



**HAL**  
open science

# Spatialisation du statut hydrique de la vigne sur un bassin versant méditerranéen par télédétection optique

Mauricio Galleguillos

## ► To cite this version:

Mauricio Galleguillos. Spatialisation du statut hydrique de la vigne sur un bassin versant méditerranéen par télédétection optique. Sciences agricoles. Institut National d'Etudes Supérieures Agronomiques de Montpellier, 2010. Français. NNT : . tel-02824261

**HAL Id: tel-02824261**

**<https://hal.inrae.fr/tel-02824261>**

Submitted on 6 Jun 2020

**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.

ECOLE DOCTORALE  
Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosiences et Environnement  
(SIBAGHE)

**DOCTORAT**  
Discipline : eaux continentales et société

**Mauricio GALLEGUILLOS TORRES**

**SPATIALISATION DU STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE  
SUR UN BASSIN VERSANT MEDITERRANEEN  
PAR TELEDETECTION OPTIQUE**

Thèse dirigée par **Philippe LAGACHERIE**

Soutenue le 10 mai 2010

Membres du jury :

**Christian PUECH** Directeur de recherche (CEMAGREF, Montpellier)  
**Jean Pierre LAGOUARDE** Directeur de recherche (INRA, Bordeaux)  
**Massimo MENENTI** Professeur (Université de Delf, Pays Bas)  
**Christine KING** Chargé de recherche (BRGM, Orléans)  
**Laurent PREVOT** Chargé de recherche (INRA, Montpellier)  
**Philippe LAGACHERIE** Ingénieur de recherche (INRA, Montpellier)

Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examinatrice  
Co-directeur de thèse  
Directeur de thèse



## RESUME

Le statut hydrique de la vigne est reconnu comme étant un facteur essentiel dans la production viticole. A l'échelle de la parcelle agricole, les travaux de recherche ont permis de mettre au point différentes méthodes de caractérisation du statut hydrique. Cependant, du fait de leur lourdeur de mise en oeuvre, ces méthodes sont difficilement utilisables à l'échelle de la petite région, alors qu'il existe un fort besoin d'informations sur le statut hydrique à cette échelle. L'objectif principal de ce travail est l'obtention d'un statut hydrique spatialisé en milieu viticole méditerranéen, à l'échelle de la petite région. Le site d'étude est la basse vallée de la Peyne, zone de production viticole de 65 km<sup>2</sup>, représentative du vignoble méditerranéen. La démarche générale consiste à spatialiser l'évapotranspiration réelle (ETR), choisie comme indicateur du statut hydrique, par l'intermédiaire de deux modèles spatialisés (S-SEBI, Roerink *et al.*, 2000 et WDI, Moran *et al.*, 1994) issus d'images de télédétection dans l'infrarouge thermique (capteur ASTER). Les résultats de ces modèles sont validés par comparaison avec des mesures et des simulations locales de l'ETR. Ces simulations, réalisées en utilisant un modèle de transfert hydriques (HYDRUS-1D, Simunek *et al.*, 1998), représentent une solution de validation originale pour obtenir une ETR locale sur un grand nombre de sites, à un coût expérimental réduit. Une étude de sensibilité permet d'apprécier la robustesse de ces modèles spatialisés vis à vis des conditions expérimentales. Après avoir vérifié que les simulations locales réalisées avec HYDRUS-1D pouvaient effectivement servir de données de validation, nous montrons que les modèles spatialisés testés permettent d'estimer l'ETR à l'échelle journalière avec une précision satisfaisante, le modèle S-SEBI, pourtant plus empirique, donnant de meilleurs résultats que le modèle WDI (RMSE de 0.8 mm.j<sup>-1</sup> et 1.1 mm.j<sup>-1</sup> respectivement). Nous montrons que ces approches de spatialisation sont sensibles aux conditions expérimentales considérées (champs d'étude spatial pour le S-SEBI, vitesse du vent pour le WDI). Enfin, les résultats de spatialisation mettent en évidence d'importantes variabilités spatio-temporelles de l'ETR sur la zone d'étude. Les structures spatiales de statut hydrique observées à partir des deux modélisations réalisées sont très similaires et semblent être fortement liées aux caractéristiques pédo-paysagères de la zone d'étude.

Mots-clés : spatialisation, évapotranspiration, télédétection, bassin versant méditerranéen, vigne, IR thermique.

## ABSTRACT

Vineyard hydric status is recognized as an essential factor for wine-producing. At the field scale, research work allowed to develop different methods for hydric status characterization. However, because of tedious implementation, these methods are useless at the watershed scale, whereas hydric status information at this scale is strongly needed. The main objective of this study is to spatialize vineyard hydric status over a Mediterranean watershed. The study site is located in the basse vallée de la Peyne, a 65 km<sup>2</sup> wine-producing area, that is representative of the Mediterranean vineyards. The general procedure to achieve this objective was to spatialize actual evapotranspiration (ET), choose as an hydric status indicator, using two spatialized models (S-SEBI Roerink *et al.*, 2000 and WDI, Moran *et al.*, 1994) that were derived from thermal infrared remote sensing imagery (ASTER sensor). The results of these models were validated by comparison with local ET measurements and simulations. These simulations performed by a water transfer model HYDRUS-1D, (Simunek *et al.*, 1998), represents an original validation method to obtain local ET over an important number of sites, at a minimal experimental cost. A sensibility study allowed to identify the robustness of these spatialized models to the experimental conditions. After checking that local ET simulations obtained by the HYDRUS-1D approach were correctly simulated, we showed that S-SEBI and WDI spatialized models allowed to estimate ET with satisfactory accuracies. The more empiric S-SEBI model produced better results than the WDI model (RMSE about 0.8 mm.d<sup>-1</sup> and 1.1 mm.d<sup>-1</sup> respectively). Further, the sensibility study showed that these spatialisation approaches were sensitive to experimental conditions, (spatial extent for S-SEBI and wind speed for WDI). Finally, these spatialisation results depicted for important ET spatio-temporal variability over the Peyne watershed. The spatial patterns retrieved by the two models are similar and seems to be strongly related to pedological and landscape characteristics within the study site.

Key-words : spatialisation, evapotranspiration, remote sensing, Mediterranean watershed, vineyard, thermal infrared.



## Remerciements

Les travaux de thèse ont été effectués au sein de l'UMR LISAH, et financés pendant les 3 premières années par le CONICYT (Chili), par l'INRA pour les derniers mois et par le PNTS pour les frais de fonctionnement.

Mes premiers remerciements sont adressés à mes encadrants Philippe Lagacherie et Laurent Prévot qui m'ont proposé une thèse innovatrice et intéressante qui m'a tout de suite séduit malgré ma faible connaissance sur le sujet. Vers la fin de ma première année, un autre acteur est apparu dans le jeu, il s'agit de Frédéric Jacob qui a participé activement à l'encadrement et que je tiens à remercier particulièrement. Ce sujet de thèse imaginé dans les couloirs du laboratoire par Laurent et Philippe demandait cependant la conciliation d'un important nombre de compétences : expérimentation sur le terrain, micro-météorologie, physique de la télédétection, modélisation hydrologique et bien sûr programmation informatique entre autres. Sur ce point, malgré des moments parfois difficiles, je tiens à remercier très fortement à mes encadrants qui ont dû me former sur plusieurs des compétences que je ne possédais pas auparavant et qui me serviront probablement pour toujours dans l'avenir.

Je voudrais remercier les membres du comité de pilotage, Gérard Dédieu, Jacques Rousseau, Bruno Tysseire et Albert Oliosio qui avec ces conseils précieux ont permis que cette thèse arrive à terme. Je tiens à remercier sincèrement aux membres du jury de thèse, le président Christian Puech, l'examinatrice Christine King et les rapporteurs Jean Pierre Lagouarde et Massimo Menenti qui ont été très intéressés par le sujet de thèse et qui avec leurs questions et remarques ont fait de ma soutenance un moment d'échange scientifique que je tiens à garder pour toujours.

J'aimerais remercier l'intégralité des chercheurs du LISAH par leur aide et soutien. Je cite particulièrement à Stéphane Follain pour son soutien pen-

dant des moments délicats de la thèse. Je tiens à remercier aussi, les viticulteurs qui ont accepté que l'on travaille sur leurs chères parcelles.

Maintenant je voudrais remercier à ceux sans qui tout le travail de terrain n'aurait pas pu être accompli. Un salut chaleureux à l'équipe technique du LISAH qui s'est fortement investi dans ce travail de thèse. Merci Guillaume Coulouma pour avoir partagé tes innombrables connaissances de terrain (maintenant je peux différencier entre le chant d'une "cece" et d'une cigale normale). Merci Jean-Luc Belloti pour avoir partagé des longues journées surtout en plein été sans ombre où tu a failli tomber dans les pommes!!! Merci aussi à François Garnier et Olivier Huttel. Je voudrais remercier à Christian Floure pour son aide avec les "bugs" de ArcGIS et à Arnaud Dubrueil pour son assistance rapide et efficace lors des problèmes informatiques. Je remercie aussi l'ensemble des secrétaires pour son aide et sa sympathie.

Cette période particulière n'aurait pas pu être aussi agréable sans l'amitié et le soutien des thésards, stagiaires et post-doc du LISAH. Je voudrais commencer par Aline Bsaibes avec qui on partage une amitié sincère et qui m'a donné des suggestions clés pour le développement de ma thèse (modèle HYDRUS-1D). De même pour mon grand ami Dennis Hallema qui m'a beaucoup aidé en toute situation. Un grand merci pour Silvio Gumiere mon collègue et ami "brasileiro" avec qui nous avons partagé tant de nouvelles choses dans ce vieux continent. Merci aussi à Armand(o) Crabit et Jérôme Ghesquière pour leur soutien et amitié. Finalement un grand merci à tous ceux qui ont partagé des conseils, ou tout simplement des "buenas vibras" avec moi : Youssef, Thomas, Élodie, James, Lai-Ting, Federico, Simon,...

Mis agradecimientos mas importantes son para mi familia Alejandra, pilar y fuente de motivacion y mi hijo Martincito que llego al mundo durante la recta final de la tesis y que tuvo que sufrir de esta situacion. Mis padres en Chile, en especial mi madre que vino durante los momentos mas complicados y mis hermanos Lorena y Marcelo que siempre me apoyaron incondicionalmente. Gracias por todo, sin su apoyo, este doctorado dificilmente hubiese podido llegar a buen termino.

# Table des matières

Introduction Générale	1
<b>1 Statut hydrique de la vigne en contexte méditerranéen</b>	<b>5</b>
1.1 Contexte viticole méditerranéen	5
1.1.1 Importance socioéconomique	5
1.1.2 Caractéristiques géographiques	6
1.1.3 Importance de l'eau pour la vigne	6
1.1.3.1 Cycle de la vigne	6
1.1.3.2 Physiologie	7
1.1.3.3 Influence de l'enracinement	9
1.1.3.4 Cépages et tolérance à la sécheresse	9
1.1.3.5 Mode de conduite	10
1.1.4 Intérêt de spatialiser le statut hydrique de la vigne à l'échelle sub-régionale	11
1.1.4.1 Diagnostic	11
1.1.4.2 Pronostic	12
1.2 Contexte scientifique	13
1.2.1 Méthodes locales (mesures)	13
1.2.1.1 Potentiel de l'eau	13
1.2.1.2 Quantité d'eau	14
1.2.1.3 Flux d'eau dans la plante	16
1.2.1.4 Méthodes micro-météorologiques	16
1.2.1.5 Méthodes basées sur la température du couvert	18
1.2.1.6 Techniques basées sur des mesures sur la plante	19

## TABLE DES MATIÈRES

---

1.2.2	Modélisations locales du bilan hydrique et estimation des statuts hydriques . . . . .	20
1.2.2.1	Modèles de culture . . . . .	20
1.2.2.2	Modèles SVAT . . . . .	21
1.2.2.3	Modèles de transfert hydrique dans le sol . . . . .	21
1.2.2.4	Modèles hydrologiques . . . . .	22
1.2.3	Méthodes applicables à l'échelle sub-régionale . . . . .	23
1.2.3.1	Méthodes basées sur la télédétection . . . . .	23
1.2.3.2	Utilisation multi-locale des modèles . . . . .	28
1.2.3.3	Couplage télédétection-modélisation . . . . .	29
1.3	Positionnement scientifique . . . . .	33
1.3.1	Spécificités du milieu étudié . . . . .	33
1.3.2	Objectif de l'étude . . . . .	34
1.3.3	Démarche adoptée . . . . .	35
<b>2</b>	<b>Cadre expérimental de l'étude</b>	<b>39</b>
2.1	Présentation du site d'étude . . . . .	39
2.1.1	Situation géographique . . . . .	39
2.1.2	Climatologie . . . . .	39
2.1.3	Géologie . . . . .	42
2.1.4	Pédologie . . . . .	42
2.1.5	Topographie . . . . .	43
2.1.6	Piézométrie . . . . .	44
2.1.7	Facteurs anthropiques . . . . .	46
2.1.8	Phénologie . . . . .	48
2.2	Démarche de spatialisation . . . . .	48
2.2.1	Données utilisées . . . . .	49
2.2.1.1	Image(s) orthophotographique(s) . . . . .	49
2.2.1.2	Données ASTER . . . . .	49
2.2.1.3	Chaîne de traitement . . . . .	50
2.2.2	Indicateurs calculés . . . . .	54
2.2.2.1	Indices de végétation . . . . .	54
2.2.2.2	Estimateurs de statut hydrique : le modèle S-SEBI . . . . .	54

## TABLE DES MATIÈRES

---

2.2.2.3	Estimateur de statut hydrique : WDI . . . . .	56
2.3	Démarche de validation . . . . .	59
2.3.1	Démarche expérimentale . . . . .	59
2.3.1.1	Stratégie de sélection des parcelles . . . . .	60
2.3.1.2	Sélection in-situ . . . . .	61
2.3.1.3	Description des parcelles choisies . . . . .	62
2.3.2	Protocoles expérimentaux . . . . .	62
2.3.2.1	Mesures météorologiques . . . . .	62
2.3.2.2	Mesure de l'énergie disponible . . . . .	65
2.3.2.3	Mesures des flux convectifs . . . . .	70
2.3.3	Modélisation des transferts hydriques . . . . .	74
2.3.3.1	Modèle d'interception de Riou . . . . .	75
2.3.3.2	Modèle HYDRUS-1D . . . . .	76
2.3.3.3	Mesures locales . . . . .	80
2.3.3.4	Paramétrisation HYDRUS-1D . . . . .	84
<b>3</b>	<b>Estimations locales du statut hydrique</b>	<b>89</b>
3.1	Introduction . . . . .	89
3.2	Analyse des indicateurs pédo-climatiques de la vigne . . . . .	90
3.2.1	Pluviométrie et évapotranspiration de référence . . . . .	90
3.2.2	Piezométrie . . . . .	90
3.2.3	Phénologie . . . . .	94
3.3	Estimation du statut hydrique à partir de mesures des flux atmosphériques	96
3.3.1	Analyse temporelle de l'estimation du statut hydrique journalier	96
3.3.1.1	Analyses des flux horaires . . . . .	98
3.3.1.2	Comparaison entre sites . . . . .	102
3.4	Calage du modèle HYDRUS-1D . . . . .	102
3.4.1	Calage . . . . .	102
3.4.1.1	Critères de calage . . . . .	102
3.4.1.2	Résultats des calages . . . . .	104
3.4.2	Variabilité spatio-temporelle du stock hydrique sur les sites d'étude	108
3.4.2.1	Sites La Peyne . . . . .	108
3.4.2.2	Site dépression de Roujan (Site 6) . . . . .	112

## TABLE DES MATIÈRES

---

3.5	Comparaison des ETR simulées par HYDRUS-1D avec celles mesurées par covariances turbulentes . . . . .	112
3.5.1	Validations à l'échelle horaire . . . . .	114
3.5.2	Validation à l'échelle journalière . . . . .	118
3.5.3	Analyse temporelle des validations . . . . .	120
3.6	Analyse spatio-temporelle des ETR simulées par HYDRUS-1D . . . . .	125
3.6.1	Dépression de Roujan (Site 6) . . . . .	125
3.6.2	Sites "la Peyne" . . . . .	125
3.7	Conclusions . . . . .	130
<b>4</b>	<b>Spatialisation de l'évapotranspiration journalière à partir des données ASTER</b>	<b>133</b>
4.1	Introduction . . . . .	133
4.2	Résultats publiés (Geosciences and Remote Sensing Letters) Mapping daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed . . .	134
4.2.1	Introduction . . . . .	134
4.2.2	Materials and Methods . . . . .	136
4.2.2.1	Study site . . . . .	136
4.2.2.2	Ground based estimates of daily ET . . . . .	136
4.2.2.3	Remote sensing retrievals of daily ET . . . . .	139
4.2.3	Assessment and validation strategy . . . . .	141
4.2.4	Results and discussion . . . . .	141
4.2.4.1	Assessing quality of ET ground based estimates . . . . .	141
4.2.4.2	Validating ASTER / S-SEBI retrievals of daily ET . . . . .	143
4.2.5	Conclusion . . . . .	145
4.3	Résultats et analyses complémentaires . . . . .	146
4.3.1	Validation du rayonnement net . . . . .	146
4.3.2	Validation de l'ETR simulée par HYDRUS-1D aux dates de passage ASTER . . . . .	148
4.3.3	Analyses spatio-temporelles des ETR obtenu par S-SEBI . . . . .	149
4.4	Conclusions . . . . .	157

<b>5</b>	<b>Étude de deux indicateurs spatialisés de statut hydrique</b>	<b>161</b>
5.1	Introduction . . . . .	161
5.2	Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and inter-comparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed . . . . .	163
5.2.1	Introduction . . . . .	163
5.2.2	Material and methods . . . . .	166
5.2.2.1	Study site : la Peyne watershed . . . . .	166
5.2.2.2	Data . . . . .	168
5.2.2.3	In situ Estimation of Daily ET . . . . .	169
5.2.2.4	Remote Sensing retrieval . . . . .	172
5.2.3	Assessment and validation strategy . . . . .	178
5.2.4	Results . . . . .	179
5.2.4.1	HYDRUS-1D assessment and control . . . . .	179
5.2.4.2	Remote sensing validations . . . . .	181
5.2.4.3	S-SEBI/WDI intercomparison . . . . .	185
5.2.5	Discussion . . . . .	187
5.2.6	Conclusion . . . . .	191
5.3	Résultats et analyses complémentaires . . . . .	192
5.3.1	Analyse de sensibilité sur le WDI . . . . .	193
5.3.1.1	Variabilité des inputs . . . . .	193
5.3.1.2	Caractérisation des variables et paramètres d'influence . . . . .	194
5.3.1.3	Cohérence des résistances aérodynamiques . . . . .	197
5.3.2	Analyse de sensibilité sur S-SEBI . . . . .	199
5.4	Conclusion . . . . .	204
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>208</b>
1.5	Principaux résultats . . . . .	209
1.6	Perspectives . . . . .	211
	<b>Bibliographie</b>	<b>214</b>
<b>A</b>	<b>Description des sites</b>	<b>253</b>

## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>B</b>	<b>Sonde à neutron</b>	<b>259</b>
B.1	Principes . . . . .	259
B.2	Calibration . . . . .	260
<b>C</b>	<b>Resultats des calages du modèle HYDRUS-1D pour chaque site, évalués par le stock hydrique</b>	<b>263</b>

# Introduction Générale

La région Languedoc-Roussillon possède une longue et riche histoire viticole : la vigne y est implantée depuis l'époque des Romains et elle constitue actuellement la plus vaste aire viticole du Monde, avec près de 300000 ha. Elle comprend une importante variabilité de terroirs qui permet l'existence de 34 AOC et 64 VDP. Mais la viticulture Languedocienne vit actuellement une crise : depuis une vingtaine d'années, les quantités de vins produites ne sont plus compatibles avec la diminution de la demande des consommateurs et les orientations agricoles actuelles sont axées sur l'obtention de vins de qualité supérieure, mais produits en plus faibles quantités.

Le statut (ou état) hydrique de la vigne, qui traduit la plus ou moins bonne satisfaction des besoins en eau de la plante par l'eau contenue dans le sol, est reconnu comme étant un facteur essentiel dans la production viticole, tant en termes de quantité qu'en termes de qualité. Ceci est particulièrement le cas en régions méditerranéennes, caractérisées par des étés chauds et souvent très secs. A l'échelle de la parcelle agricole, les travaux de recherche ont permis de mettre au point différentes méthodes de caractérisation du statut hydrique de la vigne, basées notamment sur le suivi du bilan hydrique, la mesure du potentiel de l'eau dans les feuilles ou dans le sol (potentiel de base) ou la mesure de la conductance stomatique. Du fait de la lourdeur de leur mise en œuvre, ces méthodes sont difficilement utilisables à l'échelle de la petite région (quelques dizaines de km<sup>2</sup>) alors qu'il existe un fort besoin d'informations sur le statut hydrique de la vigne à cette échelle. Ce besoin s'exprime à la fois en termes de diagnostic, pour la gestion d'aire de production ou la mise en œuvre de l'irrigation, qu'en termes de pronostic, pour évaluer l'action des changements globaux. La question centrale de notre travail est ainsi : comment obtenir un statut hydrique spatialisé en milieu viticole méditerranéen, à l'échelle de la petite région ?

## Introduction Générale

---

Deux grandes catégories de méthodes existent actuellement pour évaluer le statut hydrique des plantes à l'échelle de la petite région : celles basées sur la spatialisation du bilan hydrique et celles basées sur les techniques d'observation de la Terre par télédétection. Des modélisations multi-locales du bilan hydrique ont été mises en œuvre par plusieurs auteurs, que ce soit avec des modèles de culture, des modèles de transferts hydriques dans les sols ou des modèles de transferts de masse et d'énergie entre sol, végétation et atmosphère (modèles SVAT). Ces approches permettent d'accéder pleinement à la dynamique temporelle du statut hydrique des plantes mais leur spatialisation à l'échelle de la petite région reste délicate, du fait du nombre de leurs paramètres et de la difficulté à les renseigner, en particulier les paramètres caractérisant le sol.

Du fait de ces difficultés, particulièrement fortes dans un milieu caractérisé par une importante variabilité pédologique, à l'échelle de quelques dizaines de km<sup>2</sup>, et par une grande variabilité spatiale et temporelle des nappes superficielles, nous nous sommes orientés vers l'utilisation d'observations par télédétection dans l'infrarouge thermique. Les travaux de recherche menés depuis plusieurs décennies ont en effet permis le développement de méthodologies permettant d'accéder à des informations spatialisées sur le statut hydrique des plantes à partir d'images acquises dans l'infrarouge thermique, le plus souvent combinées à des images acquises dans le domaine du visible et le proche infrarouge. Il faut toutefois signaler que la plupart de ces travaux ont été conduits sur des couverts végétaux spatialement homogènes (cultures annuelles principalement) et que très peu d'entre-eux l'ont été sur la vigne, culture pérenne et qui présente une structure géométrique marquée (mode de conduite en rangs ou en gobelets).

Le terrain d'étude choisi est la basse vallée du bassin versant de La Peyne, affluent de l'Hérault, dont la superficie est de 65 km<sup>2</sup> et où la vigne est présente sur environ 70% de la surface. Il s'agit d'une zone représentative du vignoble Languedocien, à l'intérieur de laquelle se trouve l'ORE (Observatoire de Recherche en Environnement) OMERE (Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau), dont nous avons pu bénéficier des dispositifs expérimentaux. Ce travail a été financé par le PNTS (Programme National de Télédétection Spatiale, France) par le CONICYT ("Comision Nacional de Ciencia y Tecnologia", Chili) et par l'INRA.

---

**Le présent document est organisé en cinq chapitres :**

- Le **chapitre 1** explique le contexte général de l'étude. Il détaille les caractéristiques du milieu et de l'objet étudié, le vignoble méditerranéen. Il permet ensuite d'étayer nos hypothèses de travail en présentant l'information bibliographique existante. Les objectifs de l'étude qui en dérivent sont présentés à la fin de ce chapitre.
- Le **chapitre 2** est entièrement dédié à la description du cadre expérimental de l'étude, ce qui est important puisque cette étude comporte une partie expérimentale notable. Une première section est consacrée à la présentation du bassin versant de la Peyne et à ses particularités vis à vis du statut hydrique de la vigne. Une deuxième section présente les outils de spatialisation utilisés dans ce travail, tandis que la dernière section présente les outils de validation mis en œuvre.
- Le **chapitre 3** présente les résultats d'estimations locales du statut hydrique réalisés par une approche de simulation mono-dimensionnelle des transferts hydriques dans le sol utilisée pour fournir des données de référence à un coût expérimental raisonnable. Une première section décrit les éléments mesurés et influant sur le statut hydrique de la vigne. Les sections suivantes décrivent les performances des modélisations puis leur validation par comparaison avec des mesures micro-météorologiques de l'évapotranspiration.
- Le **chapitre 4** présente les résultats obtenus avec un premier estimateur de statut hydrique spatialisé utilisant des données de télédétection dans le domaine optique, le S-SEBI. Ces résultats sont comparés à ceux des estimations locales présentées dans le chapitre précédent. Une première section, présentée sous la forme d'un article, résume les principaux résultats des estimations d'évapotranspiration réelle spatialisée. La deuxième partie présente l'ensemble des résultats non inclus dans la publication mais qui sont importants du point de vue de cette étude.
- Le **chapitre 5** présente pour sa première partie sous forme d'article, une inter-comparaison des estimations de statut hydrique spatialisées, obtenues par deux modèles spatialisés, le S-SEBI et le WDI. La deuxième partie de ce chapitre,

## **Introduction Générale**

---

concerne les analyses de sensibilité réalisées pour chacun des modèles, permettant d'élucider les résultats obtenus préalablement.

# Chapitre 1

## Statut hydrique de la vigne en contexte méditerranéen

### 1.1 Contexte viticole méditerranéen

#### 1.1.1 Importance socioéconomique

La région du Languedoc-Roussillon possède une longue et riche histoire viticole. Depuis le IV<sup>e</sup> siècle avant J.C. cette région a produit du vin. Actuellement elle constitue la région viticole la plus vaste du monde avec près de 300 000 ha. Elle comprend une importante variabilité de sols, des climats et des terroirs qui permettent l'existence de 34 AOC (Appellation d'Origine Contrôlée) et un grand nombre de vins de pays. Cependant la viticulture régionale vit actuellement une crise qui a pour conséquence l'arrachage continu des vignes. Cette crise est due en grande partie aux objectifs de production : dans le passé, le volume était recherché, c'est maintenant la qualité. Cela a provoqué une importante restructuration de la viticulture languedocienne. Historiquement cette viticulture a connu un développement technique productiviste. Actuellement, les caractéristiques du marché mondial et la diminution de la consommation nationale de vin conduisent la filière à rechercher de nouveaux marchés (Montaigne et al., 2006.). Cela a pour conséquence une reconversion vers le qualitatif, afin de pouvoir survivre à la concurrence de plus en plus forte des vins du "nouveau monde".

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

### 1.1.2 Caractéristiques géographiques

La région possède des caractéristiques géographiques particulières qui lui confère un potentiel viticole très important. Il y a dans la région une grande diversité de situations pédo-climatiques allant de la côte jusqu'aux contreforts montagneux, en passant par les coteaux, avec en même temps une grande diversité de sols. Tous ces éléments permettent l'existence d'un grand nombre d'AOC qui constituent un atout permettant une diversité des vins produits, de plus en plus recherchée dans la viticulture moderne.

### 1.1.3 Importance de l'eau pour la vigne

#### 1.1.3.1 Cycle de la vigne

Des changements affectent annuellement, dans un ordre chronologique immuable, le nombre, les dimensions et les fonctions des divers organes de la vigne. Les phases de ce cycle végétatif sont des étapes de la vie qui correspondent à des états différents de la plante (Branas, 1974). La figure 1.1 présente les différents phases du développement annuel d'une vigne. On distingue deux grandes périodes : le repos hivernal, période pendant laquelle il ne se produit aucun changement morphologique et la vie active qui correspond à la période pendant laquelle les organes s'édifient, la graine et la baie se forment et les matériaux nécessaires à la survie de la plante pendant la phase de repos hivernal s'accumulent dans les parties vivaces (Branas, 1974). La vie active peut elle-même se séparer en deux phases : la croissance et la maturation dont le passage d'une phase à la suivante se fait progressivement. Ces deux phases sont très différentes. Pendant la croissance se constitue le dispositif de capture de l'énergie et le système d'absorption dans le sol, tandis que pendant la maturation se produit une accumulation des assimilats dans les baies et les graines.

Lorsqu'on établit une plantation viticole, le plant de vigne n'est pas complètement développé et ne peut produire immédiatement. Pendant les deux premières années, la vigne requiert des soins spéciaux et c'est généralement durant la troisième année que le plant subit sa taille de formation et est attaché aux fils de fer. A sa troisième année, le plant entre dans la phase productive et fait l'objet de la première déclaration de récolte à l'administration. Ce n'est parfois cependant qu'à la quatrième ou à la cinquième année, selon les conditions locales, qu'il sera en pleine production.

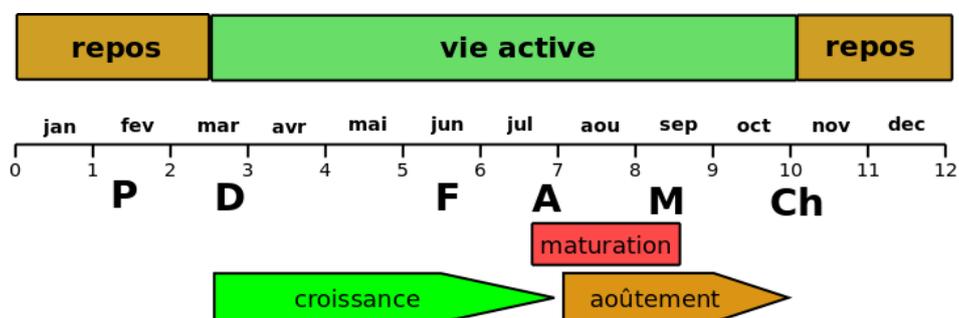


FIG. 1.1: Schéma synthétique du cycle de la vigne, les lettres P, D, F, A, M et Ch, correspondent aux stades phénologiques : pleurs, débourrement, floraison, aoûtement (véraison), maturité et chute des feuilles, respectivement.

