81: 335–57.
- Riou, C., C. Valancogne, and P. Pieri. 1989. “Un Modèle Simple D’interception Du Rayonnement Solaire Par La Vigne - Vérification Expérimentale.” *Agronomie* 9 (5): 441–50.
- Roux, Sébastien, Nicolas Bertrand, and J.Wery. 2017. “Description of the Model Structure for BISWAT (Bispecific Intercropped System – Water Stress Dynamics Model).”
- Saurin, N., B. Tisseyre, and E. Lebon. 2014. “Comment Mesurer La Contrainte Hydrique de La Vigne, de La Plante Au Vignoble.” *Innovations Agronomiques* 38: 143–58.
- Shuttleworth, W J, and J S Wallace. 1985. “Evaporation From Spare Crops - An Energy Combination Theory.” *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society* 111 (469): 839–55.
- Simonneau, T., N. Ollat, A. Pellegrino, and E. Lebon. 2015. “Contrôle de L’état Hydrique Dans La Plante et Réponses Physiologiques de La Vigne À La Contrainte Hydrique.” *Innovation Agronomiques* 38.
- Tandonnet, J. P., S. J. Cookson, P Vivin, and N Ollat. 2010. “Scion Genotype Controls Biomass Allocation and Root.” *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16 (2): 290–300.
- Tomás, Magdalena, Hipólito Medrano, Jose M. Escalona, Sebastià Martorell, Alicia Pou, Miquel Ribas-Carbó, and Jaume Flexas. 2014. “Variability of Water Use Efficiency in Grapevines.” *Environmental and Experimental Botany* 103. Elsevier B.V.: 148–57.
- Tondut, J.L., F. Laget, and A. Deloire. 2006. “Climat et Viticulture : Evolution Des Températures Sur Le Département de L’hérault : Un Exemple de Réchauffement Climatique.” *Revue Française D’œnologie* 219 (March): 1–6.
- Wery, Jacques, Patrice Coll, Lionel Delbac, Nicolas Guilpart, Marc Fermaud, Aurélie Metay, Nathalie Smits, Denis Thiéry, and Anne Merot. 2012. “Indicating Processes and Performances of Agrosystems: A Framework Based on a Conceptual Model and Its Use in Vineyards Fields.” *ESA 2012, 12th Congress of the European Society for Agronomy*, no. August: 198–99.
- Zhang, Li, Elisa Marguerit, Landry Rossdeutsch, Nathalie Ollat, and Gregory A. Gambetta. 2016. “The Influence of Grapevine Rootstocks on Scion Growth and Drought Resistance.” *Theoretical and Experimental Plant Physiology* 28 (2). Springer International Publishing: 143–57.

