



**HAL**  
open science

# Évaluation de la capacité du modèle de bilan hydrique WaLIS à représenter la diversité des pratiques et des terroirs viticoles du bassin versant du Rieutort

Victor Berteloot

► **To cite this version:**

Victor Berteloot. Évaluation de la capacité du modèle de bilan hydrique WaLIS à représenter la diversité des pratiques et des terroirs viticoles du bassin versant du Rieutort. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2020. dumas-03575583

**HAL Id: dumas-03575583**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03575583v1>**

Submitted on 15 Feb 2022

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

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

## **Mémoire de fin d'études**

**Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur ENGEES, en troisième année  
à Montpellier Supagro  
Option : Eau Sol et Environnement**

**Evaluation de la capacité du modèle de bilan hydrique WaLIS à représenter la diversité des  
pratiques et des terroirs viticoles du bassin versant du Rieutort**



**Par Berteloot Victor**

**Année de soutenance : 2020**

**Organisme d'accueil : INRAE, laboratoire SYSTEM**

# RÉSUMÉ

La viticulture languedocienne est confrontée à de nombreux défis. Elle doit notamment s'adapter au réchauffement climatique tout en modifiant ses pratiques pour mieux respecter l'environnement. La modélisation est un outil essentiel pour identifier les avantages et inconvénients des différents leviers d'action envisageables, et quantifier leurs bénéfices agronomiques et environnementaux. La simulation et les mesures expérimentales effectuées sur les 10 parcelles du Rieutord, bassin versant aux caractéristiques remarquablement diversifiées et représentatives du terroir héraultais, a permis d'évaluer un modèle de bilan hydrique sur différentes configurations de parcelles. Le modèle évalué est le modèle WaLIS, modèle à 2 compartiments, dont la dernière version permet de prendre en compte l'évolution d'un couvert végétal dans l'inter-rang. Elle a d'abord été testée avec un jeu de données de 2012, puis avec les données de 2020. Les mesures expérimentales ont montré que la dynamique de croissance du couvert était encore mal simulée, et que la qualité des bilans hydriques variait selon les parcelles. Si des efforts concernant la qualité du jeu de données en entrée et le paramétrage décrivant la repousse du couvert restent à faire, les simulations effectuées permettent tout de même de montrer que les trajectoires hydriques varient fortement d'une parcelle à l'autre et montrent également les effets de l'irrigation sur une des parcelles suivies.

**Mots-clés** : Modélisation, Bilan Hydrique, Enherbement, Stress hydrique, Vigne, Changement climatique

Pour citer ce document : Berteloot Victor, 2020. Mémoire de stage de fin d'étude, ingénieur de l'eau et de l'environnement, option Eau Sol et Environnement, Montpellier SupAgro, 62 pages.

## **ABSTRACT**

**Title :** Evaluation of the ability of the WaLIS water balance model to represent the diversity of viticultural practices and fields characteristics in the Rieutort catchment

Languedoc vineyard is confronted with many challenges. It must adapt to global warming while changing its practices to respect the environment. Modelling is an essential tool to identify the advantages and disadvantages of the cultural practices, and evaluate their agronomic and environmental effects. The simulation and experimental measurements are realised on 10 fields of the Rieutort catchment, very representative of the type of fields found in Hérault. The model chosen is WaLIS, a 2-compartment model, the latest version of which allows to take in account the evolution of plant cover in the inter-row. It was first tested with a 2012 data set, then with a 2020 data set, measured during the practice. Experimental measurements show that the dynamic of grass growth is still poorly simulated, and that the quality of water balances vary a lot according to the field. So, efforts concerning the quality of the input dataset and the parameterization describing canopy regrowth are necessary. Nevertheless, the simulations show that the water trajectories are coherent from one plot to another, and the model also show the significant effects of irrigation on one of the fields irrigated.

**Keywords :**

Water Balance, Global Warming, Vineyard, Modeling

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens avant tout à remercier Audrey Naulleau pour son encadrement, sa rigueur et sa gentillesse. Malgré le début de stage délicat et la période de mesures de terrain raccourcie, elle a su préserver la cohérence du stage et ses objectifs ambitieux. Je remercie également Laure Hossard, Christian Gary et Laurent Prévot pour leur encadrements, leurs avis éclairés tout au long de mon stage et leur aide sur le terrain. Les mesures de terrain n'auraient pu se faire sans les techniciens de l'UMR SYSTEM, particulièrement Yvan et Jeff, et tous les volontaires qui nous ont accompagnés.

Merci à ma tutrice Lydie Guilioni et à ses conseils durant la réunion à mi-stage.

Un grand merci aux gestionnaires des stations météo de Cabrerolles et Murvièl-lès-Beziers, qui nous ont fourni rapidement et régulièrement toutes les données nécessaires pour nos simulations. Merci à Laurent Prévot pour les données de Roujan.

Il est aussi important de remercier les viticulteurs du bassin versant, qui ont accepté notre présence sur leurs parcelles à toute heure du jour et de la nuit et répondu à nos multiples questionnaires.

Merci à ma famille et à Célia qui m'ont permis de travailler dans de bonnes conditions au début du stage et m'ont soutenu lors de la période délicate traversée à la fin du stage.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>8</b>
<b>1 MATÉRIELS ET MÉTHODES</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1 Présentation de la zone d'étude</b> .....	<b>11</b>
1.1.1 Localisation du bassin versant du Rieutort .....	11
1.1.2 Climat.....	12
1.1.3 Pédologie .....	13
1.1.4 Pratiques agricoles caractéristiques du bassin.....	14
<b>1.2 Présentation du modèle Walis</b> .....	<b>15</b>
1.2.1 Les termes du bilan hydrique calculé par WaLIS .....	15
1.2.2 Pluie et ruissellement.....	17
1.2.3 La transpiration.....	18
1.2.4 Prise en compte des interventions de gestion de l'enherbement.....	19
<b>1.3 Choix des données pour le paramétrage du modèle</b> .....	<b>20</b>
1.3.1 Pédologie et réserves utiles .....	20
1.3.2 Données météorologiques .....	22
1.3.3 Relevés de Végétation .....	24
<b>1.4 Test de la nouvelle version de WaLIS sur un jeu de données de 2012 :</b> .....	<b>25</b>
1.4.1 Description des données de 2012 : .....	25
1.4.2 Détail des 3 versions de WaLIS testées .....	26
<b>1.5 Protocoles expérimentaux pour l'acquisition des données nécessaires à la validation du modèle</b> <b>:</b> .....	<b>27</b>
1.5.1 Choix des parcelles, des placettes et des ceps suivis .....	27
1.5.2 Suivi de l'enherbement .....	28
1.5.3 Suivi du coefficient cultural .....	29
1.5.4 Mesure du statut hydrique .....	29
1.5.5 Suivi des itinéraires techniques sur les parcelles .....	30
1.5.6 Choix des indicateurs de qualité du modèle .....	30
<b>2 Résultats</b> .....	<b>31</b>
<b>2.1 Etude des données de 2012</b> .....	<b>31</b>

<b>2.2</b>	<b>Évaluation du modèle à partir des données de terrain de 2020 .....</b>	<b>33</b>
2.2.1	Simulation de l'enherbement .....	33
2.2.2	Simulation du coefficient cultural .....	34
2.2.3	Simulation du statut hydrique : .....	35
<b>3</b>	<b>Discussion .....</b>	<b>42</b>
3.1	L'évaluation du taux de couverture.....	42
3.1.1	L'hétérogénéité des caractéristiques du couvert.....	42
3.1.2	La fertilité des sols.....	43
3.1.3	La germination et le début de la repousse pas ou mal pris en compte : .....	43
3.2	La réserve utile : .....	44
3.3	Conclusions Agronomiques : .....	45
	<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>46</b>
<b>4</b>	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>ANNEXES.....</b>	<b>50</b>

## **AVANT-PROPOS**

Le stage s'est déroulé dans le laboratoire SYSTEM, réunissant des personnels de l'INRAE et du CIRAD et situé sur le campus de Montpellier SUPAGRO. Il était dirigé par Audrey Naulleau, qui réalise une thèse au sein de ce laboratoire et dont l'objectif est d'analyser la résilience de la viticulture et des pratiques de gestion du sol dans le bassin versant du Rieutord face au changement climatique. Ses encadrants de thèse, Laure Hossard, Christian Gary et Laurent Prévot ont aussi supervisé le travail.

Enfin, le stage était encadré par Lydie Guillioni et Sylvain Weill, dans le cadre de ma troisième année à Montpellier Sup Agro, en partenariat avec l'ENGEES, mon école d'origine.

## **SIGLES ET ACRONYMES**

**AOC** : Appellation d'Origine Contrôlée

**AOP** : Appellation d'Origine Protégée

**ASW** : Available Soil Water : Eau disponible dans le sol pour la plante

**CN** : Curve Number : Coefficient proposé pour le calcul du ruissellement

**EF** : Efficience

**ETP** : Evapotranspiration potentielle

**FTSW**: Fraction of Soil Transpirable water

**MAE** : Mesures Agro Environnementales

**RMSE** : Relative Mean root square error

**RPG** : Registre Parcellaire Graphique

**TTSW** : Total Transpirable Soil Water Eau contenue dans le sol de la capacité au champ au point de flétrissement, et accessible aux racines. Elle est souvent inférieure à la réserve utile

**RU**: Réserve Utile, Eau contenue dans le sol, de la capacité au champ au point de flétrissement, indépendante de l'enracinement des plantes

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du bassin versant du Rieutort .....	11
Figure 2: Diagramme ombrothermique réalisé à partir des chroniques météorologiques de 1992 à 2019 de la station de Roujan .....	12
Figure 3 : Précipitations et évapotranspirations potentielles annuelles du bassin versant de Roujan entre 1992 et 2020 .....	13
Figure 4 : Carte des sols du bassin versant réalisée avec les données de la carte pédologique de l'Odéve au 1/100 000.....	14
Figure 5 : Entrée et sorties du modèle WaLIS, d'après Celette .....	16
Figure 6 : Carte des sols simplifiée du bassin versant du Rieutort.....	21
Figure 7 : Localisation des différentes stations météo, D'après Laurent Prévot .....	23
Figure 8 : Précipitations mensuelles de l'année hydrologique 2019/2020 et comparaison aux valeurs moyennes de la région (chronique de données de Roujan, en bleu).....	24
Figure 9 : Parcelles suivies par Y.Tindon en 2012.....	26
Figure 10 : Carte des parcelles suivies (en blanc) et des sols du bassin versant .....	28
Figure 11: Trois états de la croissance des apex (d'après Institut Français de la Vigne et du Vin) .....	29
Figure 12: Comparaison des versions 1 et 2 (avec un zoom sur la version 2) .....	32
Figure 13 : taux de couvertures simulés et mesurés pour les parcelles 5 et 8 .....	33
Figure 14: taux de couvertures simulés et mesurés pour les parcelles 1 et 9 .....	34
Figure 15 : Coefficients culturaux simulés et mesurés pour les parcelles 4 et 10.....	35
Figure 16 : Indices de croissance des apex sur les 10 parcelles .....	36
Figure 17 : Bilan hydrique simulé pour les 10 parcelles et points de contrôle mesurés expérimentalement .....	39
Figure 18 : Parcours hydriques simulés des 10 parcelles du bassin versant.....	41
Figure 19 : Entrées et sorties du modèle pour la parcelle 4, et ASW des 2 compartiments .....	42
Figure 20 : Système racinaire de la vigne (Ionescu et al.,1978).....	44

## LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1 : Calcul de la FTSW.....	15
Équation 2 Conversion des potentiels hydriques en potentiels de base.....	16
Équation 3 Calcul de l'ASW.....	17
Équation 4 : Partage des précipitations .....	17
Équation 5 Calcul du seuil de ruissellement.....	17
Équation 6 calcul du CN .....	17
Équation 7 Calcul du Ruissellement.....	18
Équation 8 Calcul de la transpiration de la vigne.....	18
Équation 9 Calcul du facteur de stress hydrique de la vigne.....	18
Équation 10 calcul du coefficient cultural du couvert.....	18
Équation 11: Calcul de la LAI du couvert.....	19
Équation 12 : Calcul du taux d'accroissement de la LAI.....	19
Équation 13 calcul de l'évaporation dans le compartiment 1 .....	19

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:Classes de sols utilisées pour déterminer les réserves utiles du bassin versant.....	21
Tableau 2 : Données pour le couvert spontané et le couvert de fétuques.....	25
Tableau 3 tableau récapitulatif des caractéristiques des parcelles.....	27
Tableau 4 : Synthèse des indicateurs de qualité du modèle pour les 3 versions testées (en vert bonne qualité du modèle, en rouge non) biais, RMSE et EF sans unité, RU en mm.....	31
Tableau 5 : Indicateurs de qualité du modèle ( en vert les meilleurs indicateurs, en jaune les valeurs intermédiaires et en rouge les plus mauvaises) .....	40

## INTRODUCTION

La culture de la vigne est présente en Languedoc depuis l'époque romaine, et omniprésente depuis le XIX<sup>e</sup>-ème siècle. Au cours de ce siècle le développement du transport ferroviaire a permis d'augmenter les débouchés de vin de la région, (Fanet, 2009). La production a longtemps été orientée vers les vins de consommation courante, avec des objectifs essentiellement quantitatifs. Peu de parcelles sont irriguées mis à part celles où l'eau est la plus facilement accessible, essentiellement dans les plaines, et le climat convient à la culture de vin. La région a longtemps été et est encore un des principaux producteurs de vin en France. En 2004 la superficie du vignoble languedocien était de 272 000 hectares, le tiers de la superficie du vignoble national, et le premier vignoble du monde en superficie. (Celette, 2007). Au cours du XX<sup>e</sup>me, particulièrement dans la période d'après-guerre, la viticulture s'est intensifiée, avec un large recours aux pesticides et aux engrais de synthèse (Fanet, 2009).

Ce modèle fait aujourd'hui face à plusieurs défis. Le premier est la baisse de la consommation de vins de table. Il a entraîné l'arrachage subventionné massif de parcelles depuis les années 70. En Hérault, la surface cultivée est passée de 160 000 hectares en 1970 à 92 000 en 2012, et la production de 13 000 milliers d'hectolitres à 4760 dans la même période. (Rapport Vi-A-Terra, 2015). La période d'arrachage a aussi été une période de ré-encépagements, avec le remplacement des variétés anciennes (Carignan, Mourvèdre, Cinsault et Aramon) par des cépages améliorateurs, tels que la Syrah ((Rapport Vi-A-Terra, 2015).

La filière viticole s'est aussi saisie des problématiques environnementales. La viticulture est une des activités agricoles la plus consommatrice de pesticides, en 2000 sa consommation de pesticide était de 20% de la consommation nationale pour 3% de la surface agricole utile occupée (Auberlot et al., 2005). Les atteintes à l'environnement, par transfert des pesticides dans les nappes phréatiques ou les cours d'eau sont nombreuses dans les terroirs viticoles. Le milieu méditerranéen est particulièrement concerné par les problématiques de ruissellement, qui charrie particule de sol et les molécules qui y sont fixées. C'est aussi un sujet particulièrement important aux yeux de l'opinion publique et du consommateur. (Celette, 2007)

Au-delà de ces deux défis, la viticulture est confrontée à un dernier enjeu important, d'ordre climatique. Les tendances climatiques montrent actuellement une augmentation de la température et de de la demande évaporative et une augmentation du risque de périodes estivales sèches (Lelièvre et al., 2008). Ces tendances déjà observées vont s'accroître au cours du siècle à venir (Lelièvre et al., 2008). Les dates de vendanges et de débourrement, témoins de cette élévation des températures sont elles aussi de plus en plus précoces (Seguin, 2007).

Ces triples défis sont parfois difficiles à conjuguer. Il est par exemple prouvé que l'enherbement, réduit les risques de ruissellement, d'érosion et de transfert des pesticides. Il limite aussi la valeur excessive de la vigne, ce qui augmente la qualité de la récolte. Cependant, la vigne supporte mal la concurrence hydrique de l'herbe au cours de l'été. Cet exemple illustre la difficulté d'apporter une réponse unique et adaptée pour résoudre ces 3 défis majeurs à relever pour assurer la pérennité de la viticulture languedocienne.

La mise en place de l'irrigation pourrait constituer un élément de réponse, pour diminuer le déficit hydrique de la vigne. Elle constitue un axe de travail important en Hérault, le conseil général prévoyant d'irriguer 22 400 hectares supplémentaires de vigne à l'horizon 2030. (Plan Hérault irrigation). Il est nécessaire de quantifier les besoins pour mettre en place les infrastructures nécessaires à la réalisation d'un tel projet.

Les réponses à mettre en œuvre face à ces défis sont donc complexes, et parfois contradictoires. Il est nécessaire de proposer des solutions intégrant tous ces enjeux, en tenant compte des contraintes spécifiques des différents terroirs, et adaptées à la variabilité locale. La modélisation peut être un outil intéressant pour

simuler différents modes de cultures sous diverses contraintes et climats, pour, in fine, identifier les avantages et inconvénients de chacun d'entre eux.

Il est donc nécessaire d'avoir recours à des approches de modélisation pour :

- i) Tester différents scénarios de gestion, et quantifier leurs bénéfices environnementaux et agronomiques
- ii) Tester ces leviers d'actions agronomique et vérifier leur compatibilité avec le climat futur et les contraintes locales

La modélisation du bilan hydrique de la vigne est une approche qui permet de traiter l'ensemble de ces enjeux, en se focalisant sur leurs conséquences sur l'état hydrique de la vigne.

Différents modèles sont disponibles pour étudier le bilan hydrique des parcelles et les effets de l'enherbement sur celui-ci. Certains sont des modèles à réservoirs, caractérisés par leurs robustesses et leur facilité d'utilisation. Cependant ils ne reproduisent pas l'ensemble des processus physiques se produisant dans le sol, cette classe de modèle reste imparfaite (Celette, 2003). A contrario, les modèles mécanistiques prétendent représenter la physique des sols. Les déplacements d'eau sont calculés par l'équation de Richards, qui permet de calculer les transferts d'eau en fonction des différences de potentiel hydrique dans le sol, mais sont plus complexes d'utilisation.

De nombreux modèles à réservoirs sont disponibles. Parmi ceux-ci, au moins trois ont été utilisés pour le bilan hydrique d'une parcelle de vigne enherbée :

-BISWAT (Bispecific Intercrop System WATER Stress dynamic model) permet d'établir une prise en compte de cultures mixtes, annuelles ou pérennes. Son principal atout est de permettre une discrétisation fine du sol en y et en z qui permet de décrire avec précision la partie exploitée par chaque culture (Bertrand et al., 2018)

- STICS (Brisson et al 2003) permet d'établir des bilans hydriques sur une douzaine de culture dont les cultures associées. Il intègre des équations permettant de calculer l'évaporation et la transpiration avec une partie plus complète que les modèles à réservoir basique. La transpiration est par exemple calculée à partir d'une analogie électrique. Malgré le partage de la demande climatique ou de l'interception de la lumière par les deux cultures, le bilan hydrique reste monodimensionnel.

-WaLIS (Water baLance for Intercropped Systems) spécifique à la vigne, a lui été utilisé sur le bassin versant par Y.Tindon en 2012, pour simuler l'enherbement de parcelles viticoles. Il a été validé sur les parcelles du chapitre (source manuel utilisateur). Il a donc été souvent utilisé en milieu méditerranéen, et offre une certaine facilité d'usage et de codage.

En outre, WaLIS sera utilisé à la suite de ce stage pour simuler le bilan hydrique spatialisé du bassin versant du Rieutort, dans le cadre de la thèse d'A. Naulleau.

Ce bassin versant, au nord de Béziers, suivi au cours de ce stage concentre les problématiques et la diversité rencontrées dans l'Hérault. Les viticulteurs souhaitent y développer l'irrigation, face aux sécheresses récurrentes et aux menaces du réchauffement climatique. La mise en place de l'enherbement y est encouragée, certaines parcelles sont donc enherbées.

L'objectif de ce stage sera de vérifier l'aptitude du modèle WaLIS à simuler les bilans hydriques de 10 parcelles du bassin en 2019/ 2020, à l'aide notamment de suivi de terrain, pour évaluer la qualité des simulations. Il s'agit notamment de vérifier si la qualité des paramétrages et des données d'entrées, des formalismes du modèle sont satisfaisants pour simuler les bilans hydriques sur la diversité des parcelles rencontrée dans le Rieutord.

Pour atteindre cet objectif, il conviendra de répondre à la problématique suivante :

Dans quelles mesures le modèle de bilan hydrique permet de représenter la diversité de conditions pédologiques et les pratiques culturales (irrigation, enherbement) rencontrées au sein du bassin versant du Rieutort ?

- Comment décrire la diversité ?
- Quel suivi de terrain mettre en place ?
- Comment évaluer les simulations ?

Dans un premier temps nous décrirons la zone étudiée, les données disponibles, le modèle utilisé et le protocole mis en place. Ensuite, nous confronterons les résultats obtenus avec des données de 2012 puis avec les données mesurées au cours du stage. Enfin, la suite à donner à ce travail et des points de discussions ou d'améliorations seront abordés.

# 1 MATÉRIELS ET MÉTHODES

## 1.1 Présentation de la zone d'étude

### 1.1.1 Localisation du bassin versant du Rieutort

Le Rieutort est un affluent de l'Orb. Il est situé au nord de Béziers, au centre du département de l'Hérault, dans l'ex-région Languedoc-Roussillon (Figure 1). Il prend sa source dans les premiers contreforts du massif central, les Avants-Monts. L'altitude maximale atteinte sur le bassin versant est de 650 mètres et le Rieutort se jette dans l'Orb, à 20 mètres d'altitude, au niveau de Murviel-lès-Béziers. Le ruisseau de Saint-Ouyres, est le principal affluent du Rieutort. Le bassin du Rieutort, se situe sur les communes de Murviel-lès-Béziers, Causse et Veyran, Saint Nazaire de Ladarez et Caberrolles et possède une superficie de 45 kilomètres carrés. L'activité agricole y est relativement importante, avec, d'après le Registre Parcellaire Graphique 2017 (RPG 2017), une surface agricole utile de 1698 hectares, soit 36% de la superficie du bassin. Enfin, les eaux du bassin versant alimentent en partie le captage d'eau potable du Limbardie, qui approvisionne les communes avoisinantes.



Figure 1 : Localisation du bassin versant du Rieutort

L'activité agricole est inégalement répartie dans le territoire, selon un gradient d'intensité nord/sud : au nord les collines sont principalement couvertes de garrigues et de forêts tandis que l'activité agricole s'intensifie dans la plaine alluviale de l'Orb.

Ce bassin versant est caractéristique du terroir languedocien par les activités agricoles exercées et ce gradient nord/sud d'occupation des sols par la viticulture. Il est aussi caractérisé par une grande diversité de pratiques, d'objectifs de rendement et de conditions pédologiques, représentatives de la région languedocienne. Cette zone d'étude permet donc d'aborder des situations très diverses tout en restant dans la même unité hydrologique.

## 1.1.2 Climat

Le climat rencontré sur la zone d'étude est caractéristique du climat méditerranéen, c'est-à-dire des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Il n'y a pas de chroniques de données disponibles sur les stations météorologiques du bassin versant du Rieutort, mais il est possible de décrire le climat de la zone grâce aux données météorologiques de Roujan, ville voisine du bassin, collectées depuis 1992 par l'Unité de Service AGROclim de l'INRAE d'Avignon.