### 1.1.3.2 Physiologie

Les besoins de la plante se limitent à l'eau et aux substances minérales du sol, ainsi qu'au  $\text{CO}_2$  et  $\text{O}_2$  de l'atmosphère. Sa matière fraîche est composée d'environ 70 à 80% d'eau (Heller, 1993.). L'eau passe à l'atmosphère, en particulier par les stomates qui demeurent la principale voie d'émission de vapeur d'eau (85 à 100%). Les stomates sont des ouvertures microscopiques dans l'épiderme des feuilles assurant les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère, dont la transpiration. La transpiration est un flux de vapeur d'eau, depuis le sol jusqu'à l'atmosphère, via le système racinaire, les tiges les branches et les feuilles ; il s'agit donc d'une perte d'eau pour le système sol-plante. Près de 98% de l'eau absorbée par la plante est perdue par la transpiration. Cette perte est inévitable car les stomates doivent s'ouvrir pour permettre l'entrée du  $\text{CO}_2$  et assurer la photosynthèse. De plus, lorsque la plante transpire, elle entraîne une absorption supplémentaire d'eau et favorise l'absorption et la circulation des éléments minéraux à l'intérieur de la plante, depuis les racines vers les parties aériennes. Les stomates se ferment dès que le stress hydrique devient trop important. Différentes raisons peuvent provoquer cette fermeture stomatique : sécheresse de l'air, conditions de température extrêmes, âge des feuilles, maladies ou encore désordres physiologiques (Trambouze, 1996). Bien qu'étant un effet indirect, en situation de déficit hydrique, la plante ferme ses stomates, réduisant ses pertes en eau par transpiration. Cette fermeture va entraîner des modifications physiologiques, morphologiques et phénologiques mais va aussi limiter l'entrée du  $\text{CO}_2$ , entraînant une diminution de l'activité photosynthétique.

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

L'importance et les effets de l'alimentation hydrique sur la croissance végétative, le rendement et la qualité des raisins ont beaucoup été étudiés (Deloire et al., 2004; Hera-Orts et al., 2005.; Ojeda, 1999; Reynier, 2003; Salva and Zanardo, 2004; van Leeuwen and Seguin, 1994). Une alimentation hydrique optimale pendant toute la période végétative et fructifère de la vigne maximise l'activité photosynthétique, induisant une croissance végétative excessive qui conduit à un entassement du feuillage et une diminution de la réception de lumière au niveau des grappes (Carbonneau, 1998; Deloire et al., 2005a). Comme conséquence de cette situation, une concurrence pour les photo-assimilats entre les apex végétatifs et les grappes se produit (Champagnol, 1984), ainsi que s'établissent des conditions favorables pour des maladies cryptogamiques comme le *Botrytis cynerea* L. (Galet, 1999.). Le microclimat des grappes peut aussi agir sur la composition polyphénolique des raisins (Hera-Orts et al., 2005.; Ojeda, 1999; Ristic and Iland, 2005) et sur la concentration ou la dilution des composés chimiques dans la baie (Carbonneau, 1998). A l'opposé, une contrainte hydrique sévère peut induire des blocages physiologiques et biochimiques sur différents organes, dépendant du stade où celle-ci se produit, qui ont une incidence directe sur la qualité finale du raisin (Champagnol, 1984; Schultz, 2003). En effet, la photosynthèse est très atteinte par des contraintes hydriques sévères, pouvant provoquer des altérations de la croissance végétative ou de la baie, ainsi que sur la maturation de celle-ci (Deloire et al., 2005a). Les phénomènes liés à la croissance, tel que l'agrandissement cellulaire, sont les premiers à être affectés lors d'un stress hydrique (Carbonneau, 1998; Champagnol, 1984; Ojeda, 1999). C'est ainsi que la croissance des baies est très dépendante des conditions hydriques au cours de leur développement. Néanmoins, des études réalisées par Ojeda et al. (2004) montrent que l'intensité et le moment d'apparition d'une contrainte hydrique auront différentes répercussions. Il a été montré que lorsqu'un stress hydrique sévère se produit entre la nouaison et juste avant la véraison, le volume de la baie sera réduit irréversiblement (Deloire et al., 2005a). Pourtant, cette situation serait produite non pas par une diminution des divisions cellulaires, mais par un changement dans les propriétés physiques des parois cellulaires de la pellicule qui limiterait leur expansion de manière irréversible (Ojeda, 1999). Concernant la qualité du raisin (arômes, composés phénoliques, sucres, acides etc. . .), l'incidence de la contrainte hydrique a été très étudiée (Carbonneau, 1998; Deloire et al., 2005a; Ojeda, 1999; van Leeuwen and Seguin, 1994). Cette qualité est d'une partie liée à la taille des baies et au rapport pellicule/pulpe, mais aussi très dépendante

de la biosynthèse et interaction des composés et au transport des sucres (Wang et al., 2003). Il est donc fondamental de connaître les niveaux de stress et les moments d'apparition de ceux-ci, pour optimiser la production viticole, tant en termes de quantité qu'en termes de qualité.

### 1.1.3.3 Influence de l'enracinement

Une caractéristique particulière à la vigne est son système racinaire qui est très hétérogène dans l'espace (dans les trois dimensions) puisqu'il peut se maintenir près de la surface comme aller très profond dans le sol, en fonction de la situation hydrique. Le système racinaire est de plus variable dans le temps (Champagnol, 1984; Guix, 2005). Un autre facteur correspond à la plasticité de la vigne à s'adapter à presque n'importe quelle condition de sol. Les conditions qui apparaissent à priori les plus favorables à la mise en évidence de l'influence du milieu édaphique sur le fonctionnement de la vigne sont celles qui favorisent une colonisation racinaire maximale (Lebon et al., 2003). D'après Branas and Vergnes (1957) et Champagnol (1984), ce stade est atteint lorsque les vignes sont âgées de 7 à 10 ans. Bien qu'un grand nombre d'auteurs aient observé la présence de racines de vigne jusqu'à des profondeurs pouvant atteindre la dizaine de mètres (Ionescu et al., 1978), la plus grande densité racinaire se trouve toujours dans le premier mètre de sol (Champagnol, 1984). Un aspect important à retenir concernant la profondeur d'enracinement est que celle-ci est un atout pour résister à la sécheresse (Champagnol, 1984; Morlat et al., 1992; Smart and Coombe, 1983.; Trambouze, 1996). La considération de l'ensemble de ces facteurs rend difficile l'interprétation du fonctionnement du système racinaire (Trambouze, 1996).

### 1.1.3.4 Cépages et tolérance à la sécheresse

La vigne (*Vitis vinifera* L.) est une espèce très hétérogène avec une estimation de plus de 6000 cépages (Aradhya et al., 2003) qui se développent depuis les hautes latitudes (50° N) jusqu'aux tropiques, en passant par les régions méditerranéennes. Il existe une grande diversité de ces cépages en relation avec leurs tolérances aux facteurs climatiques, dont la sécheresse. Les cépages sont généralement classés par leur capacité à échapper à la sécheresse (Smart and Coombe, 1983.) ou encore entre "pessimistes" ou "optimistes" selon la classification écologique de Jones (1980.). La principale différence entre ces stratégies est que les "pessimistes" modifient leur croissance et leur physiologie

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

pour préserver les ressources actuelles en vue d'éventuelles limitations futures, tandis que les "optimistes" utilisent toutes les ressources disponibles à un instant donné, en "espérant" que d'autres arriveront dans le futur. Pour ce qui concerne les ressources hydriques, cette classification écologique est analogue à la classification physiologique en plantes isohydriques et anisohydriques (Schultz, 2003; Tardieu and Simonneau, 1998), qui est fondamentalement liée au comportement stomatique. Dans le comportement isohydrique il y a une forte régulation stomatique tendant à atténuer les variations du potentiel hydrique de la plante, tandis que les plantes anisohydriques ont une propension à maintenir les échanges gazeux au prix d'une réduction de leur teneur en eau. Bien que la plupart des cépages aient un comportement isohydrique, certains d'entre-eux, comme par exemple la Syrah, ont un comportement anisohydrique (Schultz, 2003). Dans la région Languedoc-Roussillon, et en particulier dans le secteur de notre zone d'étude, on retrouve des cépages à comportement hydrique variable, correspondant à des cépages traditionnellement destinés à la production de vins de consommation courante de basse qualité avec dans les dernières décennies un apport de cépages de visant à une qualité supérieure tel le Merlot, la Syrah et le Grenache.

### 1.1.3.5 Mode de conduite

Avant la mécanisation des labours le mode de conduite en gobelet était le plus utilisé dans la région, actuellement ce mode de conduite devient de plus en plus minoritaire. De ce fait actuellement le mode de conduite couramment utilisé est la conduite en rangs (ou mode en palissade). La distance interligne et la hauteur de la haie foliaire déterminent largement l'exposition de la surface foliaire externe à la radiation solaire et, par voie de conséquence, influent sur l'état hydrique et thermique du feuillage, ainsi que sur les échanges gazeux de la végétation avec l'atmosphère (photosynthèse et transpiration). Zufferey and Murisier (2006) ont montré dans des vignobles suisses qu'en période de forte sécheresse des sols, les systèmes de conduite à surface foliaire exposée élevée (faible distance interligne et hauteur du feuillage importante) subissent une contrainte hydrique plus marquée que les systèmes à faible surface foliaire exposée. Dans cette même étude les auteurs ont montré que les échanges gazeux (photosynthèse et transpiration foliaires) ont également diminué.

### 1.1.4 Intérêt de spatialiser le statut hydrique de la vigne à l'échelle sub-régionale

#### 1.1.4.1 Diagnostic

L'évaluation des ressources en eau pour les cultures, l'avertissement à l'irrigation, les prévisions de récolte sont autant de problématiques qui nécessitent une connaissance de la variabilité du fonctionnement hydrique du système sol-culture à l'échelle de petites régions agricoles. Dans la vigne, la qualité du raisin qui conditionne en grande partie la qualité du vin est largement influencée par l'interaction entre les vignes, le climat et les facteurs pédologiques. Il est reconnu depuis les années soixante que la disponibilité hydrique est un des facteurs qu'expliquerait mieux la qualité du vin [Seguin \(1986\)](#). Cette connaissance est par ailleurs également nécessaire pour mieux objectiver et définir la notion de terroir. Celui-ci étant défini comme une portion de territoire présentant des caractéristiques pédologiques et climatiques spécifiques, justifiant une modulation des choix de matériel végétal (cépage, porte-greffe), de pratiques viticoles et de techniques œnologiques et où le fonctionnement hydrique du système sol-vigne est reconnu comme un élément majeur ([Morlat et al., 1992](#)). C'est notamment le cas de la viticulture dont une différenciation qualitative de la production est recherchée en fonction de l'origine géographique. C'est ainsi que la connaissance de l'état hydrique spatialisé est essentielle pour les producteurs viticoles qui gèrent souvent des aires de production de plusieurs kilomètres carrés, sur lesquelles ils souhaitent adopter une gestion des vignes qui prenne mieux en compte la variabilité de ces bassins, d'une part pour optimiser la gestion des "terroirs" ([Deloire et al., 2005b](#)) qui ont souvent pour objectif de produire des vins de qualité, mais aussi pour se projeter dans une future gestion de l'irrigation, ainsi qu'indirectement au contrôle de la maturité.

Dans cette approche se situe l'agriculture de précision qui implique l'acquisition et l'utilisation d'un grand nombre de données spatialisées concernant les performances des cultures et les attributs des unités de productions individuelles. Son but est de permettre une gestion des cultures dirigées, de façon à prendre en compte la variabilité de la productivité des surfaces agricoles. Un point essentiel de l'agriculture de précision est l'apparition de nouvelles technologies. Parmi celle-ci nous pouvons citer, les systèmes de positionnement géographique (GPS), les systèmes d'informations géographique (GIS), les techniques de mesure de terrain et les techniques de télédétection, un des outils

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

le plus puissant pour obtenir un suivi spatio-temporel des cultures ([Hall et al., 2002](#)). Avec ces technologies, les producteurs sont capables de mieux observer et développer leur compréhension de la variabilité des systèmes de productions, de manière à moduler les techniques culturales pour optimiser la production ([Bramley and Lamb, 2003](#)).

### 1.1.4.2 Pronostic

Au vu du contexte dans lequel se situe la viticulture méditerranéenne de la région Languedoc-Roussillon, il est indéniable que des changements sont en train de se produire. En premier lieu des changements d'ordre anthropique liés à la production viticole et en particulier au phénomène de globalisation des marchés dans lequel les objectifs de production sont en train d'évoluer vers des nouveaux horizons que la profession devra affronter. Dans ce même contexte se trouvent les habitudes des consommateurs qui sont en train d'évoluer vers des vins différents de ceux habituellement produits dans la région.

Un deuxième aspect important concerne les changements environnementaux que la région en train de subir et qui sont en constante évolution. Il est en effet clair que les ressources en eau se font de plus en plus rares, avec une compétition croissante avec d'autres cultures et surtout avec les besoins en eau des secteurs urbains et péri-urbains en croissance soutenue depuis ces dernières années.

Un dernier aspect moins visible, et à plus long terme, concerne les changements climatiques que la planète est en train de subir. Il a été admis par les scientifiques que des changements sont en train de se produire ce qui bouleversera les habitudes dans la consommation d'eau des populations. A cet effet les régions méditerranéennes sont considérées comme des "hot-spot" de la manifestation du changement climatique ([Diffenbaugh et al., 2007](#)).

En considérant l'ensemble de ces éléments il s'avère nécessaire d'avoir une meilleure compréhension des besoins en eau des cultures, en particulier de manière spatialisée, de façon à pouvoir mieux prédire de futurs scénarios. De ces réflexions découle la question centrale de ce travail : **comment spatialiser les états hydriques de la vigne à l'échelle de dizaines de kilomètres carrés ?**

## 1.2 Contexte scientifique

Pour répondre à la question précédente les scientifiques travaillent pour développer des outils permettant de mieux appréhender le devenir de l'eau dans les cultures. Plusieurs approches sont utilisées, allant de l'échelle locale (plante ou parcelle) à celle de la région.

### 1.2.1 Méthodes locales (mesures)

Les paramètres biophysiques et physiologiques de la plante (photosynthèse, conductance stomatique, teneur en chlorophylle, potentiel hydrique, etc.) peuvent être utilisés comme des indicateurs de l'état hydrique, du fait de leur relation avec le statut hydrique de la plante. Différentes techniques permettent de mesurer plus ou moins directement ces paramètres dans la culture, afin d'estimer ses besoins en eau.

Ci-après seront présentées des méthodes permettant de caractériser le statut hydrique des cultures, celui-ci étant défini comme la plus ou moins bonne satisfaction des besoins de la plante par l'eau contenue dans le sol. Parmi celles-ci se trouvent des méthodes de nature différente telles les mesures de potentiel, de quantité de d'eau, de flux dans la plante et des flux entre la surface et l'atmosphère.

#### 1.2.1.1 Potentiel de l'eau

Il existe deux types de mesures de potentiel de l'eau : une réalisée sur la plante et une deuxième dans le sol qui est en lien direct avec la plante par l'intermédiaire du système racinaire.

- potentiel hydrique foliaire de base (predawn leaf water potential) : est une mesure ponctuelle permettant l'estimation du statut hydrique de la vigne. Lorsque l'équilibre des potentiels entre la plante et le sol est atteint, il est admis qu'il reflète les conditions d'alimentation en eau de la plante entière, intégrant l'état hydrique du sol et les caractéristiques du système racinaire (densité et profondeur), ce qui a été démontré sur vigne par [Choné et al. \(2001\)](#). Les mesures doivent être réalisées en absence d'éclairage, à la fin de la nuit. C'est actuellement la technique de référence utilisée couramment par les producteurs viticoles ainsi que dans certains travaux scientifiques ([Girona et al., 2006](#); [van Leeuwen and Seguin, 1994](#)). Cependant [Améglio et al. \(1999\)](#) qui ont réalisé une étude

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

approfondie de l'utilisation de cet indicateur, ont signalé que cette méthode peut présenter des inconvénients pour déterminer le potentiel hydrique en conditions de stress hydrique, notamment lorsque les sols présentent une hétérogénéité de leurs propriétés hydriques.

- tensiomètres : mesurent l'humidité du sol comme une tension ou une pression allant de 0 (saturation) à  $-100$  kPa (sols très secs), qui traduit la capacité des plantes à extraire l'eau du sol. Les tensiomètres peuvent être placés de façon fixe dans le sol mais aussi ils peuvent être portables. Au moment de la mesure ils peuvent cependant mettre du temps à s'équilibrer notamment dans des sols argileux. Les tensiomètres doivent être installés correctement et être bien entretenus pour fonctionner correctement. Ils présentent aussi des problèmes de dégazage lorsque le sol est trop sec ( $-85$  kPa).

### 1.2.1.2 Quantité d'eau

La quantité d'eau peut être mesurée dans la plante ainsi que dans le sol.

- Quantité d'eau dans la plante : c'est une mesure directe qui permet d'estimer la teneur en eau dans les tissus végétaux, ce qui est en lien avec la condition hydrique de la plante. C'est une technique relativement efficace mais qui est destructive et lourde à mettre en œuvre en particulier lorsque un nombre important d'échantillons sont considérés.
- Lysimètres : ils servent principalement à déterminer les quantités d'eau prélevées par les plantes, l'évapotranspiration peut ainsi être directement quantifiée. Ils peuvent éventuellement servir à déterminer les flux drainés et les constituant dans les eaux de drainage. Ils présentent l'inconvénient d'être difficiles à mettre en place et ils sont incapables de prendre en compte les remontées capillaires et les remontées de la nappe à proximité de la zone racinaire.
- TDR (Time domain reflectometry) : cet appareil estime de façon rapide l'humidité du sol en utilisant les caractéristiques diélectriques du sol. En effet il est basé sur la mesure de la constante diélectrique apparente ( $K_a$ ) du sol, empiriquement associée au contenu volumétrique en eau du sol. C'est une méthode relativement dépendante du type de sol, non destructive, et portable en surface ce qui permet de couvrir un grand nombre de points. Une conversion de la constante diélectrique au contenu volumétrique est néanmoins nécessaire, des étalonnages sur chaque type

de sol sont alors indispensables. L'utilisation de la TDR est déjà très popularisée dans le milieu agricole et scientifique. Plusieurs travaux ont montré la performance de cet outil (Cuevas et al., 2006; Girona et al., 2006).

- FDR (Frequency domain reflectometry) ou “capacitance”. C'est une technique similaire à la TDR, en effet là aussi la constante diélectrique,  $Ka$ , est mesurée et empiriquement associée à l'humidité du sol. Les mesures de contenu d'humidité absolue sont dépendantes du type de sol et de la densité apparente. Cosh et al. (2005) a obtenu des résultats satisfaisants avec ce type de dispositif a une échelle sub-régionale sur des cultures annuelles, mais en réalisant un étalonnage avec des mesures gravimétriques.
- Sonde neutronique : est une technique largement utilisée dans le domaine de la recherche et même par certains agriculteurs. Elle est basé sur la mesure du mouvement rapide de neutrons (généralisé à partir de sources comme Americium 241 ou Beryllium) qui sont ralentis (thermalisés) dans le sol par collision élastique avec les particules d'hydrogènes du sol. L'ion hydrogène ( $H^+$ ) est présent dans le sol comme un constituant de la matière organique, des argiles ou de l'eau. L'eau est la seule forme d'ion  $H^+$  qui pourrait changer à court terme, de telle sorte que dans le changement dans le comptage enregistré par la sonde à neutrons pourra être attribué au changements d'humidité du sol. Sur le terrain des tubes d'aluminium sont insérés dans le sol et refermés pour éviter les entrées d'eau. Le volume de sol exploré par la sonde est une sphère de 15 à 30 cm de diamètre selon le type de sol et son humidité. L'instrument ne peut être utilisé pour les mesures de surface (entre 0-20 cm).
- Mesures gravimétriques : elles sont normalement réalisées en extrayant un échantillon de sol, qui peut être prélevé à différentes profondeurs sur une fosse creusé auparavant. Elle est couramment utilisée pour étalonner des mesures en provenance d'autres techniques car elle constitue la méthode la plus exacte mais largement la plus demandant en temps et main d'œuvre. Son plus grand inconvénient est la lourdeur de mise en œuvre surtout quand des sols profonds sont considérés, mais aussi le fait de ne pas être une mesure volumétrique.

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

### 1.2.1.3 Flux d'eau dans la plante

La mesure de flux d'eau dans la plante est une mesure directe dont l'intérêt principal est la mesure de la transpiration.

- Flux de sève (Sap flow) : méthode qui consiste à mesurer les composantes du bilan de chaleur d'un tronc d'arbre intact qui émet un flux de chaleur constante. Utilisé dans des nombreux travaux [Alarcon et al. \(2000\)](#); [Ansley et al. \(1994\)](#); [Shulze et al. \(1985\)](#), cet indicateur a largement démontré son efficacité comme indicateur de stress hydrique. Adapté à la vigne dans [Trambouze et al. \(1998\)](#), [Yunusa et al. \(2000\)](#), [Escalona et al. \(2002\)](#) et dans [Patakas et al. \(2005\)](#), ses principales difficultés sont : l'installation, la représentativité (elle concerne que le plant mesuré), la conductivité thermique du bois et le suivi et interprétation des mesures.
- Dendromètres (Linear transducer of displacement) : indicateur très sensible qui mesure en continu les fluctuations de diamètre au niveau du tronc (ou autre organe) ce qui peut être mis en relation avec la croissance, l'usage et le statut hydrique. Introduite par [Garnier and Berger \(1986\)](#), possède le grand avantage de présenter un coût bas, ce qui permet d'avoir un grand nombre par points de mesure. Son principal inconvénient est qu'il s'agit d'une mesure de contact qui peut contribuer à contaminer le fonctionnement normale de la plante, ce qui complique le suivi et interprétation des mesures ([Cifre et al., 2005](#)).
- Conductance stomatique : il existe une relation très étroite entre la fermeture stomatique en réponse à un déficit hydrique même léger, ce qui fait de la conductance stomatique un indicateur très précis de stress hydrique par rapport à d'autres indicateurs ([Cifre et al., 2005](#)). Il présente néanmoins les inconvénients suivants : la mesure se fait sur une feuille ce qui oblige d'avoir un important nombre de répétitions, et que le suivi temporel est compliqué.

### 1.2.1.4 Méthodes micro-météorologiques

Les mesures micro-météorologiques sont des mesures de flux d'eau à l'interface surface-atmosphère, la surface étant constitué par le sol et la plante, qui permettent de retrouver l'évapotranspiration réelle (ETR). Pour ce faire l'équation du bilan d'énergie

(equation 1.1) est résolue en se focalisant sur le terme de flux de chaleur latente qui est considéré égal à l'ETR.

$$R_n = H + \lambda E + G_0 \quad (1.1)$$

où  $R_n$  est le rayonnement net,  $H$  est le flux de chaleur sensible,  $\lambda E$  le flux de chaleur latente et  $G_0$  le flux de chaleur dans le sol.

- Méthode aérodynamique et de Bowen : méthodes simples, souvent utilisées à l'échelle parcellaire. La première est basée sur l'utilisation des profils moyens dans la partie de la couche limite dans laquelle les flux verticaux peuvent être considérés comme conservatifs. Les valeurs moyennes de la vitesse du vent, de la température et de l'humidité de l'air, doivent être mesurés à deux niveaux. Elle suppose la connaissance des coefficients d'échanges turbulents à partir des données mesurées. Cette méthode tend à être moins en moins utilisée à cause des incertitudes sur la détermination des flux. et de la nécessité d'avoir les 2 niveaux situés dans la zone à flux conservatifs ce qui la rend difficilement utilisable sur des petites surfaces.

La deuxième méthode, largement utilisée dans le passé, a longtemps été la méthode de référence. Elle suppose que le rapport entre le gradient de température et le gradient d'humidité de l'air est égal au rapport entre le flux de chaleur sensible ( $H$ ) et le flux de chaleur latente ( $\lambda E$ ), sous l'hypothèse que les résistances aérodynamiques pour ces deux scalaires soient égales.

$$\beta = \gamma \frac{T_2 - T_1}{q_2 - q_1} = \frac{H}{\lambda E} \quad (1.2)$$

où  $\gamma$  est la constante psychométrique ( $\text{kPa.K}^{-1}$ ) et  $T$  est la température (K) et  $q$  ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) est l'humidité spécifique mesurées aux deux niveaux (1 et 2). Des mesures de rayonnement net  $R_n$  et du flux de chaleur dans le sol  $G_0$  sont aussi nécessaires pour pouvoir estimer le flux de chaleur latente par application de l'équation de bilan d'énergie (equation 1.1) et du rapport de Bowen défini dans l'équation 1.2, comme le montre l'équation 1.3.

$$\lambda E = \frac{R_n - G_0}{1 + \beta} \quad (1.3)$$

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

La méthode présente des limitations, elle considère deux niveaux dans la zone à flux conservatifs, elle requiert de la précision dans les mesures de la variation de  $q$ , finalement elle est limitée par la précision de l'estimation de  $G_0$ , qui reste délicate surtout pour des cultures en rangs.

- Covariances turbulentes : depuis les années 90 elle constitue la méthode de référence pour la mesure des flux échangés entre surface et atmosphère. La méthode des covariances turbulentes sur la mesure à haute fréquence (10 à 20 Hz) des composantes de la vitesse du vent et des grandeurs scalaires considérées : température pour le flux de chaleur sensible  $H$ , humidité spécifique  $q$  pour le flux de chaleur latente  $\lambda E$ , concentration en  $\text{CO}_2$  pour la photosynthèse nette/respiration. Chacun de ces flux est calculé comme étant proportionnel à la covariance entre la vitesse verticale du vent et la grandeur scalaire considérée. Cette méthode requiert une instrumentation dont le coût est assez important et l'acquisition de très gros volumes de données. Elle permet ainsi de déterminer directement les densités de flux, sans hypothèse sur la forme des profils ou sur les diffusivités turbulentes. Cette mesure peut intégrer une surface considérable (plusieurs centaines de mètres carrés) selon la hauteur des instruments de mesure. Une description plus détaillée sera fournie dans le chapitre 2 section 2.3.2.3.

### 1.2.1.5 Méthodes basées sur la température du couvert

La température de surface étant la variable résultante de l'équation du bilan d'énergie de surface, toute modification des variables ou paramètres de cette équation se traduit par une modification de la température de surface. C'est notamment le cas des conditions hydriques du milieu : un couvert végétal bien alimenté en eau sera, toutes choses étant égales par ailleurs, plus froid qu'un couvert sec. La température de surface à laquelle on peut accéder par les techniques de télédétection dans l'infrarouge thermique est ainsi un indicateur de l'état hydrique du couvert végétal, via l'évapotranspiration. La disponibilité des capteurs infrarouge thermiques a ainsi conduit de nombreux auteurs à proposer des indices de stress hydrique basés, plus ou moins directement sur la mesure de la température radiative du couvert. Des exemples sont les indices suivants :

- CWSI (Crop Water Stress Index) : basé sur l'approche de Stress Degree Day proposé par [Idso et al. \(1981\)](#), le CWSI a été conçu par [Jackson et al. \(1981\)](#) en se basant sur la relation température de surface - température de l'air ( $T_s - T_a$ )

et les conditions environnementales, en particulier le déficit de pression de vapeur ( $VPD$ ) (Kustas et al., 1989). Le CWSI est une réécriture de l'équation de Penman-Monteith appliquée au calcul de l'évapotranspiration réelle et de l'évapotranspiration maximale ( $\lambda E$  et  $\lambda E_m$ ) du couvert.  $\lambda E_m$  correspond ici à l'évapotranspiration qu'aurait le couvert considéré en apports en eau non limitants. Le principe du CWSI nécessite donc l'estimation de la relation entre ( $T_s - T_a$ ) et le  $VPD$  dans des conditions extrêmes d'apports en eau à la culture, afin de pouvoir situer les valeurs de  $T_s$  réellement observées par rapport à ces limites. C'est encore une méthode utilisée dans de nombreux travaux (Gonzalez-Dugo et al., 2006; Kar and Kumar, 2007) mais qui cependant est limitée aux couverts totalement couvrants.

- Méthode du triangle (Carlson et al., 1995; Gillies et al., 1997) : ces travaux concernant des zones humides ou tempérées ont montré que le nuage de points reliant la température de surface ( $T_s$ ) au taux de couverture végétale  $V_c$  formait un triangle. La base évasée du triangle représente la gamme possible de températures du sol selon sa teneur en eau  $w$  et la pointe supérieure du triangle, la température d'une végétation complètement couvrante, bien alimentée en eau (cette valeur ne serait pas unique dans le cas d'éventuels déficits hydriques). Cette méthode a été développée afin d'estimer la teneur en eau du sol  $w$  : les points reliant  $T_s$  à  $V_c$  (variant de 0 à 100%) forment des « isolignes » dans le triangle pour une valeur de  $w$  donnée. En positionnant des mesures de  $T_s$ , acquises par télédétection satellitale ou aéroportée, par rapport à l'isoligne des conditions extrêmes de dessèchement du sol, il est possible de retrouver  $w$ .

### 1.2.1.6 Techniques basées sur des mesures sur la plante

Delta  $^{13}\text{C}$  : Technique se basant sur la discrimination des isotopes du carbone  $^{12}\text{C}$  et  $^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  (Farquhar and Richards, 1984.). L'acquisition de l'isotope de carbone stable est discriminée par la diffusion et la photosynthèse dans l'étape de la carboxylation (Farquard et al. 1980). Cette technique est potentiellement intéressante puisqu'elle présente l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et intègre le "vécu hydrique" de la plante au cours d'une période (mesure intégrative). Cet indicateur présente l'avantage de permettre une comparaison directe avec d'autres indicateurs comme le potentiel de base (de Souza et al., 2003; Gaudillère et al., 2002).

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

### 1.2.2 Modélisations locales du bilan hydrique et estimation des statuts hydriques

Il existe différentes catégories de modèles permettant de simuler le fonctionnement sur système sol-plante-atmosphère à l'échelle locale équivalente à l'échelle de la parcelle. Parmi ceux ci on peut identifier les modèles de cultures, les modèles SVAT, les modèles de transfert hydriques et les modèles hydrologiques. Chaque catégorie est donc adaptée à un domaine d'application. Par exemple les modèles de cultures sont adaptées au contexte agronomique avec un pas de temps et des variables de sortie incompatibles avec les besoins d'autres domaines de recherche tels le domaine hydrologique ou des pas de temps plus fins sont souvent requis avec des variables de sortie plus physiques que biologiques. Notre étude exige un modèle adapté aux conditions du contexte viticole méditerranéen, qui puisse en même temps exploiter l'information de réserve hydrique du sol tout en fournissant de l'information sur les flux interagissant avec l'atmosphère à un pas de temps relativement fin.