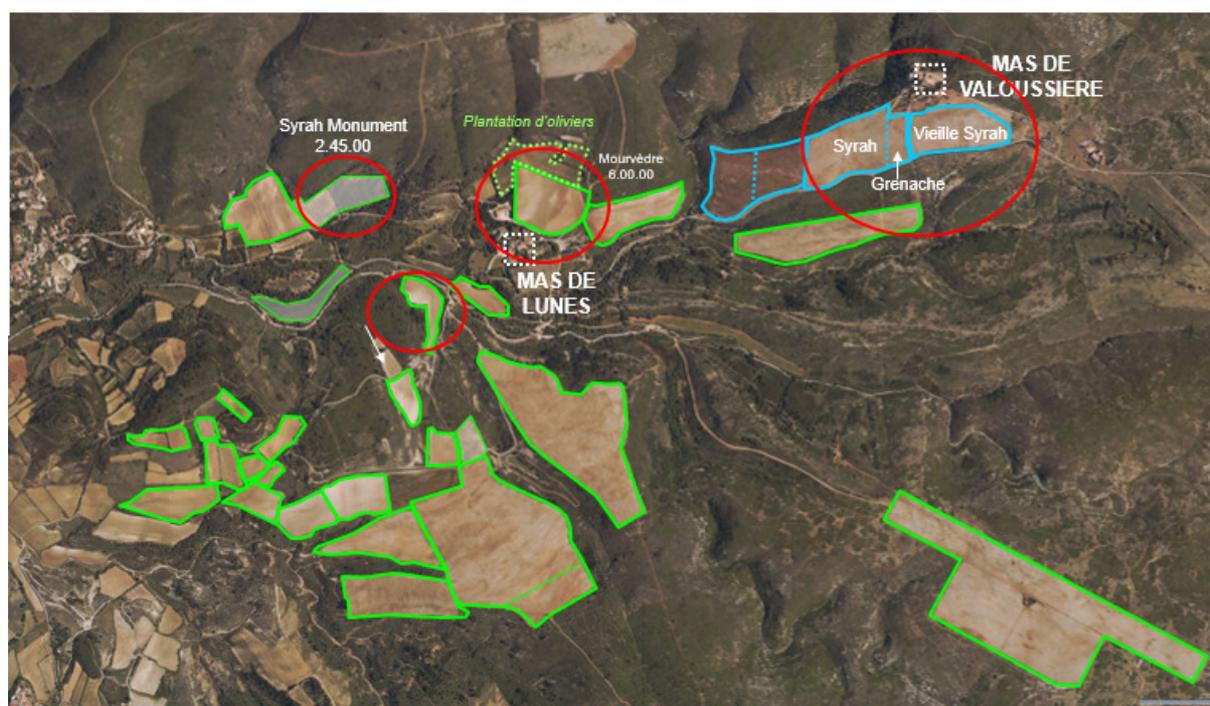
6 Annexes

ANNEXE 1 : Présentation des relevés de potentiel hydrique foliaire de base et du parcellaire des exploitations avec en rouge les parcelles étudiées

Devois des Agneaux

Résumé des mesures

Date	Valeur de potentiel moyen	
	Plantier	Grande parcelle
03-juil	1,8	2,4
09-juil	3,8	3,4
16-juil	2,1	4,1
30-juil	3	5,9
06-août	3,5	8,2
14-août	9,3	4,3



Détail des mesures

Plantier

Date	Mesure (Bar)	Valeur moyenne
03-juil	1	1,8
	3	Ecart type
	2	0,84
	1	
	2	

Date	Mesure (Bar)	Valeur moyenne
09-juil	1,5	3,8
	3,5	Ecart type
	2	2,25
	7	
	5	

Date	Mesure (Bar)	Valeur moyenne
16-juil	1	2,1
	2	Ecart type
	1	1,24
	2,5	
	4	

Date	Mesure (Bar)	Valeur moyenne
30-juil	2,5	3
	3	Ecart type
	2,5	0,61
	4	

Date	Mesure (Bar)	Valeur moyenne
06-août	3	3,5
	3	Ecart type
	2,5	1,00
	4	
	5	

Date	Mesure (Bar)	Valeur moyenne
14-août	7	9,333333333
	10	Ecart type
	11	2,08

Grande parcelle

Date	Mesure (Bar)	Valeur moyenne
03-juil	3	2,4
	2	Ecart type
	3	0,55
	2	
	2	

Date	Mesure (Bar)	Valeur moyenne
03-juil	3	3,4
	4	Ecart type
	5	1,08
	2,5	
	2,5	

Date	Mesure (Bar)	Valeur moyenne
16-juil	4	4,1
	3,5	Ecart type
	4	0,42
	4,5	
	4,5	