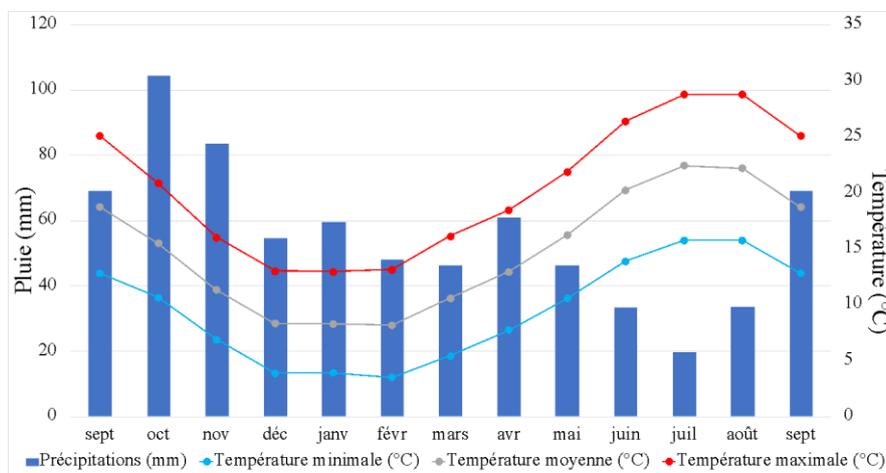


Figure 2: Diagramme ombrothermique réalisé à partir des chroniques météorologiques de 1992 à 2019 de la station de Roujan

La figure 2 ci-dessus présente les pluviométries mensuelles moyennes obtenues à partir des données de la station météorologique de Roujan sur la période 1992-2019, ainsi que les températures minimales, maximales et moyennes pour cette même période. Comme l'illustre cette figure, les températures restent douces en hiver avec une température minimale moyenne de 3 degrés durant les trois mois hivernaux, et une température moyenne de 7 degrés. Elles peuvent atteindre des valeurs élevées en été, avec une température moyenne de 24 degrés et une température journalière maximale de 30 degrés.

Les plus fortes précipitations ont lieu à l'automne, lors d'épisodes méditerranéens. L'air chaud et humide en provenance de la mer Méditerranée rencontre les premiers reliefs et occasionne des pluies très intenses, contribuant à la reconstitution du stock d'eau mais engendrant parfois un très fort ruissellement. La période de fortes chaleurs correspond à la période de plus faibles précipitations, avec, sur les 30 années de données, un cumul moyen de 20 mm en juillet. Ceci engendre un déficit hydrique prononcé comme l'illustre la Figure 3.

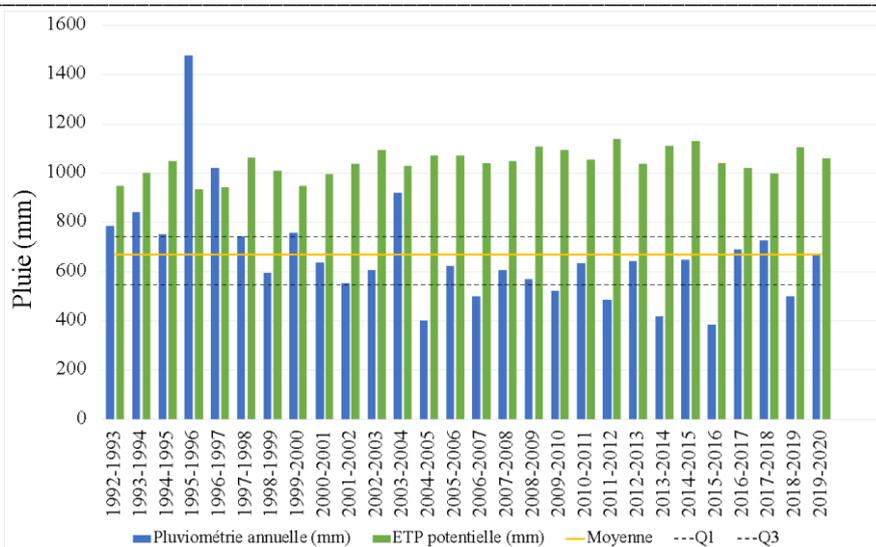


Figure 3 : Précipitations et évapotranspirations potentielles annuelles du bassin versant de Roujan entre 1992 et 2020

La figure 3 présente les cumuls de précipitations annuels, en bleu, et les évapotranspirations potentielles, en vert, calculés entre 1992 et 2019. Sur cette période, pour le cumul des précipitations, la moyenne et les deux quantiles sont indiqués. Pour l’année hydrologique 2019 -2020, le cumul de précipitations est égal à la moyenne sur 30 ans, et atteint 668 mm. Avec une évapotranspiration potentielle annuelle de 1061 mm, le déficit hydrique de l’année 2019-2020 atteint 407 mm, contre 604 mm en 2018-2019 par exemple. (Figure 3).

L’évapotranspiration (ETP) annuelle moyenne, calculée sur le bassin versant voisin de Roujan (16 km), est de 1109 millimètres (Molénat et al., 2018) tandis que la moyenne annuelle des précipitations sur 25 ans est de 654 millimètres. Ce déficit climatique, quasi systématique et relativement important, se manifeste surtout lors des sécheresses estivales, qui peuvent être marquées. En effet, en moyenne 70% des pluies ont lieu entre septembre et mars et seulement 30 % entre avril et septembre, période durant laquelle la vigne est active et l’ETP est la plus forte. Ceci illustre l’importance du sol comme réservoir d’eau pour l’alimentation hydrique de la vigne lors de cette période estivale très sèche.

### 1.1.3 Pédologie

La diversité de pratiques, de terroirs et d’objectifs de rendement présent dans le bassin s’explique aussi par la nature des sols très variable de la zone. La carte des sols de Lodève au 1 :100\_000, établie par l’INRAE en 1993, fait apparaître 45 unités de sols différentes ce qui illustre bien la complexité de la pédologie du bassin versant. (Figure 4)

Le bassin versant est constitué de 4 systèmes pédologiques organisés du nord vers le sud. Au sud, les sols sont issus de dépôts alluvionnaires récents de l’Orb et son système d’anciennes terrasses, datant de l’ère quaternaire. Au nord de cette zone, se situe le système de sol de l’ère Miocène. Ils recouvrent des sols de l’éocène, plus anciens qui affleurent par endroit. Au nord du système Miocène se retrouve le système Eocène, qui forme par endroit des cuvettes où les colluvions s’accumulent et formant alors des sols profonds à forte réserve utile.

Dans les reliefs les plus septentrionaux, le sol est constitué de schistes, roches métamorphiques de l’ère primaire. Le sol, très superficiel, est formé par altération de ces roches et contient un très fort taux de cailloux.

La roche mère est très fracturée, sous forme de feuillet. Selon le pendage de ces feuillets, les racines de vigne pénètrent dans la roche mère, ce qui augmente le volume d'eau à laquelle la vigne a accès.

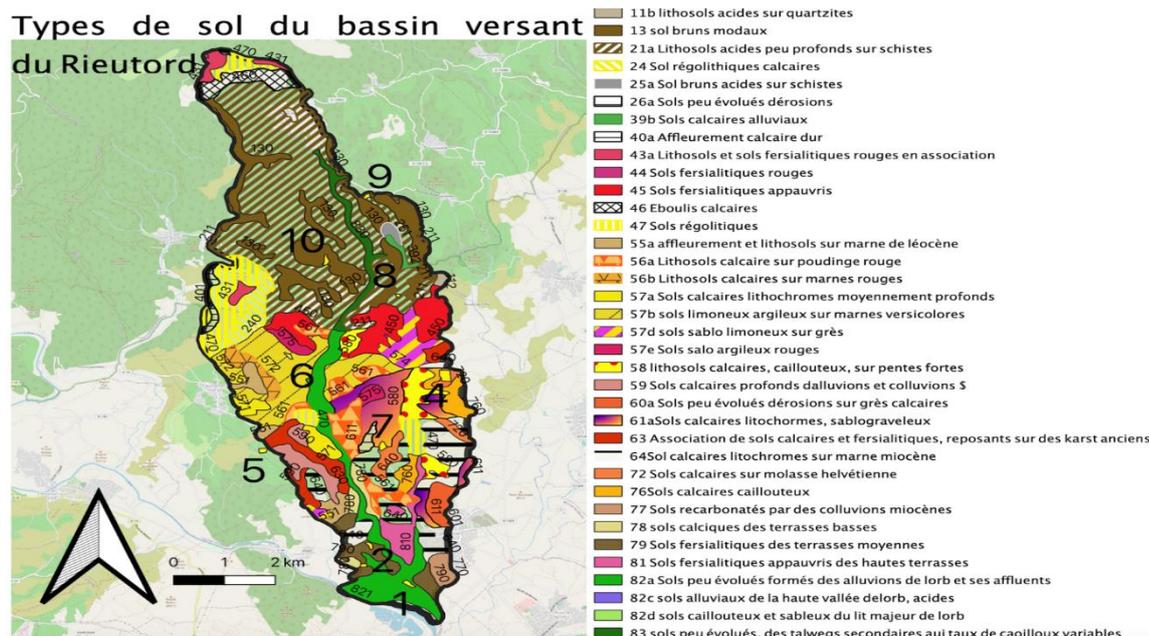


Figure 4 : Carte des sols du bassin versant réalisée avec les données de la carte pédologique de l'odève au 1/100 000

### 1.1.4 Pratiques agricoles caractéristiques du bassin

Comme expliqué précédemment (1.1.1), les pratiques agricoles recensées dans le bassin offrent un aperçu assez complet des pratiques Languedociennes. La culture majoritaire est la viticulture, qui occupe 90 % de la surface cultivée (RPG 2017). On y retrouve aussi quelques vergers d'oliviers et des parcelles de blé dur.

Au niveau des objectifs de rendement et de la valorisation de la récolte, les situations sont multiples : sur le même bassin versant on retrouve de trois appellations : « l'Indication Géographique Protégée (IGP) Pays d'Oc », « l'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC) Faugères » et « l'AOC Saint-Chinian ». Les rendements sont limités à 90 hL pour le Pays d'Oc, à 120 hL par hectare pour le Pays d'Hérault (Cahier des charges IG Pays d'Oc, 2019) et limités à 45 hL par hectare pour l'AOC (décret relatif à l'AOC Saint-Chinian, 2011).

De nombreux viticulteurs sont adhérents de caves coopératives, et ne vinifient pas leurs récoltes. La cave coopérative de Murviel-lès-Béziers fédère la majorité des coopérateurs du bassin versant. Elle produit 50 % de vin IGP Pays d'Oc, 25 % de vin IGP pays d'Hérault et 25 % de vin AOC (site de la cave de de Murviel-lès-Béziers, Août 2020). Les autres viticulteurs possèdent une cave particulière, avec pour certains une forte valorisation de la récolte.

En lien avec cette diversité d'appellation, les pratiques des viticulteurs sont tout aussi variées. De façon générale la maîtrise de l'enherbement sur l'inter-rang est gérée de façon mécanique, par un travail superficiel du sol, par exemple à l'aide de disques ou d'un cultivateur. Le rang est lui désherbé chimiquement ou mécaniquement avec un intercep. Quelques viticulteurs désherbent encore une partie des inter-rangs chimiquement. (Andrieux et al., 2015). La quasi-totalité des viticulteurs favorisent le développement du couvert durant la période hivernale, pour lutter contre le ruissellement et améliorer les propriétés du sol. Certains laissent ce couvert se développer au maximum en ne travaillant pas le sol après les vendanges tandis

que d'autres limitent la repousse hivernale grâce à un labour automnal (rapport SP3A). En outre, certains viticulteurs mettent en place un couvert permanent. Enfin d'autres sont engagés dans une démarche d'agriculture biologique, limitant la gestion de l'herbe à des interventions mécaniques.

La diversité des pratiques de gestion de l'enherbement est aussi liée à l'action des politiques publiques. Les normes sur la qualité de l'eau sont fréquemment dépassées dans l'eau extraite du captage du Limbardié. Au vu de cette situation dégradée les pouvoirs publics ont mis en place 3 types de Mesures Agro Environnementales et climatiques (MAEc) sur le bassin versant (Notice d'information du territoire, DDTM 34, 2013), favorisant l'enherbement.

10% des vignes du bassin versant sont aussi irriguées, essentiellement dans le sud du bassin versant et la plaine alluviale de l'Orb, où l'eau est amenée par le réseau Bas Rhône Languedoc (Molénat et al., 2015). L'irrigation est réalisée à l'aide de goutte à goutte. Elle peut être réalisée de la période post-vendanges jusqu'au 15 août pour les vins de pays (décret du 4 décembre 1993), et jusqu'au 1er mai pour les vins AOC, sauf dérogations. (Institut de la vigne et du vin, L'irrigation de la vigne, 2020)

Les vignes sont taillées manuellement dans leur majorité. La plus grande partie est palissée, et des écimages sont pratiqués en été pour limiter la croissance du feuillage et faciliter le passage des tracteurs. Sur certaines parcelles, les vignes sont conduites en gobelet, taille traditionnelle dans le Languedoc.

## **1.2 Présentation du modèle Walis**

Le modèle de bilan hydrique WaLIS (Water baLance for Intercropped Systems), (Celette et al., 2010), a été utilisé pour simuler le bilan hydrique des parcelles suivies dans le cadre de ce stage. Il a été adapté du modèle de LEBON (Lebon, 2003) pour modéliser des cultures associées à la vigne (ici un couvert végétal). WaLIS simule la fraction d'eau disponible dans le sol d'une parcelle de vigne, enherbée ou non, en fonction des conditions météorologiques, des caractéristiques du sol et de la végétation, au pas de temps journalier.

### **1.2.1 Les termes du bilan hydrique calculé par WaLIS**

Le principe de base est celui d'un modèle à réservoir dans lequel l'eau est stockée. Ce réservoir est le volume d'eau dans le sol accessible aux racines, de la capacité au champ au point de flétrissement, sa taille correspond à la TTSW=Total Transpirable Soil Water exprimée en mm. L'ASW (Available Soil Water) indique la quantité d'eau présente dans ce réservoir. Lorsque le sol est à la capacité au champ, la valeur de l'ASW est égale à la TTSW, lorsque la teneur en eau atteint une valeur minimale permise par le sol, au point de flétrissement, la valeur d'ASW est nulle .

Afin de pouvoir simuler une parcelle de vigne enherbée, le modèle de sol présente deux compartiments : le compartiment 1 correspond à la zone explorée par les racines de vigne et celles de l'enherbement, le compartiment 2 correspond à la zone explorée uniquement par les racines de vigne (Figure 5). Les deux réservoirs ne communiquent que par drainage du réservoir supérieur vers le réservoir inférieur ; les remontées par capillarité ne sont pas considérées

La FTSW (Fraction of Transpirable Soil Water) est un indicateur du niveau de contrainte hydrique défini à partir de l'ASW selon l'équation suivante :

$$FTSW = \left( \frac{ASW_{tot}}{TTSW} \right)$$

*Équation 1 Calcul de la FTSW*

Son intérêt est notamment qu'elle est corrélée au potentiel hydrique de la vigne, via une relation statistique non linéaire (Lebon, 2003).

$$FTSW = c_{-a} * e^{c_{-b} * PHB}$$

Équation 2 Conversion des potentiels hydriques en potentiels de base

$C_{-a}$  et  $c_{-b}$  sont des coefficients déterminés statistiquement, et PHb les potentiels de base, en bar.

Elle permet donc de quantifier le stress hydrique avec une gamme de valeurs entre 0 et 1. Ainsi, en utilisant cette grandeur, il est possible de comparer les valeurs simulées entre différentes parcelles de TTSW différentes.

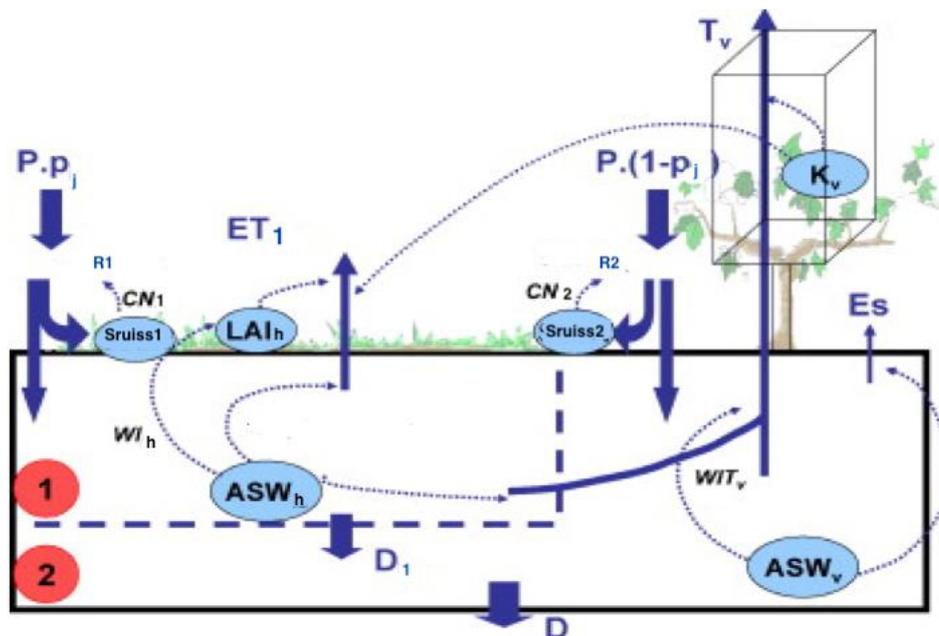


Figure 5 : Entrée et sorties du modèle WaLIS, d'après Celette

Avec P les précipitations en mm, CN1 et CN2 les Curve Number des compartiments 1 et 2, sans unité,  $P_j$  la proportion de la surface couverte d'herbe, R1 et R2 le ruissellement vers l'extérieur du système des compartiments 1 et 2, en mm, et Sruiss1 et Sruiss2 les seuils de ruissellement des compartiments 1 et 2, en mm,  $ASW_h$  et  $ASW_v$  les ASW, en mm, des compartiments 1 (exploité par la vigne et le couvert) et 2 (exploité par la vigne), D1 le drainage du compartiment 1 vers 2, et D le drainage vers l'extérieur du système, en mm,  $T_v$  la transpiration de la vigne, en mm,  $K_c$  le coefficient cultural de la vigne, sans unité, ET1, l'évapotranspiration du couvert, sans unité, et  $WI_h$  et  $WIT_v$  des indices de stress hydrique respectivement pour la vigne et le couvert, sans unité.

Un bilan de masse sur l'eau est réalisé au pas de temps journalier sur ces deux réservoirs : avec en entrée les précipitations, et le drainage du compartiment herbe et vigne vers le compartiment vigne situé en dessous, et en sortie la transpiration de la vigne, de l'herbe, l'évapotranspiration, le drainage du compartiment vigne et le ruissellement (voir figure 5). A l'issue de ce bilan, réalisé chaque jour, une nouvelle valeur d'ASW est calculée, pour les deux compartiments, selon les équations suivantes :

$$ASW_v = ASW_v(j-1) + P_v - R_2 - D + D_h - E_s - \left(\frac{ASW_v}{ASW_{tot}}\right) * T_v$$

$$ASW_h = ASW_h(j-1) + P_h - R_1 - D_1 - T_h - \left(\frac{ASW_h}{ASW_{tot}}\right) * T_v$$

*Équation 3 Calcul de l'ASW*

Avec  $ASW_v$  et  $ASW_h$  l'eau du sol transpirable respectivement par la vigne et le couvert,  $P_v$  et  $P_h$  les pluies sur les compartiments 1 et 2, R le ruissellement, D le drainage,  $T_v$  la transpiration de la vigne et  $E_s$  l'évaporation sur sol nu. La transpiration et l'évaporation sont limitées par la valeur du stock d'eau disponible.

### 1.2.2 Pluie et ruissellement

Les pluies journalières,  $P_j$ , en mm, sont prises en compte dès lors que la pluviométrie journalière dépasse le seuil de pluie efficace, fixé à 2 mm. Elles sont réparties dans les 2 compartiments en fonction de la superficie de ces derniers. Ainsi,  $P_1$  et  $P_2$  représentent les précipitations reçues sur les compartiments 1 et 2.  $P_{jherbe}$  représente la proportion de la surface enherbée.

Ainsi,

$$P_1 = P_{jherbe} * P_j$$

$$P_2 = (1 - P_{jherbe}) * P_j$$

*Équation 4 : Partage des précipitations*

Le ruissellement est calculé selon la méthode du Curve Number (CN, sans unité) (USDA, 2004). WaLIS distingue le CN sur le rang et sur l'inter-rang, ce qui nécessite de connaître leur CN spécifique, qui dépend de l'état de surface du sol. Le ruissellement se déclenche en fonction d'un seuil de précipitation.

Le seuil de ruissellement,  $SRuiss$ , en mm, est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$SRuiss = 254 * \left(\frac{100}{CN_i} - 1\right)$$

*Équation 5 Calcul du seuil de ruissellement*

La valeur de CN est modulée en fonction de l'état hydrique du sol, qui dépend des précipitations des 5 derniers jours (P5J). Trois classes sont définies à partir de 2 valeurs, A et B, paramètres d'entrée du modèle, calculées pour les sols de la région par Celette et al., 2010.

$$\text{SI } P5J < A : CN1 = \frac{4,2 * CN}{10 - 0,058 * CN}$$

$$\text{SI } P5J > A \text{ et } P5 < B \quad CN2 = CN$$

$$\text{SI } P5J > B : CN3 = \frac{23 * CN}{10 + 0,13 * CN}$$

*Équation 6 calcul du CN*

Une fois le seuil calculé, le ruissellement peut être calculé de la façon suivante :

Il est nul si  $P_j < 0,2 * Sruissl$

Si  $P_j > 0,2 * Sruissl$  :

$$R1(j) = \frac{(p_j - 0,2 * Sruiss1)^2}{(p_j + 0,8 * Sruiss1)^2} * p_{jherbe}$$

$$R2(j) = \frac{(p_j - 0,2 * Sruiss2)^2}{(p_j + 0,8 * Sruiss2)^2} * (1 - p_{jherbe})$$

*Équation 7 Calcul du Ruissellement*

### 1.2.3 La transpiration

Une fois les entrées du modèle calculées, la transpiration de la vigne est prise en compte grâce aux équations suivantes :

- Vigne :

La transpiration est calculée grâce à la formule suivante :

$$T_v = K_c * ETP * WIT_v$$

*Équation 8 Calcul de la transpiration de la vigne*

Avec  $ETP$  l'évapotranspiration potentielle et  $WIT_v$  le facteur de stress hydrique, calculé comme suit :

$$WIT_v = \min \left( 1 - \frac{FTSW_v}{FTSW_{regulLAIv}} \right)$$

*Équation 9 Calcul du facteur de stress hydrique de la vigne*

Cette équation 8 traduit le fait que la transpiration de la vigne est régulée dès lors que la  $FTSW$  est inférieure à  $FTSW_{regulLAIv}$  fixé à 40 % (Celette .et al., 2010).