#### 1.2.2.1 Modèles de culture

Des exemples de modèle de culture sont le modèle STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard) qui est développé à l'INRA depuis 1996 ([Brisson et al., 2003](#)), le modèle EPIC de [Williams et al. \(1984\)](#) ou encore les modèles hollandais.

1. variables de sorties sont : la biomasse, la production, bilan hydrique et bilan d'azote.
2. pas de temps : journalier
3. variables et paramètres d'entrée : information sur le développement des cultures, indice foliaire, interception du rayonnement, paramètres sur l'organe cultivé (graines), description du système racinaire, valeurs limites d'absorption d'eau et information sur l'absorption d'azote.

Les principaux avantages sont la capacité à simuler l'évolution de la végétation et la prise en compte des pratiques culturales, tandis que les inconvénients sont que peu d'adaptation à la vigne existe dans la littérature avec seulement le travail de thèse de [GarciaCortazar \(2006\)](#). Ils possèdent une description parfois sommaire des transferts hydrique du sol, ils ne permettent pas une prédiction de la température de surface, et

aussi il requièrent un grand nombre de paramètres et de variables d'entrée ce qui rend difficile le calage surtout lorsque celui-ci est appliqué de façon multilocal.

### 1.2.2.2 Modèles SVAT

Les modèles de transferts sol-végétation-atmosphère (TSVA ou SVAT) décrivent différents types de transferts. Des exemples connus sont les modèles ISBA (Interactions entre Sol, Biosphère et Atmosphère), (Calvet et al., 1998) qui est un modèle monocouche avec plusieurs versions avec une à réservoirs et une autre en utilisant l'équation de Richards pour expliquer les transferts dans le sol, alors que SiSPAT (Simple Sol Plante Atmosphère Transfert), (Braud et al., 1995) est un modèle de Bilan d'énergie qui sépare le sol et la végétation.

1. variables de sorties sont les transferts de type radiatifs au sein du couvert végétal, les transferts d'énergie et de masse ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ) entre couvert végétal et atmosphère et les transferts hydriques dans le sol et entre sol et plantes. De plus ils sont capables de décrire des processus physiologiques tel la conductance stomatique, ou la photosynthèse pour certains d'entre-eux.
2. pas de temps : minutes à l'heure
3. variables et paramètres d'entrée sont des données météorologiques, une description du sol (parfois non explicite), une description de la végétation (indice foliaire, taux de couverture, albédo, hauteur de la végétation).

Les principaux avantages sont qu'ils permettent une simulations des flux à l'échelle infra-journalière et qu'il peuvent être couplés avec des données de télédétection notamment dans l'infrarouge thermique, alors que les inconvénient sont le besoin de description de l'évolution de la végétation en entrée ce qui en lien avec le grand nombre de paramètres souvent difficiles à renseigner et qui sont nécessaires pour initialiser ces modèles.

### 1.2.2.3 Modèles de transfert hydrique dans le sol

Un exemple de modèle de transferts hydriques est le modèle HYDRUS. C'est un modèle basé sur l'équation de Richards, développé par Simunek et al. (2008) il comporte des versions unidimensionnelles, bi-dimensionnelles et tri-dimensionnelles. C'est

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

un modèle qui permet des applications pluridisciplinaires puisqu'il inclu un grand nombre d'équations permettant par exemple de travailler avec les solutés.

1. variables de sorties sont les transferts hydriques dans le sol, entre sol et plantes et entre sol, plantes et atmosphère.
2. pas de temps : minute à la journée
3. variables et paramètres d'entrée sont des données météorologiques, une description du sol (détaillé), une description de la végétation (indice foliaire, taux de couverture)

Les principaux avantages sont qu'il nécessitent peu de variables et paramètres, souvent correspondant au fonctionnement hydrique du sol qui présente l'avantage d'être stable dans le temps. Il permet aussi de tenir en compte des nappes phréatiques qui interagissent avec la végétation. Les principaux désavantages sont l'absence de considérations physiologiques de la plante (régulation stomatique) et le manque de référence dans la littérature de son applicabilité sur vigne.

### 1.2.2.4 Modèles hydrologiques

Quelques modèles hydrologiques tel SWAT développé par le USDA ou HYDROTEL (Fortin et al., 1995) incluent un module de calcul du bilan hydrique vertical qui permet de déterminer notamment l'évapotranspiration réelle.

1. variables de sorties sont le ruissellement, infiltration, flux de nappes, et ETR
2. pas de temps : minute à la journée
3. variables et paramètres d'entrée sont des données météorologiques, une description du sol (détaillé), une description des caractéristiques de surface

Le principal inconvénient est que ce type de modèle n'est pas applicable à l'échelle de la parcelle.

Parmi les différents modèles décrits dans la littérature, il est important de signaler le travail de Bsaiibes (2007) qui a réalisée une adaptation des modèles HYDRUS-1D et SiSPAT à la vigne, via l'utilisation d'un modèle d'interception du rayonnement spécifique à la vigne (Riou et al., 1989). Dans cette étude des performances satisfaisantes ont été obtenues à l'échelle journalière, et même horaire en absence de stress hydrique marqué sur les deux modèles.

### 1.2.3 Méthodes applicables à l'échelle sub-régionale

#### 1.2.3.1 Méthodes basées sur la télédétection

Les techniques d'observation de la Terre par télédétection sont un moyen privilégié pour documenter la variabilité spatiale et temporelle des surfaces terrestres. Le progrès de la résolution spatiale et de la répétitivité temporelle permettent d'accéder à l'échelle sub-régionale (centaine de km<sup>2</sup>). Dans cette partie, nous limiterons la présentation des méthodes utilisant la télédétection à celles utilisables pour l'estimation du statut hydrique de la vigne.

- **télédétection visible (400-700 nm), proche infrarouge (700-1300 nm) et moyen infrarouge (1300-2500nm)** : les techniques de télédétection permettent tout d'abord d'accéder à des informations sur l'organisation spatiale : délimitation du parcellaire agricole, reconnaissances des couverts végétaux naturels ou cultivés par classification mono ou multi-temporelle. Elles permettent de plus d'accéder à des informations quantitatives sur l'état de la végétation. Un grand nombre d'indices de végétation ont ainsi été développés. Ces indices sont des combinaisons mathématiques des réflectances mesurées dans plusieurs bandes spectrales, qui sont mise en relation, de manière empirique ou à l'aide de modèles de transferts radiatifs, avec des variables biophysiques du couvert végétal telles que l'indice foliaire (LAI), son activité photosynthétique, sa structure géométrique (taux de couverture, angle moyen des feuilles ... ). L'indice de végétation le plus couramment utilisé est le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) défini originellement par [Tucker \(1979\)](#) pour l'étude de la végétation. A posteriori sont apparus des indices qui corrigent de l'effet du sol, les effets atmosphériques et finalement une combinaison des deux effets (Soil Adjusted Indices : SAVI ([Huete, 1988](#)), TSAVI ([Baret and Guyot, 1991](#)), GESAVI ([Gilabert et al., 2002](#)), etc). Dans [Broge and Leblanc \(2001\)](#) un grand nombre d'indices sont comparés en fonction de nombreux paramètres comme l'indice foliaire, l'architecture ou la géométrie d'illumination entre autres.

Les réflectances spectrales permettent l'existence de plusieurs indices hydriques parce qu'il existe des bandes d'absorption particulières, notamment de l'eau dans la région du proche et moyen infrarouge ([Serrano et al., 2000](#)). Plusieurs indices

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

ont ainsi été développés pour estimer le contenu en eau des végétaux (Gao, 1996; Hardisky et al., 1983; Peñuelas et al., 1993; Sims and Gamon, 2003). Ces indices sont des indicateurs directs du contenu en eau de la plante, en effet plusieurs études suggèrent que les longueurs d'ondes idéales pour prédire le contenu d'eau de la canopée, soient des longueurs d'ondes avec un faible coefficient d'absorption qui permettent à la radiation de pénétrer profondément (Claudio et al., 2006; Peñuelas et al., 1993). Par exemple des études récentes suggèrent que les régions de 970 nm et de 1200 nm soient les bandes les plus adaptées pour estimer le contenu d'eau de la canopée (Serrano et al., 2000; Sims and Gamon, 2003). D'autre part Fensholt and Sandholt (2003) ont trouvé pour un milieu aride que l'indice SIWSI basé sur la relation entre moyen infrarouge et du visible était significativement lié avec l'humidité du sol. La grande limite de ces indices est que ces longueurs d'onde ne sont pas disponibles sur tous les satellites ce qui limite l'utilisation de ces indices.

Un autre indice cité dans la littérature est l'indice de réflectance photochimique (PRI), il a été démontré qu'il était fortement corrélé à l'état de de-epoxidation du cycle des xanthopylles (Gamon et al., 1990; Penuelas and Filella, 1998). Cet indice est de ce fait corrélé avec la photosynthèse et la conductance stomatique ce qui lui permet de refléter la condition hydrique des feuilles dans différentes espèces (Stylinski et al., 2002; Winkel et al., 2002), incluant la vigne (Evain et al., 2004). Finalement il existe un dernier groupe d'indices concernant la condition hydrique des végétaux. Il s'agit d'indices se basant sur l'hypothèse de la relation entre fluorescence chlorophyllienne et stress hydrique. En tenant compte l'instrumentation actuelle, elle peut être mesurée à des distances relativement courtes avec des fluoromètres lasers (Flexas et al., 2000; Zarco-Tejada et al., 2003) ou de façon aéroportée en utilisant la fluorescence chlorophyllienne induite par le soleil (Cifre et al., 2005). La détection satellitaire serait hypothétiquement possible si la fluorescence était mesurée dans la bande de Fraunhofer, une bande d'absorption par l'oxygène ou dans certaines bandes non présentes dans le spectre solaire. Cependant la mise en œuvre de tels instruments est encore l'objet de discussion, tant sur le plan théorique que sur le plan pratique.

- **téledétection dans l’infrarouge thermique** : tous les corps ont une émission naturelle qui est liée à leur température. Dans le spectre, il existe une fenêtre atmosphérique (région où la transmittance de l’atmosphère est maximale) comprise entre 8-14  $\mu\text{m}$  permettant la mesure par téledétection. L’utilisation de la téledétection infrarouge thermique est devenue très populaire depuis les 30 dernières années avec un important nombre de travaux qui lui sont dédiées. Un résumé peut être retrouvé dans [Quattrochi and Luvall \(1999\)](#) et plus récemment dans [Kalma et al. \(2008\)](#). L’émission thermique d’un corps noir (qui est un émetteur parfait) est donnée par la loi de Planck (equation 1.4) qui s’exprime en  $\text{W.m}^{-3}.\text{sr}^{-1}$ ,

$$L_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (1.4)$$

où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide ( $299792458 \text{ m.s}^{-1}$ ),  $h$  est la constante de Planck ( $6.6625 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ ),  $k$  la constante de Boltzman ( $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}$ ) et  $T$  la température de la surface du corps noir en kelvin.

L’intégration de la loi de Planck sur l’ensemble des longueurs d’onde conduit à la loi de Stephan-Boltzman qui exprime l’émittance  $M$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) d’un corps noir en fonction de sa température de surface  $T_s$  (K)

$$M = \sigma T_s^4 \quad (1.5)$$

où  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67032 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \text{ m}^{-1}$ ).

Dans le cas des corps naturels, on définit l’émissivité  $\epsilon$  comme le rapport de l’émittance à celle du corps noir à la même température (equation 1.6)

$$M = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (1.6)$$

L’émissivité des sols et de la végétation est proche de 1 (proche de 0.9 pour un sol nu et supérieur à 0.95 pour la végétation ([Jiang et al., 2006](#); [Jiménez-Muñoz et al., 2006](#))). Du fait que cette émissivité est inférieure à l’unité, l’énergie émise par un corps naturel dans l’IR thermique est égale à :

$$M = \epsilon \sigma T_s^4 + (1 - \epsilon) R_a \quad (1.7)$$

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

où  $R_a$  est le rayonnement atmosphérique des grandes longueurs d'onde. Dans le cas d'un radiomètre ayant une ouverture spectrale  $[\lambda_1, \lambda_2]$ , l'intégration de la loi de Planck sur cette fenêtre spectrale conduit à des formulations de l'emittance spectrale en :

$$M_{\lambda_1.\lambda_2} = kT_s^n \quad (1.8)$$

où  $k$  et  $n$  dépendent de la fenêtre spectrale considérée, et de la réponse spectrale du capteur.

La télédétection dans l'IR thermique permet ainsi d'accéder à la température de surface, variable clef de l'équation du Bilan d'énergie (équation 1.1). Cette équation peut être détaillée sous la forme décrite par [Lagouarde et al. \(1995\)](#) (équation 1.9).

$$(1 - \alpha_s)R_g + \epsilon_s R_a - \epsilon_s \sigma T_s^4 = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a} + \frac{\rho C_p e_{sat}(T_s) - e_a}{\gamma r_c} + \lambda \frac{T_s - T_0}{\Delta z} \quad (1.9)$$

Cette formulation de l'équation fait ainsi apparaître :

- des variables météorologiques :  $T_a$  température de l'air,  $e_a$  pression partielle de vapeur d'eau dans l'air,  $R_g$  rayonnement global,  $R_a$  le rayonnement atmosphérique de grandes longueurs d'onde et  $T_0$  la température du sol à la profondeur  $\Delta_x$ .
- des paramètres de la surface :  $\alpha_s$  albédo,  $\epsilon_s$  l'emissivité,  $r_a$  la résistance aérodynamique (qui dépend de la rugosité de la surface, de la vitesse du vent et des conditions de stabilité atmosphériques),  $r_c$  la résistance du couvert, qui dépend du degré de fermeture stomatique et de  $\lambda$  la conductivité thermique du sol.
- des constantes physiques :  $\rho$  la masse volumique de l'air,  $C_p$  la capacité calorifique de l'air et  $\sigma$  la constante psychrométrique.
- une variable d'équilibre : la température de surface  $T_s$

Il faut insister sur le fait que, toutes choses étant égales par ailleurs, la température de surface traduit "l'état hydrique" de la surface. A titre d'exemple une surface humide sera toujours plus froide que la même surface si elle était sèche. Ce dernier exemple montre l'intérêt de la télédétection dans l'IR thermique ce qui a fait l'objet de nombreux travaux depuis plusieurs décennies.

Les principaux inconvénients sont le peu de capteurs satellites opérationnels, des résolutions le plus souvent hecto voire kilométriques, la sensibilité à la couverture nuageuse (tout comme le domaine solaire), et dans notre contexte viticole très peu de travaux ont été réalisés à ce jour.

- **micro-ondes passives** : elles s'appuient sur l'émission des objets dans le domaine des hyperfréquences, c'est à dire comprises entre 1 m et 1 mm (ce qui correspond aux fréquences de 0.3 GHz à 300 GHz). Ces mesures permettent une estimation de l'humidité de surface des sols (limité à quelques centimètres du sol) mais aussi une estimation de l'indice foliaire. Elle présentent aussi une forte complémentarité avec les autres domaines de la télédétection ([Kustas et al., 1998](#)). Ce type de mesure possède deux avantages considérables, d'une part les effets atmosphériques sont pratiquement négligeables ce qui permet d'avoir des mesures même sur des jours nuageux, et d'autre part les effets solaires sont négligeables, ce qui permet de faire des mesures indifféremment du jour ou la nuit et l'effet et indépendamment de l'effet de l'inclinaison du soleil. Malgré ces avantages remarquables, leur grand inconvénient est leur très mauvaise résolution spatiale.
- **micro-ondes actives (radar)** : la technologie Radar (Radio Detection and Ranging) est une technologie développée dans le domaine militaire et a été utilisée depuis plusieurs décennies. Cependant le potentiel des données télédétection radar pour estimer l'humidité des premiers centimètres du sol a été démontrée dans des cas limités et reste un sujet de recherche actif car le signal retrodiffusé par un couvert végétal est aussi fonction de la rugosité de la surface du sol, de la biomasse végétale et de la structure géométrique de la végétation. A différence des micro-ondes passives, la résolution spatiale des capteurs radars actuels est équivalente à celle dans le domaine visible.

Finalement nous pouvons conclure sur les micro-ondes qu'elles permettent un accès à l'humidité de surface seulement, et de plus dans le contexte viticole à notre connaissance aucun travail est répertorié à ce jour.

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

Au terme de cette rapide revue de l'utilisation de la télédétection pour le suivi de l'état hydrique de vignobles à l'échelle sub-régionale, seul le domaine de l'infrarouge thermique nous paraît susceptible d'apporter des informations pertinentes.

### 1.2.3.2 Utilisation multi-locale des modèles

Se base sur le fait d'utiliser un modèle permettant d'obtenir un statut hydrique sur une superficie plus importante que celle pour laquelle il a été originalement développé (Faivre et al., 2004). La principale approche actuelle pour la prévision de la variabilité du fonctionnement local du système sol- plante est la simulation multi-locale qui correspond à une juxtaposition de modèles (généralement des modèles simplifiés de transfert vertical) dont on fait varier les paramètres et variables d'entrée en fonction des variabilités spatiales du climat et des propriétés du sol. Cette démarche a été développée pour évaluer des fonctionnements moyens sur des grandes surfaces. Mais elle présente de nombreuses limites vis à vis d'une réelle prévision des fonctionnements locaux à l'échelle d'un paysage, car elle prend en compte de manière insuffisante voire néglige les différentes variabilités du milieu, dont notamment les variabilités des conditions aux limites aux interfaces sol/atmosphère et zone racinaire/sous-sol, et les variabilités spatiales et temporelles des propriétés hydrologiques des sols. Les modèles permettant d'obtenir un statut hydrique sont de différentes natures. D'après Conolly (1998) on peut synthétiser en trois grands types de modèles qui diffèrent par leur aptitude à reproduire les processus. Ces trois groupes sont les suivant par ordre de complexité croissante :

- les modèles analogiques : ils représentent le système par un autre système connu, supposé similaire ; le sol est ainsi souvent représenté par un ensemble de réservoirs (Jong and Shaykewich, 1981) ;
- les modèles empiriques : ils sont établis à partir d'observations et non pas de lois physiques, ce qui les limite pour des applications plus généralisées sur des zones à conditions différentes ;
- les modèles mécanistes : ils décrivent les processus en se basant sur des lois physiques, chimiques ou biologiques reconnues. Ils sont souvent très dépendant d'un grand nombre de données d'entrée mais du fait de leur nature physique, ils peuvent être théoriquement appliqués à tous types de contextes.

L'utilisation multi-locale de modèles à l'échelle sub-régionale est une approche de spatialisation qui implique de pouvoir renseigner ces modèles sur chaque élément ou

unité de paysage. Pour ce faire la télédétection est un outil indéniable qui peut être utilisé pour la mise en œuvre d’approches multi-locales.

### 1.2.3.3 Couplage télédétection-modélisation

Le couplage télédétection-modèles de fonctionnement a été appliqué aux modèles de culture dans le domaine solaire principalement, aux modèles SVAT dans le domaine de IR thermique principalement mais aussi dans le domaine solaire, et aux modèles de transferts hydriques du sol dans le domaine des micro-ondes. Compte-tenu de l’analyse faite de l’apport potentiel de la télédétection pour notre problématique, l’infrarouge thermique est le seul susceptible d’apporter des informations pertinentes. Son avantage repose sur la possibilité de cartographier certaines variables déduites des rayonnements mesurés. Dans la réalité, il n’est cependant pas possible de cartographier directement toutes les variables de l’interface Surface - Végétation - Atmosphère recherchées. Ceci a conduit au développement de diverses méthodologies afin de pallier ce déficit d’information, soit en s’affranchissant de ces variables, soit en les estimant indirectement. Parmi ces approches adoptées, le couplage des modèles SVAT tels ISBA ou SiSPAT avec des données IR thermique représente l’approche la plus déterministe mais elle reste très complexe du fait des problèmes dans les techniques d’assimilation et elle est très coûteuse à mettre en œuvre à l’échelle sub-régionale. En réponse la communauté scientifique a souvent adopté des approches plus simples utilisant l’IR thermique le plus souvent combiné au domaine solaire, de type semi-empiriques basées sur des relations simplifiées ou encore des approches intermédiaires se basant sur la résolution du bilan d’énergie instantané, en faisant appel au développement d’un important nombre de modèles pour caractériser, dans une espace limité théorique ou empiriquement, le statut hydrique des couverts végétaux et des sols. Par exemple l’indicateur WDI (décrit à posteriori) permet de retrouver l’ETR dans l’espace NDVI (SAVI) -  $(T_s - T_a)$ . Beaucoup d’entre-eux requièrent la présence de surfaces ”extrêmes” sur la scène étudiée (surfaces sèches/bien alimentées en eau par exemple). Dans les dernières années différents modèles basées sur la télédétection IR thermique ont été développés, dont nous présentons les principaux dans ce qui suit par ordre chronologique :

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

- **basée directement sur l'équation Penman-Monteith** (Monteith, 1965) : un important nombre de travaux se sont basées sur l'équation 1.10 qui est une réécriture de l'équation du bilan d'énergie pour déterminer le flux de chaleur latente. Des validations sur plusieurs type de couverts ont été publiées dans la littérature (Cleugh et al., 2007; Er-Raki et al., 2008; Goodrich et al., 2000; Mu et al., 2007)

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G_0) + \frac{\rho C_p VPD}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})} \quad (1.10)$$

où  $VPD$  est le déficit de pression de vapeur en kPa),  $\Delta$  la pente de la courbe saturation de la pression de vapeur/température en ( $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ ) et  $\gamma$  la constante psychométrique en kPa.

- **Modèle de Granger and Grey** (Granger and Gray, 1989). Ce modèle se rapproche aux modèles basées sur l'équation de Penman-Monteith mais avec la différence que celui-ci inclut un terme dans l'équation qui considère une évaporation relative, en s'affranchissant de l'évaporation potentielle.

$$ETR = \frac{\Delta(R_n - G_0)R}{\Delta R + \gamma} + \frac{\gamma R E_a}{\Delta R + \gamma} \quad (1.11)$$

L'équation 1.11 illustre l'addition du terme évaporation relative  $R$  qui utilise une relation empirique se basant sur le pouvoir de dessèchement de l'air  $E_a$  pour être estimé. Il a été utilisé par Wu et al. (2006) pour calculer l'évapotranspiration d'une forêt, puis validé par des mesures de flux de sève estimateur direct de la transpiration.

- **SSiB (Simplified Simple Biosphere model)** (Xue et al., 1991) : génère une simulation numérique des interactions surface/atmosphère basée sur le principe de conservation d'énergie et d'eau. Il a été originalement développé comme une composante de la couche superficielle de la surface pour des simulations climatiques, avec des valeurs atmosphériques d'entrée adéquates, mais peut fonctionner de manière autonome des autres modèles atmosphériques. Ce modèle est capable

de générer des flux de surface, mais aussi des conditions d'environnement de surface comme l'humidité du sol (Goward et al., 2000).

- **SEBI (Surface Energy Balance index)** (Menenti and Choudhury, 1993) : il est à la base une modification du CWSI (§ 1.2.1.5) étant basé sur le principe que la température de surface varie avec l'évapotranspiration réelle. Pour une valeur d'albédo de surface donnée, et un jeu de caractéristiques de conditions limites données (température potentielle, humidité et vitesse de friction), la température de surface maximale peut être calculée en supposant une évapotranspiration nulle de la surface. Dans cette situation le flux de chaleur sensible  $H$  peut être déterminé à partir de l'énergie disponible  $Rn - G_0$  en estimant les résistances aérodynamiques par calcul itératif. D'autre part la température de surface minimale peut être estimée à partir de l'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ). Ainsi l'évapotranspiration réelle peut être estimée comme une interpolation pondérée de la température de surface observée entre les valeurs calculées de températures de surface maximale et minimale. Le modèle calcule les limites supérieures et inférieures. Dans van den Hurk (2001) deux applications de ce modèle ont été présentées.
- **WDI (Water Decifit Index)** (Moran et al., 1994) : est basé sur la relation existante entre la température de surface et le taux de couverture végétale, estimé par un indice de couverture végétation (NDVI, SAVI). Le WDI est une extension du CWSI (§ 1.2.1.5) aux surfaces partiellement couvrantes. Il est caractérisé par un trapèze dont les 4 extrêmes sont déterminés pour des situations extrêmes sol/végétation couvrante pour des états sec/bien alimentées en eau. Il requiert comme information des caractéristiques de la surface considérée pour estimer les résistances aérodynamiques nécessaires pour le calcul des droites du trapèze. C'est une approche relativement simple qui permet d'estimer le ratio  $ETR/ET_m$ .
- **TSEB (Two-Source Energy Balance)** (Norman et al., 1995) : est basé sur l'approche à deux sources décrite dans Shuttleworth and Wallace (1985). Le modèle a une structure en parallèle dans lequel les flux de chaleur sensible du sol et de la végétation ont une paramétrisation indépendante qui considère les échanges

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

entre surfaces. Le modèle permet ainsi d'obtenir la contribution résultante des flux de chaleur turbulents déterminés à partir de la différence température de surface - température de l'air ( $T_s - T_a$ ) et de paramétrisation des résistances aérodynamiques du sol et de la végétation. Cette approche permet d'avoir une signification physique meilleure (Kustas and Norman, 1999) que l'approche à source unique d'estimation du paramètre  $kB^{-1}$ . Le modèle a été repris dans de nombreux travaux sous le nom de TSM (Two-Source-Model) (Crow et al., 2008; Kustas et al., 2004; Li et al., 2005, 2006) qui a différence de TSEB, néglige les échanges entre surfaces, avec des résultats satisfaisants pour des cultures annuelles (coton, maïs et soja).

- **SEBAL (Simplified Energy Balance Algorithm for Land)** (Bastiaanssen et al., 1998b) : est un modèle basé sur une approche intermédiaire, qui utilise en même temps des paramétrisations empiriques et physiques. Ce modèle a été développé pour calculer la répartition de l'énergie à l'échelle régionale avec un minimum de données de sol. Les variables atmosphériques (température de l'air et et vitesse du vent) sont estimées à partir de mesures de télédétection en considérant la variabilité spatiale par les contrastes hydrologiques et énergétiques. La détermination de zones humides et sèches sur la zone étudiée est nécessaire pour extraire des valeurs seuils. Le modèle requiert en entrée la connaissance de rayonnement incident, température de surface, NDVI, et carte d'albédo obtenu directement à partir de la télédétection. Des relations semi-empiriques sont donc utilisées pour estimer l'émissivité, la rugosité (Bastiaanssen et al., 1998a) et le flux de chaleur dans le sol à partir du NDVI. Le flux de chaleur sensible est calculé à partir du flux d'inversion sur des unités de terrain non évaporantes (conditions sèches) et des surfaces humides types. Le flux de chaleur latente est calculé comme le résidu du bilan d'énergie. Ce modèle a été utilisé dans différentes applications pour estimer l'évapotranspiration réelle surtout sur des couverts végétaux complètement couvrant et sur des zones relativement plates (Bastiaanssen et al., 2000; Jacob et al., 2002b; Mohamed et al., 2004; van den Hurk, 2001).
- **S-SEBI (Simplified Surface Energy Balance index)** (Roerink et al., 2000) : c'est une méthode simplifiée dérivé de SEBI pour estimer les flux de surface à

partir de données de télédétection. Elle se base sur la détermination d'un albédo dépendant de la température maximale pour des conditions sèches et d'un albédo dépendant de la température minimale pour des conditions humides. Le grand avantage de ce modèle est que des données atmosphériques supplémentaires ne sont pas nécessaires si les extrêmes des surfaces sont présents dans les images étudiées. Des résultats acceptables ont été obtenus par différents auteurs ([Borinina and Ramillien, 2008](#); [Gomez et al., 2005](#); [Sobrino et al., 2005](#))

- **SEBS (Surface Energy Balance System)** ([Su, 2002](#)) : basé sur le même concept que SEBI mais dans un cadre plus complexe qui permet la détermination de la fraction évaporative en calculant le bilan d'énergie dans des cas limités. Le modèle SEBS consiste, d'après [McCabe and Wood \(2006\)](#) en une série d'algorithmes qui déterminent les paramètres physiques de la surface terrestre comme l'albédo, l'émissivité, la température de la couverture végétale etc. à partir des réflectances spectrales et la température de radiance ; un modèle plus complexe pour déterminer la rugosité de surface au transfert de chaleur, une formulation pour déterminer la fraction évaporative sur la base du bilan d'énergie.

Le résumé présenté ci-dessus nous montre le grand nombre modèles utilisant l'information de télédétection dans le domaine solaire et IR thermique développés pour estimer l'évapotranspiration réelle des cultures sur différentes échelles spatiales. Ils requièrent la présence simultanée de surfaces extrêmes en terme de statut hydrique au sein de la zone étudiée ou sinon des mesures atmosphériques ainsi que des caractéristiques des couverts étudiés pour retrouver les conditions extrêmes. Malgré que ces modèles ont été utilisés sur un grand nombre de couverts végétaux incluant des cultures complètement couvrantes et des forêts mais aussi des zones partiellement couvrantes, très peu de travaux ont été réalisées sur vigne.

## 1.3 Positionnement scientifique

### 1.3.1 Spécificités du milieu étudié

Le cas particulier du paysage viticole méditerranéen présente des spécificités intrinsèques lié a sa structure et fonctionnement. Dans l'intérêt de notre étude ce paysage

## 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

---

présente des atouts qui le différencie d'autres milieux et qui sont à considérer :

- c'est un milieu très favorable pour différencier les états hydriques où, les variabilités spatiales et temporelles d'états hydriques sont importantes compte tenu des spécificités climatiques (sécheresse estivale de plusieurs mois avec une absence quasi totale de précipitations) et de l'absence d'irrigation ;
- c'est un milieu qui présente une importante variabilité de conditions de sols vis à vis de leur comportement hydrique ce qui permet d'avoir des situations contrastées au même moment ;
- la vigne, culture omniprésente dans la région, est une culture pérenne à enracinement profond ce qui lui permet d'accéder à des horizons de sols plus profonds en quête d'eau pour pouvoir transpirer pendant les mois estivaux
- la vigne est une monoculture ce qui permet de faire un suivi temporel à moyen terme.