Date	Mesure (Bar)	Valeur moyenne
30-juil	5	5,9
	6,5	Ecart type
	5	0,89
	7	

Date	Mesure (Bar)	Valeur moyenne
06-août	10	8,2
	7,5	Ecart type
	9,5	1,60
	6	
	8	

Date	Mesure (Bar)	Valeur moyenne
06-août	4	4,3
	4	Ecart type
	4,5	0,45
	5	
	4	

Mas de Lunès

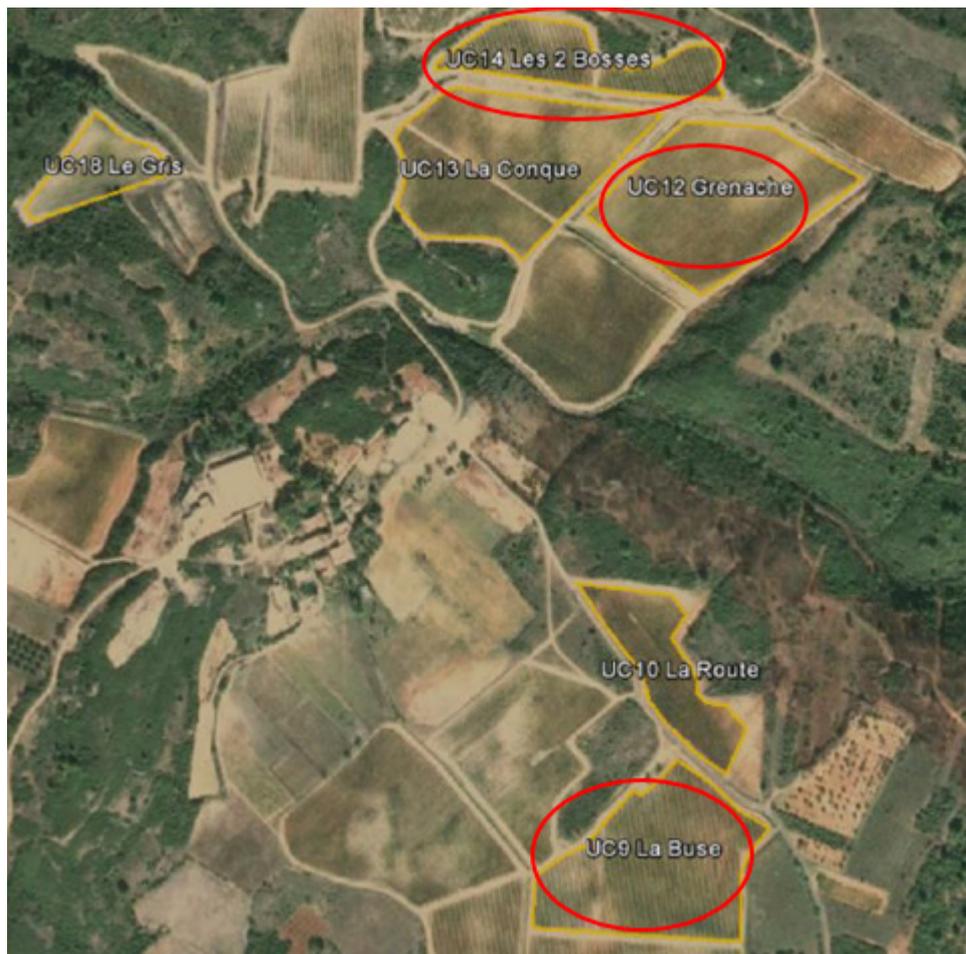
Résumé des mesures

Date	Valeur de potentiel moyen		
	Basse	Terre-plein	Cadenas
03-juil	2,1	N/A	N/A
09-juil	2,5	2,5	4,1
16-juil	1	2,5	3,3
30-juil	1,9	1,9	4,6
06-août	2,6	2,8	5
14-août	3,6	3,9	4,5

Mas la chevalière

Résumé des mesures

Date	Valeur de potentiel moyen			
	Les 2 bosses	Grenache	Grand merlot	Côté route
03-juil	6,4	6,8	10,7	N/A
10-juil	2,7	2,3	2,5	4,2
17-juil	3,6	2,9	2,2	3,7
31-juil	3,5	3,2	3,4	3,7
07-août	3,6	4,4	4,3	3,4



Mas Neuf

Résumé des mesures

Date	Valeur de potentiel moyen				
	UC4	UC1	UC12	UC14	UC2
04-juil	1,2	1,4	1,3	N/A	1
19-juil	2	1	1,2	1,8	2,5
02-août	4	4,3	2,5	3,9	2,6
09-août	4,2	4,2	3,2	3,8	3,1
16-août	5	1,8	4,4	4,4	3,1