L'augmentation du coefficient cultural ( $K_c$ ), qui intervient dans l'équation 7, est calculée en fonction de la température en degré jour, avec une température de base fixée à 10 °C jour. (Lebon., 2003). Il évolue linéairement jusqu'à atteindre sa valeur maximale,  $K_{max}$ , au bout d'un certain nombre de degré jour accumulé depuis le débourrement ( $ddk_{max}$ ). Quinze jours avant la chute des feuilles,  $K_c$  commence à décroître, (Lebon 2003).

- Herbe :

La transpiration de l'herbe est contrôlée par le coefficient cultural  $K_h$ , celui-ci est calculé à partir de l'indice foliaire ( $LAI$ , Leaf Area Index).

$$K_h = K_m * (1 - e^{-\epsilon LAI})$$

*Équation 10 calcul du coefficient cultural du couvert*

Avec  $K_m$  le coefficient de couverture maximale fixé à 0.95 (Allen et al., 1998) et  $\varepsilon$  le coefficient d'extinction fixé à 0.6.

La LAI est ensuite calculée comme suit :

$$LAI_d = LAI_{d-1} + GLAI_d - S * LAI_d$$

Équation 11: Calcul de la LAI du couvert

Avec,  $S$  le taux de sénescence de la LAI, et  $G$  son taux d'accroissement, dépendant de la température ( $T$ ), de la disponibilité en azote ( $INN$ ), du coefficient de croissance de l'enherbement ( $LAI_{rate}$ ) mais aussi du stress hydrique via le seuil de  $FTSW$  qui entraîne une fermeture stomatique,  $FTSW_{regulLAI}$  comme le montre l'équation 11 :

$$GLAI_d = AI_{rate} * (1,71 * 10^{-3}) * T^2 * INN * \left(1 - \frac{FTSW_h - 0,1}{FTSW_{regulLAI} - 0,1}\right)$$

Équation 12 : Calcul du taux d'accroissement de la LAI

Enfin, l'évapotranspiration du couvert herbacé est calculée à partir du coefficient cultural du couvert ( $k_v$ ) mais aussi d'un indice de stress hydrique ( $WI_h$ ) défini essentiellement comme le rapport de la  $FTSW$  au jour  $j$  sur la  $FTSW_{regultranspi}$  :

$$ET_1 = ETP * P_{j_{herb}} * (1 - k_v) * k_h * WI_h$$

Équation 13 calcul de l'évaporation dans le compartiment 1

## 1.2.4 Prise en compte des interventions de gestion de l'enherbement

Le modèle a été complété, par A.Naulleau, en début 2020, pour mieux tenir compte des pratiques de gestion de l'enherbement réalisées par les viticulteurs dans le bassin versant étudié. (Voir le code en annexe 1) Au lieu de simuler une destruction définitive du couvert en fin d'hiver il convient de simuler une repousse de l'herbe à la suite d'une tonte ou d'un travail du sol. Ainsi le modèle est capable de simuler la présence d'un inter-rang sur quatre enherbé de façon permanente, et la repousse de l'herbe au printemps sur les inter-rangs travaillés.

Pour simuler la gestion de l'enherbement, 3 opérations culturales sont représentées :

- la tonte : elle ramène la valeur de LAI au jour  $j$  à une valeur de valeur de LAI résiduel après tonte.
- Le labour de l'inter-rang : il ramène la LAI à une valeur nulle après le travail du sol sur l'inter-rang.
- Le labour du rang : il ramène la LAI du rang à une valeur nulle après travail du sol sous le rang.

La proportion des deux réservoirs n'est plus fixe comme dans la précédente version : la proportion de l'inter-rang enherbé varie en fonction de la repousse de l'herbe :

Le  $P_{j_{herb}}$  correspond désormais à un taux de couverture. Celui-ci est considéré comme proportionnel au coefficient d'interception KH du couvert.

Lorsqu'un travail du sol est effectué sur une partie de la parcelle seulement (rang ou inter-rang par exemple), le  $P_{j_{herb}}$  restant est égal à celui de la surface non travaillée multiplié par le  $P_{j_{herb}}$  du jour précédent.

De la même manière, les tailles de compartiment évoluent proportionnellement à la croissance ou senescence de l'herbe. Chaque jour, la TTSWh est reconsidérée et augmente ou diminue selon la variation du coefficient d'interception de l'herbe, Kc. Ainsi lors d'un travail du sol, la TTSWh est réduite proportionnellement à la diminution du  $P_{j_{herb}}$ .

Différents types d'interventions techniques peuvent donc être simulés, et des interventions sur le rang ou l'inter-rang peuvent être différenciées, ce qui permet de simuler la repousse du couvert sur la globalité de la parcelle.

Des modifications pour prendre en compte l'irrigation ou simuler une destruction définitive du couvert ont aussi été codées.

## 1.3 Choix des données pour le paramétrage du modèle

### 1.3.1 Pédologie et réserves utiles

Le paramètre en entrée du modèle WaLIS qui définit la taille du réservoir hydrique du sol est la TTSW (Voir partie 1.2.1). L'hypothèse selon laquelle TTSW et réserve utile sont égales sera considérée, la mesure de la TTSW, étant trop lourde pour être menée dans le cadre du stage : elle impliquerait d'établir des profils de densité racinaire par exemple. Cette hypothèse implique que les racines de vignes explorent la totalité du volume de sol. Cela semble raisonnable du fait que la vigne ait une capacité d'émettre des racines en profondeur même en terrains peu favorables à l'enracinement. (Carbonneau et al., 2013). Cette approximation entraîne tout de même un risque de surestimation de la TTSW, particulièrement si la densité racinaire dans les horizons de sol est faible

Pour déterminer cette réserve utile, deux cartes des sols sont disponibles :

La carte des sols de Lodève, à l'échelle 1/100 000 a été établie par l'INRA en 1993. (Voir figure 4, partie 1). Selon l'expertise de G.Coulouma et P Lagacherie (LISAH), les différentes unités représentent bien les différents types de sols présents sur le terrain, mais les délimitations sont incertaines.

L'autre carte, a été établie par l'ACH 34 (Association Climatique de l'Herault), à une échelle de 1/10 000. A contrario de la carte pédologique il y a peu de données brutes (description de fosses...). La présentation de ces classes de réserves utiles aux acteurs locaux au cours d'un atelier participatif (thèse A. Naulleau) a fait apparaître de nombreux désaccords.

Les données utilisées pour quantifier la réserve utile seront donc celles de la carte des sols de Lodève. Elle a permis de délimiter les sols du bassin en 3 grands ensembles :

- 1) Système des terrasses de l'Orb,
- 2) terrasses argilocalcaires
- 3) Schistes

Ces grands ensembles ont ensuite été subdivisés en 6 sous-ensembles suivants (tableau 1) : l'organisation nord/sud des sols du bassin décrite en 1.1.3 est retrouvée (Figure 6)

Tableau 1: Classes de sols utilisées pour déterminer les réserves utiles du bassin versant

Unité de sols	Carte des sols de Lodève	Gamme RU (mm)	Caractéristiques	Remarques
1a	82a,83	200 -300	Sols alluvionnaires récents et homogènes	Alimentation e eau par la nappe
1b	76/77/78/79/81	80-150	Anciennes terrasses de l'Orb : dépôts alluvionnaires anciens et lessivés	Couche d'argile en profondeur difficile à traverser par les racines
2a	58/59/63/64/72 /57a/57b/44	100-150	Sols argilocalcaires profonds	Très hétérogène
2b	26/55/56/57e/60a /61a/43/45/46/47	50-100	Sols argilocalcaires plus superficiels	Très hétérogène
3a	11/13	40-60	Sols superficiels sur schiste de l'ère primaire	Dépend de la position sur le versant et de l'anthropisation (sous solage)
3b	21a/24/25a/39b	60-100	Sols moyennement profonds sur schistes	Sols situés plutôt en bas de versant, dépend du travail de sous solage

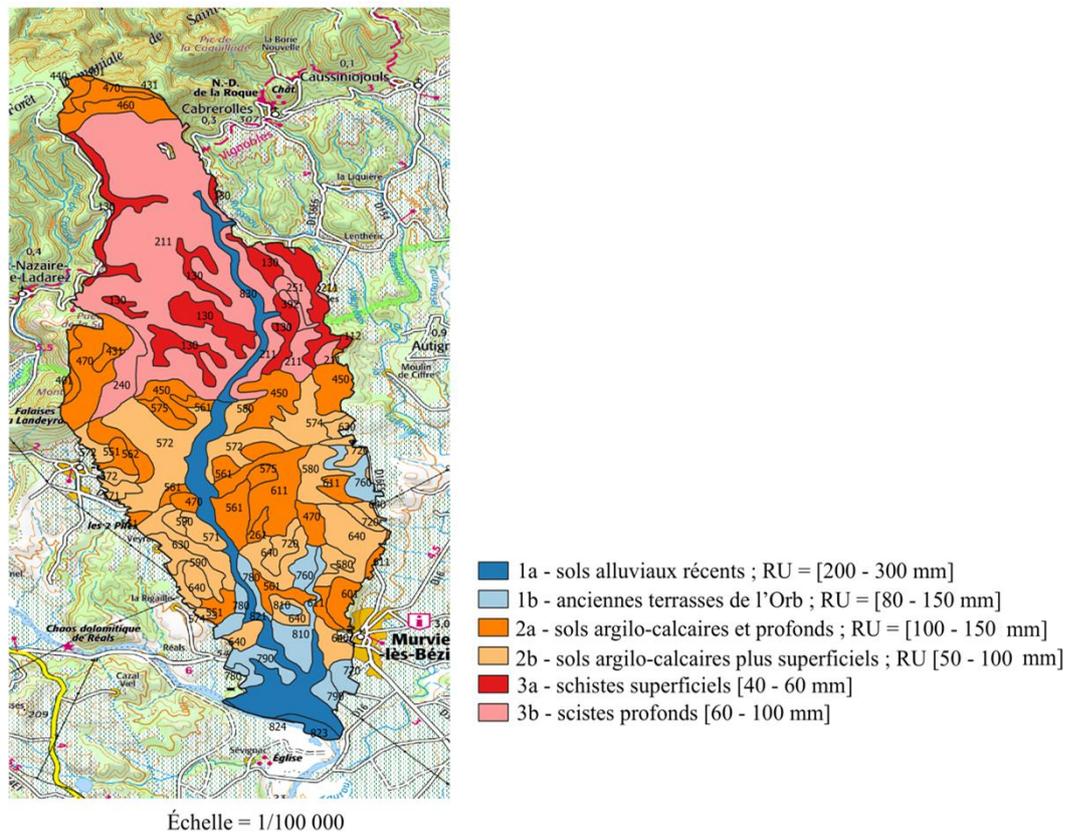


Figure 6 : Carte des sols simplifiée du bassin versant du Rieutort

Les gammes de réserves utiles ont été calculées à partir des fosses pédologiques décrites dans la carte des sols de Lodève (disponible pour les unités surlignées), en appliquant une fonction de pédotransfert.

Ces regroupements d'unités de sol permettent de réaliser des classes de réserve utile, mais qui ne sont pas assez précises pour paramétrer le modèle. Les réserves utiles des parcelles suivies doivent être déterminées à l'intérieur de ces gammes de valeurs. Du fait du confinement, qui a réduit la période expérimentale, les sondages à la tarière qui devaient compléter cette analyse pédologique n'ont pas pu être réalisés. Le positionnement dans la gamme de valeur se fera donc :

- à l'aide de réunions avec G.Coulouma et P.Lagacherie qui ont effectué une prospection sur la zone,
- à partir des indications fournies par les viticulteurs
- à partir de la position dans le paysage (bas de pente, zone sommitale)

### **1.3.2 Données météorologiques**

Plusieurs stations météorologiques sont installées à proximité du bassin (Figure 7) : les plus proches sont situées à Murviel-lès-Béziers (stations météo France), à Cabrerolles (Station AOC Faugères) à Roquebrun (Station CG34) et Cessenon (Station ACH 34). Elles mesurent notamment les températures (minimales, moyennes et maximales) et les précipitations journalières

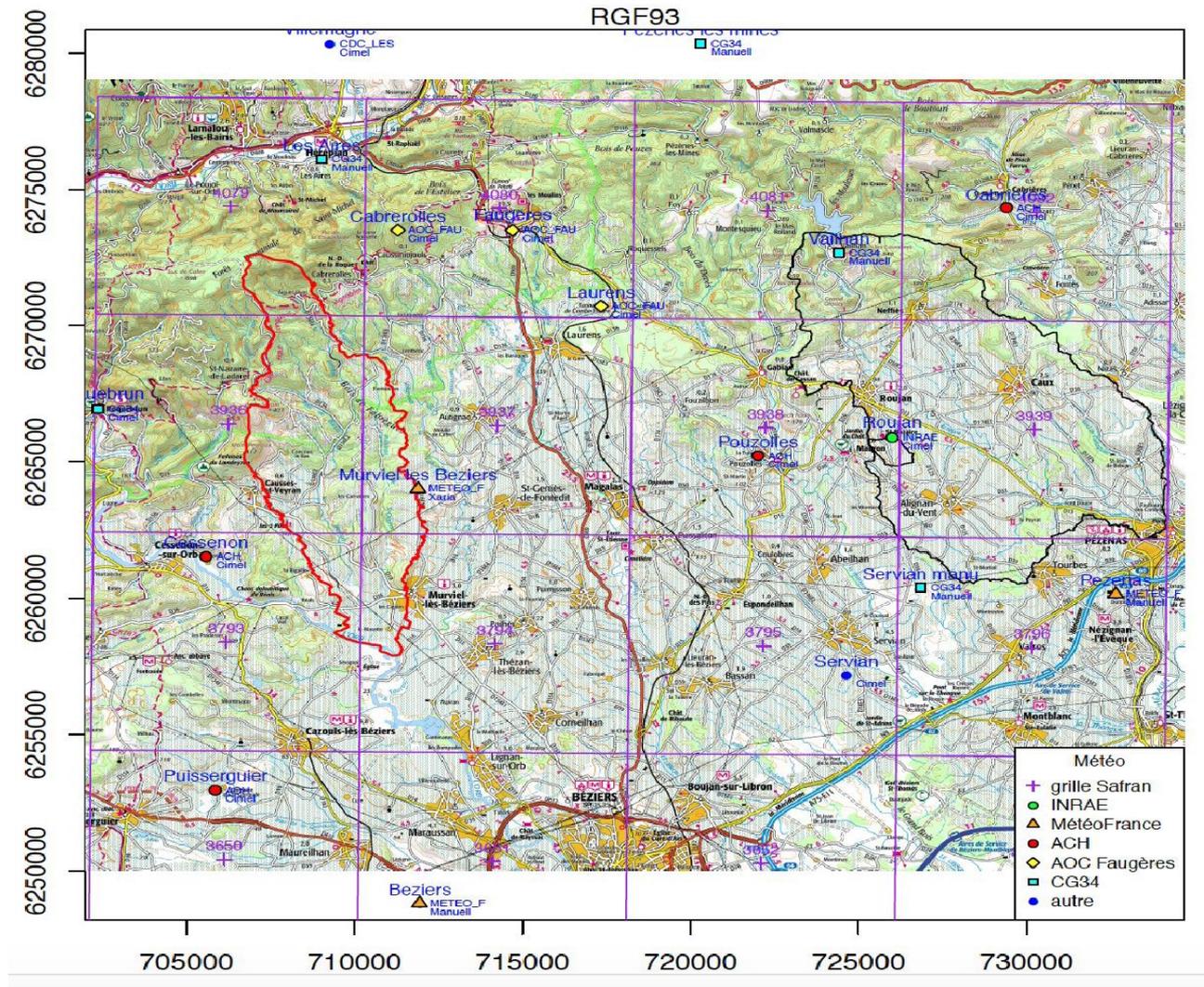


Figure 7 : Localisation des différentes stations météo, D'après Laurent Prévot

Concernant les données de précipitations, la variabilité spatiale est importante. L'influence du relief, via les précipitations orographiques, peut modifier le cumul de pluie. De même les orages estivaux peuvent être très localisés. Ainsi, les données pluviométriques utilisées pour les 3 parcelles les plus au nord du bassin seront les données de la station de l'AOC Faugères située à Cabrerolles et celles utilisées pour les 7 parcelles du sud du bassin seront celles de la station météo France de Murviel-lès-Béziers. Cette différenciation permet de prendre en compte plus précisément les entrées dans le bilan hydrique.

A titre d'exemple, l'orage du 12 août 2020 a apporté 11 mm de pluie à Cabrerolles contre 16, 5 à Murviel-lès-Béziers. L'épisode pluvieux du 10 au 15 mai a causé 79 mm de précipitations à Murviel-lès-Béziers contre 97 à Cabrerolles. Ceci justifie d'utiliser les données pluviométriques différenciées pour le nord et le sud du bassin.

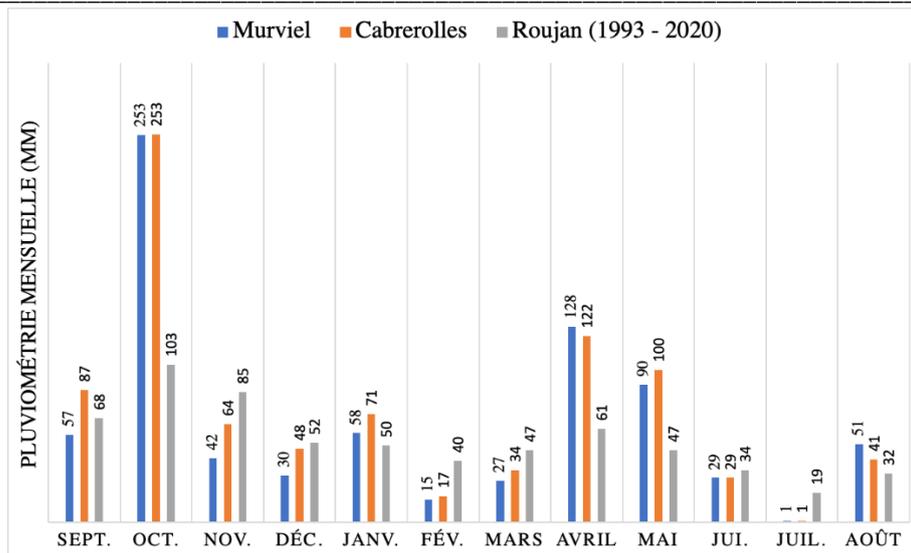


Figure 8 : Précipitations mensuelles de l'année hydrologique 2019/2020 et comparaison aux valeurs moyennes de la région (chronique de données de Roujan, en bleu)

La figure 8 compare les cumuls mensuels de pluie de Murvièl et Cabrerolles aux valeurs moyennes de la région mesurées à Roujan depuis 30 ans. Elle permet notamment d'observer que les précipitations sont différentes entre les stations de Murvièl et Cabrerolles, avec 30 mm d'écart en septembre par exemple et 10 mm en juillet. L'année hydrologique simulée est pluvieuse. Elle est caractérisée par des fortes précipitations en automne, (plus du double de la moyenne mensuelle en octobre avec 253 mm à Murvièl) et au printemps. La recharge du sol doit donc être correcte, ce qui sera vérifié par la simulation. L'été, particulièrement le mois de juillet, avec seulement 1 mm de pluie, est sec.

La station INRAE située sur le bassin versant voisin de Roujan est la seule mesurant l'ensemble des variables nécessaires au calcul de l'évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub>). Nous avons donc utilisé les données de vitesse du vent, de rayonnement global et d'humidité de Roujan pour calculer l'ET<sub>0</sub> des stations météo du Rieutord. La station de Roujan et le centre du bassin sont espacés seulement de 16,1 kilomètres.

### 1.3.3 Relevés de Végétation

Les espèces végétales présentes dans les inter-rangs de vigne au sein du bassin versant ont été recensées par Nora Dermerch en 2012.

Les paramètres du modèle Walis ne sont pas décrits dans la littérature pour ces espèces. Ainsi, ces valeurs sont déterminées à partir de leurs traits fonctionnels et en rapport avec les valeurs décrites pour la fétuque dans WaLIS (Garcia, 2013). Elles concernent notamment les taux de croissance de la LAI ( $LAI_{rate}$ ), les seuils de FTSW à partir desquelles la croissance de la LAI est limitée ( $FTSW_{regulLAI}$ ) et la transpiration régulée ( $FTSW_{regultranspi}$ ), et la somme de température à partir de laquelle la plante entre en sénescence (T senescence) (Tableau 2). Ces valeurs seront utilisées pour établir le bilan hydrique.

Dans le modèle utilisé, le couvert spontané simulé est assimilé à un couvert mono spécifique. Les paramètres qui décrivent le couvert spontané multi-espèces sont établis en faisant la moyenne des paramètres correspondant à chaque espèce au prorata de leur présence dans le mélange. Nous ne simulons qu'un seul couvert pour l'ensemble du bassin versant.

Tableau 2 : Données pour le couvert spontané et le couvert de fétuques

Paramètre	Spontané	Fétuque
$LAI_{rate}$	0,65	0,9
$FTSW_{regultranspi}$	0,5	0,6
$FTSW_{regulLAI}$	0,7	0,9
T senescence (degré jours)	540	700

## 1.4 Test de la nouvelle version de WaLIS sur un jeu de données de 2012 :

### 1.4.1 Description des données de 2012 :

Durant son stage, réalisé en 2012, Y.Tindon s'est intéressé à la possibilité de mettre en place un enherbement des vignobles à 60 ou 100 % dans le bassin versant du Rieutord et a tenté de quantifier le risque de stress hydrique que cela induisait. Pour valider ses paramétrages, il a réalisé des mesures de potentiel de base sur 10 parcelles, comme le montre la figure 9. Le fait de disposer de mesures de potentiels de base dès le début du stage sur certaines parcelles du bassin versant était un véritable avantage. Elles permettent de tester les différentes versions du modèle, d'appréhender la sensibilité du modèle aux divers jeux de paramètres disponibles sur le bassin versant et d'avoir un premier aperçu de la diversité du comportement hydrique d'un premier réseau de parcelles du bassin versant.