Si ces atouts sont importants en terme d'objectifs scientifiques en relation aux cultures annuelles, il faut aussi prendre en compte les difficultés liées à ce milieu particulier :

- la vigne est un couvert discontinu avec une structure en deux dimensions aussi bien pour le compartiment végétation que pour le compartiment sol.
- le morcellement du parcellaire est une caractéristique propre au milieu viticole méditerranéen européen qui a pour conséquence de générer une forte hétérogénéité dans l'espace. De plus, les parcelles de petite taille sont la norme dans la zone d'étude ce qui pose une difficulté en termes de résolution spatiale des outils de spatialisation.

En considérant l'ensemble des spécificités citées ci-dessus, nous allons devoir prendre en compte l'ensemble de ces spécificités lors de notre étude portant sur un bassin versant de quelques dizaines de kilomètres carrés, ce qui constitue l'originalité plus importante de ce travail de thèse.

### 1.3.2 Objectif de l'étude

Le paysage viticole méditerranéen constitue donc un milieu très spécifique. Par ailleurs nous avons présenté un résumé du grand nombre de travaux existant sur la spatialisation du statut hydrique de la végétation ou sur la spatialisation de l'évapotranspiration, avec les différentes méthodes mises en œuvre. Nous avons vu que très peu de travaux

s'adressent à l'obtention d'un statut hydrique spatialisé sur vigne hormis les travaux se basant sur la réflectance dans le domaine solaire. C'est pourquoi notre hypothèse de recherche est la suivante : **est-il possible de déterminer un statut hydrique en milieu viticole fortement hétérogène par télédétection, et si oui, quels sont les indicateurs plus pertinents ?**

### 1.3.3 Démarche adoptée

Après avoir présenté les approches potentielles pour spatialiser le statut hydrique de la vigne à l'échelle de la petite région, plusieurs ont été considérées.

L'approche de spatialisation par modélisation multi-locale présente l'avantage de pouvoir fournir des informations précises, grâce notamment à l'application de modèles à base physique. Ses inconvénients sont la lourdeur des données d'entrée et surtout l'impossibilité d'examiner un grand nombre de points qui puissent représenter la réalité d'un bassin versant hétérogène. Ceci nous amène à ne pas considérer cette approche comme outil de spatialisation unique. Cependant nous l'utiliserons de façon locale avec un modèle de transferts hydriques pour élargir la gamme temporelle des points de validation.

Nous utiliserons un modèle mécaniste simple pour réaliser la modélisation sur l'ETR à partir de profils d'humidité du sol de façon à obtenir une évapotranspiration continue dans le temps ce qui nous permettra, en l'intégrant sur des périodes de temps définies (par exemple période de développement de la vigne), d'obtenir des statuts hydriques sur vigne en continu. Nous avons choisi le modèle mécaniste de transferts hydriques dans la zone non-saturée HYDRUS-1D (Simunek et al., 2008). En effet dans la thèse de Bsaibes (2007) son adaptation à la vigne, prenant en compte sa structure 2D a été réalisée. Il a été couplé avec le modèle d'interception du rayonnement de Riou et al. (1989) et Riou et al. (1994), et a utilisé l'humidité moyenne dans le profil racinaire pour représenter la variabilité rang/inter-rang. Ce modèle relativement simple assimile les rangs de vigne à des parallélépipèdes à densité foliaire uniforme et dérive par suite l'interception du rayonnement par la végétation. Cette adaptation a permis d'obtenir des modélisations très satisfaisantes de l'ETR et des profils d'humidité du sol, à l'échelle de la parcelle, pendant une période de 3 mois. Quant à la spatialisation multi-locale en négligeant les échanges latéraux, une bonne simulation de l'ETR à l'échelle de quelques

# 1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN

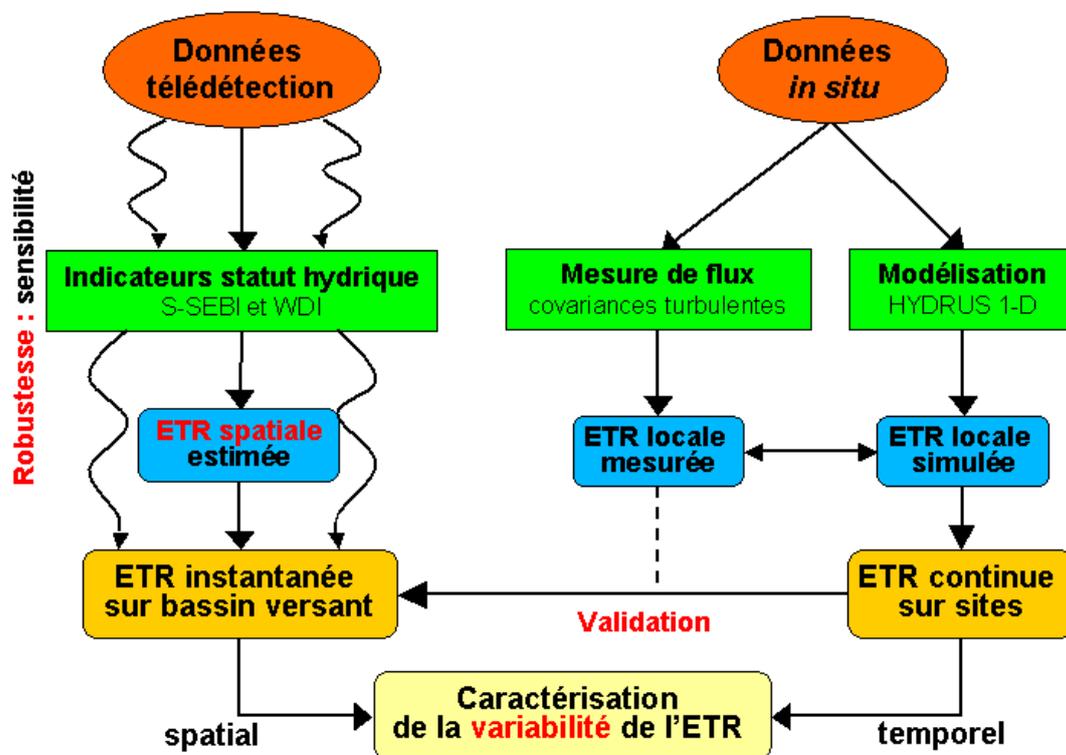


FIG. 1.2: Diagramme de la démarche de travail adoptée pour la thèse

dizaines d'hectares a été obtenue, vérifiée par comparaison avec des mesures de flux par covariances turbulentes et par scintillométrie.

Ainsi une première étape consiste à obtenir des simulation locales de l'ETR à l'aide d'HYDRUS-1D : nous tenterons d'obtenir un statut hydrique local en continu sur un ensemble de sites représentant la gamme de variabilité observée sur la zone d'étude. Un étalonnage sera donc réalisé avec les données locales réalisées sur chaque site de mesure pour vérifier la cohérence des simulations. De plus, une validation des ETR obtenue par HYDRUS-1D sur deux sites contrastés en terme de statut hydrique sera réalisée en les confrontant avec des mesures de l'ETR par covariances turbulentes.

Une deuxième étape consistera à calculer des ETR obtenues par télédétection dans le domaine solaire et infrarouge thermique (TIR), puisque celle-ci nous semble l'approche la plus pertinente pour étudier une superficie hétérogène importante comme dans notre cas. La grande quantité de travaux déjà réalisés sur le sujet (se référer à la

section 1.2.3.3) renforce l'idée d'avoir recours à cette approche. Elle présente l'avantage supplémentaire d'être relativement simple et rapide à mettre en œuvre, en considérant la disponibilité d'images satellites disponibles. Nous utiliserons des modèles (indicateurs) semi-empiriques simples et qui ont déjà prouvé leur efficacité dans des nombreux travaux : un indicateur uniquement basé sur la télédétection, le modèle S-SEBI (Roerink et al., 2000) et un indicateur comportant une paramétrisation aux conditions limites théoriques basées sur des données micro-météorologiques, le WDI (Moran et al., 1994) nous permettant d'obtenir d'évapotranspiration spatialisés de manière relativement directe.

La variable résultante (ETR) peut être comparée avec les résultats obtenus par modélisation locale. Des comparaisons entre les résultats issus de ces deux indicateurs seront réalisées pour tenter de déterminer lequel des deux s'adapte le mieux au contexte de notre étude. La robustesse des méthodes spatialisées utilisées sera évaluée par des analyses de sensibilité.

Ceci nous permettra d'obtenir un statut hydrique spatialisé obtenu par deux méthodes à partir de données télédétection et validé par une approche originale, utilisant un modèle à base physique de transferts hydriques comme un interpolateur temporelle permettant d'obtenir plus de points de validation de façon continue dans le temps.

Ainsi, avec l'ETR spatialisée obtenue par télédétection et l'ETR continue obtenue par les simulations locales nous permettrons de caractériser in fine sa variabilité spatiale et temporelle respectivement.

La figure 1.2 résume sous forme d'un diagramme la démarche mise en œuvre dans ce travail de thèse pour obtenir un statut hydrique spatialisé.

## **1. STATUT HYDRIQUE DE LA VIGNE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN**

---

## Chapitre 2

# Cadre expérimental de l'étude

### 2.1 Présentation du site d'étude

#### 2.1.1 Situation géographique

Le bassin versant de la Peyne est situé dans le département de l'Hérault dans la région de Languedoc-Roussillon au sud-est de la France (figure 2.1). La zone étudiée comprend les communes de Caux, Alignan du Vent, Roujan, Neffies, et une partie de Margon et de Pezenas. Seule la basse vallée du bassin versant a été considéré dans notre étude puisque la partie supérieure correspond à une zone à relief non-agricole. La zone étudiée s'étend sur une surface de 65 km<sup>2</sup> avec une dominante viticole considérable. Les coordonnées de la zone étudiée sont 43.49°N, et 3.37°E. A l'intérieur du bassin de la Peyne se situe le bassin versant expérimental de Roujan qui fait partie de l'Observatoire de Recherche en environnement ORE OMERE (Voltz and Albergel, 2002) destiné à étudier l'impact des actions anthropiques en milieu cultivé méditerranéen sur les flux hydrologiques.

#### 2.1.2 Climatologie

La zone étudiée possède un climat méditerranéen sub-humide à saison sèche prolongée. Les précipitations se produisent majoritairement à l'automne et au printemps et, contrairement à d'autres régions méditerranéennes, les pluies de printemps sont moins importantes. Les intensités de précipitations peuvent être importantes notamment lors de événements orageux, pouvant atteindre plus de 100 mm.j<sup>-1</sup>. Le nombre de jours pluvieux par an (considérant les 15 dernières années) est compris entre 68 et

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

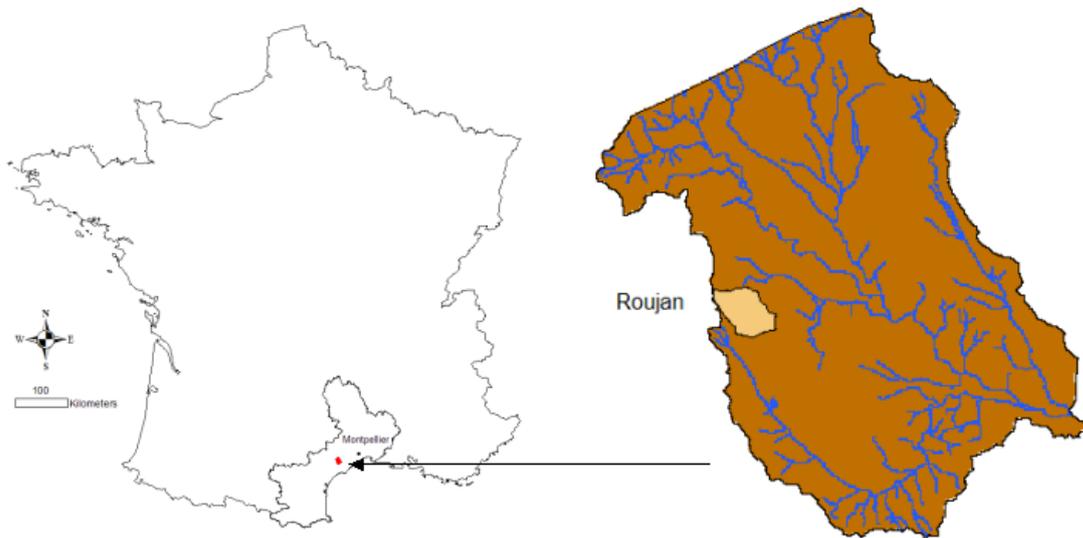


FIG. 2.1: Localisation et représentation du bassin versant de la Peyne avec son réseau hydrographique.

121 jours avec une valeur médiane proche de 80 jours (Sayah, 2008). C'est une zone à important ensoleillement : près de 250 jour en moyenne. La moyenne annuelle des précipitations est de 733 mm, mais avec une variabilité inter-annuelle importante allant de 1500 mm à 318 mm pour les années les plus sèches durant les 15 dernières années (Sayah, 2008). Les températures sont généralement douces pendant l'hiver avec une moyenne de 9.9°C pour le mois le plus froid de l'hiver. En été la moyenne est de 21°C pour le mois le plus chaud, mais elles peuvent être très importantes pouvant atteindre certaines années plus de 40°C (valeur instantanée). Il faut signaler qu'une amplitude thermique journalière considérable est observée pendant les mois d'été. L'humidité est très variable en fonction de la période concernée. Pendant les mois de mai à août on retrouve une humidité de climat sec tandis qu'on peut considérer comme humide le reste de l'année. La zone d'étude est relativement protégée du vent fort provenant du nord appelé le Mistral. La tramontane correspondant a un vent sec du nord ouest est souvent rencontré surtout en hiver et au printemps. Le vent du sud (Marin) et de l'est (Grec) sont moins communs mais peuvent être très violents et sont associés a des passages perturbés en Méditerranée, ils sont souvent accompagnés de temps couverts et des précipitations.

## 2.1 Présentation du site d'étude

Variable	Variation Annuelle	Seuil de signification pente $\neq 0$	Variation sur 15 ans
Précipitations (mm)	-31.7	3.4% *	-476
Température moyenne ( $^{\circ}\text{C}$ )	0.015	ns	0.22
Humidité moyenne (%)	-0.45	4.9% *	-6.7
Rayonnement global ( $\text{W.m}^{-2}$ )	4.1	ns	61
Vents ( $\text{m.s}^{-1}$ )	0.009	ns	0.14
ET <sub>0</sub> (mm)	6.37	3.9% *	96

TAB. 2.1: Évolution de variables météorologiques sur le site de Roujan au cours de la période 1992-2008, ET<sub>0</sub> correspond à l'évapotranspiration de référence (selon Penman), en \* sont représentées les différences significatives, d'après [Sayah \(2008\)](#).

Un aspect d'intérêt particulier pour notre étude concerne l'évolution des paramètres météorologiques qui interviennent dans le bilan hydrique des cultures. [Sayah \(2008\)](#) à réalisé une étude climatologique à partir des données de la station météorologique de Roujan (ORE OMERE) sur les 15 dernières années. Dans son étude, il a calculé les régressions linéaires des moyennes annuelles de chacune des variables en fonction du temps et testé l'hypothèse "pente de la régression linéaire significativement différente de zéro". Il a constaté une diminution significative des précipitations. Le rayonnement global, la température de l'air ainsi que la vitesse du vent, ont augmenté alors que l'humidité relative a diminué, ce qui a une incidence directe dans le calcul de l'évapotranspiration de référence qui elle a augmenté de  $6.4 \text{ mm.an}^{-1}$  (96 mm sur période de 15 ans). Le tableau 2.1 résume en détail ces valeurs. Des différences significatives ont été observées pour seules les variables pluie et humidité relative. L'évapotranspiration de référence a significativement augmentée de son intégration des «faibles» variations du fait de l'augmentation de la température, du rayonnement global et de la vitesse du vent (non significatives) et de la diminution de la l'humidité de l'air (significative). Des résultats similaires ont été observés sur les stations météorologiques environnantes même si la période étudiée par [Sayah \(2008\)](#) n'est pas d'une longue durée en termes météorologiques, il est probable que des changements sont en train de se produire.

Ces résultats renforcent les hypothèses annoncés dans le chapitre 1, concernant

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

l'intérêt d'étudier le statut hydrique des cultures locales telles la vigne, en contexte méditerranéen qui voient leurs stocks en eau de plus en plus contraints du fait de ces changements.

### 2.1.3 Géologie

Les terrains cultivés de la zone d'étude correspondent à des terrains sédimentaires Néogène et Quaternaire. Quatre périodes géologiques caractérisent la formation du substrat présent dans la basse vallée du bassin versant de la Peyne. Il s'agit par ordre chronologique du miocène marin, l'assèchement de la mer, Le pliocène marin et finalement le piémont plio-villafranchien. Le miocène marin date d'environ 14 millions d'années. Une importante accumulation de sédiments s'est alors produite, constitués principalement de limon-argileux et de sables qui sont rassemblés sous le nom de «mollasses» du fait de leur origine détritique. Des restes de polypiers ainsi que des gisements d'huitres géantes sont visibles par endroits. Un dessèchement très rapide de la mer (3000 ans) s'est ensuite produit provoquant dans le bassin versant un rabotage des sommets calcaires. Un nouvel épisode transgressif et s'est produit il y a 5 millions d'années, générant des niveaux argileux et limoneux lacustres, qui seront progressivement recouverts par des apports détritiques grossiers. Vers la fin du pliocène (2.5 millions d'années), l'influence d'apports détritiques continentaux est de plus en plus marquée, avec une organisation fluviale. Des éruptions volcaniques ont provoqué des coulées de laves. Depuis, les différences de niveaux sont liées aux diverses périodes érosives du Quaternaire moyen et récent où la rivière de la Peyne prend régulièrement de l'importance ([Coulouma, 2008](#)).

### 2.1.4 Pédologie

Du fait de la complexe géologie de la zone, un grand nombre d'unités de sols ont été décrits pour le bassin versant de la Peyne : 28 unités sont actuellement décrites pour la zone ([Coulouma, 2008](#)), cependant seuls les grands types de sols seront décrits dans ce manuscrit :

- un premier ensemble correspond aux sols développés sur alluvions. Dans ce groupe il y a ceux développés sur des alluvions actuelles de la Peyne qui se différencient

selon l'importance du cours d'eau associé et ceux développés sur alluvions anciennes de la Peyne. On distingue plusieurs unités de sols développés sur des alluvions anciennes en fonction de la pureté de leur filiation avec les alluvions et de la morphologie des terrasses, à l'origine d'une évolution particulière des sols. Ces sols sont caractérisés par des textures limono-sableuses à limono-argilo-sableuses avec une présence d'éléments grossier importante, surtout en surface.

- un deuxième groupe concerne les sols développés sur le miocène marin («mollasses»). Dans ce groupe on distingue ceux développés directement sur mollasses, ceux développés sur des glacis colluviaux et ceux développés dans les dépressions mal drainées. Ils sont caractérisés par des textures limono-sablo-argileuses à limono-sableuses en surface et des textures plus sableuses ou plus argileuses en profondeur. Les éléments grossiers sont négligeables pour ces types de sols.
- le troisième groupe est constitué par les sols développés sur les niveaux de transition mio-pliocène. Il s'agit d'un groupe de sols à textures plus argileuses, avec un taux d'éléments grossiers variables.
- le quatrième groupe regroupe les sols sur dépôts plio-villafranchiens. Dans ce groupe, les sols sur alluvions villafranchiens sont des sols profonds, de texture argileuse à très argileuse en profondeur, acides, de couleur rouge en profondeur, présentant une fersialisation importante. Les sols sur alluvions quaternaires, plus récents, sont moins profonds et moins évolués que les précédents. Un dernier sous-groupe sont les sols développés sur argile pliocène. D'origine lacustres, il s'agit d'argiles généralement carbonatées.
- un dernier groupe de sols correspond aux sols sur formations basaltiques. Deux coulées majeures en provenance du volcan les Baumes se retrouvent actuellement en position haute dans le paysage, dans la bordure du bassin versant de la Peyne. Deux unités de sols sont issues de ces sols, un premier provenant directement des coulées dans lequel peu de végétation se développe et un deuxième en bordure de coulée avec une formation de végétation plus importante, caractérisée surtout par la présence d'arbres.

### 2.1.5 Topographie

La topographie de la zone étudiée est assez variée, mais en général, on n'observe pas des dénivelés. La pente médiane du bassin versant de la Peyne, calculée à partir du MNT

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

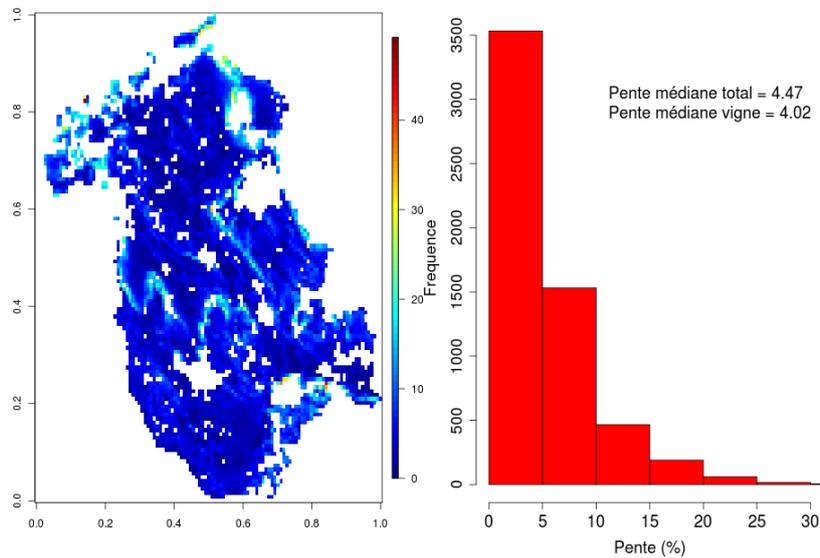


FIG. 2.2: Carte des pentes et histogramme des distributions des pentes sur milieu viticole du bassin versant de la Peyne en %

à 5 m et agrégé à 90 m est de 4.5%, tandis que la pente médiane considérant seulement le milieu viticole, est de 4%. Lorsque l'on observe l'histogramme des pentes (fig. 2.2) on peut observer que la grande majorité des pixels se trouvent dans la zone à pentes inférieures à 10% : 87% des pixels "viticole" sont dans cette catégorie. Les valeurs extrêmes d'altitude fluctuent entre 20 à 230 m. On distingue une structure particulière du bassin versant avec des zones plus élevées correspondant aux plateaux, des zones intermédiaires aux pentes plus prononcées, les terrassettes, enfin une dernière zone plate correspondante aux dépressions. Ces différentes positions topographiques ont une influence directe sur la distribution de l'eau, ainsi les positions en dépression permettent une plus grande disponibilité de l'eau, au contraire des zones à pente prononcée.

### 2.1.6 Piézométrie

La caractérisation spatio-temporelle des nappes est une variable très importante dans la détermination du statut hydrique de la végétation. Une étude menée par Guix (2005) a étudié en détail l'effet des nappes sur la condition hydrique des vignes dans notre zone d'étude. La profondeur des nappes en hiver conditionne directement le statut

## 2.1 Présentation du site d'étude

---

hydrique au cours du cycle végétatif puisqu'elles déterminent le profil hydrique initial. Une classification des nappes superficielles (en mesurant jusqu'à 4 m de profondeur) a été établie par le même auteur, celle-ci sera brièvement décrite dans ce manuscrit :

- Classe 1 : sites sans nappes ou à nappes très fugaces (présence inférieure à deux semaines). Les sites sans nappes sont associés aux sols d'origine miocène souvent en position de terrassettes, tandis que les sites à nappes fugaces sont localisés sur sols pliocène et villafranchiens. L'absence d'horizons imperméables proches de la surface expliquerait le non-développement des nappes sur ces sites.
- Classe 2 : sites à nappe temporaire, avec cinétique de remontée et de rabattement très rapide. Ils sont situés en position de sommet ou en glacis, avec une surface drainée en amont relativement faible mais un drainage en aval rapide probablement accéléré par le réseau de fossés existant dans les cultures de vigne de la région.
- Classe 3 : cette dernière catégorie représente les sites à nappes omniprésentes (au dessus de 4 m). Parmi celles-ci on distingue trois sous-catégories qui interagissent différemment avec le stock hydrique disponible pour la vigne. Une première sous-classe correspond aux nappes situées toujours à une profondeur variable entre 2.5 et 4 m. Caractéristiques des sols quaternaires proches des cours d'eau, celles-ci alimentent le profil par capillarité durant toute l'année, ayant une influence directe sur l'alimentation en eau des racines des vignes qui arrivent normalement à cette profondeur. Une deuxième sous-classe est associée aux sites avec la présence d'une marne bleue d'origine miocène qui est imperméable et présente à faible profondeur. Dans ce cas la nappe est dans la zone racinaire pendant la période de repos puis redescend aux profondeurs de la sous-classe antérieure. La dernière sous-classe correspond aux sites localisées dans les dépressions, sans lien avec le type de sol, et sont toujours situées à faible profondeur (moins de 2.5 m) du fait de leur apport en eau permanent de l'amont combiné à un mauvais drainage en aval.

La zone d'étude possède donc des situations très contrastées en termes de nappes phréatiques superficielles, ce qui conditionne directement les conditions d'humidité de la zone racinaire des vignes, comme démontré dans (Guix-Hébrard et al., 2007).

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

### 2.1.7 Facteurs anthropiques

Les facteurs anthropiques qui nous concernent, c'est à dire ceux qui ont un impact sur les flux d'eau et d'énergie relèvent de différents facteurs, parmi lesquels sont à mettre en avant la culture de la vigne et sa distribution spatiale et l'aménagement hydraulique du milieu.

Un premier aspect concernant la vigne est en lien avec la structure du couvert. À l'intérieur du bassin versant de la Peyne, nous trouvons plusieurs types de mode de conduite, avec une dominante de conduite en rangs palissés. Dans le passé, le système en gobelet était le plus utilisé mais du fait de la mécanisation le système en rangs est maintenant la norme sauf à dans quelques cas où l'on privilégie le système en gobelet car une récolte manuelle est requise. Celle-ci peut être nécessaire quand il s'agit d'une parcelle trop inaccessible pour les machines agricoles ou lorsqu'il est nécessaire d'avoir des grappes en parfait état, ce deuxième cas étant absent dans la zone d'étude. Dans notre étude, les vignes en rang avec récolte mécanique ont été privilégiées.

Un deuxième aspect concerne le parcellaire viticole, qui présente une structure très atomisée, avec un morcellement du parcellaire très important : plus de 14000 parcelles ont été répertoriées sur notre site d'étude (surface totale de 64 km<sup>2</sup>), avec une taille moyenne de 0.8 ha par parcelle. Sur la figure 2.3, on voit que la vigne est la culture prépondérante sur le bassin versant avec près de 70% de la surface concernée. Les bois et forêts constituent le deuxième type d'occupation du sol en termes de surface. À signaler que ceux-ci sont surtout présents sur les bords du bassin versant, sur les zones à relief qui correspondent aux endroits à pentes importantes (voir fig 2.2). Le bassin versant comporte aussi un nombre non négligeable de sols nus et des sols en friche, accessoirement quelques cultures sont aussi présentes, notamment des oliveraies. On note aussi les 4 villages présents dans la zone d'étude, il s'agit de Néffies au Nord, Caux à l'Est et Roujan à l'Ouest et Alignan du Vent au Sud.

Un dernier aspect lié à la mécanisation de la culture de la vigne concerne les états de surface, en particulier sur l'inter-rang des vignes, où des labours sont réalisés dans un grand nombre de parcelles de la zone. Celui-ci affecte directement les échanges surface atmosphère en modifiant les propriétés physiques du sol. Corban (2006) a mené une étude des caractérisations des états de surface grâce à la télédétection à haute résolution spatiale sur la zone d'étude.

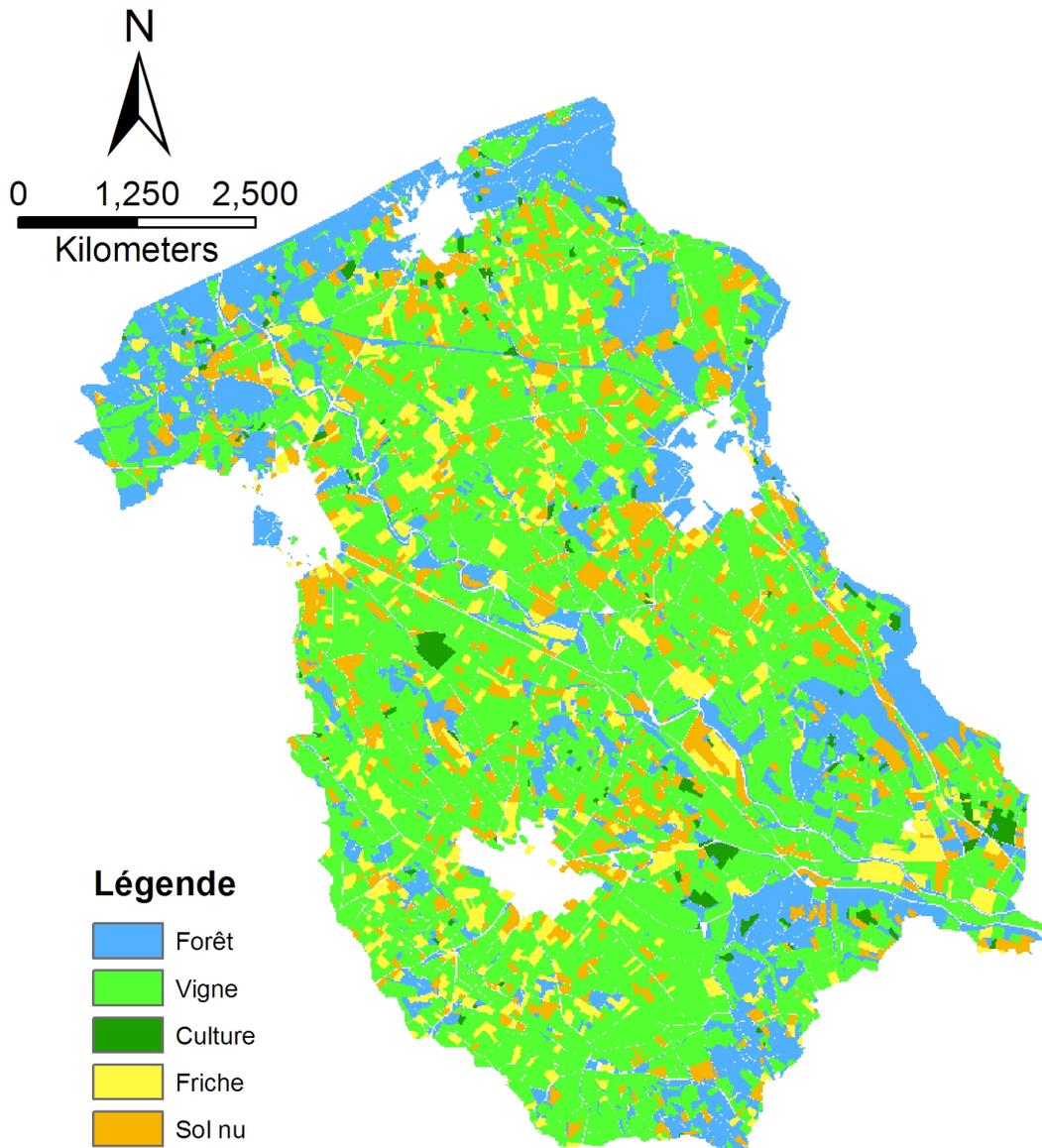


FIG. 2.3: Carte d'occupation des sols du bassin versant de la Peyne (dans laquelle les zones urbaines sont sans couleurs).