Château Roquefeuille

Résumé des mesures

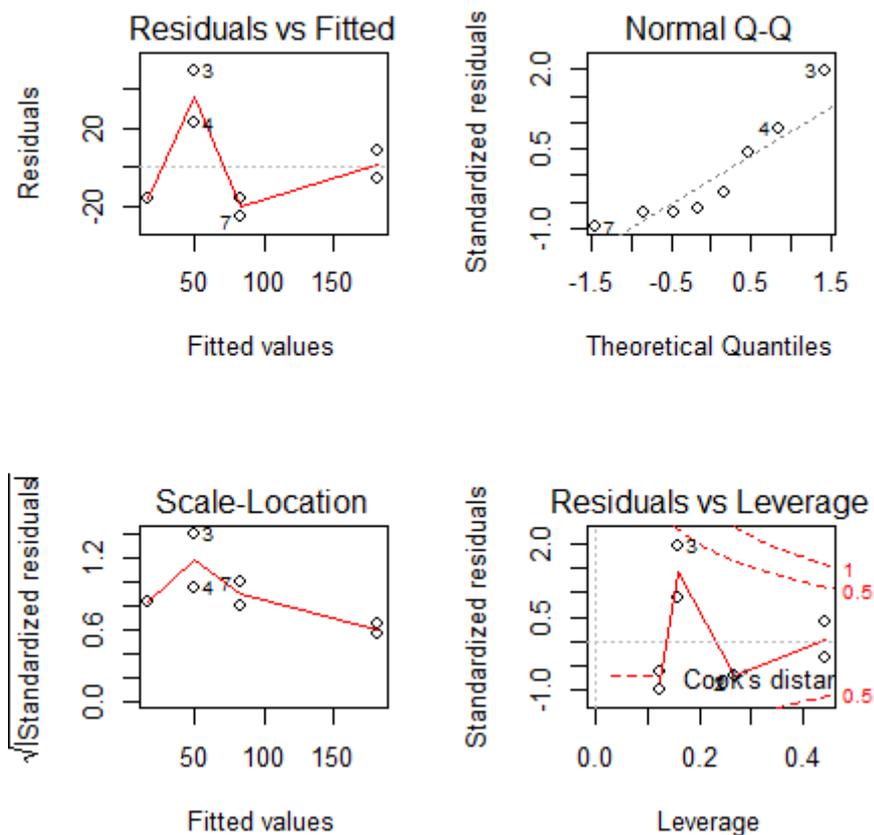
Date	Valeur de potentiel moyen						
	P12 non irrigué	P27	P7-14	P28	P29	P22 non irrigué	P2 non irrigué
06-juil	1,8	2,1	4,6	1,7	4,7	7,7	4,3
13-juil	1,6	2,4	4,1	3,4	4,7	3,9	3,8
20-juil	4,6	7,6	16	10	12,4	14,4	10,9
03-août	3,7	3,6	13,9	7,2	9,2	8,3	3,4
10-août	1	1	1	1	1	1	1
17-août	10,8	12,1	14,1	9,4	N/A	N/A	N/A