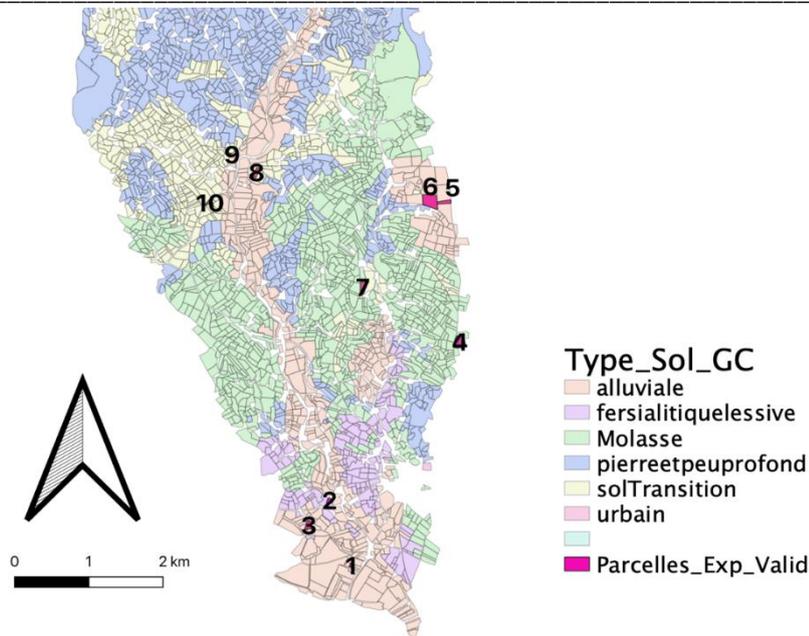


Figure 9 : Parcelles suivies par Y.Tindon en 2012

Cependant ces données ne peuvent être utilisées pour appréhender l’aptitude du modèle WaLIS à simuler les bilans hydriques sur le bassin versant car :

- i) Toutes les parcelles suivies en 2012 sont situées au sud du bassin versant, la diversité des caractéristiques du bassin versant ne peut donc être évaluée dans sa globalité
- ii) Certaines mesures (suivi d’enherbement, coefficients culturaux) n’ont pas été effectuées

### 1.4.2 Détail des 3 versions de WaLIS testées

Le modèle WaLIS a été enrichi lors de la première partie de la thèse d’Audrey Naulleau (partie 1.2), pour simuler la repousse de l’enherbement. Il est donc possible de réaliser le bilan hydrique en tenant compte des interventions techniques des viticulteurs et en modélisant la repousse de l’enherbement entre ces interventions.

Le premier bilan est réalisé avec l’ancienne version du modèle. Elle permet de simuler la croissance puis la destruction définitive du couvert semé de fétuques le 1er avril 2012.

Le deuxième bilan utilise la nouvelle version du modèle pour simuler la croissance puis la repousse d’un couvert spontané après chaque travail du sol. (Tableau 3) L’objectif est de comparer des deux versions du modèle.

Le bilan 3 est paramétré de la même façon que le bilan 2, mais en utilisant les valeurs de réserve utile fournies par la carte des sols de Lodève, alors que les réserves utiles utilisées pour les bilans 1 et 2 provenaient des données de l’ACH 34 (voir partie 1.3.1). L’objectif est de comparer ces deux sources de données

Tableau 3 tableau récapitulatif des caractéristiques des parcelles

	V1	V2	V3
TTSW	Carte ACH 34	Carte ACH 34	Carte Sol Iodève revue
ITK	Destruction 01/04	Parcours type selon sol	Parcours type selon sol
Enherbement	Semé (Fétuques)	Spontané	Spontané
Modèle	Version Celette 2010	Version Naulleau 2020	Version Naulleau 2020

Voir le paramétrage détaillé pour les simulations de 2012 en annexe 1.

## 1.5 Protocoles expérimentaux pour l'acquisition des données nécessaires à la validation du modèle :

### 1.5.1 Choix des parcelles, des placettes et des ceps suivis

Les parcelles suivies ont été choisies en mars 2020. Elles ont été sélectionnées de manière à représenter la diversité du bassin (type de sol (figure 10), AOC/IGP, enherbé/non enherbé, irrigué/non irrigué (Tableau 3) mais aussi selon des critères plus pratiques : accord du viticulteur et son intérêt pour la démarche, accessibilité, particulièrement pour les mesures de nuit.

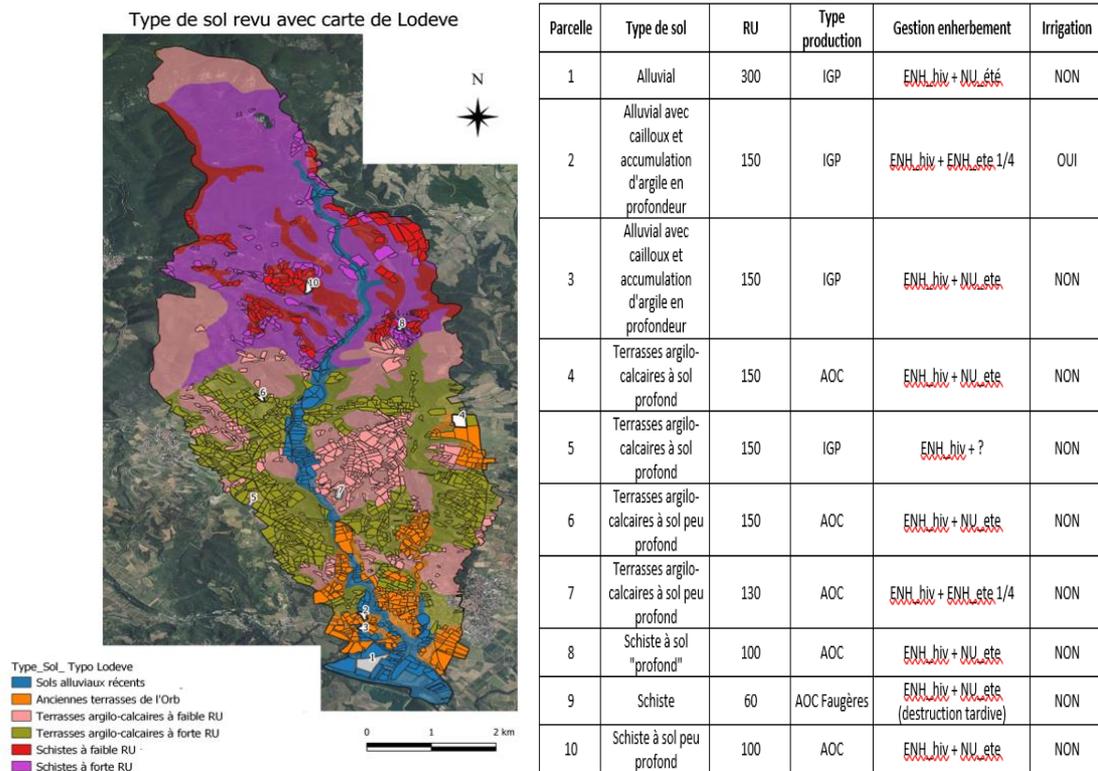


Figure 10 : Carte des parcelles suivies (en blanc) et des sols du bassin versant

Le choix des ceps est effectué en sélectionnant une zone de la parcelle homogène, où les caractéristiques pédologiques et la pente ne varient pas, sans ceps manquants et située à une distance minimum de 10 mètres de la limite de la parcelle pour éviter les effets de bord. Cinq placettes de 6 ceps sont choisies par parcelle. Une des 5 placettes est suivie pour les mesures de l'état hydrique de la vigne.

## 1.5.2 Suivi de l'enherbement

Un suivi régulier du taux de couverture a été effectué de début avril à août sur ces placettes. Les mesures de terrain ont été effectuées toutes les 2 à 3 semaines au cours de cette période. La méthodologie appliquée consiste en l'utilisation d'un quadrat que l'on déplace en diagonale dans l'inter-rang puis dans le rang. Le choix de mesurer le taux de couverture et non la LAI se justifie par le fait que les couverts sont généralement peu développés, donc l'estimation d'un taux de couverture est aisée. De plus, le grand nombre de données à récolter nécessite un protocole simplifié et des données mesurables rapidement sur le terrain. La mesure de la LAI par photos hémisphériques n'était pas envisageable.

Un protocole similaire consistant à valider la croissance du couvert par des mesures du taux de couverture a aussi été mis en place lors de l'évaluation du modèle WaLIS (Celette et al., 2010)

Pour chaque parcelle la largeur du rang et de l'inter-rang est mesurée, afin de pouvoir calculer un taux de couverture moyen sur la parcelle, en pondérant les valeurs au prorata de la proportion du rang et de l'inter-rang sur la parcelle.

### 1.5.3 Suivi du coefficient cultural

L'évolution du coefficient cultural de la vigne est suivie au cours de son développement, du 6 mai 2020 au 7 août 2020. Le coefficient  $K_c$ , qui représente la capacité d'interception du rayonnement par la vigne est calculé à partir du modèle de Riou. (C. Riou.,1989) Ce modèle assimile le rang de vigne à un parallélépipède dont il convient de mesurer la hauteur, la largeur et la porosité. L'orientation du rang et sa position géographique sont aussi prises en compte, puisqu'elles modifient la capacité d'interception du rayonnement. Une fois ces données recueillies, le coefficient cultural peut être calculé, avec le modèle de Riou.

La mesure de la hauteur du rang de vigne et de sa largeur est aisée. Le paramètre le plus subjectif, à mesurer sur le terrain est la porosité car il n'y a pas de méthodes clairement définies. De plus, le modèle de Riou est sensible à la porosité (Voltz et al., 2001). Elle a été mesurée sur le terrain en estimant le pourcentage de trous dans le feuillage.

Les mesures effectuées lors de la croissance du feuillage ont permis de vérifier le calcul de coefficients culturaux intermédiaires du modèle WaLIS. Ce calcul dépend notamment du paramètre DDK max, la somme de degré jour nécessaire à ce que le feuillage de la vigne soit pleinement développé. Les différentes études indiquent des valeurs de 400 (Lebon., 2003) à 600 degrés jours (Celette, 2010).

La mesure effectuée après écimage, lorsque le feuillage est le plus développé et le plus dense permettra de déterminer le  $K_{max}$ , constante qui indique la capacité d'interception lorsque le gabarit de la vigne ne varie plus. C'est un paramètre d'entrée du modèle, relativement sensible (Roux et al.,2014).

### 1.5.4 Mesure du statut hydrique

Deux méthodes ont été mises en place pour suivre le statut hydrique de la vigne. Une méthode légère repose sur la caractérisation de la croissance végétative de la vigne. En effet, la croissance du bourgeon terminal (apex) des rameaux primaires est sensible au stress hydrique (Saurin et al., 2014). Son état de croissance (poussante, ralenti ou arrêtée) fournit une indication sur l'état de stress hydrique de la parcelle. Cinquante apex autour de la placette sélectionnée pour mesurer les potentiels de bases seront observés. Ceci permettra d'avoir un aperçu de l'état hydrique de la vigne toutes les deux semaines.



Figure 11: Trois états de la croissance des apex (d'après Institut Français de la Vigne et du Vin)

L'autre méthode, plus lourde, consiste en la mesure du potentiel foliaire. La nuit, les stomates sont fermés et la transpiration est nulle, un équilibre entre le continuum sol-plante-atmosphère s'établit donc (Simoneau et al 2014). Il est donc possible de connaître le potentiel hydrique moyen du sol en mesurant le potentiel foliaire. Néanmoins, en cas de nuit chaude et ventée la demande climatique peut ne pas être nulle, ce qui conduit à une surestimation du déficit hydrique. En outre, le potentiel de base s'équilibre avec les horizons

de sol les plus humides (Saurin et al., 2014) ce qui peut conduire à une sous-estimation du potentiel hydrique si : i) une pluie peu abondante a humecté l'horizon de surface, ii) l'horizon de sol le plus profond est humecté par capillarité (remontées de nappe). Pour éviter les imprécisions liées au premier point, il convient de surveiller les conditions météorologiques sur la semaine précédant la mesure. Sur le réseau de parcelles suivies, cette mesure est assez complexe du fait de la distance à parcourir entre chaque parcelle, sur des chemins plus ou moins carrossables. Il a été décidé de placer les chambres à pression en deux points du bassin versant de manière à cueillir les feuilles de vignes, les stocker dans une glacière et de les apporter à la chambre à pression. Cela permet d'éviter de transporter le matériel d'une parcelle à l'autre, et d'avoir le temps de mesurer toutes les parcelles en une nuit. Cette méthode est contrôlée en cueillant un échantillon témoin dans la première parcelle, afin de vérifier que le potentiel évolue peu en 45 minutes, temps de stockage maximal des feuilles dans la glacière.

Les potentiels sont mesurés sur une placette en cueillant 2 feuilles par cep, soit 12 feuilles par placette. Les feuilles cueillies sont soigneusement choisies parmi les feuilles situées en haut du rang, en évitant les feuilles malades, abîmées ou trop jeunes.

Pour les parcelles présentant un inter-rang enherbé, deux mesures sont effectuées, l'une sur les ceps bordant un inter rang enherbé, l'autre sur des ceps du rang bordés de part et d'autre des inter-rangs travaillés.

Les feuilles sont analysées par les deux chambres à pression (une de chaque cep) pour limiter les biais dus au réglage du manomètre ou à l'expérimentateur.

### 1.5.5 Suivi des itinéraires techniques sur les parcelles

Les dates de travail du sol, de désherbage, et les apports d'eau par irrigation (volume et dates) constituent une entrée du modèle. En outre, pour mieux prendre en compte l'hétérogénéité des pratiques et d'avoir des dates d'intervention cohérentes avec les dates d'événements pluvieux, les itinéraires techniques réalisés par les 10 viticulteurs ont été réalisés. Du fait du contexte particulier, la collecte de données s'est effectuée par enquête téléphonique. Le questionnaire est disponible en annexe 3.

### 1.5.6 Choix des indicateurs de qualité du modèle

- $$\text{Biais} = \frac{\sum VO_i - VS_i}{I}$$

(Avec VO valeurs observées et VS valeurs simulées, et I l'effectif)

Il donne une indication sur la propension du modèle à surestimer ou sous-estimer systématiquement les sorties du modèle. Il est dans la même unité que les valeurs analysées. Plus il est faible plus le modèle est précis, cependant il peut arriver que les écarts entre valeurs observées et simulées se compensent, ce qui n'est pas visible en étudiant seulement le biais.

- $$\text{RRMSE} = \sqrt{\frac{\sum (VO_i - VS_i)^2}{I \cdot \overline{VO}}}$$

La RRMSE (relative root mean square error), sans unité, permet de quantifier l'écart entre valeur observée et valeur simulée, contrairement au biais il ne donne pas d'information sur le signe mais est plus précis en divisant l'écart sur la moyenne des valeurs observées. Plus elle est faible plus le modèle est précis.

- $$\text{EFFICIENCE} = 1 - \frac{\sum (VO_i - VS_i)^2}{\sum (VO_i - \overline{VO})^2}$$

Elle donne une information sur la qualité du modèle, en calculant l'écart des valeurs simulées aux valeurs observées, pondéré par l'écart des valeurs observées à la moyenne des valeurs observées. Si elle vaut 1, le modèle est exact, au plus elle est faible au moins le modèle est précis.

## 2 Résultats

### 2.1 Etude des données de 2012

Les simulations réalisées avec les données de 2012 montrent que la version du modèle prenant en compte les repousses de l'enherbement améliore un peu sa précision, et que la variable d'entrée réserve utile a un impact important sur la précision du bilan hydrique simulé.

Tableau 4 : Synthèse des indicateurs de qualité du modèle pour les 3 versions testées (en vert bonne qualité du modèle, en rouge non) biais, RMSE et EF sans unité, RU en mm

Parcelle	Version	biais	RMSE	EF	RU
P1V1		0,116	0,15	0,42	145
P1V2		0,111	0,144	0,45	145
P1V3		0,09	0,122	0,61	200
P2V1		0,288	0,288	-0,701	150
P2V2		0,329	0,337	-1,329	150
P2V3		0,407	0,425	-2,69	120
P3V1		0,228	0,248	-0,565	120
P3V2		0,222	0,242	-0,494	120
P3V3		0,407	0,425	0,47	200
P4V1		0,324	0,369	-1,74	75
P4V2		0,319	0,363	-1,662	75
P4V3		0,192	0,214	0,07	130
P5V1		0,372	0,389	-2,95	145
P5V2		0,366	0,382	-2,826	145
P5V3		0,347	0,36	-2,39	200
P6V1		0,39	0,426	-1,71	75
P6V2		0,382	0,417	-1,604	75
P6V3		0,149	0,182	0,50	200
P7V1		0,431	0,486	-2,12	75
P7V2		0,425	0,478	-2,046	75
P7V3		0,397	0,441	-1,57	90
P8V1		0,32	0,381	-0,568	120
P8V2		0,315	0,376	-0,527	120
P8V3		0,362	0,443	-1,118	90
P9V1		0,0036	0,07	0,881	145
P9V2		0,0304	0,065	0,894	145
P9V3		0,126	0,194	0,078	90
P10V1		0,443	0,451	-9,78	145
P10V2		0,433	0,441	-9,334	145
P10V3		0,584	0,544	-14,71	90

Le passage du modèle 1 au modèle 2 améliore toujours la simulation même si les gains en termes d'efficacité restent très faibles (0,1 au maximum, Tableau 4). Cependant, l'année hydrologique modélisée est un peu particulière, la recharge printanière du sol est complète. Toute l'eau consommée par l'enherbement en hiver impacte donc très peu le bilan hydrique pour la vigne. La consommation d'eau par le couvert en été est très faible, quasiment négligeable en comparaison de l'évaporation du sol et de la transpiration de la vigne.

Le premier résultat marquant est que le biais soit toujours positif, dans les 3 versions, ce qui indique que le modèle a tendance à surestimer le déficit hydrique. Ceci pourrait s'expliquer par une surestimation du Kc, une sous-estimation de la TTSW, ou encore une sous-estimation du ruissellement. Un phénomène de

remontées capillaires depuis la nappe pourrait aussi expliquer la sous-estimation de la TTSW pour les parcelles en sol alluvial.

Le changement de réserve utile (Tableau 4) entraîne des effets plus importants sur les indicateurs de qualité du modèle. Lorsque les réserves utiles de la version 2 (issues de l'ACH 34) sont supérieures aux réserves utiles de la version 3 (issues de la carte des sols), les indicateurs se dégradent, et inversement lorsque les réserves utiles des versions 2 sont inférieures à celle de la version 3. La perte d'efficacité entre la version 1 et 2 peut-être de 0,8 pour la parcelle 9 lorsque la réserve utile passe de 145mm (version 2) à 90mm (version 3), ce qui montre l'importance de cette variable d'entrée du modèle.

A priori on peut exclure une mauvaise évaluation du ruissellement car le sol est dans la plupart des parcelles complètement rechargé, ou presque, en sortie d'hiver. Les pluies d'été sont peu importantes sur l'année simulée et n'occasionnent pas ou très peu de ruissellement.

Concernant les valeurs de KC utilisées pour ces simulations, elles sont dans la gamme de valeur habituelle. (Lebon 2003) avait utilisé des valeurs d'ordre grandeur similaire, et ont été observées avec le même protocole que celui décrit au 1.5.5.

Tout ceci indique que la TTSW est sous-estimée.

Enfin, notons que certaines valeurs de potentiel de base utilisées pour la validation interrogent : notamment celles du 10 juillet 2012 réalisées après les pluies du 4 et 5 juillet (10 mm mesurés à Roujan) : la pluie humidifie le sol superficiellement et le potentiel hydrique de la vigne ne correspond plus à celui du sol en profondeur.

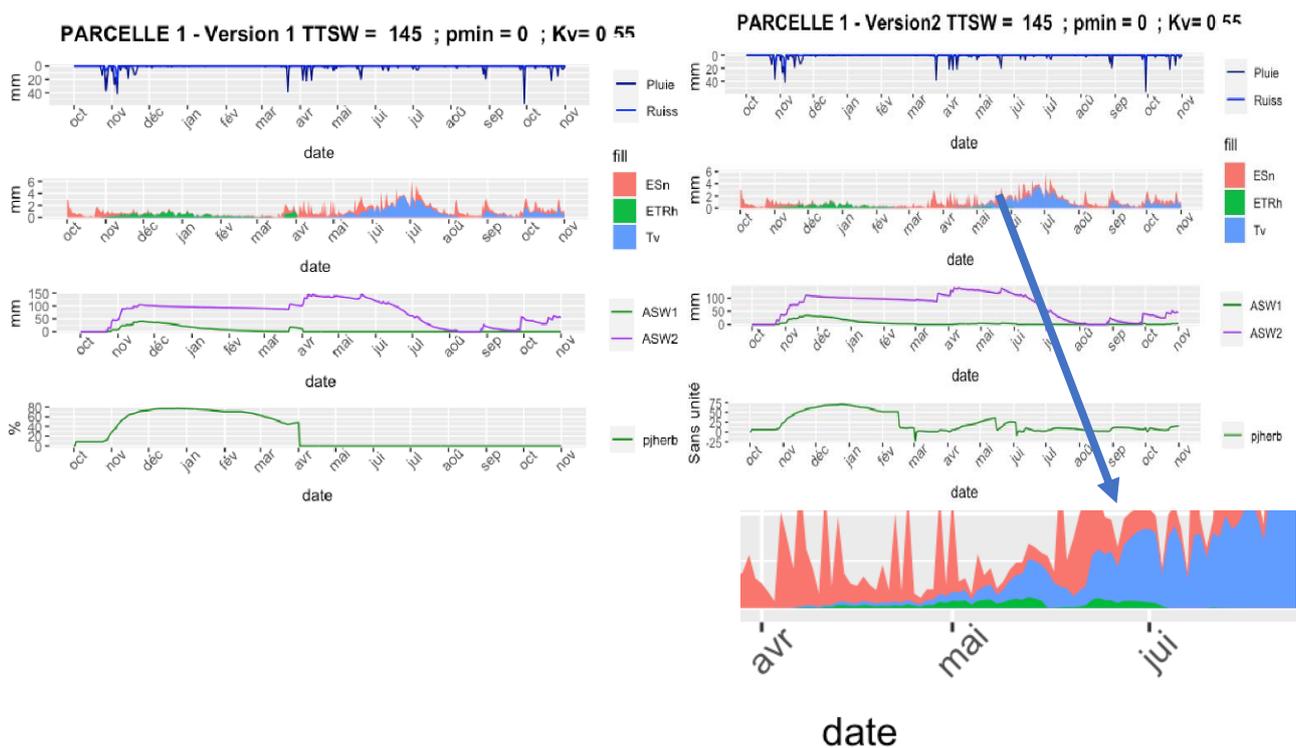


Figure 12: Comparaison des versions 1 et 2 (avec un zoom sur la version 2)

On observe également qu'avec les itinéraires techniques utilisés pour le paramétrage, les repousses de l'herbe sont très faibles, ainsi la transpiration de l'herbe est significative en hiver mais que la part due aux repousses est négligeable en été, avec moins d'un mm par jour.

L'utilisation ITK types, utilisées pour paramétrer le modèle car les ITK réellement pratiquées en 2012 par les viticulteurs étaient inconnues, ne prend pas en compte la variabilité de pratiques observées sur le bassin versant. L'utilisation d'ITK réelles pour la simulation de 2020 permettra peut-être de mieux prendre en compte l'effet de l'enherbement.

Pour conclure il ressort de ces simulations, effectuées avec les données de 2012, que la dernière version du modèle simulant les repousses de l'herbe améliore très peu la précision du modèle. En outre la qualité du jeu de données est cruciale, le paramètre TTSW par exemple, influence grandement la qualité de la modélisation.