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

Finalement un dernier aspect à prendre en compte concerne l'aménagement hydraulique dans la zone. Il est caractérisé par la présence d'un grand nombre de réseaux de fossés ainsi que par un grand nombre de talus datant parfois de plusieurs centaines d'années, ce qui a fortement influencé la distribution spatiale de l'eau dans les sols et les nappes. Dans ce contexte [Dagès \(2006\)](#) a étudié l'influence des réseaux de fossés sur les échanges surface souterrains sur l'ORE OMERE tandis que [Ghesquière \(2008\)](#) a étudié l'influence des talus pour la même zone.

### 2.1.8 Phénologie

Il est classique de représenter l'évolution phénologique des végétaux, dont la vigne par une échelle basée sur la somme de températures ([Bonhomme, 2000](#)). Le temps thermique représente la somme cumulée des températures moyennes journalières supérieures à une température de base, à partir d'une date donnée. La température de base est définie à 10°C car elle correspond à la température seuil en dessous laquelle la vigne est incapable de croître ([Lebon et al., 2003](#)). La date de référence correspond au 1<sup>er</sup> janvier. Les valeurs de références définies ont été déterminées dans des conditions de vignobles méditerranéens similaires à ceux de notre contexte. Dans le chapitre suivant sont présentés les valeurs de référence (tableau [3.1](#)) ainsi que les valeurs calculées pour la période d'étude.

Dans un contexte viticole nous utiliserons par la suite le terme millésime qui désigne l'année de développement de la vigne. Celui-ci n'étant pas en accord avec l'année hydrologique qu'il est important de considérer dans des études concernant le statut hydrique des cultures pérennes comme la vigne. Par exemple, le millésime 2007 correspond à l'année hydrologique 2006-2007, en effet les précipitations produites au cours de l'automne 2006 servent à alimenter le stock hydrique qui sera utilisé pendant le développement de la vigne de l'année 2007.

## 2.2 Démarche de spatialisation

Après considération de l'ensemble des facteurs présentés précédemment, nous avons eu recours à des données de télédétection comme source principale de spatialisation qui a ensuite permis le calcul d'indicateurs, ce qui est expliqué dans ce qui suit.

### 2.2.1 Données utilisées

#### 2.2.1.1 Image(s) orthophotographique(s)

Deux images orthophotographiques ont été utilisées pour la réalisation de cette étude. Une image photographique aérienne couleur orthorectifiée, provenant de l'IGN et datant de mai 2005 a été utilisée en premier lieu pour observer en détails la distribution des parcelles de vigne sur le bassin versant de la Peyne. La résolution spatiale de 0.5 mètres nous a permis d'étudier en détail les formes et limites des parcelles. Une autre série d'images aériennes a été utilisée dans une deuxième étape. Ces images ont été acquises par l'entreprise « avion jaune » dans une campagne d'échantillonnage réalisé le 15 septembre 2007, en coïncidence avec un des passages satellite. Ainsi un ensemble d'images non-géoreférencées avec une résolution spatiale proches de 50 cm ont servi pour actualiser la carte d'occupation des sols obtenue à partir de l'image 2005, en particulier l'information concernant les parcelles de vigne.

#### 2.2.1.2 Données ASTER

ASTER est le nom de d'un capteur de télédétection américano-japonais qui est à bord de la plateforme Terra. Il survole la terre à 705 km d'altitude avec une orbite héliosynchrone, c'est à dire qu'il passe toujours au-dessus d'un point donné de la surface terrestre à la même heure solaire locale. Il y a une oscillation annuelle de l'heure solaire du passage à cause de l'excentricité orbitale terrestre. ASTER fourni des images de 60\*60 km avec un angle de visée au nadir ce qui est très important dans notre étude comme on verra par la suite. Lancé en décembre 1999, il est actuellement le seule satellite capable de fournir des images thermiques correctes à une résolution hectométrique. Le satellite LANDSAT ETM+ fournies aussi des images à une résolution similaire (60 m), cependant il a présenté des problèmes techniques qui font que les images ne sont pas complètes. L'instrument ASTER est constitué de 3 capteurs, respectivement dans le visible-proche IR (VNIR), le moyen infrarouge (SWIR) et le infrarouge thermique (TIR). Chacun des capteurs est caractérisé par une nombre de bandes et une résolution spatiale et spectrale spécifiques. La figure 2.4, résume cette information en comparant les caractéristiques de ASTER avec celles du satellite LANDSAT sur le spectre de transmission atmosphérique. Le capteur SWIR de l'instrument ASTER a été endommagé depuis mai 2008 ce qui a interdit l'utilisation de cette information à

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

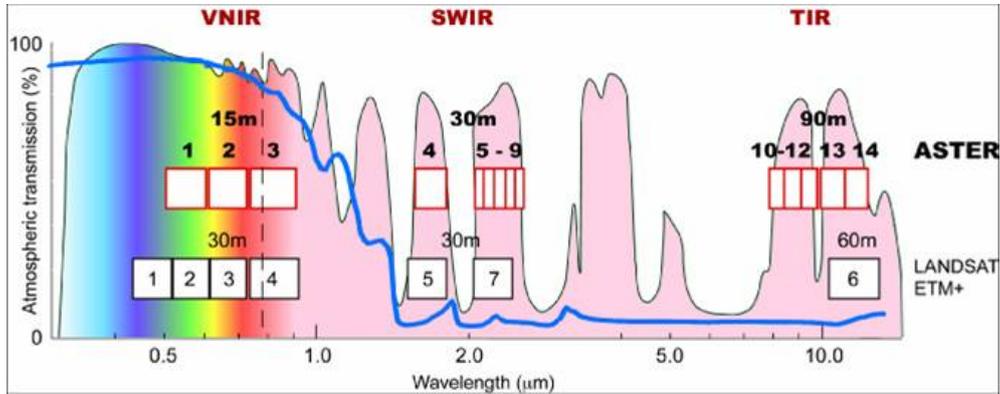


FIG. 2.4: Résolutions spectrale et spatiale du capteur ASTER et LANDSAT représentées sur le spectre de transmission atmosphérique (courbe en bleue).

partir de cette date. Ceci a eu des répercussions dans notre travail, comme détaillé par la suite.

### 2.2.1.3 Chaîne de traitement

ASTER fournit des produits semi-élaborés incluant des corrections géométriques, des corrections atmosphériques ainsi que des calculs de températures de surface et des émissivités dans le TIR en format hdf, parmi lesquels nous avons utilisé les produits : AST07 pour l'information concernant les bandes du visible (VIS) proche infrarouge (PIR) et moyen infrarouge (SWIR); AST09T qui contient l'information concernant les émissivités des 5 bandes thermiques (TIR); et AST08 qui nous donne les cartes de température de surface. Le tableau 2.2 résume les longueurs d'onde de chacune de ces bandes obtenues grâce aux produits ASTER.

La chaîne de traitement utilisée dans cette étude pour rendre utilisable l'information ASTER est synthétisée dans le schéma 2.5.

Avec l'utilisation de cette chaîne de traitement nous avons obtenu pour chaque date d'acquisition les 14 bandes et les images de températures de surface géoréférencées dans le système Lambert III sud, compatible avec les données SIG disponibles au laboratoire LISAH pour la basse vallée du bassin versant de la Peyne. 20 dates ASTER ont finalement été utilisées, elles sont détaillées sur le tableau 2.3. Cette information obtenue grâce aux logiciels ENVI 3.2 et ARCGIS 9.2 a servi pour alimenter les calculs réalisés avec les logiciels Octave 3.0 et R 2.8.

Bande	Longueur d'onde	Domaine spectrale
$\alpha_1$	0.52 - 0.60	VIS
$\alpha_2$	0.63 - 0.69	VIS
$\alpha_3$	0.76 - 0.86	PIR
$\alpha_4$	1.600 - 1.700	SWIR
$\alpha_5$	2.145 - 2.185	SWIR
$\alpha_6$	2.185 - 2.225	SWIR
$\alpha_7$	2.235 - 2.285	SWIR
$\alpha_8$	2.295 - 2.365	SWIR
$\alpha_9$	2.360 - 2.430	SWIR
$\alpha_{10}$	8.125 - 8.475	TIR
$\alpha_{11}$	8.475 - 8.825	TIR
$\alpha_{12}$	8.925 - 9.275	TIR
$\alpha_{13}$	10.25 - 10.95	TIR
$\alpha_{14}$	10.95 - 11.65	TIR

TAB. 2.2: Résumé des longueurs d'onde des bandes ASTER selon le domaine spectrale. VIS = visible, PIR = proche infrarouge, SWIR = moyen infrarouge, TIR = infrarouge thermique.

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

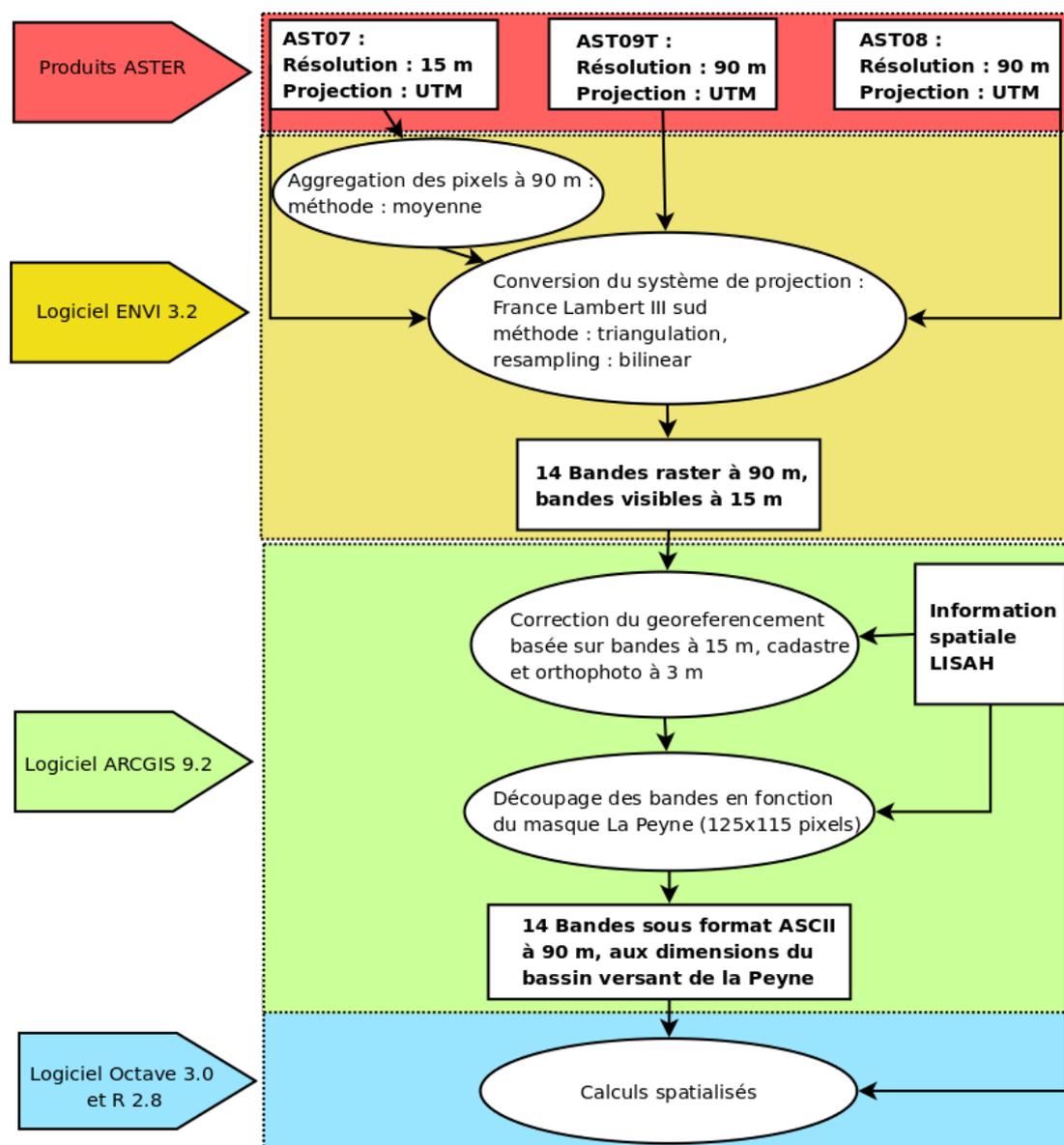


FIG. 2.5: Chaîne de traitement de l'information ASTER pour fournir des cartes adaptées au contexte de l'étude.

## 2.2 Démarche de spatialisation

---

Numéro	Date (YYYY-MM-DD)	Type d'acquisition	Couverture
1	2002-06-13	archive	totale
2	2002-06-29	archive	totale
3	2003-02-08	archive	totale
4	2005-05-20	archive	totale
5	2005-05-27	archive	totale
6	2005-08-15	archive	totale
7	2006-07-10	archive	partielle
8	2007-05-10	archive	totale
9	2007-07-13	archive	partielle
10	2007-08-14	programmée	totale
11	2007-09-15	programmée	totale
12	2007-11-02	programmée	totale
13	2008-06-22	programmée	totale
14	2008-07-08	programmée	totale
15	2008-07-15	programmée	totale
16	2008-07-24	programmée	totale
17	2008-07-31	programmée	totale
18	2008-09-01	programmée	partielle
19	2008-09-26	programmée	totale
20	2008-10-03	programmée	partielle

TAB. 2.3: Résumé des dates des données ASTER archives et programmées, avec la couverture sur la zone d'étude.

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

Un dernier point à signaler et que certaines des acquisitions ne couvraient pas entièrement la zone d'étude, mais elles ont été utilisées puisqu'elles contenaient de l'information spatiale sur des sites de mesure comme on verra par la suite.

### 2.2.2 Indicateurs calculés

#### 2.2.2.1 Indices de végétation

Des cartes de couverture végétale ont directement été élaborées à partir des bandes spectrales issues de la chaîne de traitement. Les indices de couverture végétale NDVI et SAVI ont été sélectionnés dans cette étude à cause de leur simplicité et de leur robustesse, déjà prouvées dans des nombreuses études. Le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse et al., 1974) a été calculé en utilisant la formulation classique (Eq. 2.1), de même que le Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) (Huete, 1988) qui a été calculé en utilisant l'équation 2.2

$$NDVI = \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)}{(\alpha_3 + \alpha_2)} \quad (2.1)$$

$$SAVI = \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)}{(\alpha_3 + \alpha_2 + L)(1 + L)} \quad (2.2)$$

où le coefficient  $L$  est fixé à 0.5 pour tous types de couverts,  $\alpha_2$  correspond à la bande spectrale du rouge et  $\alpha_3$  correspond à la bande spectrale du proche infrarouge (voir tableau 2.2).

Les cartes de couverture végétale ont été calculées avec leur résolution spatiale native de 15 m pour vérifier la cohérence des géoréférences en comparant avec la carte d'occupation des sols. Elles ont ensuite été calculées avec la résolution compatible avec les cartes de température de surface à 90 m pour le reste des calculs.

#### 2.2.2.2 Estimateurs de statut hydrique : le modèle S-SEBI

L'indice S-SEBI (Simplified Surface Energy Balance Index) à été développé par Roerink et al. (2000) pour effectuer une résolution simplifiée de l'équation du bilan d'énergie (Equ. 1.1), uniquement à partir d'images de télédétection acquises dans le visible-proche IR d'une part, et dans l'infrarouge thermique (TIR) d'autre part en absence de nuages. S-SEBI est défini, pour chaque pixel de l'image, par la position dans l'espace albédo-température de surface.

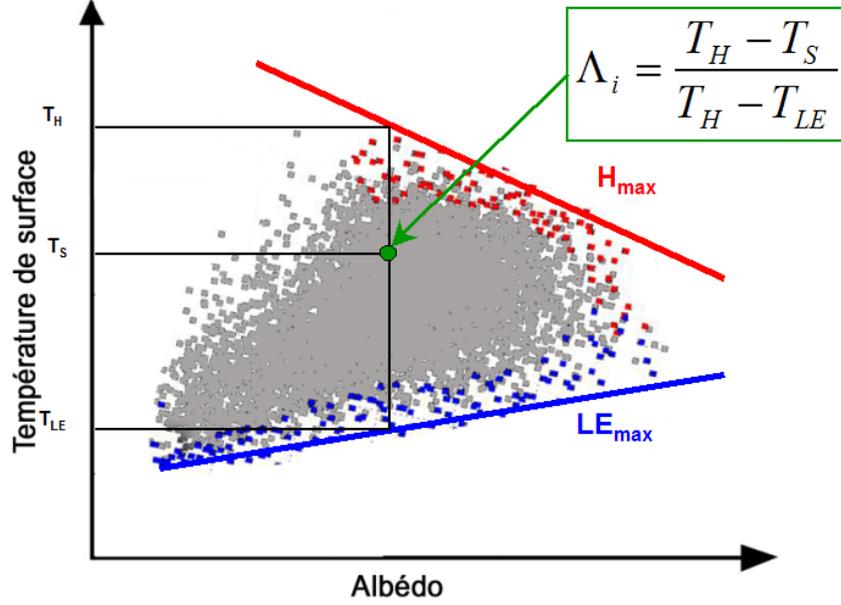


FIG. 2.6: Principes du S-SEBI : représentation schématique de la relation entre la température de surface et l'albédo. Les droites  $LET_{max}(\alpha)$  et  $H_{max}(\alpha)$  correspondent aux situations de surface parfaitement sèche ( $LE=0$ ) et parfaitement alimentées en eau ( $H=0$ ).

Les autres termes de l'équation de bilan d'énergie  $R_n$  et  $G_0$  mais aussi l'albédo ( $\alpha$ ) sont calculés par des formulations classiques explicitées par la suite (§ 2.3.2.2).

Le flux de chaleur sensible et latente ne sont pas calculés comme des variables indépendantes, mais comme une fraction évaporative ( $\lambda$ ), définie par l'équation 2.3 :

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{\lambda E + H} = \frac{\lambda E}{R_n - G_0} \quad (2.3)$$

Il a été observé que la température de surface et la réflectance (ou albédo) sont corrélées sur des zones à forçage atmosphérique constant. Les relations issues de cette corrélation peuvent être appliquées pour déterminer des propriétés de surface "efficaces" (Bastiaanssen et al., 2007; Menenti et al., 1989). Ainsi en supposant un rayonnement global et une température de l'air constants, une relation peut être déduite entre la température de surface et albédo observés.

La figure 2.6 illustre le fonctionnement de S-SEBI, dans celle-ci on observe deux

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

droites extrêmes qui définissent les deux régimes extrêmes : d'une part le régime "évaporatif" est défini par la droite  $LET_{max}(\alpha)$  où le flux de chaleur latente maximale est égale à l'énergie disponible, le flux de chaleur sensible étant proche de 0 ( $LE_{max} = R_n - G_0 / H \approx 0$ ), dans ce cas il y a peu ou pas de variation de la température de surface avec l'albédo, d'autre part le régime "radiatif" est défini par la droite  $H_{max}(\alpha)$ , où la situation s'inverse avec le flux de chaleur sensible maximale égale à l'énergie disponible et le flux de chaleur latente proche de 0 ( $H_{max} = R_n - G_0 / LE \approx 0$ ), dans ce cas la température de surface diminue quand l'albédo augmente car il y a moins d'énergie disponible. Les droites extrêmes étant définies, tout point (pixel) se situant entre ces 2 droites, on calcule alors pour un albédo donné, la fraction évaporative ( $\Lambda$ ) avec l'équation suivante :

$$\Lambda = \frac{T_H - T_0}{T_H - T_{\lambda E}} \quad (2.4)$$

Une des contraintes de cette méthode est qu'il faut disposer sur l'image suffisamment des pixels correspondants aux 2 droites extrêmes correspondantes à des situations "parfaitement" sèches et humides. Malgré la simplicité de la méthode, cette approche a donné des résultats satisfaisant dans des situations variées (Boronina and Ramillien, 2008; Gomez et al., 2005; Sobrino et al., 2007, 2005; Verstraeten et al., 2005). Plus de détails sur l'application de cette méthode seront fournis au chapitre 4 (§ 4.2.2.3).

### 2.2.2.3 Estimateur de statut hydrique : WDI

Le WDI (Water Deficit Index) introduit par Moran et al. (1994) est un indicateur de statut hydrique qui exploite les dimensions du trapèze que forment les données dans l'espace indice de végétation-température de surface. Cette méthode a été utilisée comme une extension du CWSI au cas des couverts partiellement couvrants. La méthode se base sur la représentation des pixels de l'image dans l'espace Température de surface/Taux de couverture végétale qui est approché par un indice de végétation, typiquement le *NDVI* ou le *SAVI* (§ 2.2.2.1). Cet espace comporte des limites théoriques qui sont calculées à partir d'un certain nombre de variables météorologiques (vitesse du vent, température de l'air et déficit de pression de vapeur). La représentation finale de ces limites constituent un trapèze qui est illustré sur la figure 2.7.

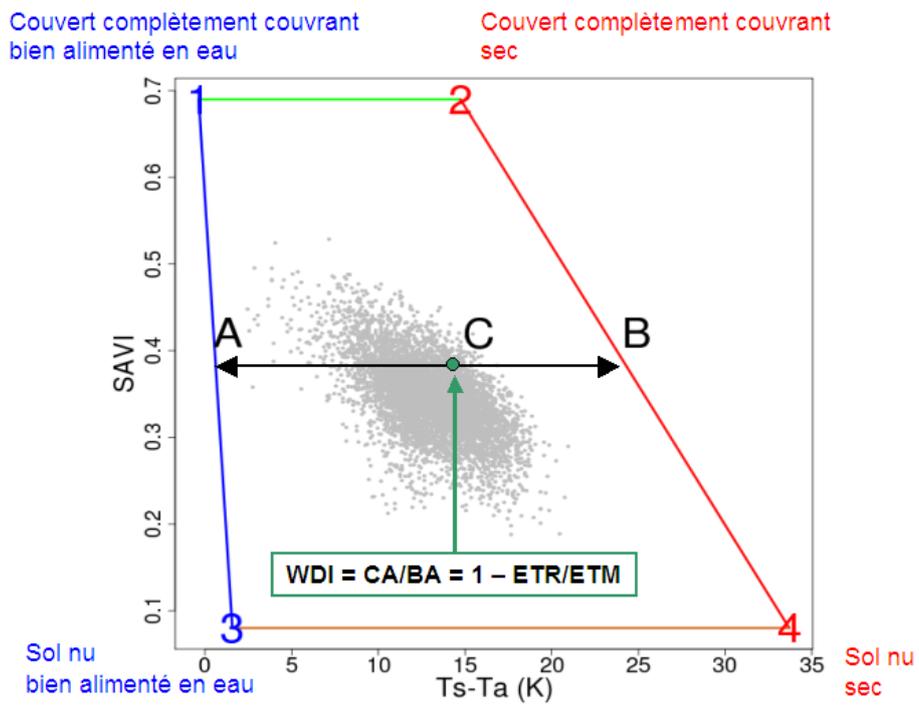


FIG. 2.7: Illustration du WDI théorique calculé par la méthode du trapèze. Les points 1-4 correspondent aux vertex théoriques représentant les situations extrêmes pour le biome représenté.

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

Ainsi pour des conditions météorologiques données et pour un couvert végétal donné, les 4 sommets du trapèze correspondent aux conditions extrêmes sol/végétation et sec/humide. Pour les estimer, [Moran et al. \(1994\)](#) appliquent l'équation de Penman-Monteith (qui est une réécriture de l'équation du bilan d'énergie), à chacun de ces 4 cas extrêmes. Les situations intermédiaires sont supposées être contenues dans le trapèze défini par les 4 droites reliant ces points extrêmes. Les équations sont alors définies :

1.  $(T_s - T_a)_1$  : correspond à une végétation complètement couvrante bien irrigué,

$$(T_s - T_a)_1 = r_a \frac{(R_n - G_0)}{C_v} \frac{\gamma(1 + \frac{r_{cp}}{r_a})}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_{cp}}{r_a})} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_{cp}}{r_a})} \quad (2.5)$$

2.  $(T_s - T_a)_2$  : correspond à une végétation complètement couvrante très stressée hydriquement,

$$(T_s - T_a)_2 = r_a \frac{(R_n - G_0)}{C_v} \frac{\gamma(1 + \frac{r_{cx}}{r_a})}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_{cx}}{r_a})} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_{cx}}{r_a})} \quad (2.6)$$

3.  $(T_s - T_a)_3$  : correspond a un sol nu complètement humide

$$(T_s - T_a)_3 = r_a \frac{(R_n - G_0)}{C_v} \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma} \quad (2.7)$$

4.  $(T_s - T_a)_4$  : correspond a un sol nu très sec.

$$(T_s - T_a)_4 = r_a \frac{(R_n - G_0)}{C_v} \quad (2.8)$$

où  $\gamma$  est la constante psychrometrique ( $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$ ),  $\Delta$  le pente de la relation déficit de pression de vapeur/température ( $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$ ), and  $VPD$  le déficit de pression de vapeur de l'air ( $\text{kPa}$ ),  $G_0$  représente le flux de chaleur dans le sol,  $r_a$  la résistance aérodynamique,  $r_{cp}$  est la résistance de couvert pour une évapotranspiration maximale ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ) équivalente à la résistance minimale du couvert et  $r_{cx}$  est la résistance de couvert maximale ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

La considération ci-dessus nous mène à obtenir à partir d'un calcul théorique (des extrêmes) et d'une estimation graphique simple (fig. 2.7), une évapotranspiration réelle en connaissant l'évapotranspiration maximale du couvert, selon l'équation 2.9.

$$WDI = 1 - \frac{ETR}{ETM} = \frac{CA}{BA} \quad (2.9)$$

Plus de détails sur l'applicabilité de la méthode seront fournis dans le chapitre 5.

Nous pouvons conclure que si calcul de WDI est en principe assez simple, il requiert la détermination des droites 1-3 et 2-4 c'est à dire la détermination des 4 points extrêmes, ce qui implique de connaître ou d'estimer un nombre assez important de variables et paramètres météorologiques et caractéristiques des surfaces étudiés (équations 2.5, 2.6, 2.7 et 2.8).

### 2.3 Démarche de validation

La validation des indicateurs spatialisée de statut hydrique est une démarche indispensable dans le but d'atteindre les objectifs fixés dans cette étude. Pour ce faire une démarche expérimentale considérant le choix de site de mesure multiples et représentatifs de la variabilité de la zone a été réalisée. Sur ceux-ci, des mesures locales ont permis direct et indirectement (via simulations) de retrouver un statut hydrique comparable à ceux obtenus par télédétection.

#### 2.3.1 Démarche expérimentale

Pour la détermination d'une démarche expérimentale cohérente avec les objectifs de la thèse, deux aspects devaient être considérés : d'une part le besoin de sites de validation pour tester de manière approfondie les méthodologies mises en œuvre, ce qui implique un travail à l'échelle de la parcelle, d'autre part le choix des parcelles. Celles-ci devaient être représentative de la variabilité des conditions hydriques sur la zone d'étude, elles devaient être de taille adéquate par rapport à la résolution spatiale du capteur ASTER et vis à vis de la possibilité d'effectuer des mesures des flux surface-atmosphère et aussi être le plus spatialement homogènes possible. Une rigoureuse sélection des parcelles test a donc été réalisée, auxquelles nous avons ajouté la dépression du bassin versant de Roujan (considérée comme un site étendu) de manière à profiter au mieux des installations permanentes de l'ORE OMERE et des travaux de thèse déjà effectués (Bsaiibes, 2007; Trambouze, 1996) notamment.

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

### 2.3.1.1 Stratégie de sélection des parcelles

Une étape fondamentale dans la réalisation de cette étude a consisté dans la sélection des sites sur lesquels les mesures locales allaient être réalisées. En effet étant impératif de capturer la plus grande variabilité possible en termes de conditions hydriques susceptibles d'être rencontrées pendant la période de développement de la vigne. Pour cela, un important nombre de facteurs a été considéré, avec pour variable principale la température de surface capturée par le satellite ASTER à 90 m de résolution. Cette tâche n'étant en rien facile du fait des conditions particulières du milieu étudié qui, comme décrit précédemment, possède une importante hétérogénéité des paramètres influant potentiellement sur le statut hydrique, à savoir : les sols, les nappes, les vignes, la taille et distributions des parcelles ainsi que le relief. Pour parvenir à ce but, plusieurs traitements ont été implémentés dans le processus de sélection des parcelles. Nous avons utilisé sept images ASTER en archives acquises au cours des années 2002, 2003, 2005 et 2006. Cette information a été croisée avec plusieurs couches d'information déjà existantes sur le bassin versant de la Payne, ainsi qu'avec les cartes de température de surface obtenue directement des produits ASTER (90 m de résolution) et corrigées dans la chaîne de traitement pour chaque date. L'intégralité des ces traitements a été réalisée avec le système d'information géographique ARCGIS 9.2. La liste suivante résume les données utilisées :

- carte de NDVI et SAVI géoreferencées
- carte de températures de surface géoreferencées
- image orthophotographique de mai 2005
- données cadastrales du bassin versant
- modèle numérique de terrain (MNT) à 10 m de résolution
- carte d'occupation des sols corrigée à partir de l'image orthophotographique (mai 2005)
- carte pédologique 1 : 25 000
- carte du réseau hydrographique
- carte du réseau de piezomètres implanté lors de la thèse de [Guix \(2005\)](#)

Une analyse détaillée a ainsi été menée dans laquelle un premier jeu de 13 parcelles de vignes a été choisi en considérant les critères suivants :

- la surface des parcelles devait être considérablement supérieure aux pixels ASTER (8100 m<sup>2</sup>)
- une homogénéité intra-parcellaire était exigée. Elle a été établie à l'aide des observations télé-détecté de couverture végétale et de température de surface. Des cartes de variabilités en fonctions des pixels environnants ont servi pour quantifier l'homogénéité des sites étudiés.
- l'éloignement des sources probables d'interférence du signal capturé dans le pixel de 90 m a été considéré, par exemple par l'éloignement des routes, des bâtiments ainsi que de groupes importants d'arbres.
- une gamme de variabilité de la température de surface, représentative de la variabilité capturée à l'intérieur du bassin versant a été considérée lors du choix des parcelles, en considérant particulièrement l'image du 15 août 2005, période pendant laquelle les plus grandes différences de température (en lien avec la condition hydrique) était espérée. Plus de 15°C de différence a été enregistré ce jour.
- le type de sols en conjonction avec l'information piezométrique, a été considéré dans la sélection des sites en essayant de prendre en compte les grands types de sols (voir § 2.1.4) avec et sans présence de nappes.
- un dernier aspect pris en compte étant la topographie des sites. Les sites relativement plats ont été privilégiés pour diminuer les sources d'erreur dans le signal capturé, ainsi que dans les flux modélisés par la suite.