Château Gassier

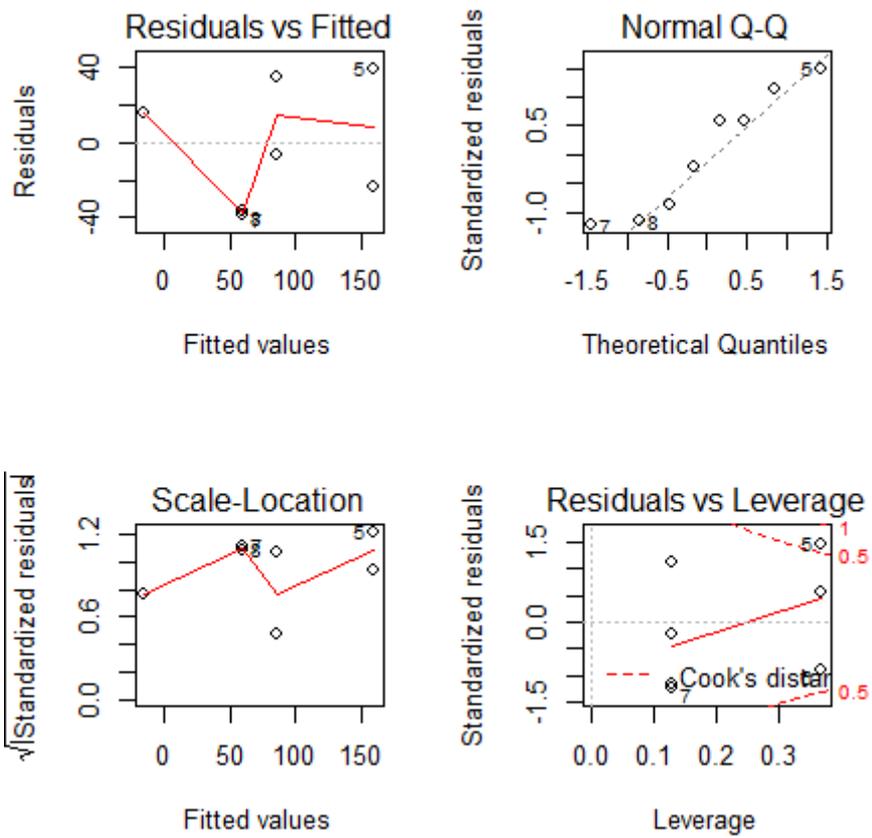
Résumé des mesures

Date	Valeur de potentiel moyen			
	Syrah	Non irriguée	Jeune vigne	Sol argileux profond
13-juil	7,3	10,9	6,7	11,6
20-juil	4,7	8,3	4,6	6,2
03-août	10,9	13,9	11,5	15,2
10-août	1	1	1	1
17-août	13,8	8,2	8,7	11,7

ANNEXE 2 : Vérification des hypothèses sur les résidus pour la relation linéaire entre les mesures de sondes aux deux profondeurs et les mesures de chambre sur la parcelle 13



ANNEXE 3 : Vérification des hypothèses sur les résidus pour la relation linéaire entre les mesures de sondes aux deux profondeurs et les mesures de chambre sur la parcelle 14



RESUME

La filière viticole du Languedoc-Roussillon fait face aux conséquences du réchauffement climatique depuis ces 20 dernières années. Les deux dernières années ont été des années particulièrement sèches avec des conséquences importantes sur les rendements. Pour s'adapter à cette contrainte, de plus en plus de viticulteurs ont recours à l'irrigation de la vigne qui permet d'améliorer à la fois le rendement et la qualité du raisin. La société AdVini souhaite améliorer l'utilisation de l'irrigation sur ses différents domaines, ce qui peut se faire en optimisant le pilotage de l'irrigation de la vigne.

Deux approches de pilotage de l'irrigation par la mesure directe de l'état hydrique de la vigne ont été testées, avec d'une part des mesures de tensiomètre en utilisant des sondes Watermark, et d'autre part en mesurant le potentiel hydrique foliaire de base avec une chambre à pression.

Après avoir réalisé une recherche bibliographique sur les modèles de bilan hydrique existant pour la vigne, l'un des modèles a été reproduit puis testé sur différentes parcelles pour évaluer l'efficacité du pilotage de l'irrigation par la modélisation.

L'analyse des résultats montre que l'utilisation de sondes Watermark est intéressante pour repérer la date de déclenchement de l'irrigation, mais la sonde ne permet pas un pilotage très précis pour la vigne. Les sondes étant enfouies à une profondeur maximale de 60cm, elles ne permettent pas de caractériser l'état hydrique du sol et donc du réseau racinaire au-delà de cette profondeur.

L'une des sorties du modèle est l'évolution du potentiel hydrique foliaire de base qui est reconnu comme un bon indicateur de l'état hydrique de la vigne. Les mesures de potentiel hydrique au champ et les valeurs de potentiel hydrique simulées par le modèle ont été comparées. L'évaluation du modèle a montré que la modélisation fonctionne bien. Certaines valeurs mesurées s'écartent beaucoup des prédictions du modèle et il sera pertinent de vérifier si cet écart provient d'une erreur de mesure ou bien d'une sous-estimation du modèle.

Le travail réalisé montre que la mesure directe au champ et la modélisation du bilan hydrique sont deux approches qui fonctionnent bien et qui sont complémentaires. A l'aide de ces outils il est possible de piloter l'irrigation avec une précision suffisante pour améliorer le rendement et la qualité de la production.

Mots clés

Vigne, irrigation, modélisation, sondes watermark, chambre à pression, bilan hydrique

Pour citer ce document : Berg, David, 2018. Stratégies de pilotage de l'irrigation de la vigne : comparaison entre la mesure directe et la modélisation du bilan hydrique. Mémoire d'ingénieur, diplôme ingénieur agronome, option production végétale durable, Montpellier SupAgro. 70 pages.]