## 2.2 Évaluation du modèle à partir des données de terrain de 2020

### 2.2.1 Simulation de l'enherbement

Les courbes en sortie de modèle montrent que la dynamique de l'enherbement est de façon générale bien simulée. A contrario des simulations effectuées sur l'année 2012, on observe bien une repousse de l'herbe durant le printemps, au cours de la période végétative de la vigne. Elle correspond aux observations réalisées sur le terrain, les taux de couvertures mesurés montrent également cette repousse de l'herbe entre 2 travaux du sol. (Voir figure 13 pour la parcelle 5 et 8, et annexe 4 pour les 10 parcelles)

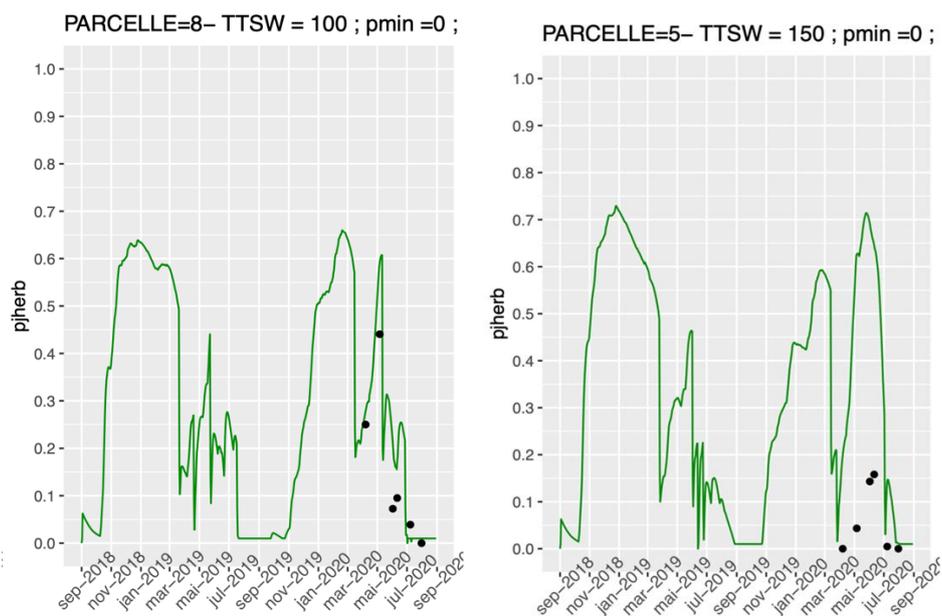


Figure 13 : taux de couvertures simulés et mesurés pour les parcelles 5 et 8

Cependant la repousse simulée est bien plus rapide que la repousse observée. Par exemple, sur la parcelle 5, le modèle simule une repousse jusqu'à un taux de couverture de 0,7 entre les travaux du sol de mars et fin mai 2020, alors que les données expérimentales indiquent une repousse jusqu'à un taux de couverture de 0.18. Le même schéma est retrouvé sur la parcelle 8, la mieux modélisée, où le taux simulé

est de 0,65 alors que le taux observé est de 0,45. Ce biais positif est observé constamment, mis à part un cas particulier.

Sur la parcelle 4, on a observé une repousse de l’herbe en période estivale ou le modèle simulait un taux de couverture nul. Cela pourrait être expliqué par la présence de millet, très résistant au stress hydrique, mais nécessite la réalisation d’un inventaire floristique pour quantifier l’impact de ce facteur.

Sur les sols de schistes des parcelles 9 et 10, ce biais du modèle est encore plus marqué. Les taux de couvertures mesurés ont toujours été nuls, l’enherbement n’ayant pas repoussé après le premier travail du sol effectué en mars (voir figure 14). Ceci pourrait s’expliquer le taux de cailloux, qui rendent ces sols moins propices au développement de l’herbe (Andrieux et al., 2015)

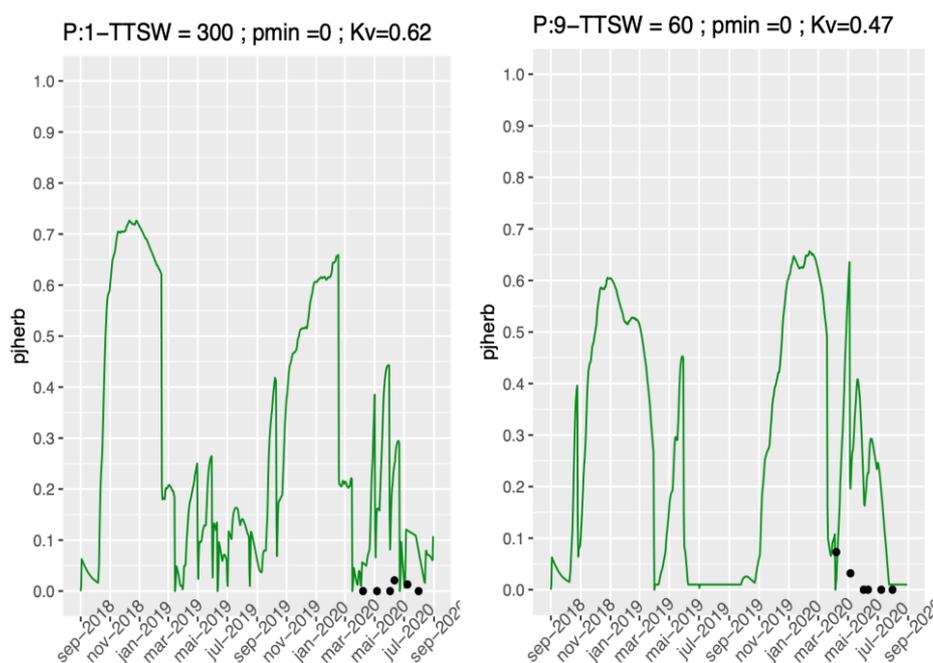


Figure 14: taux de couvertures simulés et mesurés pour les parcelles 1 et 9

Sur les sols où les entretiens étaient fréquents, comme la parcelle 1 pour laquelle il en est réalisé un par mois environ, le taux de couverture mesuré expérimentalement est toujours resté nul alors que le modèle simulait une légère repousse. (Voir figure 14)

Mis à part sur les parcelles très contraignantes, ou sur la parcelle 1 entretenue très régulièrement, la dynamique de croissance de l’enherbement est bien simulée. Cependant les taux de couvertures sont toujours trop élevés et la croissance simulée juste après les travaux du sol n’est pas observée en réalité, ce qui pourrait expliquer cet écart entre les mesures de terrain et la simulation.

## 2.2.2 Simulation du coefficient cultural

Les mesures de gabarit de la vigne et le calcul du coefficient cultural avec le modèle de Riou ont permis de déterminer le coefficient cultural maximal (Kmax) et des coefficients culturaux intermédiaires (cf protocole). Il a ainsi été possible de choisir la variable ddkmax (somme de degrés jour au bout de laquelle le coefficient cultural est maximal) et de vérifier la cohérence des résultats modélisés aux valeurs de terrain. Au vu des résultats la simulation du coefficient cultural est robuste.

Lorsque le paramètre d'entrée  $ddk_{max}$  est fixé à 400 degrés jour, les deux premières mesures expérimentales sont mieux interceptées par le coefficient cultural calculé par WaLIS, que lorsque ce paramètre est fixé à 600 degrés jour. (Voir figure 15 pour les parcelles 1 et 9 et annexe 5 pour les 10 parcelles)

La valeur de 400 degrés jour sera donc retenue pour le paramétrage de la simulation 2019/2020. (Annexe 3)

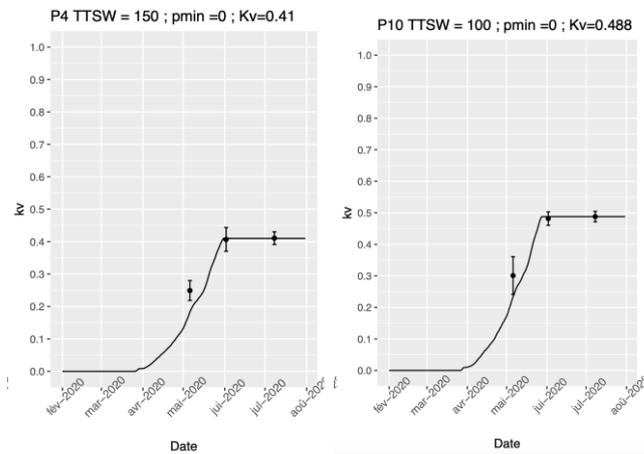


Figure 15 : Coefficients culturaux simulés et mesurés pour les parcelles 4 et 10

Enfin, les incertitudes sur la mesure de la porosité, paramètre sensible du modèle de Riou sont dissipées : on remarque que les écart-types sont resserrés autour de la moyenne, ce qui indique un faible effet de la variabilité de la porosité mesurée sur le calcul du coefficient cultural par le modèle de Riou. Plus le feuillage se développe, plus la mesure du gabarit et de la porosité est homogène et facile à réaliser et plus cet écart-type est resserré.  $K_{max}$ , paramètre d'entrée de WaLIS assez sensible, est donc mesuré avec précision.

## 2.2.3 Simulation du statut hydrique :

### 2.2.3.1 Suivi des apex :

Le suivi d'apex a permis d'obtenir un aperçu de l'état hydrique des parcelles suivies dès le mois de mai. La campagne de mesure a permis de montrer que les parcelles au nord du bassin, situées sur les sols à plus faible réserve utile, ont subi une contrainte hydrique importante et précoce. Cependant, quelques résultats, qui peuvent paraître contre intuitifs ont aussi été observés.

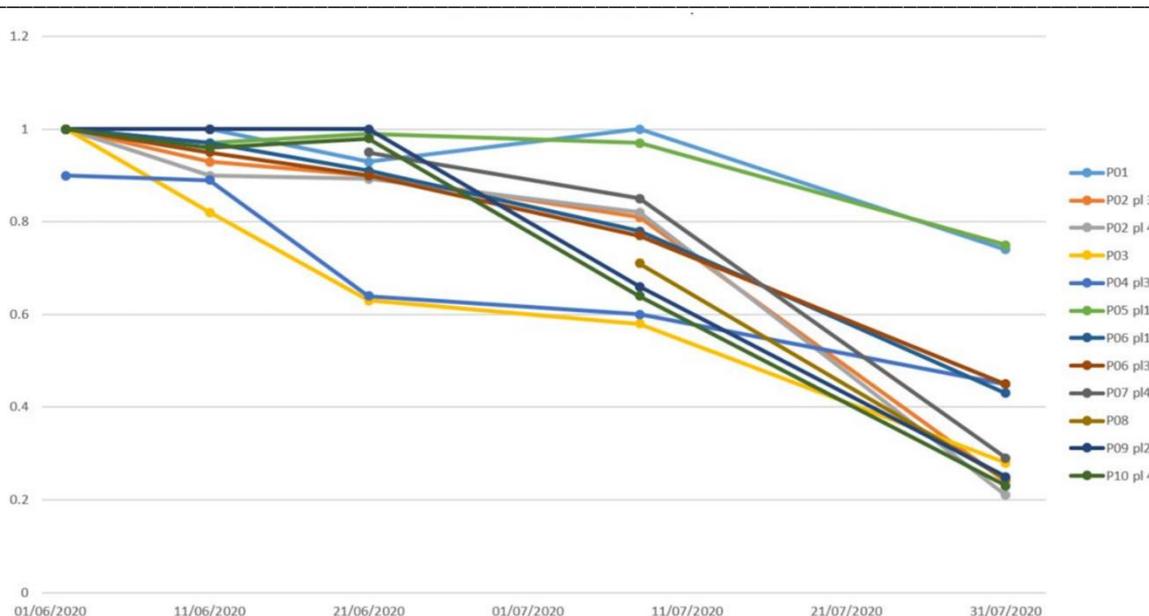


Figure 16 : Indices de croissance des apex sur les 10 parcelles

Les premières parcelles qui ont montré des signes de ralentissement étaient les parcelles 3 et 4. Dès le 21 juin l'indice de croissance d'apex, estimé par comptage était de 0,6, alors qu'il était de 0,9 pour toutes les autres parcelles. Cela peut paraître assez étonnant car ce n'était pas celles qui avaient la plus faible réserve utile. Ces parcelles étaient très touchées par le mildiou mais il n'y a pas d'études établissant un lien entre croissance des apex et état sanitaire du feuillage. Le fait que ces parcelles soient plantées de grenache, qui a un comportement isohydrique (Schultz 2003) pourrait aussi apporter une explication. Les vignes au comportement isohydrique ont en effet la capacité de réguler leur transpiration dès lors qu'elles sont en stress hydrique modéré, par le biais de la fermeture stomatique. Cela permet de diminuer précocement le flux d'eau par transpiration et donc d'en « économiser » pour la suite de la saison. Ceci pourrait expliquer ce stress précoce, détecté par les mesures d'apex.

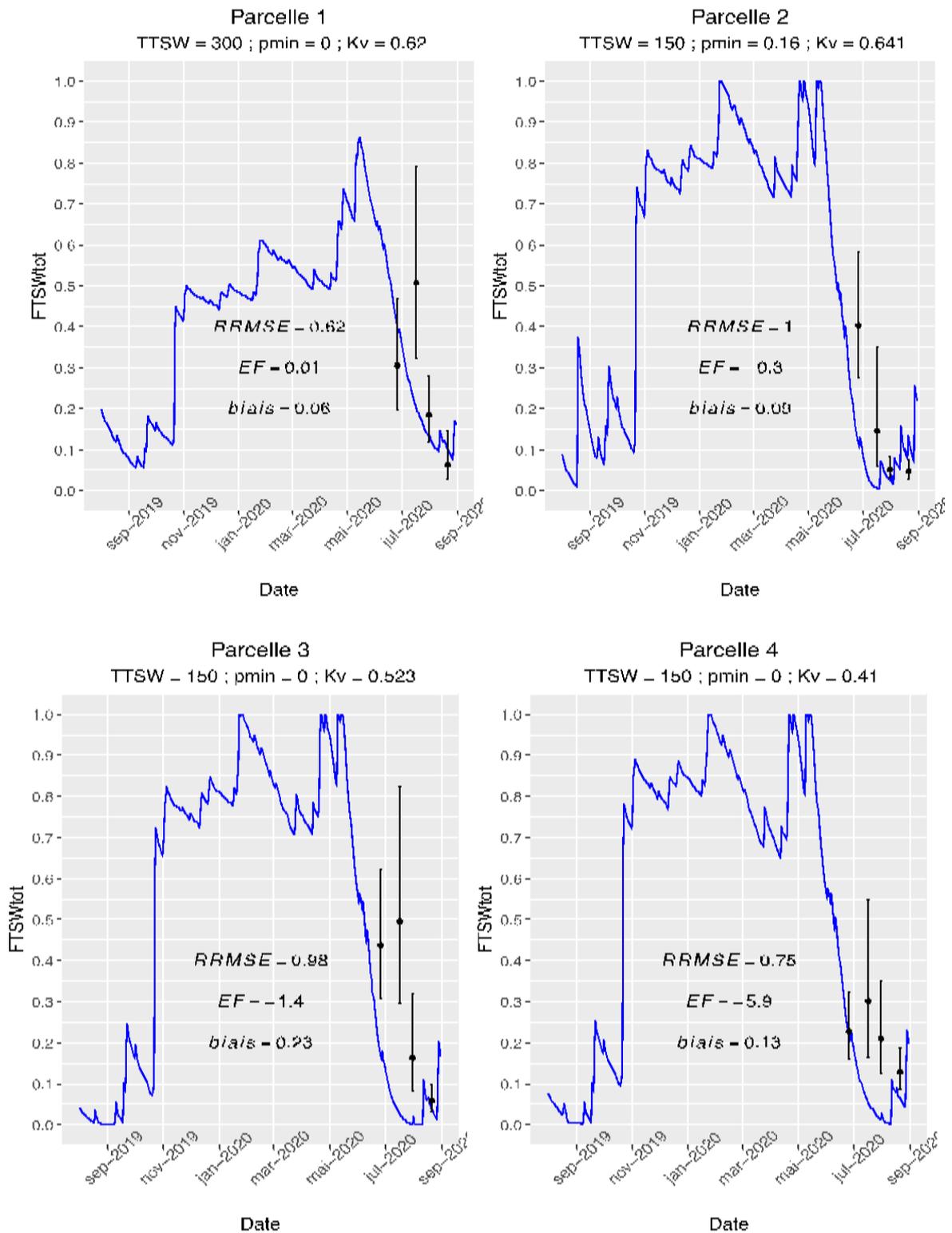
Mis à part ce cas particulier, les parcelles les plus au nord, sur les sols plus contraignants, subissent un stress hydrique plus tôt dans la saison que les parcelles les plus au sud. Ces résultats constituent une première vision de l'état hydrique des vignes sur les 10 parcelles suivies. Le décrochage a lieu aux alentours du 20 juin 2020, ce qui ne correspond pas aux simulations, pour lesquelles le décrochage est observé dès mi-mai 2020. Ces données permettent aussi de vérifier la cohérence des mesures effectuées à l'aide des potentiels de pression.

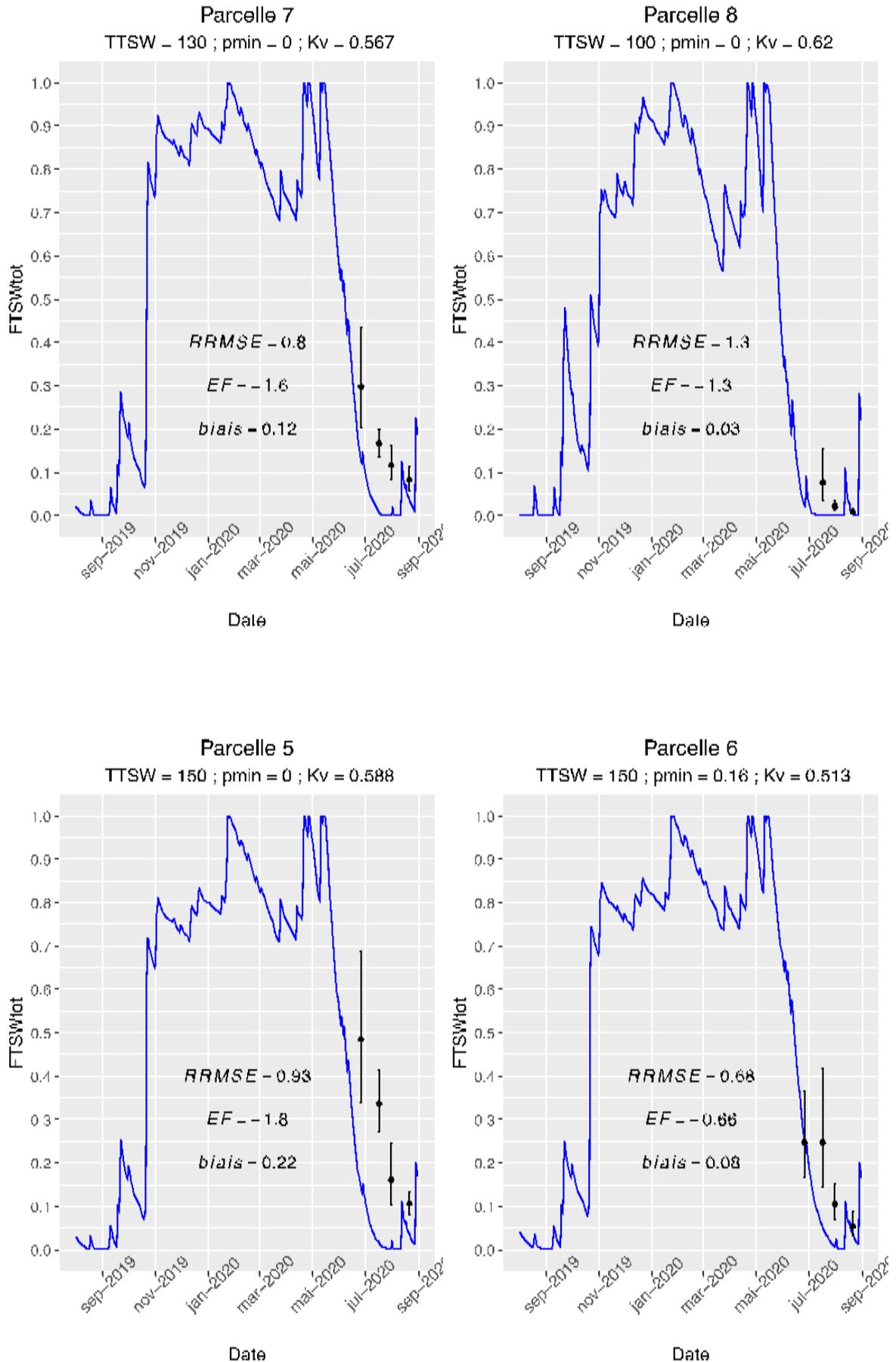
### 2.2.3.2 Bilan hydrique et efficacité du modèle :

La comparaison des simulations aux valeurs de potentiel mesurées (Annexe 6) montre que l'aptitude du modèle à modéliser les bilans hydriques des 10 parcelles sélectionnées est limitée. La dynamique semble correcte mais le modèle surestime le stress hydrique et surtout sa précocité (figure 17). La précision du modèle est assez aléatoire, il est difficile de distinguer son efficacité en fonction des caractéristiques des parcelles.

Tout d'abord, il convient de souligner que l'allure générale des courbes correspond bien aux bilans hydriques déjà effectués dans le bassin. (Tindon, 2012) Une période de recharge est observée en automne et au printemps tandis qu'une diminution brutale de la FTSW a lieu pendant l'été. La pente de la diminution de FTSW est encore plus marquée sur les parcelles au sol à faible réserve utile du nord du bassin que sur les sols

du sud du bassin. Les différences de bilan hydrique sont donc conséquentes en fonction des caractéristiques des parcelles. Ces différences de dynamique d'évolution de la FTSW sont observées tant au niveau des valeurs simulées que des mesures de potentiel de base.