### 2.3.1.2 Sélection in-situ

Une fois la sélection théorique des parcelles établie, nous avons procédé à des visites de terrain avec l'aide de l'expertise de Guillaume Coulouma, pédologue au LISAH, pour vérifier les estimations établies avec l'information SIG et satellitaire. Lors de cette campagne de terrain, un certain nombre de critères ont été appliqués pour la sélection finale des sites :

- vérification générale de la surface, topographie, et probables sources d'interférences ;
- vérification agronomique de l'état d'entretien et sanitaire des parcelles ;
- choix de parcelles de vigne en âge de production (plus de 5 ans) ;
- mode de conduite en palissade, de préférence à distance inter-rang de 2.5 m ;
- les parcelles à choisir devait impérativement ne pas avoir de système d'irrigation ;

## **2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE**

---

- l'homogénéité de cépages n'a pu être obtenue à cause du nombre limité de parcelles compatibles avec les autres critères.

De cette sélection menée sur le terrain, 6 sites ont finalement été retenus pour leur compatibilité avec les critères mentionnés. Un site supplémentaire correspondant au site de l'ORE OMERE a été retenu du fait du dispositif expérimental existant et qui sera décrit par la suite. Il est important de signaler qu'un plus grand nombre de parcelles aurait difficilement été possible de considérer, du fait de la difficulté d'obtenir les caractéristiques voulues. De plus il faut signaler que la faisabilité des mesures sur un plus grand nombre de sites aurait été impossible d'accomplir en une seule journée par un seul opérateur. Un dernier aspect à prendre en compte était l'obtention de l'accord de chacun des viticulteurs concernés par l'étude. L'identification de ceux-ci a été réalisée grâce à l'information cadastrale. Après réunion et explication des objectifs et attentes de notre étude, tous les viticulteurs ont accepté de nous permettre de travailler sur leur parcelles.

### **2.3.1.3 Description des parcelles choisies**

Les sites finalement choisies peuvent être séparées en trois groupes en fonction de leur prédisposition à subir ou non une contrainte hydrique :

- sites à haute probabilité de subir une contrainte hydrique ou sites "chauds"
- sites à probabilité moyenne de subir une contrainte hydrique ou sites "moyens"
- sites à faible probabilité de subir une contrainte hydrique ou sites "froids"

Cette classification a été établie en fonction des critères de sélection, ainsi que des observations sur le terrain. La figure 2.8 résume la localisation des sites choisies ainsi que sa classification selon les critères mentionnés ci-dessus. Nous donnons une description détaillée de chacun des sites dans l'annexe A, le tableau 2.4 résume les aspects les plus relevant pour notre étude.

### **2.3.2 Protocoles expérimentaux**

#### **2.3.2.1 Mesures météorologiques**

Les mesures météorologiques ont été réalisées par une station automatique CIMEL ENERCO 400, appartenant au réseau agrométéorologique de l'INRA-Agroclimatologie.

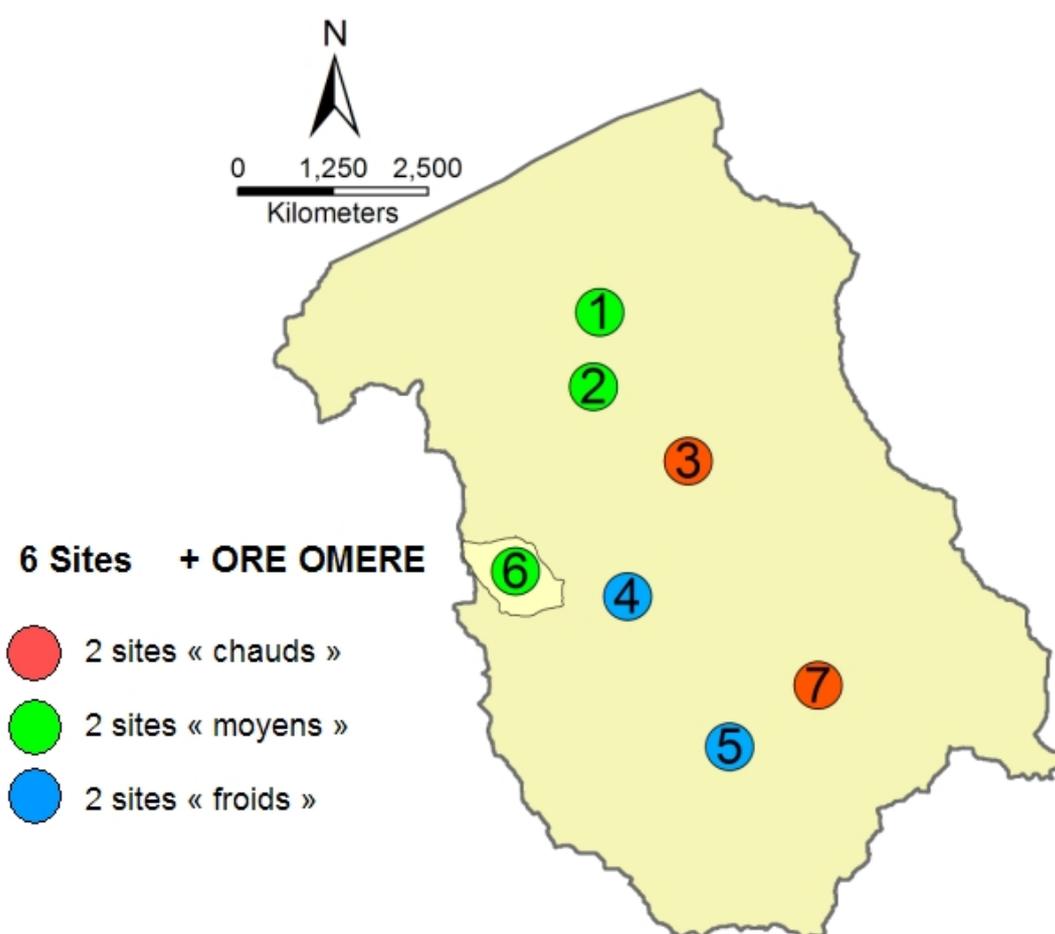


FIG. 2.8: Localisation des sites représentant la variabilité des conditions hydriques du bassin de la Peyne sélectionnés pour la réalisation des mesures terrain.

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

Site	Surface (m <sup>2</sup> )	Orientation (°)	Pente (%)	Textures	Nappe	Enherbement (période)	Cépage	Stock hydrique	Age (années)	Stress hydrique
-				-	-					
1	32701	343	< 5	limono- sablenses	I	oui (printemps)	Syrah	faible	> 5	moyen (fort)
2	74966	42	< 5	argiles- caillouteux	II	non	Grenache blanc	faible	> 10	moyen
3	29984	343	∈ [5,10]	limono- sablenses	I	oui (hiver)	Cabernet franc	faible	> 10	fort
4	53851	24	< 5	limono- argileuse	III	oui (annuel)	Cabernet sauvignon	fort	> 15	faible
5	81052	35	∈ [5,10]	argileuse	II	oui (annuel)	Merlot	fort	> 5	faible
6	145821	variable	< 5	limono- sablenses	II	variable	variable	moyen	> 5	moyen
7	92312	318	< 5	limono- sablenses	I	oui (hiver)	Cabernet sauvignon	faible	> 15	fort

TAB. 2.4: Résumé des caractéristiques viticoles et pédologiques des sites de mesure.

Elle a été installée en juin 1992 à l'exutoire du bassin versant de Roujan et elle a été remplacée par un modèle plus récent à partir de juillet 2007. La station possède 6 capteurs : un pyranomètre pour mesurer le rayonnement global, un thermomètre pour mesurer la température de l'air à 2 m, un hygromètre pour l'humidité relative de l'air et un anémomètre à coupelles et girouette pour mesurer la vitesse et la direction du vent. Le dernier capteur concerne la pluie qui est mesurée par un pluviomètre. L'information en provenance d'une deuxième station faisant partie du réseau Météo-France situé à Pézenas à 10 km de la station de Roujan et en bordure du bassin versant de la Peyne (zone d'étude) a été utilisée pour estimer la variabilité spatiale de variables météorologiques. Les résultats de cette analyse seront exposés au chapitre 5.

### 2.3.2.2 Mesure de l'énergie disponible

L'énergie disponible correspond à la différence entre le rayonnement net et le flux de chaleur dans le sol. Le rayonnement net correspond au bilan radiatif à la surface selon l'équation 2.10 :

$$R_n = (1 - \alpha_s)R_g + \varepsilon_s(R_a - \sigma T_s^4) \quad (2.10)$$

où  $\alpha_s$  est l'albédo,  $R_g$  est le rayonnement global,  $R_a$  est le rayonnement atmosphérique,  $\varepsilon_s$  est l'émissivité de surface, et  $T_s$  la température de surface.

L'énergie disponible pour la surface terrestre correspond alors au résultat du bilan des rayonnements reçus et perdus par le sol par conduction thermique. Cette énergie est utilisée par la photosynthèse (moins de 1%) mais surtout par à l'évaporation et à la transpiration des plantes (74%) et aux échanges de chaleur par convection (25%) (Chamayou, 1994).

Le rayonnement net peut être mesuré directement par un bilanmètre sur un site ponctuel ou peut être estimé à partir de l'information télédétection. Dans notre étude nous avons eu recours aux deux méthodes. Le rayonnement net a donc été mesuré en continu sur l'une des parcelles de vigne du site 6 (figure 2.13) grâce un bilanmètre CNR1 (Kipp and Zonen). Celui-ci était placé juste au dessus le rang de vigne à une hauteur de 2 m, seul endroit possible pour mesurer en continu le rayonnement net sur vigne en considérant les passages de tracteurs. Un deuxième appareil du type NRLite (Kipp and Zonen) a été placé sur le site 7 pendant plusieurs jours des saisons 2007-2008, à

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

une hauteur variant entre 2 et 2.5 m. Cette fois le bilanmètre à été placé à 65 cm du rang, de façon à capturer le signal composite sol-végétation. Le pas de temps de mesure était d'une seconde et les mesures étaient intégrées toutes les 15 minutes. Les valeurs de coefficient d'étalonnage constructeurs ont été appliquées à chacun de ces appareils.

Pour le calcul du rayonnement net à partir des mesures de télédétection il faut considérer qu'il est composé de plusieurs variables (eq 2.10). Ceux-ci implique qu'un certain nombre de calculs intermédiaires sont nécessaires pour estimer le rayonnement net. Pour cela nous avons utilisé des formulations décrites dans la littérature utilisant l'information télédétection.

- Albédo : à la base, il a été calculé à partir de l'équation de [Liang et al. \(2003\)](#) (Eq. 2.11) qui a publié une revue des coefficients pour le calcul des albédos, validés par des mesures de terrain, pour plusieurs types de capteurs de télédétection. Dans cette étude un  $R^2$  de 0.84 et une erreur relative de 0.019 a été obtenue, ce qui nous a conduit à retenir cet algorithme :

$$\alpha_s = 0.484\alpha_1 + 0.335\alpha_3 - 0.324\alpha_5 + 0.551\alpha_6 + 0.305\alpha_8 - 0.367\alpha_9 - 0.0015 \quad (2.11)$$

où  $\alpha_i$  correspondent aux bandes ASTER (voir tableau 2.2) et les coefficients sont spécifiques au capteur ASTER.

Après la défaillance du capteur SWIR d'ASTER à partir de mai 2008, les bandes 5, 6, 8 et 9 ont été indisponibles ce qui nous a obligé à une adaptation pour obtenir un albédo cohérent avec celui de [Liang et al. \(2003\)](#). Pour cela nous avons eu recours à l'algorithme utilisé et validé par [Weiss et al. \(1999\)](#) (équation 2.12) qui utilise deux bandes, une du visible et une du proche infra-rouge.

$$\alpha_{s2} = 0.57\rho_{red} + 0.42\rho_{nir} \quad (2.12)$$

où  $\rho_{red}$  représente la bande spectrale du rouge et  $\rho_{nir}$  celle du proche infrarouge. Dans notre cas nous les avons remplacées par la bandes  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$  respectivement (voir tableau 2.2).

Nous avons utilisé l'information de toutes les images antérieures à mai 2008, incluant les images d'archives, pour obtenir une régression entre les deux méthodes de calcul, en incluant tous les pixels de toutes les images disponibles. La droite

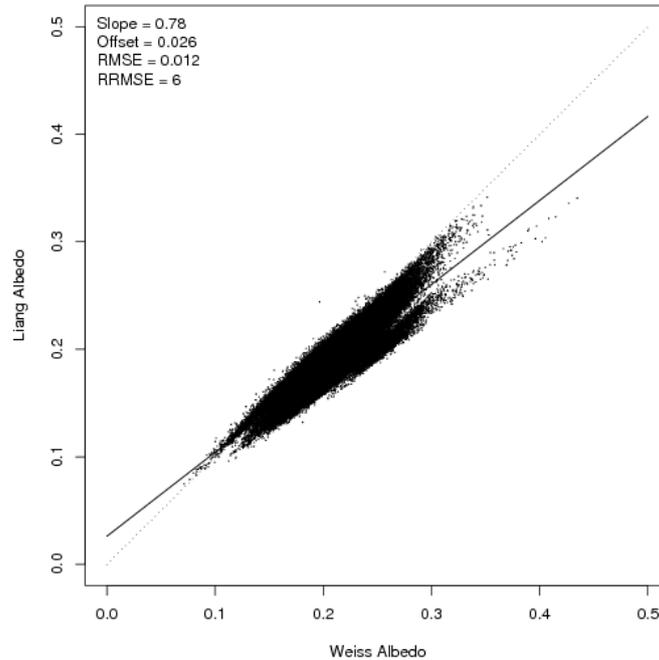


FIG. 2.9: Régression entre l'ensemble des albédos calculés par la méthode de [Liang et al. \(2003\)](#) et la méthode [Weiss et al. \(1999\)](#). Les coefficients pour la pente et offset sont représentés ainsi que l'erreur RMSE et l'erreur relative RRMSE.

de régression suivante a été obtenue (Fig. 2.9) avec un coefficient de corrélation  $R$  de 0.90, un RMSE de 0.012 et un RMSE relatif de 6%. Les albédos des images postérieures à mai 2008 ont été calculés par la méthode de [Weiss et al. \(1999\)](#) et corrigés à l'aide de cette régression.

- Émissivité : le calcul de l'émissivité a été réalisé en utilisant la formule développée par [Ogawa et al. \(2003\)](#) (Eq. 2.13) pour les bandes ASTER. L'auteur utilise l'information multispectrale du capteur infrarouge thermique ASTER en considérant toutes les bandes :

$$\varepsilon = 0.014\alpha_{10} + 0.145\alpha_{11} + 0.241\alpha_{12} + 0.467\alpha_{13} + 0.004\alpha_{14} + 0.128 \quad (2.13)$$

où  $\alpha_i$  correspondent aux bandes ASTER (voir tableau 2.2) et les coefficients sont spécifiques au capteur ASTER. Des cartes d'émissivité pour chaque passage AS-

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

TER ont été ainsi calculées.

- Rayonnement atmosphérique : la formulation de [Brutsaert \(1975\)](#) a été utilisée dans cette étude (équation 2.14). Cette fois, il ne s'agit pas d'une variable spatialisée mais d'une variable unique pour toute la zone d'étude calculé à partir des données de la station météorologique du site 6 à l'heure des passages satellite.

$$R_a = 1.24 \left( \frac{10e_a}{T_a} \right)^{1/7} \sigma T_a \quad (2.14)$$

Dans cette équation  $e_a$  désigne la pression partielle de vapeur d'eau (kPa) et  $T_a$  la température de l'air (K), les deux mesurées à 2 m sous abri, tandis que  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann.

A partir des variables calculées précédemment, des cartes de rayonnement net peuvent être produites pour chacune des dates de passage ASTER grâce à l'équation 2.10. Cette approche de calcul spatial du rayonnement net a été validée dans plusieurs travaux ([Bastiaanssen et al., 1998b](#); [Gomez et al., 2005](#); [Jacob et al., 2002a](#); [Su, 2002](#); [Timmermans et al., 2007](#)). Des cartes de rayonnement net sont alors produites comme celle présentée dans la figure 2.10.

La seconde composante de l'énergie disponible à la surface terrestre est le flux de chaleur dans le sol ( $G_0$ ). Il représente entre 10 à 30 % du rayonnement net, et il peut être relativement important dans un contexte viticole où le sol nu représente plus de la moitié de la surface exposée. Le flux  $G_0$  est caractérisé par des variations spatiales au sein de la parcelle importantes puisque sa valeur est fortement dépendante de la position par rapport aux rangs de vigne. Sa valeur sera fortement influencée par la présence d'enherbement mais aussi par l'état de surface dans l'inter-rang c'est à dire si le sol a été travaillé ou non.

Dans notre étude, des capteurs de flux de chaleur dans le sol ( $G_0$ ) ont été installés sur deux de nos sites. Un premier point de mesure était situé sous la vigne d'une des parcelles du site 6. Comme pour les mesures de rayonnement net, l'installation de celui-ci a été conditionné par les passages des machines dans l'inter-rang ne permettant d'avoir une mesure continue du flux de chaleur dans le sol que seulement sous le rang. L'appareil HFP01 (Huskeflux) a été installé à 5 cm de profondeur en essayant de ne pas

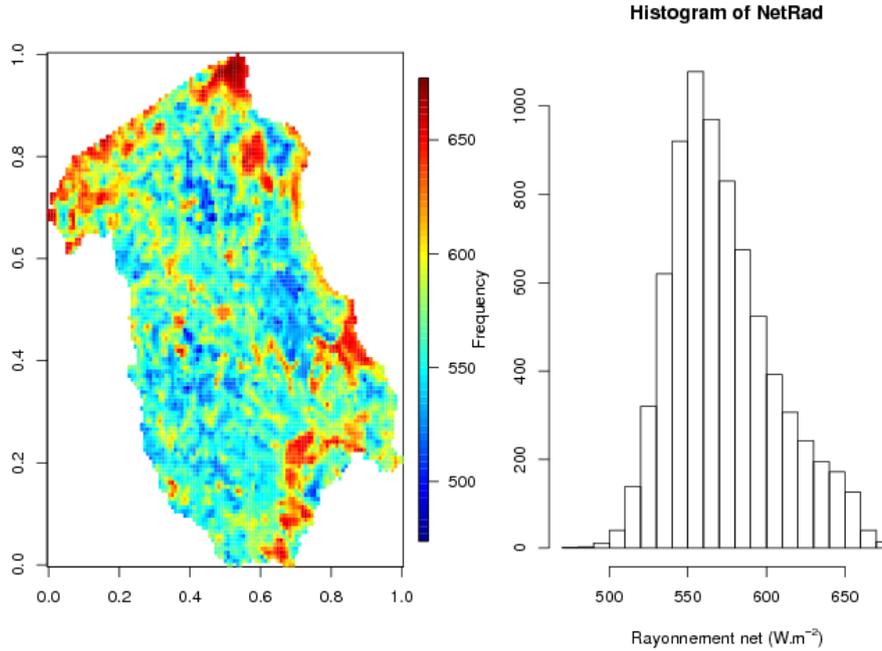


FIG. 2.10: Carte et histogramme du rayonnement net du 22 juin 2008 ( $\text{W.m}^2$ ) sur le bassin versant de la Peyne.

perturber la structure du sol. Aucune correction a été utilisé pour la couche 0-5 cm. Trois points de mesures placés sur le site 7 à chaque installation de la station de mesure des flux turbulents, permettant d’obtenir des mesures de flux de chaleur dans le sol dans 3 points situés à 75, 150 et 2 cm du rang, permettant une mesure représentative rang-inter-rang. Ces deux dernières se sont avérée très utiles puisqu’elles ont permis d’avoir des mesures dans l’inter-rang où les flux sont beaucoup plus importants.

Un deuxième type d’estimation du flux de chaleur dans le sol  $G_0$  est l’estimation à partir de mesures télédétection. Pour la réalisation de celle ci nous avons utilisé la formulation donnée par [Clothier \(1986\)](#) :

$$G_0 = R_n(0.295 - 0.01331 * (\alpha_3/\alpha_2)) \quad (2.15)$$

où  $R_n$  est le rayonnement net, où  $\alpha_i$  correspondent aux bandes ASTER (voir [tableau 2.2](#)).

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

### 2.3.2.3 Mesures des flux convectifs

La méthode des covariances turbulentes est considérée comme la méthode de mesure de référence des flux échangés avec l'atmosphère car elle permet une estimation directe des densités de flux, sans hypothèse sur la forme des profils et sur les diffusivités turbulentes. Nous allons donner une description des principes généraux, une description détaillée pouvant être retrouvée dans [Brunet et al. \(1995\)](#) et dans [Dijk et al. \(2004\)](#).

Le phénomène de turbulence atmosphérique assure les échanges de matière et d'énergie entre la surface et l'atmosphère. Des grandeurs vectorielles (vitesse du vent) et scalaires (température, concentrations en gaz) composantes de la turbulence atmosphérique, fluctuent en permanence, ce qui peut être montré par des mesures à une fréquence élevée. La décomposition de Reynolds est utilisée pour analyser ces variables et comprendre comment elles peuvent engendrer un flux. Elle se base sur la décomposition des valeurs instantanées en une valeur moyenne et une fluctuation par rapport à cette moyenne. Par exemple, pour la vitesse verticale du vent  $w$  et une variable scalaire  $c$  (température, humidité,  $[\text{CO}_2]$ )

$$w = \bar{w} + w' \quad (2.16)$$

$$c = \bar{c} + c' \quad (2.17)$$

où  $w'$  et  $c'$  sont les fluctuations instantanées des grandeurs  $w$  et  $c$  autour de leurs moyennes respectives  $\bar{w}$  et  $\bar{c}$ . En faisant l'hypothèse d'une couche limite homogène, la densité de flux moyenne  $\overline{F_c}$  s'écrit sous la forme :

$$\overline{F_c} = \overline{w'c'} \quad (2.18)$$

Le flux vertical s'exprime alors comme la covariance entre les fluctuations de la vitesse du vent et celles de la grandeur scalaire considérée ([Brunet et al., 1995](#)). Elle s'applique à toute variable. Ainsi, pour :

- la quantité de mouvement (en  $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$ )

$$\tau = -\overline{\rho u'w'} \quad (2.19)$$

où  $\tau$  est appelée contrainte de cisaillement et  $\rho$  est la densité de l'air. La vitesse de frottement  $u^*$  est définie par :

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (2.20)$$

– la chaleur sensible (en  $\text{W.m}^{-2}$ )

$$H = \rho C_p \overline{w'T} \quad (2.21)$$

où  $T$  est la température ( $K$ ) et  $C_p$  la chaleur spécifique de l'air à pression constante ( $\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ )

– la chaleur latente (en  $\text{W.m}^{-2}$ )

$$LE = L\rho \overline{w'q'} \quad (2.22)$$

où  $q$  est l'humidité spécifique de l'air ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ) et  $L$  la chaleur latente de vaporisation de l'eau ( $\text{J.kg}^{-1}$ ), et  $E$  le flux de vapeur d'eau ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) ou évapotranspiration (ETR)

Son inconvénient est qu'elle nécessite des instruments relativement coûteux et de manipulation par du personnel qualifié et qu'elle génère un volume de données très important, lié à la haute fréquence de mesure. Pour obtenir des mesure de qualité, deux conditions doivent être satisfaite :

– la fréquence d'échantillonnage : doit être suffisamment élevée pour capturer les composantes à haute fréquence. Le critère habituellement proposé est :

$$f \approx 10 \frac{u}{z_m} \quad (2.23)$$

où  $f$  est la fréquence d'échantillonnage (Hz),  $u$  la moyenne de la vitesse horizontale du vent ( $\text{m.s}^{-1}$ ) et  $z_m$  est la hauteur de mesure (m) (Brunet et al., 1995).

– le temps d'intégration du signal, temps sur lequel sont calculées les covariances, doit être suffisamment grand pour prendre en compte les composantes à basse fréquence. Le critère habituellement proposé est :

$$t \approx 1000 \frac{z}{u} \quad (2.24)$$

où  $t$  est le temps d'intégration.

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---



FIG. 2.11: Station de flux par covariances turbulentes sur le site 7

Deux sites ont fait l'objet de ce type de suivi, la dépression de Roujan (site 6) et le site 7.

La station de mesure du site 6 comporte un mât de 6.2 m de hauteur installé au centre de la dépression, légèrement décalé vers le Sud-Est pour mieux tenir compte des vents dominants du Nord-Ouest. Au sommet du mât les appareils suivants sont installées :

- un anémomètre sonique 3D (Young 8100), capable de mesurer les composantes du vent dans ses trois directions  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ainsi que la température de l'air.
- un hygromètre (Licor LI7500) pour la mesure des concentrations de vapeur d'eau et de  $\text{CO}_2$

La fréquence d'acquisition des données est de 10 Hz, l'étalonnage du constructeur a été considéré. Cette station faisant partie de l'observatoire ORE OMERE ([Voltz and Albergel, 2002](#)), elle enregistre en continu depuis septembre 2005 ce qui nous a permis d'avoir un jeu de donnée pratiquement continu durant toute la durée de l'expérimentation (juillet 2007 à octobre 2008).

La deuxième station située, sur le site 7, a été installée à plusieurs reprises pendant

## 2.3 Démarche de validation

Installation	Date début (YYYY-MM-DD)	Date fin (YYYY-MM-DD)
1	2007-07-07	2007-07-16
2	2007-07-27	2007-07-30
3	2007-08-13	2007-08-16
4	2007-09-14	2007-09-17
5	2008-04-24	2008-04-28
6	2008-06-12	2008-06-16
7	2008-06-27	2008-07-01
8	2008-07-14	2008-07-17
9	2008-08-08	2008-08-11
10	2008-08-25	2008-08-27
11	2008-09-01	2008-09-03

TAB. 2.5: Résumé des dates d'installation de la station située au site 7.

la saison 2007-2008 de préférence autour des passages ASTER. la hauteur d'installation des appareils a été variable en fonction de la période, entre 2.4 et 3.1 m.

- un anémomètre sonique 3D (Young 8100), capable de mesurer les composantes du vent dans ses trois directions x, y, z ainsi que la température de l'air.
- un hygromètre (KH<sub>2</sub>O) pour la mesure de la concentration de vapeur d'eau.

La fréquence d'acquisition des données est de 20 Hz, l'étalonnage, correspond aux données constructeur. Les périodes présentées dans le tableau 2.5 ont été enregistrées.

Ces dates correspondaient à la programmation du satellite ASTER, cependant celle-ci a été décalée sans préavis pendant l'année 2008 ce qui a malheureusement conditionné une partie de notre étude en limitant nos points de validation sur une période non-négligeable de l'expérimentation. La station de mesure des flux n'était en place sur le site 7 que pour 4 des 12 dates d'acquisition ASTER. Le traitement des données permettant d'obtenir des flux a été effectué avec la bibliothèque ECPACK (Dijk et al., 2004), développé aux Pays Bas par le "Joint Eddy covariance Project" qui regroupe le Royal Netherlands Meteorological Institute, les universités de Wageningen et de Utrecht. L'ensemble des calculs ont été réalisés par L. Prévot.

Le calculs ont été réalisés à 2 pas de temps pour chaque site : Pour le site 6 ils ont été effectuées à 30 min et à 60 min, tandis que pour le site 7 ils ont été effectuées à

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

15 min et à 30 min, ces différences étant liées à la hauteur de mesure. Dans les deux cas les corrections suivantes ont été réalisées :

- prise en compte de la distance entre l'anémomètre sonique et l'hygromètre (0.15 m)
- prise en compte des composantes basse fréquence ("linear detrend")
- prise en compte de l'effet de l'humidité sur la température mesurée par l'anémomètre sonique
- rotation du système de coordonnées de façon à annuler les valeurs moyennes des composantes radiale ( $v$ ) et verticale ( $w$ ) de la vitesse du vent, ainsi que la covariance  $\langle w',v' \rangle$
- correction de la vitesse verticale moyenne (Webb term)

De cette manière, les flux de quantité de mouvement, de chaleur sensible ( $H$ ), et de chaleur latente ( $LE$ ) ont été obtenus et utilisés pour la suite de cette étude.