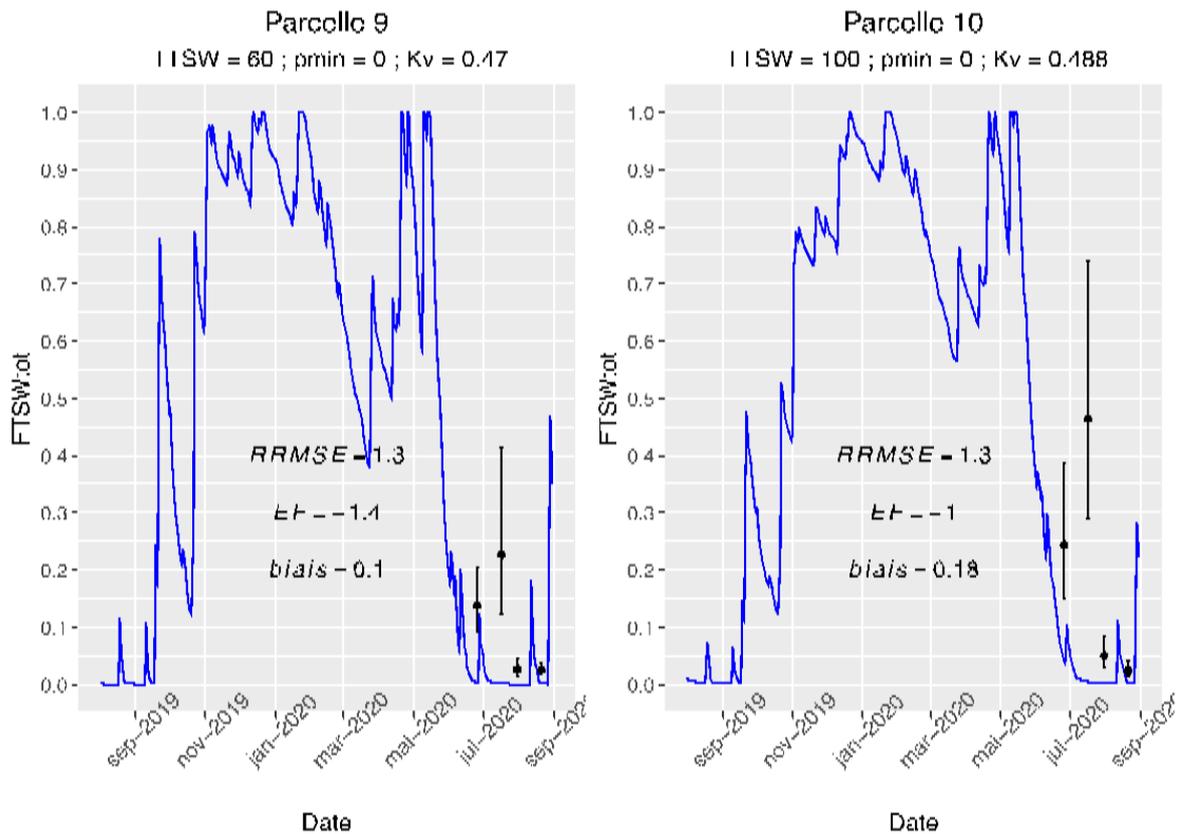


Figure 17 : Bilan hydrique simulé pour les 10 parcelles et points de controle mesurés expérimentalement

On observe néanmoins sur certaines parcelles (1, 3, 9 et 10) que la mesure de potentiel de mi-juillet 2020 ne suit ni la dynamique simulée ni la dynamique des mesures expérimentales. Cela suppose une erreur expérimentale, comme le choix des feuilles par exemple, l'équipe ayant réalisé les mesures sur ces 4 parcelles étant peu expérimentée. Les indicateurs de qualité du modèle calculés avec ces 4 valeurs expérimentales, indiqués sur les graphiques sont donc peu représentatifs. Il a été choisi de les recalculer en enlevant les valeurs de FTSW mesurées qui ont augmenté entre fin juin et mi-juillet. Les indicateurs calculés sans cette valeur aberrante sont répertoriés dans le tableau 5 ci-dessous :

Tableau 5 : Indicateurs de qualité du modèle ( en vert les meilleurs indicateurs, en jaune les valeurs intermédiaires et en rouge les plus mauvaises)

parcelle	RRMSE	Biais	Efficienc
1	0,36	-0,026	0,56
2	1	0,094	-0,3
3	0,83	0,15	-0,28
4	0,64	0,19	-6,8
5	0,53	0,22	-1,8
6	0,42	0,04	0,52
7	0,8	0,12	-1,6
8	1,3	0,034	-1,3
9	1,3	0,061	-1,5
10	1,2	0,09	-0,51

Les indicateurs de qualité du modèle indiquent que les bilans hydriques simulés correspondent mal à la réalité. Seules les parcelles 1 et 6 ont des indicateurs convenables, qui sont dans les ordres de grandeur des indicateurs obtenus lors de la validation du modèle WaLIS au domaine du chapitre (Roux et al., 2014).

Plus en détail, le biais est toujours positif, mis à part pour la parcelle 1, où il est nul, ce qui indique que le modèle sous-estime toujours la FTSW. Sur certaines parcelles, comme la 5, l'écart est de 0,22 ce qui est très significatif. En observant les graphiques on remarque que, une fois la deuxième mesure éliminée c'est entre la valeur mesurée début juin et la valeur simulée que l'écart est le plus important. La diminution brutale de FTSW en début d'été est donc mal simulée.

Les simulations ont tendance à surestimer le stress hydrique. La baisse rapide de FTSW observée au début l'été débute plus tôt sur les simulations que celle observée sur les mesures. Les mauvais indicateurs du modèle sont donc dus à un décalage temporel de la chute de FTSW, qui est simulée de façon trop précoce par le modèle. Sur les parcelles à plus faibles réserves utiles la FTSW passe de 1 à 0,05 (parcelle 10) en moins de 3 semaines. C'est donc la période la plus difficile à modéliser précisément, et un petit décalage temporel peut entraîner de grands écarts entre FTSW simulée et FTSW mesurée, et avoir de forts effets sur l'efficacité du modèle.

Seule sur la parcelle 1, où la réserve utile est très forte, la chute de FTSW est moins brutale (elle dure plus de 2 mois), et la FTSW mesurée est quasiment égale à la FTSW simulée. L'efficacité est correcte, le biais est quasi nul et la RRMSE est faible. La parcelle ne subit pas de stress hydrique, et la réserve utile ne s'épuise pas en été.

Les parcelles sur molasse calcaire, dont la réserve utile est très variable (voir partie 1.2) sont les plus compliquées à simuler. La parcelle 4 est la plus mal représentée, avec une efficacité de -5,9. La parcelle 6 est la mieux simulée. Ceci souligne l'importance de la détermination de la réserve utile.

Le réseau de parcelles situé sur sol de schiste est plutôt bien simulé. Ces parcelles sont soumises à stress hydrique sévère dès le mois de juin, les orages d'été ont un effet important mais limité dans le temps, la FTSW diminuant rapidement. Cette diminution rapide décuple l'écart entre la valeur mesurée fin juin et la valeur simulée, d'où la RRMSE très élevée (1, 3)

Enfin, l'anomalie constatée sur la parcelle 4 avec le comptage d'apex se confirme puisque l'on observe que les FTSW mesurées sont plus élevées que celles simulées, et que la pente est beaucoup moins forte.

Il convient tout de même de nuancer les mauvais indicateurs du modèle obtenus avec nos mesures de validation car :

- i) La variabilité des résultats varie énormément selon les parcelles, et les résultats sont meilleurs pour les parcelles ayant des grandes réserves utiles, l'erreur relative liée à la réserve utile étant donc plus faible
- ii) La période de mesure correspond à une chute brutale de FTSW, difficile à simuler. En validant le modèle sur au moins une année hydrologique entière comme cela a été fait au chapitre (Roux et al., 2014) les résultats auraient sans doute été plus probants.
- iii) Le lien entre FTSW et potentiels de base est une formule empirique, établies dans des conditions bordelaises. L'application de cette équation dans notre étude peut alors être controversée.

Il est aussi intéressant de remarquer que les trajectoires hydriques des 10 parcelles suivies sont toutes très différentes (Figure 18) : les 3 groupes de parcelles (terrasses de l'Orb, molasse et schistes) se distinguent. Les parcelles sur schiste (8,9,10) subissent un stress sévère dès la mi-juin alors que les parcelles sur molasse argilocalcaires (4,5,6,7) subissent un stress hydrique sévère à partir de mi-juillet. Les parcelles les plus au sud, situées dans les sols les plus profonds subissent moins de stress hydrique, c'est en particulier vrai pour la parcelle 1, qui ne subit qu'une contrainte faible à modérée pendant 1 mois, et la parcelle 2 qui est irriguée

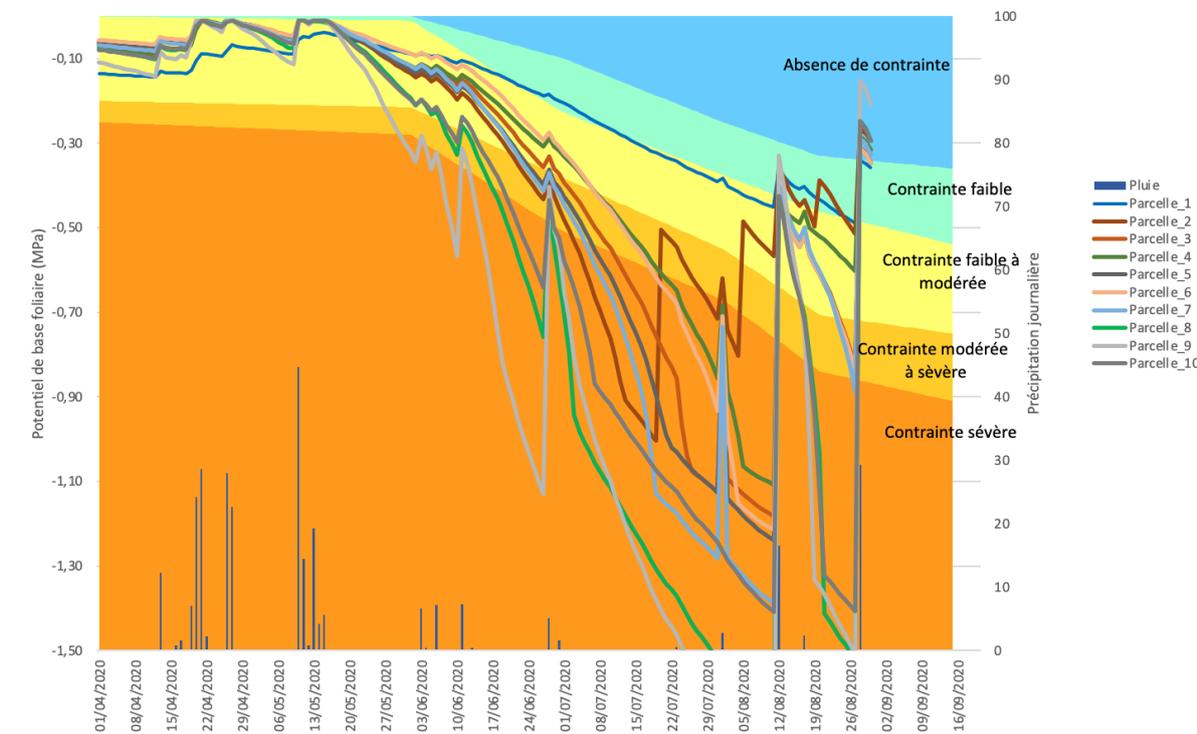


Figure 18 : Parcours hydriques simulés des 10 parcelles du bassin versant

Enfin, la part de la transpiration de l'enherbement dans le bilan hydrique est significative, y compris durant la saison de croissance de la vigne, (Figure 19) avec plus de 3 mm par jour en mai pour la parcelle 4. En hiver, c'est le principal flux d'eau en sortie du bilan hydrique.

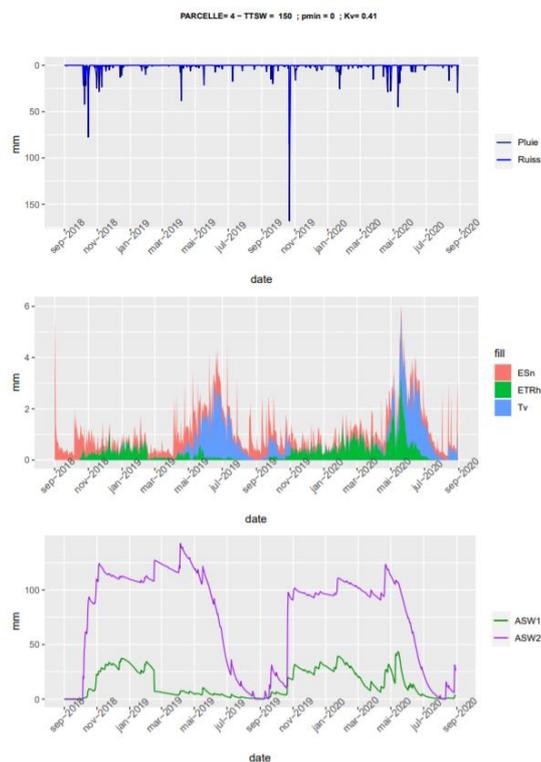


Figure 19 : Entrées et sorties du modèle pour la parcelle 4, et ASW des 2 compartiments  
ESn représente l'évaporation, ETRH l'évapotranspiration de l'herbe et Tv la transpiration de la vigne

## 3 Discussion

### 3.1 L'évaluation du taux de couverture

La nouvelle version de WaLIS intègre l'évolution du taux de couverture en fonction de l'itinéraire technique. Cependant celui-ci n'est pas correctement simulé. Les valeurs simulées au cours de l'hiver et du printemps semblent correctes, avec des taux de couverture de 70 % en moyenne sur les 10 parcelles. Cela correspond aux commentaires ajoutés par les viticulteurs au cours de l'entretien téléphonique : la végétation est bien développée et certains doivent broyer l'herbe en sortie d'hiver avant de pouvoir réaliser un travail du sol.

Néanmoins, après le premier travail du sol réalisé de fin février à fin mars, le suivi expérimental réalisé a montré que le taux de couverture simulé était largement supérieur aux taux mesurés. (voir partie 2.2.3 observations) Plusieurs hypothèses pourraient expliquer cette mauvaise simulation de la repousse du couvert :

#### 3.1.1 L'hétérogénéité des caractéristiques du couvert

Même si des relevés floristiques ne viennent pas étayer le propos, il a paru évident, lors des suivis du taux de couvertures sur les 10 parcelles que les espèces présentes dans les couverts n'étaient pas identiques. On peut supposer que ceci est dû à la variabilité des caractéristiques pédologiques et chimiques des sols sur le bassin, mais aussi à l'adaptation des communautés aux interventions de gestions du couvert, différentes d'un viticulteur et d'une parcelle à l'autre. Ces interventions agissent au fil du temps comme des filtres de sélection.

E. Kazakou et al., 2012 a démontré que les trajectoires des communautés végétales étaient influencées par les pratiques agricoles, en utilisant la théorie de l'écologie fonctionnelle. La composition des communautés végétales évolue donc spatialement, mais aussi temporellement, puisque les proportions des espèces varient aussi au cours de l'année. En effet l'inventaire floristique réalisé par Nora DERMECH sur le bassin versant montre que les pourcentages d'espèces majoritaires varient entre l'hiver et l'été. Le paramétrage est établi à l'aide de coefficients calculés à partir des proportions moyennes des espèces les plus abondantes à l'échelle du bassin versant. Cette double variabilité n'est donc pas prise en compte et constitue une approximation conséquente.

### **3.1.2 La fertilité des sols**

La fertilité des sols est un enjeu peu pris en compte dans notre travail. Pourtant elle impacte la croissance de la surface foliaire de la vigne (Robinson 1983), mais aussi du couvert, la croissance des graminées évoluant dans les sols enrichis en Azote par exemple (POOZESH 2007). Ainsi, le calcul de la LAI (équation 10) dans WaLIS dépend de l'Indice de nutrition Azoté (INN). Or celui-ci est fixé à 0,3 par défaut et il n'y a aucune donnée pour le quantifier plus précisément pour les simulations réalisées.

En matière de fertilisation, les pratiques des viticulteurs sur les 10 parcelles suivies sont très hétérogènes : certains (parcelle 1) réalisent un apport de 300 kg d'engrais organique tandis que d'autres (Parcelle 3) ne réalisent aucun apport, notamment dans un souci économique. Il est donc évident que la disponibilité en éléments minéraux pour le couvert et donc l'INN sont en réalité très variables selon les parcelles.

Au-delà de cette variabilité géographique, F. Cellette a montré qu'il existait une forte variabilité temporelle de la disponibilité en azote. Il énonce tout d'abord le fait que la croissance du couvert a lieu avant le débournement de la vigne, durant cette période tout l'azote minéral présent dans la solution de sol est disponible pour le couvert. Après le débournement vigne et couvert sont en compétition. De plus Cellette plus établit un lien étroit entre le bilan hydrique et la disponibilité en azote. L'azote minéral absorbé par les plantes est celui qui est dissout dans la solution de sol, il est donc très peu disponible en période de sécheresse. Enfin, la minéralisation de l'azote organique, et donc in fine la disponibilité d'azote pour les plantes, varie selon la température du sol et son humidité (Mers et al, 1982). Il conviendrait donc de faire varier l'INN au cours du temps. C'est ce à quoi s'attache A Metay qui essaie de compléter le modèle pour y intégrer une dynamique de l'azote dans le sol le couvert et la vigne.

### **3.1.3 La germination et le début de la repousse pas ou mal pris en compte**

Le processus de germination n'est pas pris en compte dans le modèle. Il a peu d'impact pour la repousse du couvert en hiver car la période sans travail du sol est relativement longue. Cependant ce décalage est préjudiciable pour la simulation des repousses de printemps. La pousse a lieu entre 2 travaux du sol, soit sur une durée de 1 à 2 mois. Les températures sont plus élevées et la repousse de l'herbe plus rapide. La surestimation est donc beaucoup plus significative en ne prenant pas en compte le temps correspondant à la germination.

De même, la repousse du couvert est différente selon les interventions techniques menées : certains travaux du sol sont très superficiels et ne déracinent pas la végétation la mieux enracinée, la repousse sera donc plus rapide qu'après un labour plus profond. On peut également supposer qu'après une tonte, le matériel

racinaire étant encore en place, la repousse sera plus rapide qu'après un labour. Pour l'instant des différenciations ne sont pas prises en compte par le modèle.

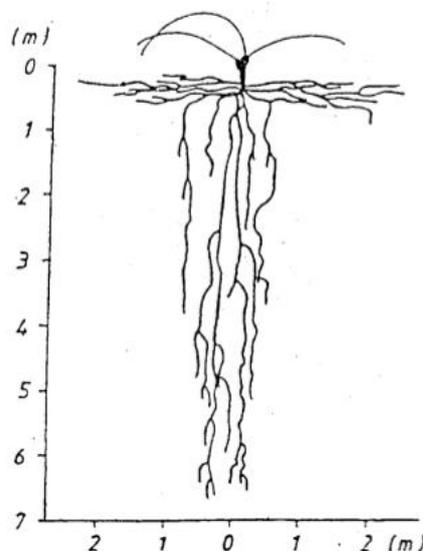
Il en est de même pour la repousse après un traitement herbicide, la repousse est plus lente qu'après un labour, selon Andrieux et al., 2015, il n'y a pas de repousse pendant 20 jours après un traitement herbicide, mais ceci n'est pas différencié dans le modèle.

Ces remarques montrent que le taux de couverture reste mal estimé par le modèle, mais que des pistes d'amélioration sont possibles. Le taux de couverture simulé trop important pourrait engendrer une consommation d'eau par transpiration du couvert. Néanmoins la part d'eau évaporée pendant la période végétative reste faible (donner valeurs) et surestimation de la transpiration ne saurait justifier à elle seule la mauvaise estimation du bilan hydrique.

### **3.2 La réserve utile**

Comme expliqué dans la partie 1.3.3, le découpage et la description des sols du bassin versant restent incertaines. Les prospections réalisées par G.Couloumma et P.Lagacherie en juin 2020 ont mis en lumière les lacunes des données disponibles pour quantifier la réserve utile. Les sols argilocalcaires du milieu du bassin présentent en réalité des caractéristiques très variables. Leur esquisse pédologique (communication personnelle), montre l'enchevêtrement des systèmes pédologiques ainsi que la présence de colluvionnement et de cuvette où les sols s'accumulent expliquent cette variabilité, parfois à l'intérieur même d'une unité de sol de la carte pédologique au 1 : 100 000.

En outre, l'enracinement varie selon les conditions pédologiques, et peut être plus ou moins profond et hétérogène. Cela rend complexe de définir avec précision la profondeur de sol participant à l'alimentation hydrique de la plante. (Champagnol 1984 in Celette). En outre, Ionescu et al., 1978, montre que 2 types de racines participent à l'alimentation hydrique du cep, un réseau de racines dense et superficielle qui fournit de l'eau en quantité tant qu'elle est disponible, et des racines plus profondes mais moins nombreuses, qui alimentent le cep lors des périodes sèches et contribuent à sa survie (Moralt, 1992), voir figure 20. Il est donc compliqué de mesurer exactement le volume de sol participant à la réserve utile.



*Figure 20 : Système racinaire de la vigne (Ionescu et al., 1978)*

Les mesures de terrain prévues avant le confinement n'auraient donc, de toute façon, pas permis de mesurer avec une grande exactitude la RU, tant il est difficile de délimiter la profondeur de sol participant ou non à l'alimentation hydrique.

Pour mesurer l'eau disponible pour la vigne dans le sol, il est possible d'utiliser d'autres méthodes que l'analyse des caractéristiques pédologiques du sol. Ces méthodes sont moins contraignantes à mettre en œuvre et permettent d'obtenir des mesures plus nombreuses et donc de mieux prendre en compte l'hétérogénéité d'un terroir. Les deux méthodes proposées sont la mesure du rapport du  $\delta^{13}C$  dans les baies à la récolte et le lien entre la pente de la courbe de FTSW et la TTSW.

L'isotope absorbé de manière préférentielle par la vigne est le carbone 12 (Saurin et al., 2014). Cependant, plus la vigne est en situation de stress hydrique, moins l'absorption de l'isotope 13 est discriminée. Selon Couloumma et al 2020 il existe une corrélation entre le  $\delta^{13}C$  dans les baies à la récolte et la réserve utile. Pour que cette relation puisse être observée il faut néanmoins que quelques conditions soient réunies :

- La recharge des sols doit être complète en sortie d'hiver, et l'été peu pluvieux, ce qui est le cas de l'année en cours
- La vigne ne doit pas être irriguée, cette pratique étant encore peu développée sur le Rieutord (voir partie 1), cela ne posera pas de problème pour la mesure du delta C13, à part pour la parcelle irriguée.
- L'influence des différences variétales est encore loin d'être démontré, et semble peu significative (Couloumma et al 2020) les récoltes effectuées sur les 10 parcelles suivies pourront être utilisées, même si les variétés sont différentes.

La réserve utile peut aussi être estimée en considérant qu'en situation de sécheresse, la seule sortie d'eau du bilan hydrique correspond à la transpiration de la vigne. La variation du potentiel de base est alors en relation inverse avec la TTSW. En connaissant l'ET0 et le coefficient cultural de la vigne, et en mesurant la variation de potentiel de base, la seule inconnue est donc la TTSW, qu'il est alors facile de calculer. (Gaudin, 2014)

Ce calcul ne peut s'effectuer que lors de périodes sèches, ou l'évaporation du sol peut être négligée. Il ne s'applique pas aux parcelles où sont présentes des nappes sous-jacentes qui engendrent des remontées capillaires. (Gaudin, 2014)

Ces deux estimations de la Réserve utile offrent deux avantages : les méthodes sont assez rapides de mise en œuvre, et surtout, elles permettent de mesurer la réserve en eau disponible pour la vigne et donc de s'affranchir de l'incertitude liée à sa profondeur d'enracinement et à la difficile définition de la limite du compartiment de sol (et parfois de roche mère !) colonisé par les racines.

Il est aussi possible d'approcher la valeur de la réserve utile par inversion de modèle mais cela nécessite plusieurs années de données.

### **3.3 Conclusions Agronomiques**

Les Situations observées sur les parcelles du bassin versants sont très diverses. Cela montre qu'il est impossible de proposer des solutions valables et viables sur tout le bassin versant. Cela indique également que les réactions des parcelles aux changements climatiques seront multiples et que la sensibilité aux futures périodes de stress hydrique prolongées sera très variable. Les parcelles sur sol de schistes souffrent déjà d'un stress hydrique sévère et paraissent donc les plus menacées.

La part de l'évapotranspiration pendant la phase végétative de la vigne n'est pas négligeable (figure 20) et ne permet pas des pratiques d'enherbement en sol superficiel. La parcelle 1 ne subit pas de stress hydrique, il serait possible par exemple de favoriser le développement de l'enherbement sur cette parcelle. A contrario, cela paraît impossible sur les parcelles à plus faible réserve utile, tant la réserve en eau disponible pour la plante est faible à partir de juillet. Elles souffrent d'une contrainte hydrique sévère et ne toléreraient en aucun cas une concurrence de l'herbe durant la période végétative.

Les bénéfices de l'enherbement sur la structure du sol sont prouvés et favorisent la recharge hivernale (Celette, 2007), il convient donc de le favoriser dès que possible. Au vu de l'importance de la réserve en eau transpirable par la vigne (approximée par la réserve utile), il apparaît capital d'améliorer les données disponibles sur cette thématique, et d'aboutir à une spatialisation fine, afin de pouvoir proposer des leviers d'actions agronomiques adaptés à la diversité des situations rencontrées dans un seul bassin versant.

Enfin, l'irrigation apparaît aussi comme un levier précieux. Les apports d'eau en goutte à goutte de 30 mm en 3 fois sur la parcelle 2 permettent d'éviter à la vigne de subir un stress hydrique sévère (Figure 19) en fin de cycle, et la consommation en eau bleue reste modérée. Ainsi la maturation des baies peut se faire dans des bonnes conditions, les stress hydriques trop sévères pouvant bloquer la maturation et diminuer le taux de sucres du raisin (Delrot et al, 2014). Elle apparaît donc comme un levier d'action agronomique mais aussi un moyen de mieux contrôler les caractéristiques du raisin et son potentiel de vinification.

## CONCLUSION GENERALE

Les travaux menés pendant ce stage ont montré que la nouvelle version du modèle WaLIS, permettant de modéliser la repousse de couverts spontanés ne simulait pas les bilans hydriques des parcelles du bassin versant du Rieutord avec une grande précision. Les indicateurs de qualité du modèle varient fortement selon les parcelles, ce qui laisse penser qu'au-delà de la qualité des formalismes du modèle, la qualité du jeu de données, et notamment les doutes concernant l'évaluation de la réserve utile sont un biais considérable. Il convient donc de renforcer les données sur les caractéristiques de l'enherbement des inter-rangs des parcelles et la rapidité de la repousse du couvert après une intervention du viticulteur pour améliorer la précision de la part du bilan hydrique liée à la transpiration de l'herbe. Le manque de précision liée à la mauvaise estimation de la réserve utile pourrait être dissipé grâce à la mesure du  $\delta C^{13}$ . Cependant les dynamiques semblent bien simulées, et permettent déjà d'observer les effets de la diversité de pratique et de sensibilité au stress hydrique présente dans le bassin. Les parcelles du nord, sur sols contraignants, subissent une période de stress hydrique prolongée tandis que certaines parcelles situées au sud ne subissent quasiment pas de stress. Un faible apport d'eau par irrigation permet aussi de corriger la trajectoire hydrique de la parcelle et d'éviter un stress trop intense à la vigne en fin de cycle végétatif.

La nouvelle version du modèle spatialisée de WaLIS et le jeu de données disponibles sur le Rieutord n'est donc pas assez précis pour modéliser précisément, à l'échelle de la parcelle, le bilan hydrique. Toutefois, les bilans hydriques simulés diffèrent fortement d'une parcelle à l'autre, et cela en cohérence avec les mesures de potentiel hydrique. Le modèle permet donc d'établir des bilans hydriques qui sont sensibles à la diversité des terroirs du Rieutord. Réaliser un modèle spatialisé à l'échelle du bassin versant avec ce modèle fait donc sens et permettrait de distinguer différentes catégories de parcelles et éventuellement des modes de gestion adaptés à chacune d'entre elles, sous le climat actuel et à venir.

## 4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Andrieux, Patrick, Anne Biarnès, Jean-Marc Barbier, A. Bonnefoy, C Compagnone, X Delpuech, Christian Gary, A Metay, J.P Rellier, et M. Voltz. « SP3A : SPATIALISATION DE PRATIQUES AGRICOLES ADAPTEES ET ACCEPTABLES Préservation des sols viticoles méditerranéens et amélioration de leurs fonctions de régulation des flux d'eau et de matières associées : répartition spatiale dans un bassin versant, de pratiques agricoles adaptées et acceptables », 2015. [http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0081/Temis-0081824/21945\\_A.pdf](http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0081/Temis-0081824/21945_A.pdf).
- Arnal, Clément. « L'arrachage viticole : un facteur de mutations pour le département de l'Hérault », 2015.
- Bailly, Jean-Stéphane, Frederic Laget, Ekaterina Zadonina, et Yvonne Ferricelli. « Dérives climatiques sur l'Hérault : évolution des bilans thermiques (seuil de 10°C) de 1980 à 2010 ». *19es Journées GiESCO 2015*, 2015. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01496751/document>.
- Bertrand, Nicolas, Sebastien Roux, Oswaldo Forey, Mae Guinet, et Jacques Wery. « Simulating Plant Water Stress Dynamics in a Wide Range of Bi-Specific Agrosystems in a Region Using the BISWAT Model ». *European Journal of Agronomy* 99 (septembre 2018): 116-28. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.06.001>.
- « Cahier Des Charges Indication Géographique Protégée « Pays D'oc » », 2011. <file:///C:/Users/vbert/Downloads/PNO3CDCPaysdOc.pdf>.
- Carbonneau, Alain. « Écophysiologie et gestion de l'eau en viticulture », 2013. [http://www1.montpellier.inra.fr/pechrouge/images/carbonneau\\_ecophysiologie\\_fiches2013.pdf](http://www1.montpellier.inra.fr/pechrouge/images/carbonneau_ecophysiologie_fiches2013.pdf).
- « Cave coopérative de Murvièle-lès-Beziers », Aout 2020. [http://www.coteaux-rieutort.fr/extra\\_info\\_pages.php/pages\\_id/8](http://www.coteaux-rieutort.fr/extra_info_pages.php/pages_id/8).
- Celette, Florian. « Dynamique des fonctionnements hydrique et azoté dans une vigne enherbée sous le climat méditerranéen ». Montpellier Sup Agro, 2007. [https://www.supagro.fr/theses/extranet/07-0009\\_Celette.pdf](https://www.supagro.fr/theses/extranet/07-0009_Celette.pdf).
- . « Évaluation d'un modèle à réservoirs pour simuler le bilan hydrique d'une vigne enherbée en climat méditerranéen », 2003. [https://agritrop.cirad.fr/530408/1/document\\_530408.pdf](https://agritrop.cirad.fr/530408/1/document_530408.pdf).
- Celette, Florian, Aude Ripoche, et Christian Gary. « WaLIS—A Simple Model to Simulate Water Partitioning in a Crop Association: The Example of an Intercropped Vineyard ». *Agricultural Water Management* 97, n° 11 (1 novembre 2010): 1749-59. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.008>.
- Daudin, Gabriel, et Sébastien Roux. « WaLIS : synthèse des formalismes de référence et des résultats sur parcelle de validation », 2011.
- DDTM34. « Notice d'information du territoire, mesures agroenvironnementales territorialisées », 2013. <http://www.herault.gouv.fr/content/download/8970/50141/file/11-Bassin%20versant%20Rieutort.pdf>.
- « Décret relatif à l'appellation d'origine contrôlée "SaintChinian" », 28 juin 2011. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000024278407&dateTexte=>

- Serge Delrot, Grégory Gambetta, Jean-Pascal Goutouly. Effets du déficit hydrique sur les flux d'eau et la teneur en sucres dans les baies de raisin. *Innovations Agronomiques*, INRA, 2014, 38, pp.33-47. <https://hal.inrae.fr/hal-02629883/document>
- Donald E. Woodward (retired), Robert D. Nielsen, soil scientist, Lincoln, Nebraska, Robert Kluth (retired), Arlis Plummer, hydraulic engineer, Lincoln, Nebraska, Joe Van Mullem (retired), Gary Conaway (retired), Agricultural Research Service, et al. *Part 630 Hydrology National Engineering Handbook*, 2004. <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17758.wba>.
- Dufourq, Thierry. « Fiche Pratique irrigation de la vigne ». Institut Français de la vigne et du vin, 2020. <https://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/irrigation-de-la-vigne/>.
- Fanet, Jacques. « La restructuration des vignobles du Languedoc Roussillon ». In *Les produits de terroir, les indications géographiques et le développement local durable des pays méditerranéens*, 231-36, 2009.
- Garcia, Leo. « Evaluation des conséquences hydriques et azotées de différents modes de gestion de parcelles viticoles sur la croissance de la vigne : Approche par l'expérimentation virtuelle », 2013.
- Gaudin, Rémi, Kamal Kansou, J.C Payan, Anne Pellegrino, et Christian Gary. « A water stress index based on water balance modelling for discrimination of grapevine quality and yield ». *d. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 48, n° 1 (2014): 1-9.
- Lebon, Eric, Vincent Dumas, Philippe Pieri, et Hans R. Schultz. « Modelling the Seasonal Dynamics of the Soil Water Balance of Vineyards ». *Functional Plant Biology* 30, n° 6 (2003): 699. <https://doi.org/10.1071/FP02222>.
- Molénat, J., D. Raclot, R. Zitouna, P. Andrieux, G. Coulouma, D. Feurer, O. Grunberger, et al. « OMERE: A Long-Term Observatory of Soil and Water Resources, in Interaction with Agricultural and Land Management in Mediterranean Hilly Catchments ». *Vadose Zone Journal* 17, n° 1 (2018): 180086. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.04.0086>.
- Morlat, R., M. Penavayre, A. Jacquet, C. Asselin, et Lemaitre. « INFLUENCE DES TERROIRS SUR LE FONCTIONNEMENT HYDRIQUE ET LA PHOTOSYNTHESE DE LA VIGNE EN MILIEU EXCEPTIONNELLEMENT SEC (1990). CONSEQUENCE SUR LA MATURATION DU RAISIN. » *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 26, n° 4 (1992).
- Myers, R. J. K., K. L. Weier, et C. A. Campbell. « QUANTITATIVE RELATIONSHIP BETWEEN NET NITROGEN MINERALIZATION AND MOISTURE CONTENT OF SOILS ». *Canadian Journal of Soil Science* 62, n° 1 (1 février 1982): 111-24. <https://doi.org/10.4141/cjss82-013>.
- Pellegrino, A., E. Gozé, E. Lebon, et J. Wery. « A Model-Based Diagnosis Tool to Evaluate the Water Stress Experienced by Grapevine in Field Sites ». *European Journal of Agronomy* 25, n° 1 (1 juillet 2006): 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.03.003>.

- Poozesh, Vahid. « Réponse des graminées des prairies permanentes à l'acidité, à l'aluminium et à la fertilisation (N,P): relations avec les traits fonctionnels ». Institut national polytechnique, 2007. <https://hal.inrae.fr/tel-02823930/document>.
- Riou, C., C. Valancogne, et Philippe Pieri. « Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne. Vérification expérimentale ». *Agronomie* 9, n° 5 (1989): 441.
- Robinson, David, et I. H. Rorison. « Relationships between Root Morphology and Nitrogen Availability in a Recent Theoretical Model Describing Nitrogen Uptake from Soil. » *Plant, Cell and Environment* 6, n° 8 (novembre 1983): 641-47. <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11589228>.
- Roux, Sébastien, François Brun, et Daniel Wallach. « Combining Input Uncertainty and Residual Error in Crop Model Predictions: A Case Study on Vineyards ». *European Journal of Agronomy* 52 (janvier 2014): 191-97. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.008>.
- Saurin, Nicolas, Bruno Tisseyre, et Eric Lebon. « Comment mesurer la contrainte hydrique de la vigne, de la plante au vignoble ». *Innovations agronomiques* 38, n° 14 (2014): 143-58.
- Schultz, H. R. « Differences in Hydraulic Architecture Account for Near-Isohydric and Anisohydric Behaviour of Two Field-Grown *Vitis Vinifera* L. Cultivars during Drought ». *Plant, Cell & Environment* 26, n° 8 (2003): 1393-1405. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01064.x>.
- Seguin, Bernard. « Le réchauffement climatique et ses conséquences pour la viticulture », 2007. [https://chaireunesco-vinetculture.u-bourgogne.fr/colloques/actes\\_clima/Actes/Article\\_Pdf/Seguin.pdf](https://chaireunesco-vinetculture.u-bourgogne.fr/colloques/actes_clima/Actes/Article_Pdf/Seguin.pdf).
- Tindon, Yves. « Mémoire de fin d'études : Spatialisation des risques de stress hydrique du vignoble en fonction des différents types d'entretien des sols : application au cas d'un bassin versant méditerranéen. » Montpellier Sup agro, 2012.
- Trambouze, W, et M Voltz. « Measurement and Modelling of the Transpiration of a Mediterranean Vineyard ». *Agricultural and Forest Meteorology* 107, n° 2 (mars 2001): 153-66. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00226-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00226-4).
- Voltz, Marc, Guichard, P. Lucas, Serge Savary, Isabelle Savini, Marc Voltz, ., Jean-Noël Aubertot, Jean-Marc Barbier, Alain Carpentier, Jean-Joël Gril, Laurence Guichard, P Lucas, Serge Savary, et Isabelle Savini. « Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux », 2005. <https://hal.inrae.fr/hal-02832492/document>.

## 5 ANNEXES

### Annexe 1 : Paramétrage pour simulations de 2012

Colonne1	Colonne2	Colonne3	Colonne4
Paramètres	SIMU 1	SIMU 2	SIMU 3
destruction	01-avr	Sans objet	Sans objet
TTSWtot	Valeur Tindon non optimisée	Valeur Tindon non optimisée	Valeur Audrey
ASVWhini	0	0	0
ASVWVini	0	0	0
Date levée enherbement	01-oct	01-oct	01-oct
LAI rate	0,9	0,65	0,65
LLS min de l'herbe	700	540	540
FTSWhregultr	0,6	0,5	0,5
FTSWhregulLAI	0,9	0,7	0,7
Date labour R	Destruction 01/04 précédé d'une tonte en f	ITK classique avec repousse	ITK classique avec repousse
Date tonte	pas tonte	pas tonte	pas tonte
Date labour IR	labour février, destruction 01/04	ITK classique avec repousse	ITK classique avec repousse
Kmax	Valeurs Tindon	Valeurs Tindon	Valeurs Tindon
CN1(sous le rang, sol nu)	Valeurs Tindon	Valeurs Tindon	90
CN2(IR sol enherbé)	Valeurs Tindon	Valeurs Tindon	89

parcelles	TTSWtot (TINDON)	TTSWtot (AUDREY)	KMAX	CN1	CN2	ITK IR TINDON	ITK IR audrey	ITK R Tindon	ITK R Audrey
1	145		0,55	82	86	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10
2	183		0,633	82	86	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10
3	120		0,446	87	91	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10
4	75		0,497	82	86	01-avr	01/02; 01/10	01-avr	01/02; 01/10
5	145		0,414	87	91	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10
6	75		0,398	87	91	01-avr	01/02; 01/10	01-avr	01/02; 01/10
7	75		0,528	87	91	01-avr	01/02; 01/10	01-avr	01/02; 01/10
8	120		0,657	87	91	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10
9	145		0,641	87	91	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10
10	145		0,642	87	91	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10	01-avr	01/02; 01/04 ;01/06; 01/10

### Annexe 2 : Questionnaire

Appel téléphonique Viticulteur 26/03-27/03 :

Entretien avec rdv téléphonique

Obj : avoir toutes les infos pour paramétrage de WaLIS et interprétation des résultats

#### 1. Caractérisation du sol :

- Quelle surface fait la parcelle ? surface plantée ? => recouper avec données shp ?
- Pourriez-vous me décrire votre sol ? Nature (schistes, argilo-calcaire, alluvionnaire...) ? structure ? texture (sable, argile, limons) ?
- Y a-t-il une pente ? % ? Si oui, homogène dans la parcelle ?
- Quelle est la profondeur du sol moyenne sur la parcelle ? Homogène / Hétérogène ?
- Le sol est-il caillouteux, pourriez-vous me donner un taux de cailloux ?
- Représentative des parcelles alentours ? Si non, quelles particularités ?

#### 2. Physiologie de la vigne :

- Quel âge a la vigne ? Quelle année de plantation ?
- Quel est le cépage de la parcelle ? (on le connait en général) Porte greffe ? Pourquoi ce cépage/porte greffe sur cette parcelle ?

- Quelle densité de plantation ? Quel est l'écartement entre les rangs ? Quelle orientation ?
- Y a-t-il des manquants ? % ? homogénéité dans la parcelle ?
- Quel type de taille ? Guillot, cordon, gobelet etc. ..
- La vigne a-t-elle subi des dommages particuliers en 2019 : accident climatique (gelée, canicule, grêle, etc.), attaques parasitaire, dégâts de gibiers, etc. ?
- Pouvez-vous indiquer la date approximative de la chute des feuilles en 2019 ?
- Quel est le nombre de bourgeons laissés après la taille cet hiver ?
- Quand a eu lieu le débourrement en 2020 ? (si pas donné au cours du dernier appel)
- En général, quelle est la hauteur maximale (après écimage) du feuillage de la vigne ?
- Quelle est l'objectif de rendement, a-t-il été atteint ces 5 dernières années ? Vers quel type de production ? Direction la cave ? le vrac ? la mise en bouteille ?

3. Pratiques agricoles :

- MAE ? depuis combien d'années ? pourquoi (eau, érosion, vigueur, structuration sol, biodiversité...) ? L'enherbement est-il présent sur toute la parcelle, en inter-rang, un rang sur deux, sur trois ?
- Récapituler les différentes opérations de gestion de l'herbe depuis la vendanges 2018.
- Labour après la vendanges ? Puis à la sortie d'hiver, date de labour ? Date de tonte ? Date de dsh chimique ?
- Parcelles irriguées ? Matériel (gag, enterré, sprinkler...) ? Fréquence/Déclenchement ? Quantité apportée en moyenne ?
- L'année dernière combien de ferti apporté ? Sous quelle forme ? A quelle date ?