### 2.3.3 Modélisation des transferts hydriques

Dans un couvert végétal, en particulier celui de la vigne, l'évaporation et la transpiration dépendent de la répartition de l'énergie disponible entre le sol et la plante ce qui dépend de la structure géométrique de ce couvert. Celle-ci dépend du cépage, de l'orientation des rangs, de la distance de plantation et du mode de conduite. Les transferts radiatifs sont directement concernés par cette structure (Champagnol, 1984; Smart, 1973), mais aussi les transferts aérodynamiques (Riou et al., 1987; Weiss and Allen, 1976) ainsi que les flux conductifs et convectifs qui en résultent. En considérant l'ensemble de ces éléments il s'avère nécessaire de choisir un modèle de transferts hydriques adaptée à la vigne. Pour cela l'utilisation classique de la loi de Beer-Lambert ne semble pas adapté à notre contexte d'étude puisqu'elle se base sur la répartition homogène des diffuseurs. Elle est donc inadaptée aux cultures en rang car elle sous-estime l'interception du rayonnement par leurs parois verticales. Ceci nous a conduit à choisir une approche mieux adaptée aux cultures en rang, en adoptant le couplage du modèle d'interception de Riou, spécifiquement adapté à la vigne avec un modèle mécaniste de transfert hydrique dans le sol (HYDRUS-1D). La même approche a été suivie par Bsaiibes (2007) pour simuler les transferts hydriques des parcelles de vigne du bassin versant de Roujan.

Dans le cas des parcelles de friche et blé du bassin versant de Roujan le rayonnement incident a été partagé entre le sol et la végétation simplement en fonction du taux de couverture par la végétation. Les valeurs de  $LAI$  adoptées étaient basées sur le taux de couverture estimé par télédétection (NDVI) et les valeurs qui y correspondent dans la littérature.

### 2.3.3.1 Modèle d'interception de Riou

Dans un premier temps le modèle de [Riou et al. \(1989\)](#) a été considéré pour estimer la part de rayonnement intercepté par le couvert végétal d'une culture en rangs. Il assimile les rangs de vigne à des parallélépipèdes rectangles de longueur infinie, prenant en compte des paramètres de type :

- morphologiques : dimensions du parallélépipède (hauteur, largeur, inter-rang, porosité du feuillage)
- géographiques : latitude, angle solaire, angle de l'orientation des rangs avec le Nord.
- météorologiques : rayonnement global horaire et journalier

Le rayonnement intercepté ( $R_i$ ) par la vigne est calculé en fonction de la trajectoire du soleil et des paramètres morphologiques des rangs de vigne. L'équation 2.25 résume l'intégration de la course du soleil  $\lambda_r$  qui servira par la suite à calculer  $R_i$  en tenant compte des proportions géométriques du couvert.

$$\lambda_r = \frac{I_v}{I_h} \quad (2.25)$$

où  $I_v$  est le rayonnement solaire incident sur une surface verticale et  $I_h$  le rayonnement reçu par une surface horizontale. Enfin, le rayonnement global ( $R_g$ ), les albédos du sol et du feuillage ( $\alpha_s, \alpha_v$ ) servent à convertir  $R_i$  en rayonnement absorbé ( $R_{av}$ ), qui permet donc de calculer le rayonnement arrivant au sol par soustraction avec le rayonnement total incident ( $R_g$ ).

L'approche de [Riou et al. \(1994\)](#) à été appliquée pour déterminer une évaporation potentielle ce qui nous permet d'obtenir de façon résiduelle une transpiration potentielle à partir de l'évapotranspiration potentielle calculé par l'approche de Penman. L'équation 2.26 permet donc d'obtenir une évaporation potentielle  $E_p$  en conditions de non stress hydrique :

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

$$E_p = ET^* \frac{R_v}{(1 - a_v)R_g} \quad (2.26)$$

où  $ET^*$  est l'évapotranspiration de référence (selon Penman),  $R_v$  est le rayonnement solaire absorbé par la vigne,  $a_v$  est l'albédo de la végétation (pour la vigne il est fixé à 0.2) et  $R_g$  est le rayonnement global. Le rayonnement solaire absorbé par la vigne  $R_v$ , a été calculé à chaque pas de temps par le modèle géométrique d'interception de [Riou et al. \(1989\)](#) afin de simuler l'interception de lumière par un vignes en rang. En relation à l'orientation des rangs des vignes, [Smart \(1973\)](#) et [Champagnol \(1984\)](#) ont montré l'effet de l'orientation des rangs, sur l'interception du rayonnement solaire, en considérant le rang comme un parallélépipède plein. Ils ont montré la variation de la distribution du rayonnement solaire au cours de la journée, mais aussi au cours de la saison. En effet en début d'été, les rangs orientés Nord-Sud interceptent plus de rayonnement qu'une vigne plantée dans la direction Est-Ouest. Selon [Smart \(1973\)](#) en milieu sec les conséquences de l'orientation des vignes peuvent être importantes, une orientation Nord-Sud favorise l'interception du rayonnement dans la matinée et l'après midi. C'est l'inverse pour une vigne orientée Est-Ouest, où la demande climatique imposée aux vignes par le rayonnement coïncide avec le pic de déficit hydrique de l'atmosphère en milieu de journée. En fin de saison, interception du rayonnement est meilleure pour une vigne orientée Est-Ouest que Nord-Sud.

Finalement on peut conclure que le modèle d'interception de Riou permet de décomposer, pour une vigne en rang, l'évapotranspiration de référence  $ET^*$  (Penman) en évaporation de référence  $E_p$  et transpiration de référence  $T_p$  (végétation) en considérant l'équation 2.27.

$$ET^* = E_p + T_p \quad (2.27)$$

### 2.3.3.2 Modèle HYDRUS-1D

Le modèle uni-dimensionnel de transferts hydriques HYDRUS-1D (version 4.0) de [Simunek et al. \(2008\)](#) a été utilisé dans cette étude. Le modèle comporte plusieurs ensembles, chacun d'eux définis par des équations spécifiques, permettant d'obtenir, dans le cadre de notre étude, des simulation en continu des profils d'humidité des sols et des transpiration et évaporation réelles, élément essentiel dans l'obtention du statut

hydrique.

- **flux hydriques dans le sol** : le modèle est basé sur l'équation à une dimension de Richards (1931) pour le calcul des transferts hydriques dans le milieu insaturé. L'équation des flux d'eau de HYDRUS-1D inclue un terme source, lié à l'absorption racinaire des plantes. Le flux est supposé vertical et les gradients thermiques sont négligés. L'équation 2.28 en résulte :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] - S(h) \quad (2.28)$$

où  $\theta$  est le contenu volumique d'eau,  $t$  est le pas de temps,  $z$  est la coordonnée verticale,  $h$  est la pression (ou tension) de l'eau dans le sol et  $K$  est la conductivité hydraulique. Le terme  $S(h)$  correspond au volume d'eau extrait par le système racinaire, par unité de volume de sol et par unité de temps.

- **extraction racinaire** : la fonction de Feddes et al. (1978) a été utilisée pour la détermination du terme puits  $S(h)$ .

$$S(h) = a(h)S^* \quad (2.29)$$

où  $a(h)$  est le coefficient de réduction de l'extraction racinaire, fonction de la pression matricielle de l'eau ( $h$ ),

$$S^* = \frac{1}{L_r} T_p \quad (2.30)$$

l'extraction racinaire potentielle au noeud de calcul considéré,  $S^*$ , fonction de la transpiration potentielle totale  $T_p$  (obtenue préalablement par le modèle d'interception de Riou section 2.3.3.1).  $S^*$  est considéré comme étant distribuée de façon homogène sur la profondeur totale racinaire  $L_r$ .

La fonction de réponse au stress hydrique  $a(h)$  (figure 2.12) est une fonction adimensionnelle dépendant de la pression matricielle de l'eau,  $a(h) \in [0, 1]$ . C'est une fonction linéaire de  $h$  entre les valeurs seuils  $h_1$  et  $h_2$  et entre  $h_3$  et  $h_4$ . La valeur seuil  $h_1$  correspond à la valeur de charge sous laquelle les racines commencent à extraire l'eau du sol, tandis que  $h_2$  est la valeur de hauteur de charge sous laquelle les racines extraient l'eau au taux maximale possible. La valeur  $h_3$  correspond

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

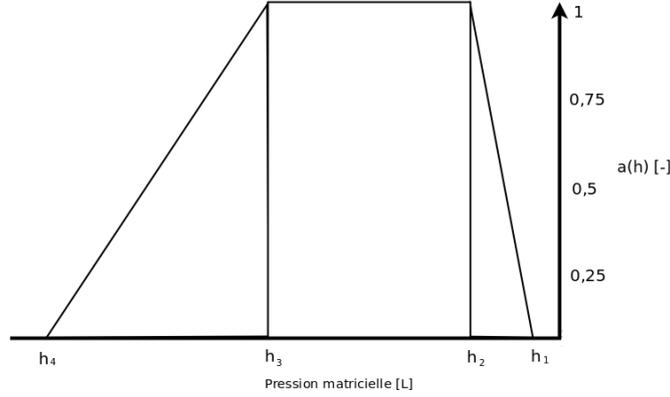


FIG. 2.12: Représentation de la fonction de réponse au stress hydrique  $a(h)$  défini par Feddes et al. (1978). Les valeurs de  $h_1, h_2, h_3, h_4$  sont définies dans le texte

à la valeur limite de hauteur de charge sous laquelle l'extraction racinaire ne se fait plus à la vitesse maximale alors que la valeur  $h_4$  correspond à la valeur seuil sous laquelle les racines n'ont plus la capacité d'absorber de l'eau, où point de flétrissement permanent.

- **propriétés hydrodynamiques du sols** : courbe de rétention  $\theta_v(h)$  et conductivité hydraulique  $K(h)$  sont représentées par les fonctions van Genuchten (1980) :

$$\theta_v(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < h_s \\ \theta_s & h \geq h_s \end{cases} \quad (2.31)$$

$$K(h) = K_s S_e^{0.5} \left[ 1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad S_e = \frac{\theta_v - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.32)$$

où  $h_s$  est la hauteur de charge à l'entrée d'air, avec une valeur de 0 dans notre cas,  $\theta_r$  et  $\theta_s$  correspondent à la teneur en eau volumique résiduelle et à saturation ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ), respectivement,  $\alpha$  est un paramètre empirique représentant l'inverse d'une pression d'entrée d'air ( $\text{mm}^{-1}$ ),  $n$  est un paramètre empirique représentant la distribution de la taille des pores et  $m$  un paramètre empirique fonction de  $n$ . Ces derniers paramètres interviennent dans la forme du profil. La fonction de conductivité hydraulique en conditions non saturées est définie par le modèle de Mualem (1976), modèle statistique de distribution de la taille des pores. Enfin,  $K_s$  est la conductivité hydraulique à saturation ( $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ ) et  $S_e$  est le contenu

d'eau dans le sol ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ).

- **représentation de la condition limite supérieure** : les flux d'eau à travers la surface du sol est contrôlée par des variables externes tels l'intensité des précipitations, évaporation et transpiration potentielle et les propriétés hydrodynamiques de la couche de surface. La condition limite du sol fluctue à partir d'un flux dépendant de l'évaporation et la transpiration à une condition de charge lorsque des précipitations se produisent et inversement. En absence d'eau superficielle, la condition limite est obtenue en limitant la valeur absolue du flux par les conditions de [Neuman et al. \(1974\)](#) :

$$\begin{aligned} | -K \frac{\partial h}{\partial z} - K | &\leq |EI^*| \\ h_a \leq h_0 \leq h_s \end{aligned} \tag{2.33}$$

où le terme à gauche de l'équation représente le flux à la surface du sol limité par  $|EI^*|$ , qui est le taux potentiel d'infiltration ou d'évaporation,  $h_0$  est le potentiel de pression à la surface du sol,  $h_a$  est le potentiel de pression minimum permis sous les conditions de sols prévalentes, fixée à -100 000 mm, et  $h_s$  représente une fine couche d'eau qui peut se former à la surface du sol pendant des fortes pluies, avant le phénomène d'écoulement superficiel, dans notre cas fixé à 10 mm car du ruissellement peut avoir lieu étant donné du contexte méditerranéen de l'étude où des flux de type hortonien sont très communs. Quand une des valeurs seuil de l'équation 2.33 est atteinte, le potentiel de charge est utilisé pour calculer le flux réel.

- **représentation de la condition limite inférieure** : pour les simulations sans nappe nous admettons qu'il y a drainage libre vers les horizons plus profonds de sol, tandis que dans le cas des simulations à nappe une condition de pression variable est présente. Il faut alors disposer de la pression à la limite inférieure, dépendante de la profondeur de nappe. Pour cela la pression à la base du profil considéré ( $P_v$ ) est définie par l'équation 2.34

$$P_v = |P_p| - |H_n| \tag{2.34}$$

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

où  $P_p$  est la profondeur du profil considéré et  $H_n$  correspond à la profondeur de nappe mesuré à partir de la surface (en mm).

- **calcul de la transpiration** ( $T_t$ ) : elle se calcule selon l'équation 2.35 en considérant l'intégration, sur le profil racinaire, des taux d'extraction racinaire élémentaire, à chacun des nœuds de calcul, en tenant en compte de l'épaisseur  $\Delta x_i$  de la couche de calcul centrée sur le nœud  $i$ ,

$$T_t = \sum_{i=n}^n \Delta x_i \frac{S_i + S_{i+1}}{2} \quad (2.35)$$

la modélisation de la transpiration ne prend donc pas en compte les adaptations physiologiques à la contrainte hydrique, la plus importante étant la régulation stomatique. Si bien le modèle Riou-HYDRUS-1D ne représente pas cette régulation stomatique directement il estime la transpiration via la fonction d'extraction racinaire (équations 2.29) par assèchement du sol. Malgré la simplicité de ce formalisme, HYDRUS-1D a donné des résultats sur vigne à l'échelle journalière et même horaire (Bsaiibes, 2007) au moins en absence de stress hydrique prononcé.

### 2.3.3.3 Mesures locales

Des mesures locales ont été réalisées d'une part sur la dépression du bassin versant de Roujan, qui correspond au site 6 (2.4), avec un dispositif expérimental faisant partie de l'ORE OMERE. La figure 2.13 illustre l'ensemble des dispositifs utilisés dans cette étude.

Par ailleurs des mesures locales ont été réalisées sur les six autres sites décrits précédemment (2.4), ceux-ci sont représentés sur la figure 2.14 qui illustre la localisation des sites sur lesquels des modélisations locales ont été réalisées à partir de mesures in-situ. La localisation des stations de flux qui serviront à l'analyse et aux validations postérieures (chapitre 3) est aussi incluse sous la forme d'étoiles. Sur cette carte on observe que les sites sont bien distribués dans l'espace, avec des sites sur les 2 rives du bassin versant de la Payne.

Les mesures qui ont été réalisées sur les 7 sites sélectionnés sont les suivantes :

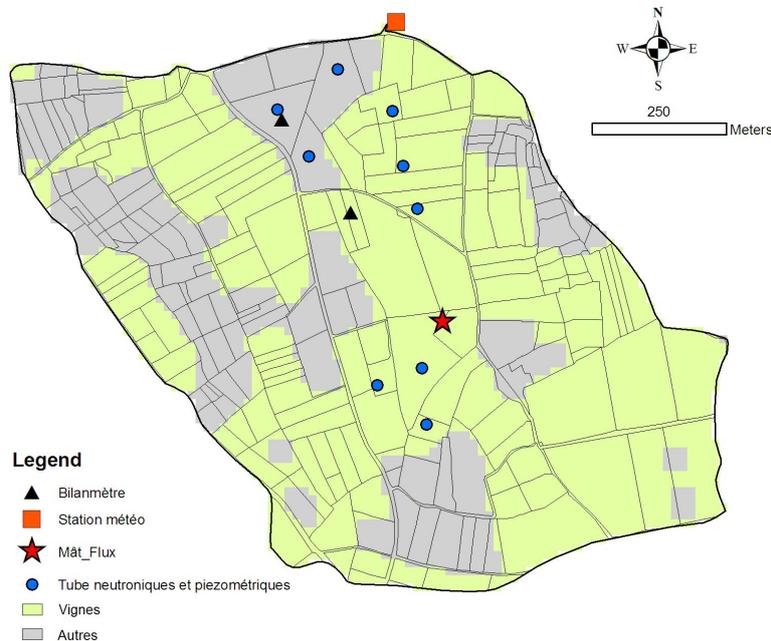


FIG. 2.13: Dispositif expérimental sur le bassin versant de Roujan

- **Végétation** : des mesures sur la végétation ont été réalisées pendant la période de plein développement de la végétation pour déterminer la forme du parallélépipède considéré dans le modèle de Riou et al. (1989), à savoir la hauteur, la largeur, la porosité (représentant la part du rayonnement pouvant traverser le feuillage et la distance inter-rang. Elles serviront accessoirement pour déterminer la hauteur de déplacement  $d$  et la longueur de rugosité  $z_{om}$ , paramètres intervenant dans le chapitre 5.
- **Humidité du sol** : un à deux tubes d'aluminium d'une profondeur de 4 m ont été installés à l'aide d'une foreuse mécanique pendant le mois de juin 2007 sur chaque site de mesure (2.4), en fonction de la variabilité intra-parcellaire des sols. Les tubes ont été installés sous le rang de vigne. Les tubes ont été soigneusement installés dans le trou réalisé par la foreuse, en comblant avec la terre d'origine. Une période d'attente d'au moins 15 jours a été considérée pour que le sol se stabilise avec le tube et que la mesure d'humidité puisse être représentative de la réalité. Des profils d'humidité du sol de chacun de nos sites ont été obtenues grâce

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

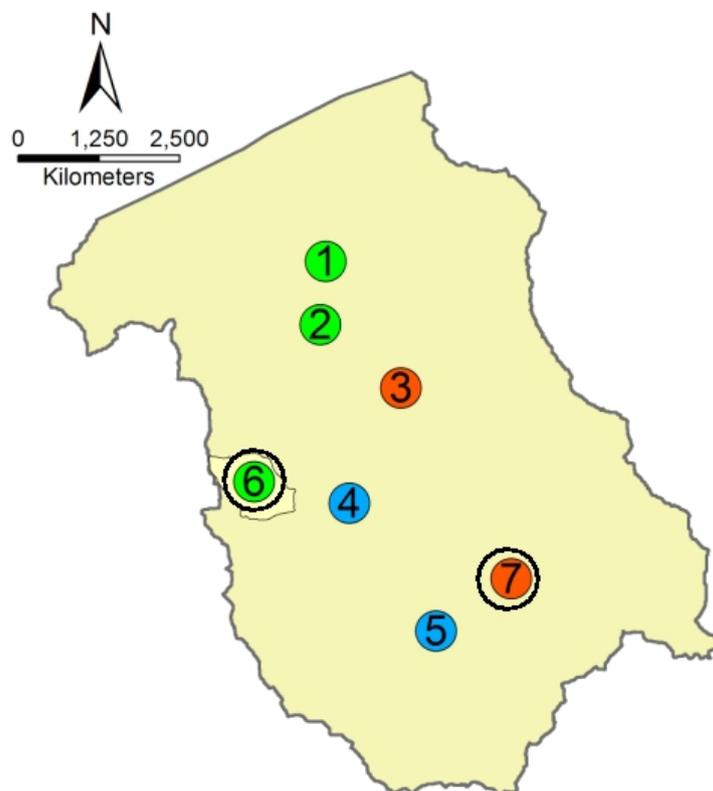


FIG. 2.14: Localisation des dispositifs de mesure sur le bassin versant de la Peyne. Le cercles rouges représentent les sites "chaud", les cercles verts les sites "moyen" et les cercles bleue les sites "froids". Les cercles doubles représentent les sites où une station de flux a été installée.

aux mesures avec une sonde neutronique 503-DR CPN (Vectra, France). Des mesures ont été réalisées, à 22 dates au cours de 420 jours de l'expérimentation, entre juillet 2007 et octobre 2008 pour les sites 1, 2, 3, 4, 5 et 7, tandis des mesures ont été réalisées à 16 dates pour les 9 points de mesures du site 6. Une mesure bi-hebdomadaire a été établie comme référence pendant la période végétative de la vigne, ainsi qu'une mesure mensuelle pendant les mois d'hiver, sauf exception d'une averse considérable (supérieure à 30 mm) où des mesures ont été réalisées le plus rapidement possible (1 à 2 jours après). L'étalonnage de la sonde neutronique a été faite avec l'aide d'une sonde neutronique gamma qui mesurait des densité apparentes en plus des mesures classiques d'humidité de sols par hori-

zons, comme proposée par [Lascano et al. \(1986\)](#). Des mesures en conditions sèche (mi-septembre 2007) et humide (fin-mars 2008) ont été réalisées pour caractériser l'ensemble de la variabilité existante pour chaque type de sol. Des prélèvements de sols sur chaque horizon nous ont permis d'obtenir une humidité réelle à l'aide de la densité apparente mesuré par la sonde gamma. Les résultats de la calibration sont données dans l'annexe [B](#).

- **Humidité de surface** : des mesures d'humidité de surface ont été réalisées avec une sonde TDR TRASE 6050 (Soil Moisture Corp., USA), simultanément aux mesures par sonde neutronique. Dix répétitions incluant le rang et l'inter-rang, travaillé et non travaillé (quand c'était le cas), ont été réalisées. Le capteur permet d'obtenir une mesure entre 0 et 15 cm, avec une valeur moyenne au alentour des 8 cm. Dans les simulations, ainsi que dans les validations, la mesure TDR à été comparée aux simulations à 10 cm, par souci de simplification. Sur certains sites, à tendance argileuse ou avec un taux de cailloux trop important, lorsque le sol devenait trop sec, les mesures étant irréalisables, une interpolation entre les dates disponibles a été implémentée pour déduire l'humidité de surface. Les horizons de surface étant complètement secs, et avec l'absence de précipitations pendant ces périodes, de très faibles variations de l'humidité des sols étaient observées.
- **Piézométrie** : 1 tube de PVC situé à moins de 10 m du tube aluminium destiné aux mesures d'humidité neutronique, a été installé pendant le mois de juin 2007 à l'aide d'une foreuse mécanique. Les tubes ont été crépinés à leur partie inférieure, à la scie tous les 5 cm sur une longueur de 1 m. L'espace vide entre la paroi de sol et le tube le long du crépinage a été comblé par du gravier faisant fonction de filtre et facilitant l'équilibre du niveau de la nappe entre le sol et le piézomètre. L'étanchéité du système est assuré par deux anneaux d'argile gonflante de 0.5 m d'épaisseur situé au dessus du gravier et sur les derniers 0.5 m du tube sous la surface du sol. Entre ces anneaux, le trou a été comblé avec la terre d'origine. Ces caractéristiques permettent de comparer les relevés avec ceux obtenus par [Guix \(2005\)](#) et [Tassinari et al. \(2002\)](#) qui ont utilisé des systèmes équivalents. Les relevés des mesures sont effectués manuellement à l'aide d'une sonde de mesure du niveau d'eau par contact électrique. Les relevés ont été effectués en même temps

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

---

que les mesures d'humidité du sol. Les points de mesures de la dépression de Roujan ont été relevé par des dispositifs du type DIVER permettant de mesurer le niveau des nappes à pas de temps horaire.

- **Description des profils des sol** : une description des horizons pédologiques à été effectuée pour chaque site lors de l'installation des piézomètres et des tubes aluminium pour la mesure par sonde neutronique. Des prélèvements ont aussi été effectués en condition sèche et humide pour chaque profondeur de sol mesuré par la sonde à neutron, dans le but d'établir son étalonnage.

Les mesures sur la végétation ont servi à paramétrer le modèle d'interception de Riou. Les mesures météorologiques et de niveau de nappes ont été utilisées en entrée (forçage) du modèle HYDRUS-1D. Les mesures d'humidité de sols ont comme nous le verront, été utilisées pour le calage du modèle HYDRUS-1D, ainsi que pour vérifier son bon fonctionnement.

### 2.3.3.4 Paramétrisation HYDRUS-1D

Pour qu'un modèle tel qu'HYDRUS-1D puisse fonctionner correctement, c'est à dire dans notre cas puisse simuler des flux d'évapotranspiration réalistes, il est le plus souvent nécessaire de réaliser :

1. **l'initialisation du modèle**, c'est à dire la détermination du profil initial d'humidité du sol : le modèle a été initialisé sur tous les sites en mars 2007, de façon à laisser un temps suffisamment long pour obtenir une stabilité dans les calculs, puisque les premières mesures de profils d'humidité servant aux calages ont été réalisées à partir de 15 juillet 2007. Une autre raison pour commencer la simulation le 1 mars est qu'à cette période, seul le processus d'évaporation a lieu, la vigne n'ayant pas encore commencé son développement végétatif. Pour déterminer la condition initiale, les conditions météorologiques ont été considérées en termes de quantité et de distribution temporelle des précipitations, de profondeurs de nappes et de forme des profils d'humidité dans des conditions similaires. Avec ces considérations, plusieurs conditions initiales de profils d'humidité représentatifs de la situation au 1 mars ont été testée jusqu'à ce que les simulations aient atteint

une certaine exactitude définie par la suite (chapitre 3).

2. **variables de forçage** : les données météorologiques à pas de temps horaire provenant de la station Roujan ont été utilisées. Ainsi la pluviométrie, l'évaporation et transpiration potentielles préalablement déduite à partir de l'ETP Penmam par l'intermédiaire du modèle de [Riou et al. \(1994\)](#) (voir section 2.3.3.1) ont été utilisés comme variables de forçage du modèle. A signaler aussi que l'évolution de la hauteur des nappes est aussi une variable de forçage.

3. **une paramétrisation adéquate (ou calage) de ce modèle** :

- propriétés hydrodynamiques du sol : nous disposons de différentes sources d'information en fonction du site étudié. Pour les nouveaux sites d'étude, seuls la description des horizons pédologiques effectuée lors de la mise en place des piézomètres était disponibles. Par ailleurs les données concernant les propriétés hydrodynamiques des horizons des sols de la dépression de Roujan, recueillis par [Trambouze \(1996\)](#) ont servi de valeurs de base pour la détermination de ces propriétés. [Trambouze \(1996\)](#) a mesuré les teneurs en eau résiduelle et à saturation ( $\theta_r$  et  $\theta_s$ ) par la méthode gravimétrique et a utilisé la méthode de Müntz de l'infiltromètre à double anneau pour mesurer la conductivité hydraulique à saturation  $K_s$ . Les paramètres  $\alpha$  et  $n$  ont été déterminés en utilisant le mode inverse inclus dans HYDRUS-1D qui permet d'ajuster l'équation 2.31. Les paramètres  $\theta_r$  et  $\theta_s$  des horizons des sites différents des horizons étudiés par [Trambouze \(1996\)](#), en particulier les sites 2, 5 et 7 (se référer au tableau 2.4) ont été déduits des valeurs d'humidités mesurées par sonde neutronique pendant l'expérimentation. En effet, nous estimons que la variabilité des conditions rencontrées lors de la période d'étude nous permet de considérer que des valeurs suffisamment proches de la saturation ( $\theta_s$ ) et du point de flétrissement ( $\theta_r$ ) ont été rencontrés.
- extraction racinaire : deux types d'informations sont indispensables pour déterminer l'extraction racinaire, l'information concernant la structure des racines et l'information concernant leur physiologie. En premier lieu la structure des racines est représentée par la profondeur et la densité racinaire. Concernant la profondeur

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE

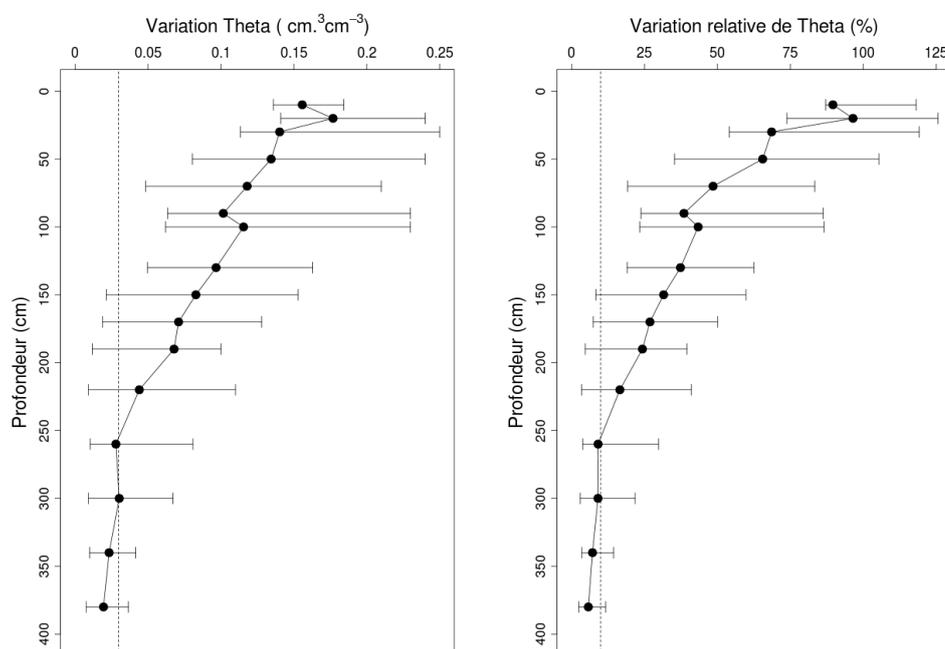


FIG. 2.15: Moyenne sur l'ensemble des sites de la variation des teneurs en eau volumique brute et relative (Theta), en fonction de la profondeur. En barres sont représentées les valeurs maximales et minimales rencontrés. Les lignes en pointillées correspondent à 10% de variation de teneur en eau.

effective des racines de vigne, une analyse a été réalisée dans le but de vérifier la profondeur effective d'extraction puisque plusieurs auteurs ont signalé des valeurs très différentes d'enracinement de vigne (voir section 1.1.3.3). La variation des teneurs volumiques d'eau en fonction de la profondeur (entre 0 et 4 m) a donc été considérée. De cette analyse illustrée par la figure 2.15, on observe qu'à partir de 2.5 m, les teneurs en eau ne varient plus de façon significative (moins de 10% de variation), ce qui implique que les racines ne sont plus présentes de manière significative au delà de cette profondeur. Ces résultats sont en accord avec les observations de [Trambouze \(1996\)](#) et de [Guix \(2005\)](#) sur la même zone d'étude. Pour la détermination de la densité racinaire, nous avons repris les observations de [Trambouze \(1996\)](#) dont l'exactitude a été démontrée [Bsabes \(2007\)](#) et qui sont cohérentes avec les variations des teneurs en eau observé sur chaque profil et synthétisée dans la figure 2.16, avec une densité racinaire maximale entre 40 et

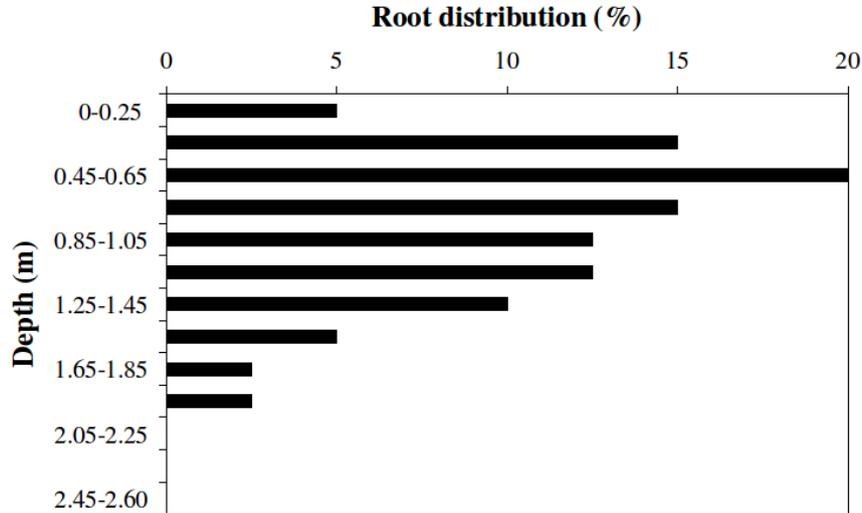


FIG. 2.16: Densité de la distribution verticale des racines adoptée, (d’après [Trambouze \(1996\)](#) et [Bsaibes \(2007\)](#)).