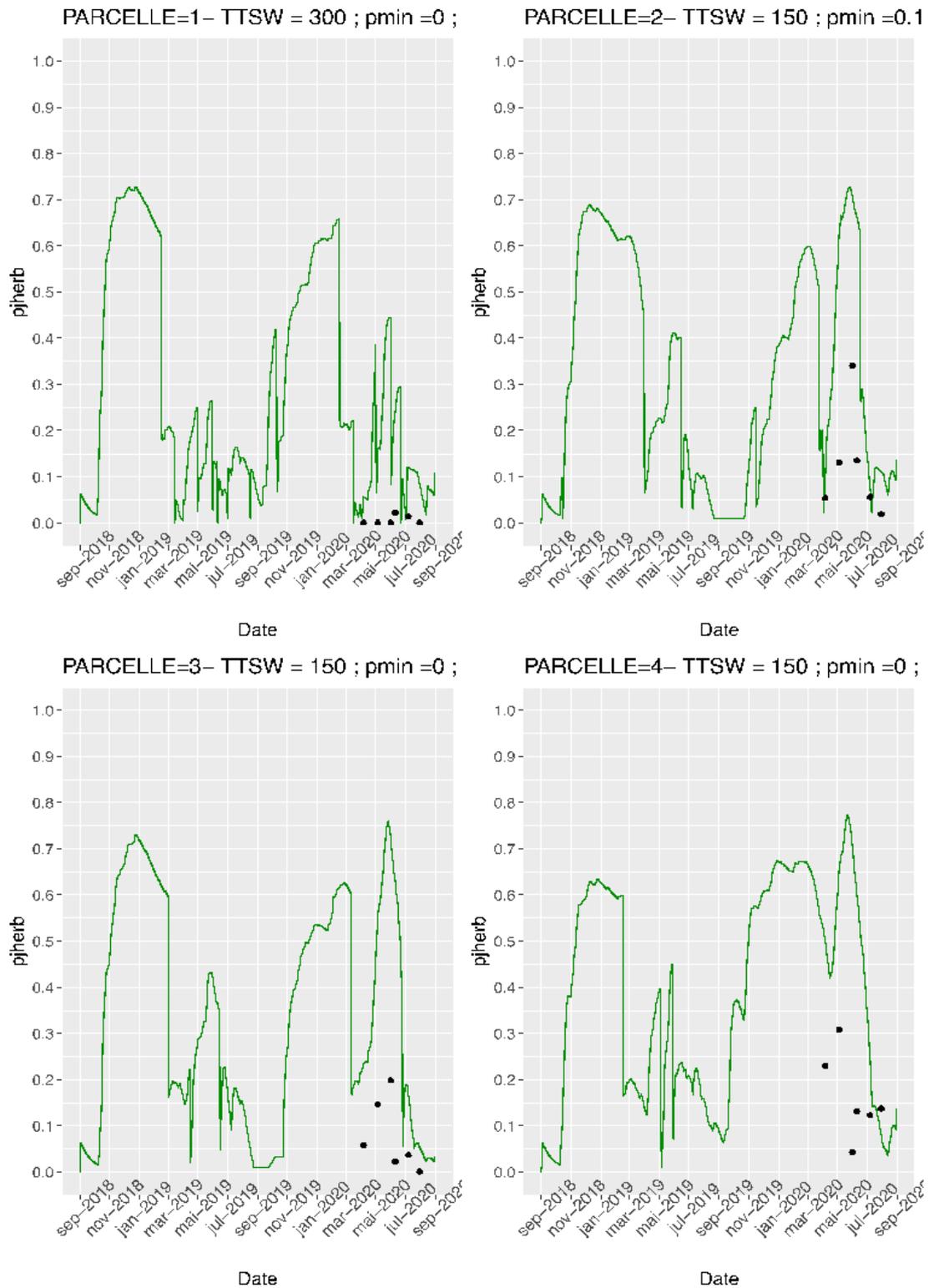
Annexe 3 : paramétrage 2020

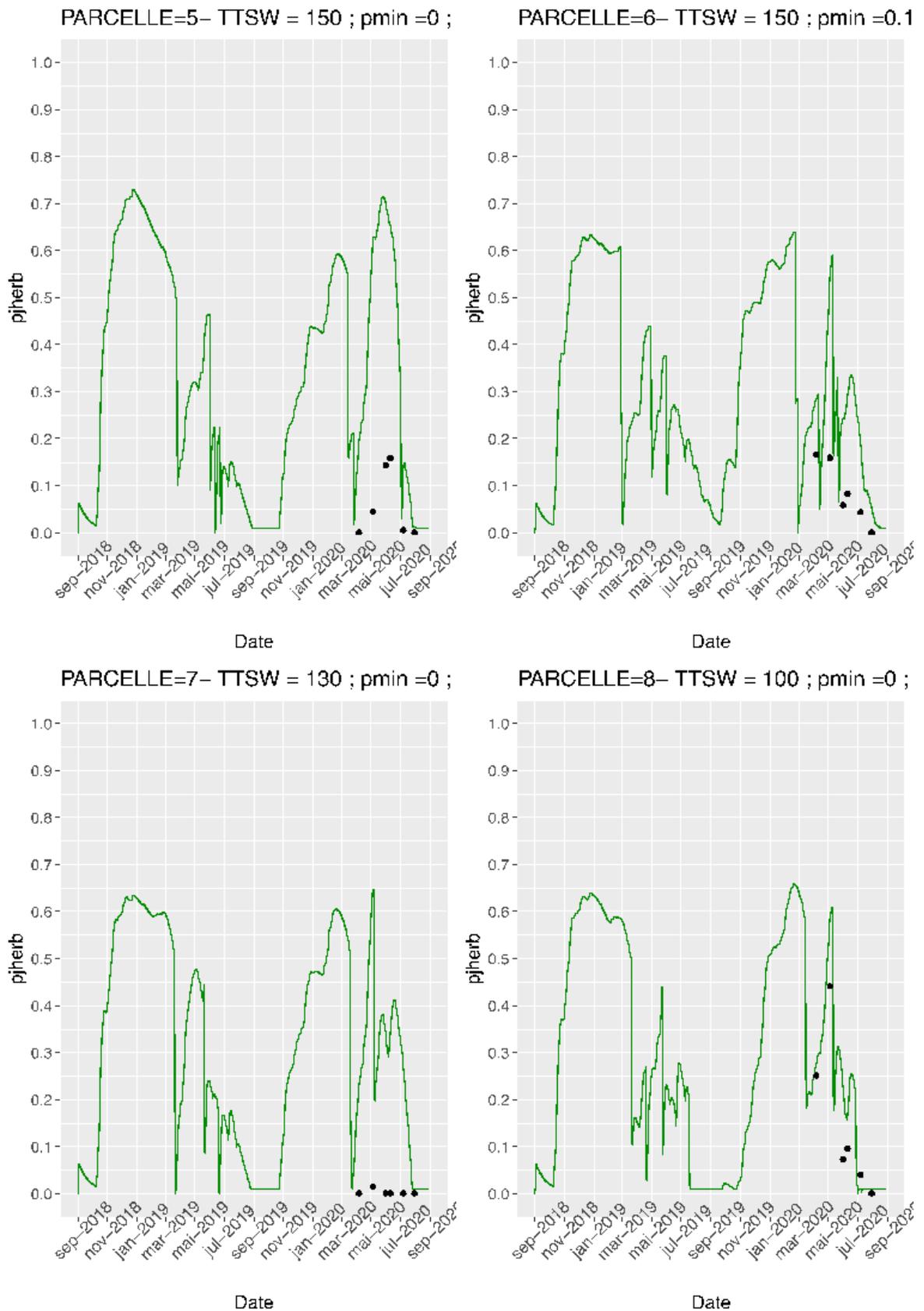
	parcelle 1	parcelle 2	parcelle 3	parcelle 4	parcelle 5	Parcelle 6	parcelle 7	parcelle 8	parcelle 9	parcelle 10
pmax	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
pmin	0	0,16	0	0	0	0,16	0	0	0	0
pini	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TTSW TOT	300	120	120	150	150	150	100	100	60	100
TTSWh min	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
TTSWh max	60	60	60	60	60	60	50	50	30	50
ASWhinit	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
ASWhvinit	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Levee	01/10/2019	01/10/2019	01/10/2018	01/10/2018	01/10/2018	01/10/2018	01/10/2018	01/10/2018	01/10/2018	01/10/2018
INN (enherbement)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
herblairate	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
LAI nit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LAI res	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
LIS min	540	540	540	540	540	540	540	540	540	540
LAI tonte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dtonte		31/03/2019, 24/03/2020				28/02/2019, 31/05/2019, 09/05/2020	18/03/2019, 19/03/2020			
LAlabourR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dlabourR	15/02/2019, 30/03/2019, 30/04/2019, 30/05/2019, 30/06/2019, 15/08/2019, 10/10/2019, 15/02/2020, 31/03/2020, 28/04/2020, 30/05/2020, 30/06/2020	15/10/2018, 31/03/2019, 15/11/2019, 24/03/2020, 15/06/2020	10/03/2019, 15/05/2019, 10/03/2020, 15/05/2020	15/02/2019, 03/05/2019, 06/02/2020, 04/05/2020	25/03/2019, 01/06/2019, 23/06/2019, 12/03/2020, 24/03/2020, 01/07/2020	28/02/2019, 30/04/2019, 31/05/2019, 21/02/2020, 10/04/2020, 20/05/2020	21/05/2019, 17/07/2019, 10/05/2020, 20/03/2020, 06/05/2020	19/04/2019, 23/05/2019, 30/03/2019, 30/05/2019, 10/05/2020, 26/06/2020, 08/07/2020	26/10/2018, 30/03/2019, 01/07/2019, 18/03/2020, 03/05/2020	15/03/2019, 15/04/2019, 15/05/2019, 18/03/2020, 12/04/2020, 14/06/2020
LAlabourR	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dlabourR	15/03/2019, 10/06/2019, 14/03/2020	31/03/2019, 15/08/2019, 23/03/2020	12/03/2019, 15/03/2020	03/05/2019, 28/05/2020	12/03/2019, 12/03/2020	26/02/2019, 26/02/2020	22/03/2019, 21/05/2019, 20/06/2019, 17/03/2020	20/03/2019, 17/07/2019, 14/03/2020, 30/06/2020	31/03/2019, 03/04/2020	28/02/2019, 28/02/2020
Tbase	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
dbt ( Valeur Audrey simulée 07/04/19)	7/04/2019; 30/03/2020	7/04/2019; 30/03/2020	7/04/2019; 30/03/2020	7/04/2019; 30/03/2020	7/04/2019; 30/03/2020	7/04/2019; 30/03/2020	7/04/2019; 30/03/2020	7/04/2019; 30/03/2020	7/04/2019; 30/03/2020	7/04/2019; 30/03/2020
arretTR	01-nov	01-nov	01-nov	01-nov	01-nov	01-nov	01-nov	01-nov	01-nov	01-nov
ddKmax	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
kmax	0,62	0,64	0,52	0,41	0,58	0,51	0,56	0,47	0,49	0,49
kini	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
keend	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
length ini	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
length end	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
CN ruiss	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86
CN ruiss2	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83

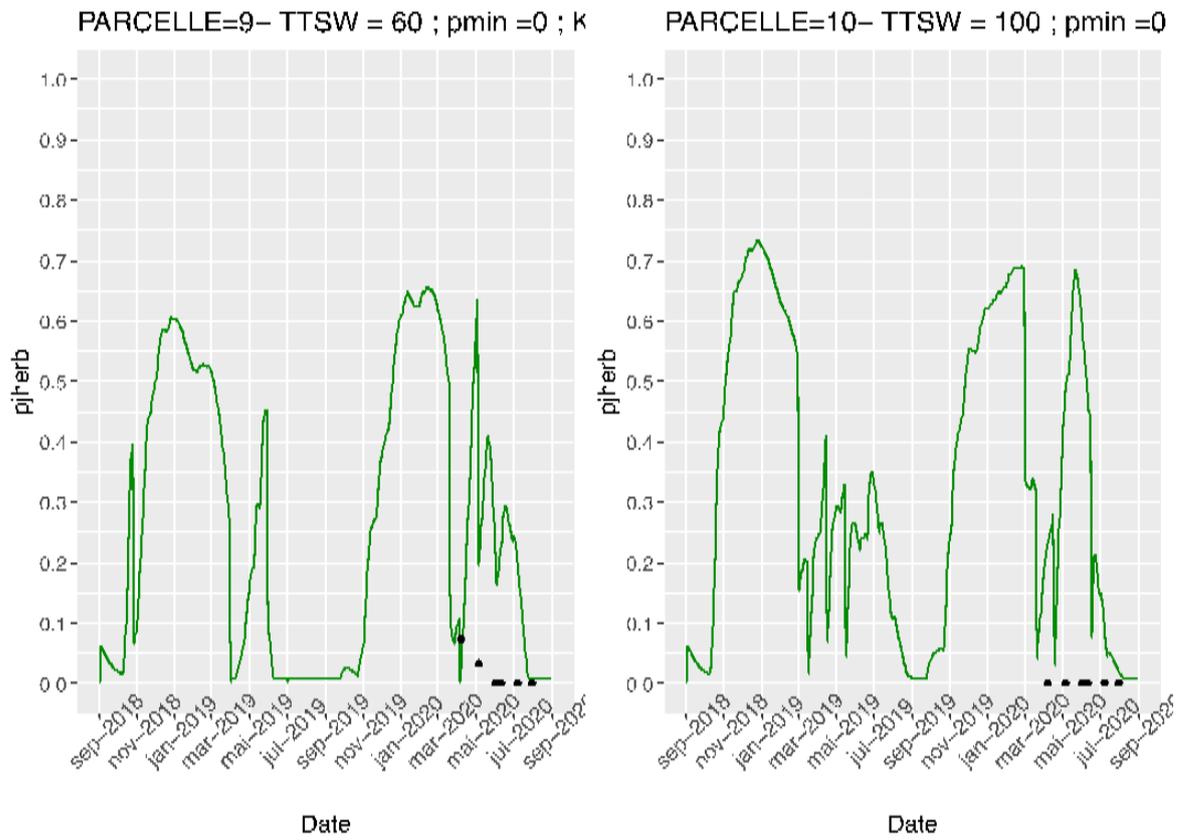
FTSWregultr	0,4	0,4	0,4	0,4
dose_iri	-	500M3 hA = 50 mm	-	-
date_iri	-	13/07/2019, 18/08/2019	-	-
seuil pluie eff	2	2	2	2
FTSWhregultr	0,5	0,5	0,5	0,5
FTSWhregulAI	0,7	0,7	0,7	0,7
P5J1 R	12,7	12,7	12,7	12,7
P5J2 R	28	28	28	28
P5J1 IR	35,6	35,6	35,6	35,6
P5J2 IR	53	53	53	53
U	2,7	2,7	2,7	2,7
b1 evap	14	14	14	14
b2 evap	0,15	0,15	0,15	0,15
c a	1,0572	1,0572	1,0572	1,0572
c b	5,3452	5,3452	5,3452	5,3452

0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
2	2	2	2	2	2
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
28	28	28	28	28	28
35,6	35,6	35,6	35,6	35,6	35,6
53	53	53	53	53	53
2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
14	14	14	14	14	14
0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
1,0572	1,0572	1,0572	1,0572	1,0572	1,0572
5,3452	5,3452	5,3452	5,3452	5,3452	5,3452

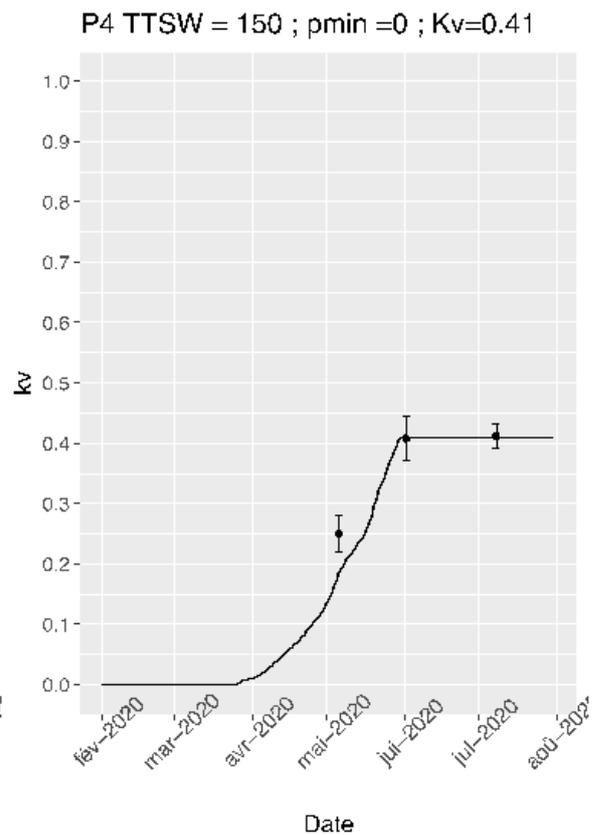
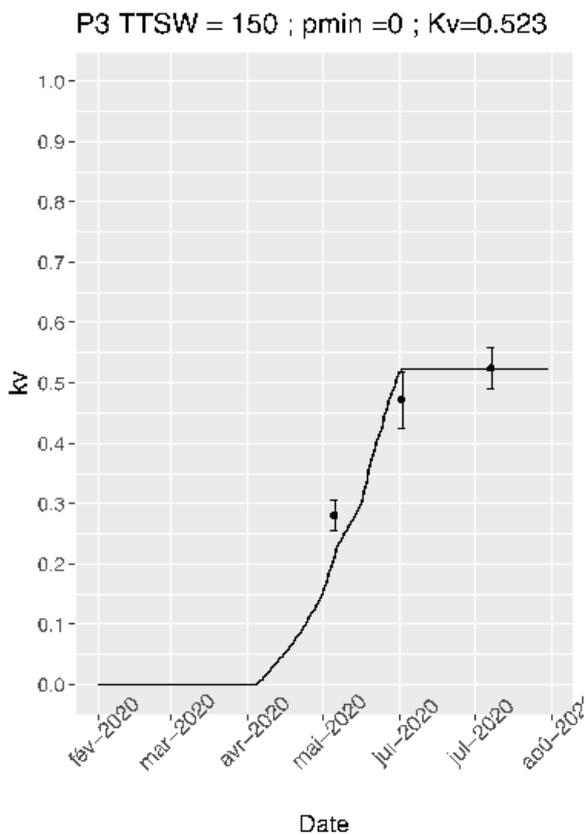
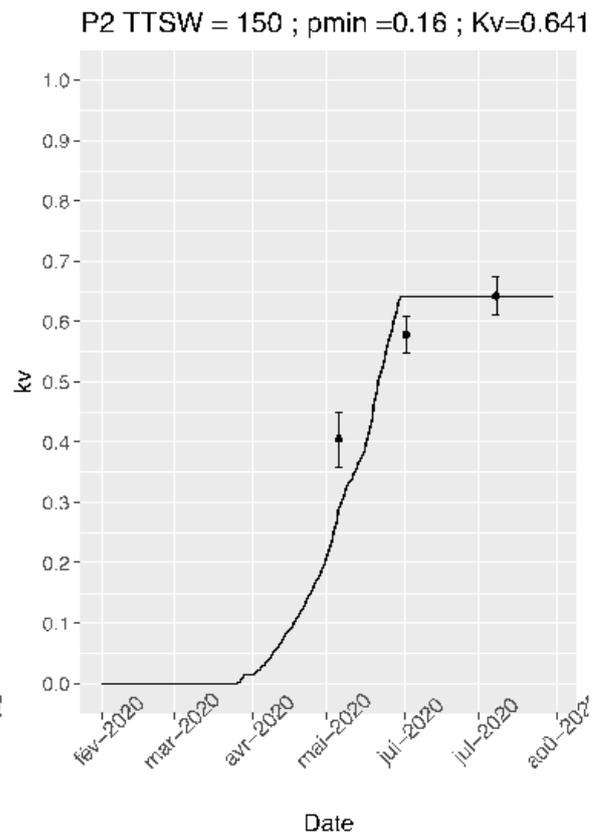
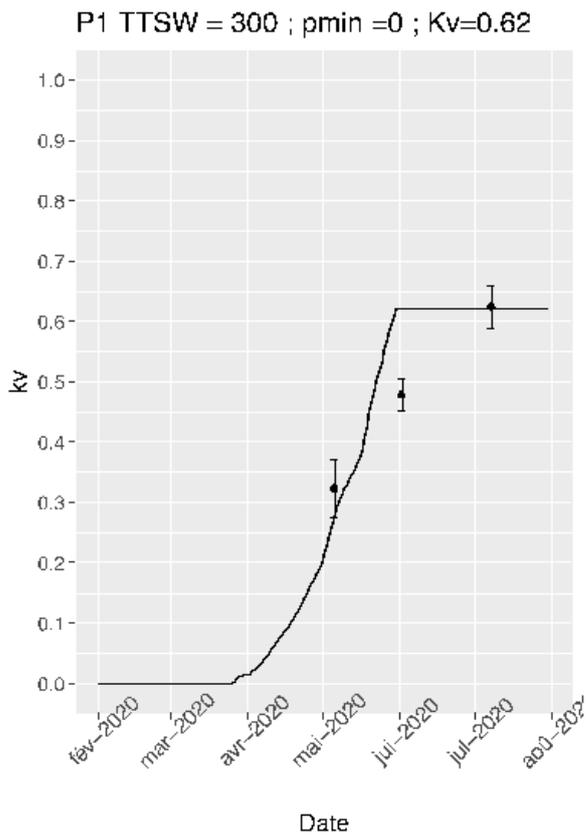
Annexe 4 : Taux de couverture

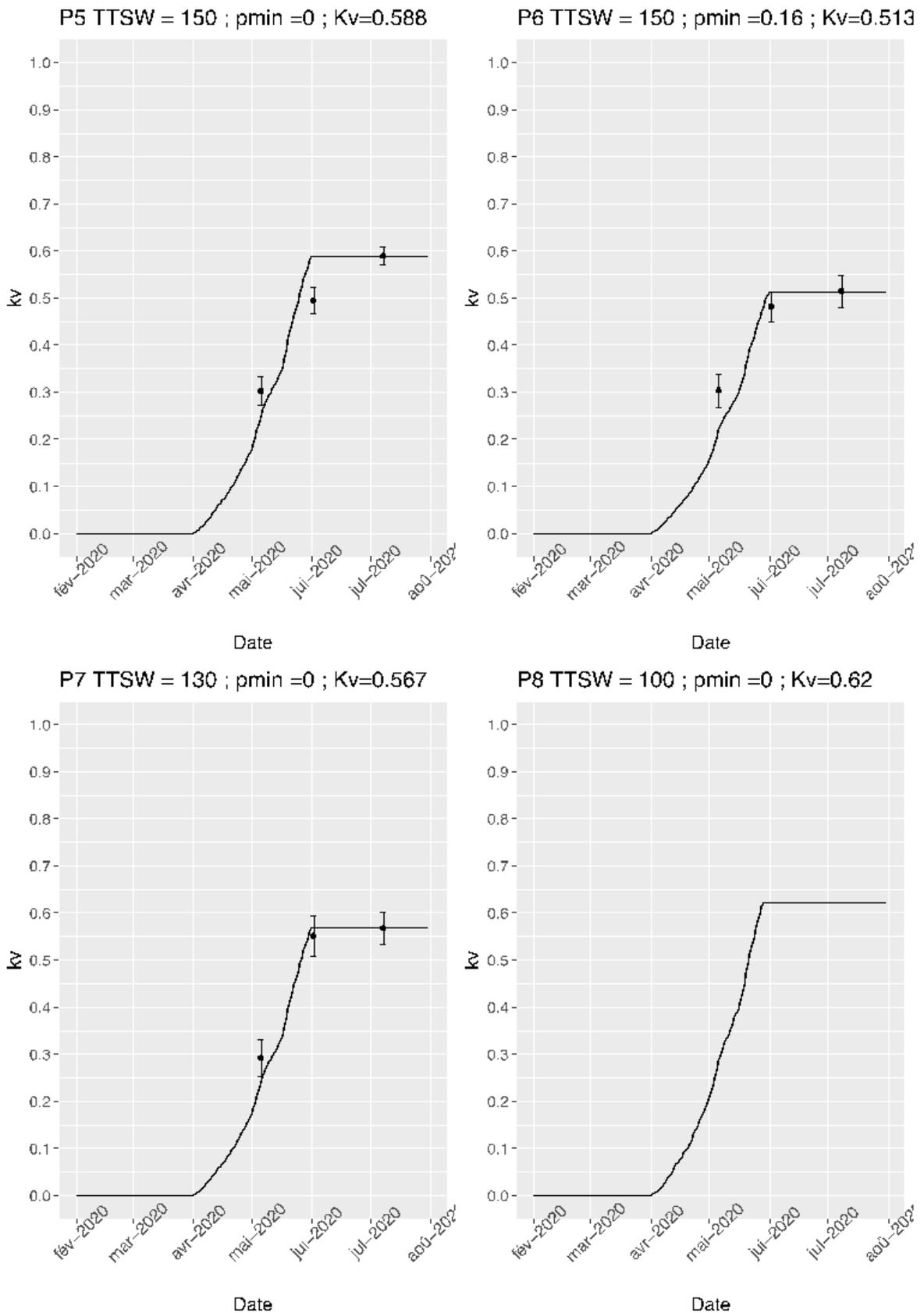


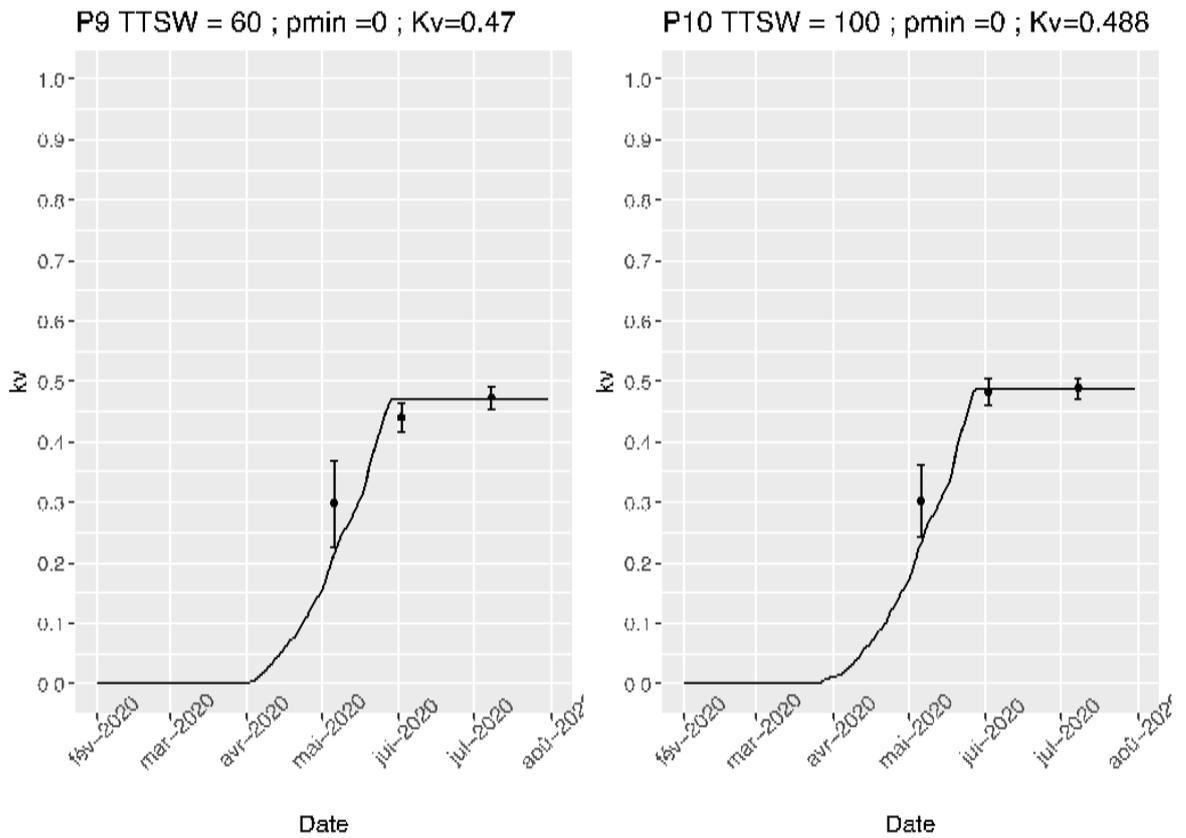




Annexe 5 : Coefficients culturaux







Annexe 6 : Potentiels hydriques mesurés