Valeur seuil	Pression (mbar)
$h_1$	-0.01
$h_2$	-0.025
$h_3$	-0.1
$h_4$	-1.5

TAB. 2.6: Pressions matricielles (en mbar) correspondant aux valeurs seuils de la fonction d’extraction racinaire de [Feddes et al. \(1978\)](#) (équation 2.29).

100 cm. De plus, il est important de signaler que dans [Bsaibes \(2007\)](#), une analyse de sensibilité considérant plusieurs distributions racinaires possibles a été réalisée. Les résultats de cette analyse montrent que les différents profils considérés n’induisent pas de variation significative de l’évaporation et de la transpiration. Ceci renforce la pertinence de considérer une distribution racinaire unique.

D’autre part, les pressions matricielles seuils (voir figure 2.12),  $h_1$  et  $h_2$  ont été établies pour la vigne d’après [Wesseling \(1991\)](#) à -0.01 mbar et -0.025 mbar respectivement, alors que les valeurs  $h_3$  et  $h_4$  régulant la transpiration ont été définies par [Trambouze and Voltz \(2001\)](#). Les valeurs intervenant dans la fonction de [Feddes et al. \(1978\)](#) sont résumées dans le tableau 2.6.

## **2. CADRE EXPÉRIMENTAL DE L'ÉTUDE**

---

Une fois le dispositif expérimental installé des mesures ont été réalisées pendant la fin de la saison 2007 et l'intégralité de la saison 2008. Ces mesures ont servi en partie pour alimenter le modèle couplé Riou-HYDRUS-1D dans le but d'obtenir l'évapotranspiration réelle en continu sur les 7 sites de mesure choisies. Les résultats de ces simulations validées et par la comparaison avec les mesures de références obtenue grâce aux tours à flux par covariances turbulentes sont présentés dans le chapitre 3 qui suit.

## Chapitre 3

# Estimations locales du statut hydrique

### 3.1 Introduction

Dans le chapitre qui suit, nous présentons l'ensemble de la démarche utilisée pour estimer le statut hydrique de la vigne sur un ensemble de sites (estimation multi-locale). Ces estimations seront ultérieurement utilisées pour valider les approches de spatialisation du statut hydrique de la vigne qui seront traitées dans les chapitres suivants. Les deux approches que nous avons utilisées pour réaliser ces estimations locales de statut hydrique de la vigne seront successivement présentées :

- la méthode des covariances turbulentes basées sur la mesure de flux atmosphériques et reconnue dans la littérature comme méthode de référence pour évaluer les évapotranspirations réelles au cours du temps mais dont la lourdeur de mise en œuvre a limité le nombre de sites caractérisés ;
- une méthode d'estimation de l'évapotranspiration réelle basée sur l'utilisation d'un modèle de transferts hydriques (HYDRUS-1D) calée sur des mesures d'humidité du sol, applicable sur un plus grand nombre de sites. Les résultats de cette dernière méthode, peu décrite dans la littérature pour un contexte viticole, seront comparés à la précédente avant d'être utilisés comme données de validation.

Avant de présenter ces deux méthodes, nous analyserons les différents indicateurs pédo-climatiques caractérisant la période d'expérimentation et qui seront utiles pour analyser ultérieurement nos résultats

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

## 3.2 Analyse des indicateurs pédo-climatiques de la vigne

### 3.2.1 Pluviométrie et évapotranspiration de référence

Les chroniques de précipitations d'évapotranspiration de référence sont représentées en figure 3.1. Pour les 5 années concernés par l'étude, la pluviométrie varie entre 453 et 710 mm, alors que la moyenne annuelle sur les 30 dernières années est de 650 mm. La pluviométrie est caractérisé par la présence de forts événements, principalement pendant l'automne tandis que pendant le printemps les précipitations sont beaucoup plus distribuées. Il est important de remarquer que les années 2005-2006 (millésime 2006), 2006-2007 (millésime 2007) ont été particulièrement sèches ce qui a eu une incidence importante sur les réserves hydriques. Le déficit hydrique a été particulièrement marqué pendant l'été 2007.

La période 2007-2008 (dernière chronique de la figure 3.1) correspond à la période de fonctionnement de notre dispositif de suivi de l'état hydrique sur le terrain (mesures par covariances turbulentes, suivis d'humidités et simulation HYDRUS-1D). La pluviométrie pendant l'année hydrologique 2007-2008, D1D1 en grande partie correspondante à la période de simulation, a été dans l'ordre de la valeur moyenne pour la zone avec 604 mm. Elle a cependant présenté une distribution différente de la normale avec une pluviométrie plus importante et moins intense pendant les mois de printemps, au lieu des pluies intenses qui surviennent généralement pendant les mois d'automne. L'évapotranspiration de référence (ET0) calculée selon la méthode Penman-Monteith (Allen et al., 1998) a été dans l'ordre des valeurs moyennes pour la zone. Une analyse plus fine de ces valeurs montre par contre que la distribution temporelle de l'ET0 est différente de la normale. On observe sur la figure 3.1 que l'ET0 à présenté pendant le printemps une alternance des valeurs faibles et fortes en lien avec la distribution de la pluie. De plus, les conditions climatiques présentes ont permis de générer une ET0 très forte pendant la fin du printemps et le début de l'été. Il sera important de considérer ces éléments lors de l'interprétation des valeurs des ETR obtenues par mesures et par simulations par l'intermédiaire du rapport ETR/ET0.

### 3.2.2 Piezométrie

Guix-Hébrard et al. (2007) ont démontré l'importance des nappes phréatiques pour le bilan hydrique de la vigne dans notre zone d'étude. Ceci nous amène à analyser en

### 3.2 Analyse des indicateurs pédo-climatiques de la vigne

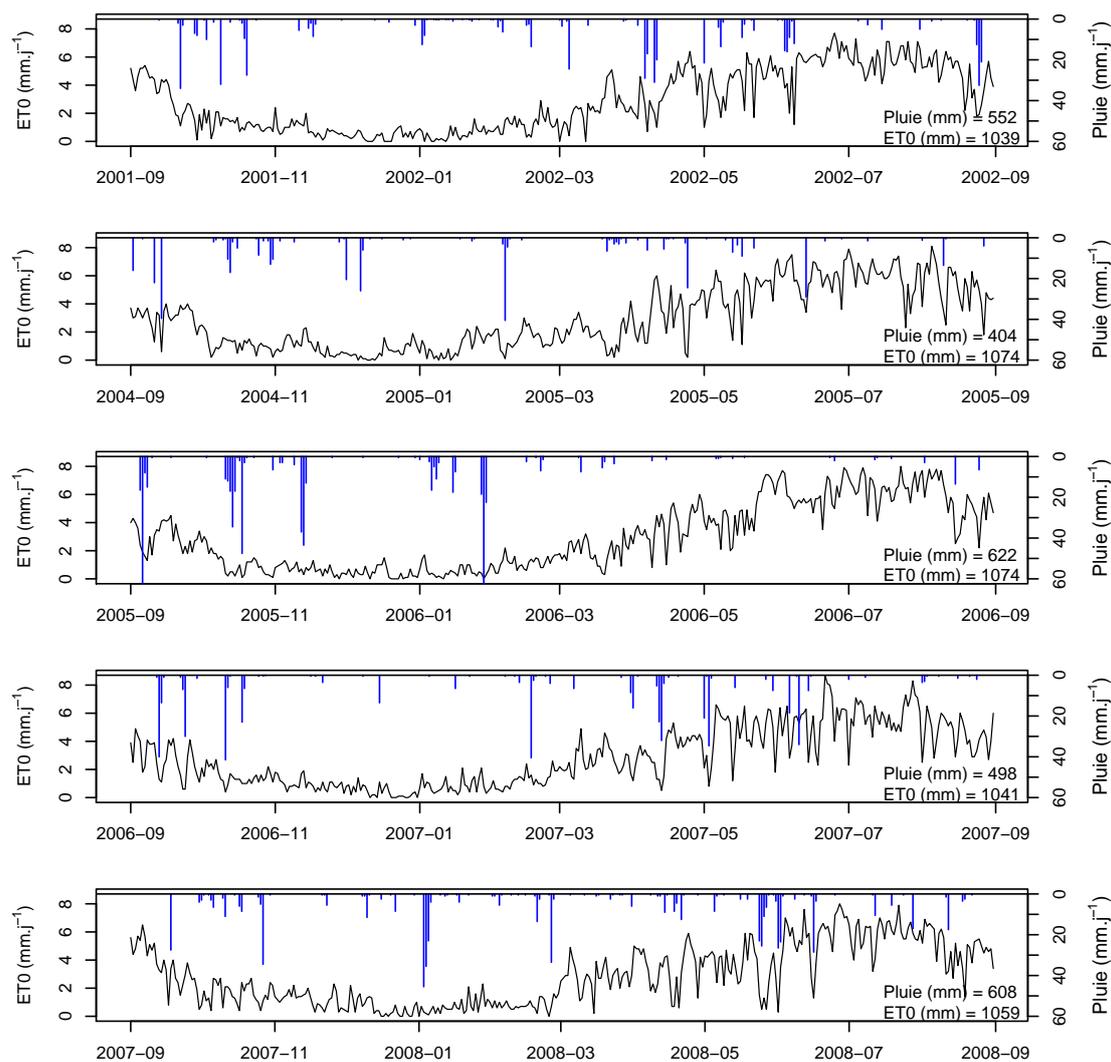


FIG. 3.1: Chroniques des précipitations et de l'ET0 référence pour les années hydrologiques (du 1<sup>er</sup> septembre au 31 août) concernés par l'étude (2001-2002, 2004-2005, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008).

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

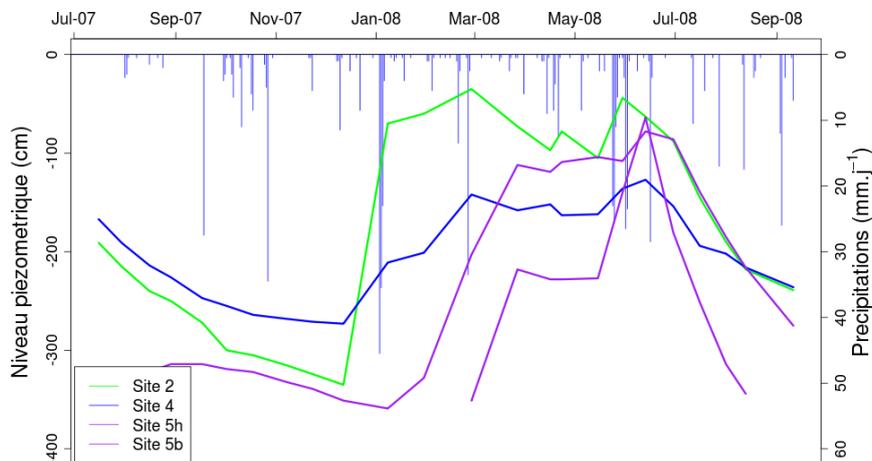


FIG. 3.2: Piézométrie des sites à nappe du bassin versant de la Peyne.

détail ces mesures car la présence ou absence de nappes superficielles a une influence directe sur le statut hydrique de la vigne.

Les mesures piézométriques ont révélé des niveaux de nappes différents selon les sites, ce qui est en accord avec les résultats de Guix (2005) qui a montré une forte variabilité spatiale de ces niveaux de nappes : sur les six sites suivis en piézométrie, seulement trois sites ont révélé une présence de nappe dans les 4 premiers mètres. Les sites 2 et 4 ont un comportement similaire, en effet on observe sur la figure 3.2 que le niveau de la nappe est toujours à moins de 3 mètres sur ces deux sites alors que sur le site 5 ceci se produit seulement pendant le printemps et l'été. Cette condition laisse supposer une forte contribution de cette nappe à l'alimentation hydrique de la vigne compte tenu des remontés capillaires à des niveaux de sol où l'absorption racinaire de la vigne est encore active. En observant en détail l'évolution des niveaux piézométriques de ces sites on distingue une différence dans la fluctuation des niveaux. Le site 4 présente la dynamique de niveau de nappe moins importante avec une nappe toujours située entre 1.3 et 2.5 m, alors que les deux autres sites ont des fluctuations plus importantes. Le site 2 en particulier a présenté un remplissage de la nappe très rapide pendant le mois de janvier 2008. Ce phénomène est probablement dû à la faible réserve utile de ce site. Sur ce site pendant l'hiver un affleurement en surface de la nappe s'est produit, ce qui a été observé sur le terrain, tandis qu'en été, le dessèchement a été très rapide

## 3.2 Analyse des indicateurs pédo-climatiques de la vigne

---

ce qui a conditionné la condition hydrique de la vigne en fin d'été. Il s'agit en effet d'un site très caillouteux, d'après les observations réalisées sur le profil pédologique avec des textures grossières (voir description § 2.4) ce qui aurait pour conséquence une porosité importante facilitant l'évacuation de l'eau du sol. Une deuxième explication, probablement en synergie avec la précédente, viendrait de la présence du réseau de fossés à l'extérieur de la parcelle. Malgré les différences entre la piézométrie de ces deux sites, on peut les classer dans la Classe III définie par Guix (2005) (§ 2.1.6) et qui correspond aux sites avec une nappe superficielle (moins de 3 m) présente pendant toute l'année.

Le Site 5 pour lequel des mesures ont été effectuées en haut et en bas de la parcelle (site 5h et 5b), présente une importante variation de son niveau de nappe, qui peut être très rapide dans le temps (classe de nappes II définie dans la § 2.1.6). Une explication à cela serait en lien avec la position du site 5 dans le paysage : celui-ci est situé dans une zone à pente supérieure à 5% (§ 2.3.1.3) ce qui expliquerait en partie les différences piézométriques plus abruptes. Un autre aspect à considérer pour expliquer la rapide descente du niveau de nappes visible pendant le début de l'été 2008, serait directement lié à la présence du réseau de fossés qui jouerai le rôle de drain, évacuant rapidement l'eau du sol.

Les sites 1, 3 et 7 n'ont pas présenté de nappe pendant toute la période, classe de nappe I, donc pas d'interaction entre le système racinaire des vignes et les nappes. Sur ces sites, la vigne est seulement alimentée par la pluie ce qui se traduit par des niveaux de stress plus élevés comme nous le verrons plus loin.

Le Site 6 étant un site de taille beaucoup plus grande que les autres, plusieurs points de mesure sont installés depuis plusieurs années dans le cadre l'ORE OMERE. Pour notre étude 9 points de mesure ont été sélectionnés. Parmi ces points, 6 sont installés sur des parcelles de vigne (aw87, aw88, aw92, aw104, aw124 et aw126), 2 sur une parcelle de blé (aw83Pam,aw83Pav) et 1 point sur une friche (aw81). Ces points sont représentées sur la figure 2.13. Sur ce site nous retrouvons les trois classes de nappes établies pour le bassin versant de la Peyne par Guix (2005). En effet les parcelles aw81, aw83Pam, aw83Pav et aw87 et aw88 sont des sites à nappe permanente au dessus de 4 m, correspondant à la classe III. La parcelle aw92 correspond à la catégorie II alors que les parcelles aw104, aw124 et aw126 sont dans la classe I. Dagès (2006) a réalisé une étude approfondie de l'influence des réseaux de fossés sur les échanges

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

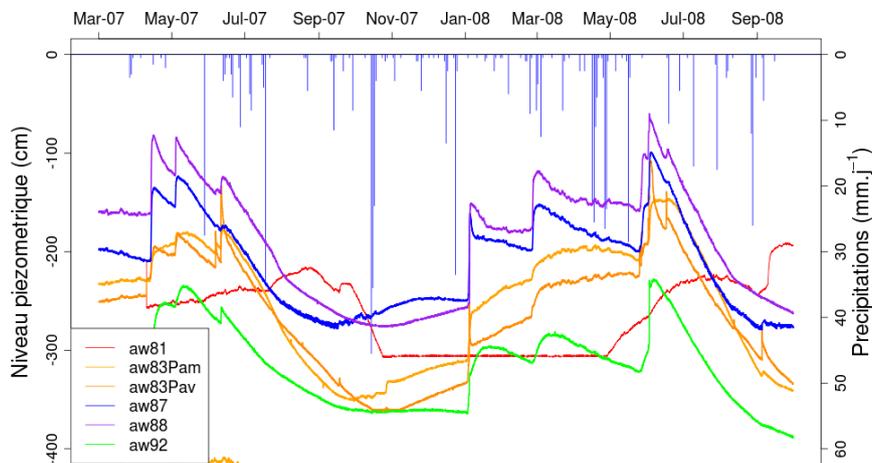


FIG. 3.3: Piézométrie des sites à nappes de la dépression de Roujan (Site 6).

surface-souterrain en bassin versant méditerranéen dans laquelle ces mêmes points de mesures ont été utilisées. Dans cette étude il est intéressant de noter l'influence de facteurs anthropiques, tel le réseaux de fossés, sur la distribution spatiale (dans les 3 dimensions) des niveaux piézométriques.

Un dernier point à signaler est que les niveaux de nappes constituent des données de forçage (condition à la limite inférieure) du modèle HYDRUS-1D.

#### 3.2.3 Phénologie

Les données concernant les sommes des températures (§ 2.1.8) sont représentées dans le tableau 3.1. Celui-ci nous indique que d'importantes différences se sont produites dans certaines dates de début de stades physiologiques selon les millésimes. En effet on aperçoit que pour les millésimes 2007 et 2008, la date de débourrement est beaucoup plus précoce que les années précédentes ce qui nous indique que des hivers doux ont eu lieu. Les autres stades phénologiques ne présentent pas de variations notables, avec des dates de maturité similaires pour toutes les années. Ceci nous indique que les millésimes concernés par l'étude ont subi des températures "normales" pendant la période végétative, cependant il faut tenir compte du fait que cet indicateur théorique se base uniquement sur la température de l'air et que les conditions de sécheresse, annoncée dans la § 3.2.1 pourrait affecter les dates phénologiques estimées, en particulier

### 3.2 Analyse des indicateurs pédo-climatiques de la vigne

pour le millésime 2007.

Phénologie Millésime	Débourrement (59°j)*	Floraison (380°j)**	Fermeture grappe (734°j)*	Véraison (970°j)***	Maturité (1530°j)***
2002	17/04	27/05	29/06	20/07	04/09
2005	11/05	02/06	29/06	17/07	29/08
2006	09/05	31/05	01/07	16/07	25/08
2007	10/03	22/05	27/06	18/07	04/09
2008	13/03	31/05	02/07	21/07	03/09

TAB. 3.1: Dates de début de stade phénologiques calculées à partir des sommes des températures, pour les années concernés par l'étude. Estimation à partir des données météorologiques acquises à la station de Roujan (\* d'après Hébrard (2004), \*\* d'après Champagnol (1984), \*\*\* d'après Pellegrino (2003)).

Des dates particulièrement importantes dans l'interprétation des résultats concernant le statut hydrique de la vigne correspondent aux stades de débourrement, de fermeture de grappe et de véraison (§ 1.1.3.1 et § 1.1.3.2). D'après les sommes des température nous pouvons observer que pour le millésime 2008 les dates de début de ces stades phénologiques ont correspondu aux dates suivantes : 13 mars, 2 juillet et 21 juillet. Pour ce millésime, le débourrement à été très en avance par rapport aux autres années au contraire, la floraison et surtout le fermeture de grappe correspondant à l'arrêt de croissance sont un peu plus tardive que pour les millésimes antérieurs. Ceci est probablement dû au début de printemps pluvieux et à des températures plus faibles, qui ont eu pour conséquence un ralentissement des étapes phénologiques. Ceci est en accord avec les observations piézométriques décrites dans la section précédente (§ 3.2.2) où une descente importante des niveaux piézométriques s'est produit à partir de la fin du mois de juin 2008, période de croissance maximale pour la vigne, durant laquelle la plante est encore en train de grandir mais surtout de remplir les baies (division et expansion cellulaire).

### 3.3 Estimation du statut hydrique à partir de mesures des flux atmosphériques

Les mesures à partir de flux atmosphériques ont été réalisées par la méthode des covariances turbulentes, méthode de référence, décrite dans la section 2.3.2.3, sur deux sites (sites 6 et 7) contrastés en termes de conditions hydriques potentielles (se référer à § 2.3.1.3). Des mesures micrométéorologiques, incluant le flux de chaleur latente, ou évapotranspiration réelle, ont été obtenues sur le Site 6, tandis que, des mesures réalisées pendant des séries de quelques jours sur le site 7 nous permettront d'analyser en détail le statut hydrique de la vigne pendant la période de simulation.

#### 3.3.1 Analyse temporelle de l'estimation du statut hydrique journalier

L'analyse des mesures d'évapotranspiration réelle obtenue par covariances turbulentes sur deux sites de mesure (sites 6 et 7), a permis de faire une analyse temporelle de l'estimation du statut hydrique journalier évalué en termes d'ETR journalier ( $\text{mm.j}^{-1}$ ).

La figure 3.4 résume l'évolution de l'ETR journalier au cours de la période de mesure (coïncidant avec la période de simulation). On aperçoit sur les deux sites mesurés, Site 6 en ligne orange continue et site 7 points rouges, que les l'ETR mesurées par les stations de flux sont très variables dans le temps, avec des valeurs minimales proches de 0 pour les mois d'hiver et pouvant dépasser les  $6 \text{ mm.j}^{-1}$  pour le début de l'été 2008. Ces valeurs sont cohérentes avec les observations météorologiques décrites auparavant (§ 3.2.1), entre une année et l'autre. Un aspect intéressant à signaler est la variabilité inter-annuelle de l'ETR. On observe sur la période d'été 2007 des valeurs très faibles dépassant rarement les  $2 \text{ mm.j}^{-1}$  alors que l' $ET_0$  dépasse souvent les  $5 \text{ mm.j}^{-1}$ . Ceci est clairement visible sur le graphique inférieur représentant la fraction évaporative définie préalablement dans l'équation 2.3, où les valeurs sont majoritairement comprises entre 0.2 et 0.4. De plus si l'on considère que les précipitations ont été négligeables pendant l'été 2007, la période peut alors être cataloguée comme sèche et à forte probabilité de stress hydrique pour la vigne. Des valeurs de fraction évaporative inférieures à 0.3 n'ont pas souvent été répertoriées sur vigne ce qui prouve les conditions très sèches de cette période (Morlat et al., 1992; Trambouze, 1996), seul Oliver and Sene (1992) ont signalé

### 3.3 Estimation du statut hydrique à partir de mesures des flux atmosphériques

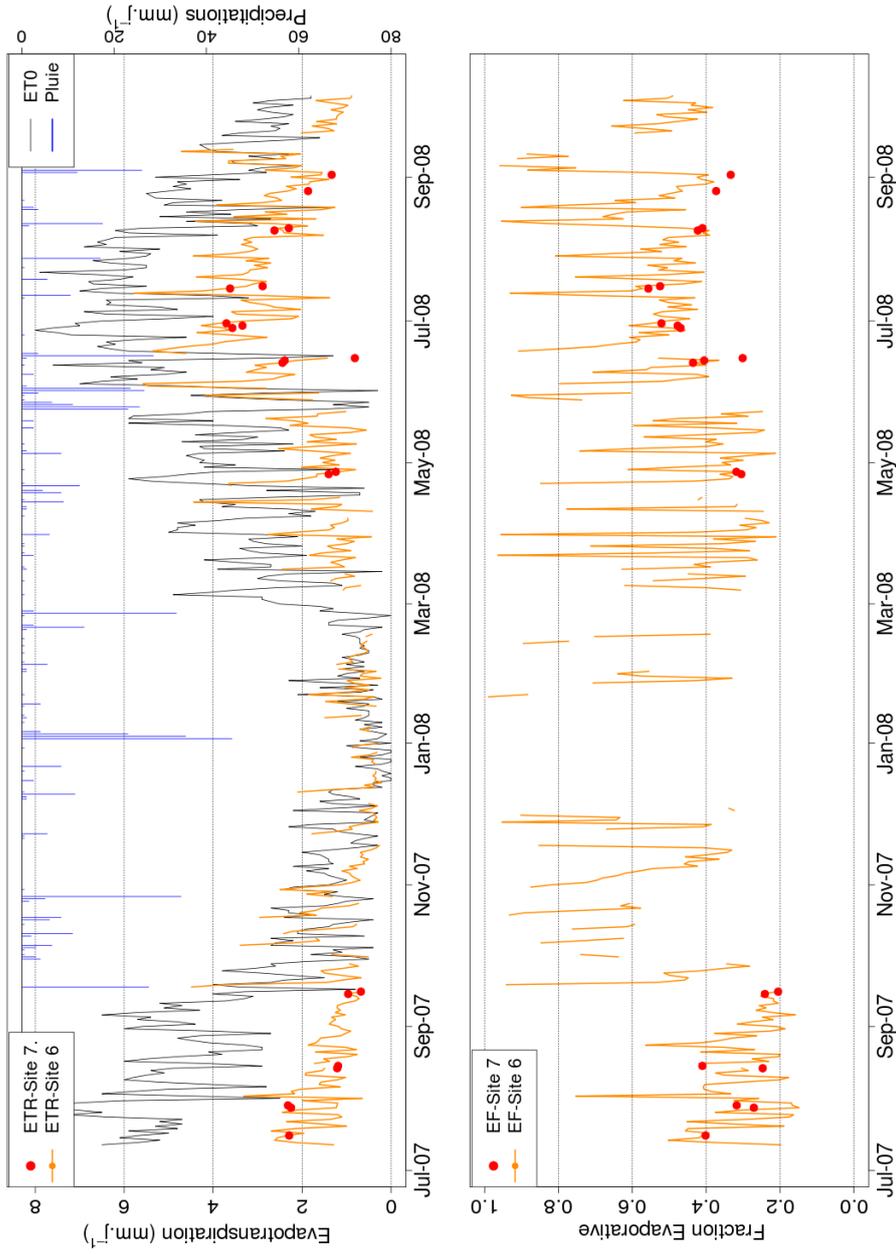


FIG. 3.4: Climatologie de l'évapotranspiration réelle mesurée par covariances turbulentes pendant la période des simulations sur les sites 6 et 7. Dans la figure supérieure sont représentées les variables météorologiques pluie et évapotranspiration potentielle de référence. La figure inférieure représente la fraction évaporative pour la même période.

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

une valeur de ETR de  $1 \text{ mm.j}^{-1}$  pendant la période du 26/05 au 13/07 sur un vignoble en Espagne, mesuré par la méthode du rapport de Bowen ( 1.2.1.4)

Après cette période sèche de l'été 2007, 670 mm de pluie sont tombés pendant le reste de la période concerné par l'étude, lors d'importants événements en octobre 2007, janvier 2008, et surtout en mai 2008. Ces précipitations ont permis un approvisionnement du stock hydrique des sols du bassin versant pour la saison 2008, en particulier par le remplissage des nappes (voir figure 3.2). Ce phénomène est visible aussi sur la figure 3.4 avec des évapotranspirations réelles importantes, surtout vers la fin du printemps et le début de l'été, comprises le plus souvent entre 3 et  $4 \text{ mm.j}^{-1}$ , mais pouvant augmenter jusqu'à des valeurs proches de  $6 \text{ mm.j}^{-1}$  pendant les périodes suivantes immédiatement des événements pluvieux, où l'ETR se rapproche de l'ET0. La fraction évaporative a toujours été supérieure à 0.4 pour la saison 2008 ce qui nous indique une alimentation en eau de la culture correcte. Les valeurs de fraction évaporative trouvées pour cette période correspondent à celles citées par plusieurs auteurs sur des vignes non-irriguées (Heilman et al., 1994; Morlat et al., 1992) mais aussi à des valeurs trouvées sur des vignes irrigués (Lascano et al., 1992; Li et al., 2008; Ortega-Farias et al., 2007; Riou et al., 1994) ce qui est cohérent avec les conditions pédo-climatiques rencontrées durant cette période.

Une dernière observation déduite de ces informations concerne les valeurs maximales de l'ETR. La fraction évaporative a rarement dépassé la valeur 0.6, même dans les meilleures conditions d'alimentation en eau possible pour la plante. Ceci nous amène à penser que cette valeur correspondrait à la valeur de l'évapotranspiration maximale pour le vignoble étudié (sites 6 et 7). Ces résultats sont en lien avec le coefficient de culture de la vigne  $Kc$  défini par plusieurs auteurs entre 0.5 et 1.0 pour la vigne (Allen et al., 1998; Baeza et al., 2005; Riou et al., 1994; Trambouze, 1996).

#### 3.3.1.1 Analyses des flux horaires

L'analyse des composantes du bilan d'énergie (équation 1.1) à pas de temps horaire est utile à plusieurs titres. Ces mesures nous permettent d'abord de vérifier la clôture de ce bilan, résultat indispensable pour prouver la cohérence des valeurs mesurés par covariances turbulentes. L'analyse des flux horaires nous permet aussi d'identifier des phénomènes atmosphériques pouvant perturber la mesure comme l'apparition de nuages ou des changements brutaux de la vitesse et direction du vent. Finalement l'analyse des

### 3.3 Estimation du statut hydrique à partir de mesures des flux atmosphériques

---

flux horaires nous permet aussi d'observer les variations de l'évapotranspiration d'une culture au cours de la journée ce qui peut être associé à des réponses physiologiques de la végétation (fermeture stomatique par exemple).

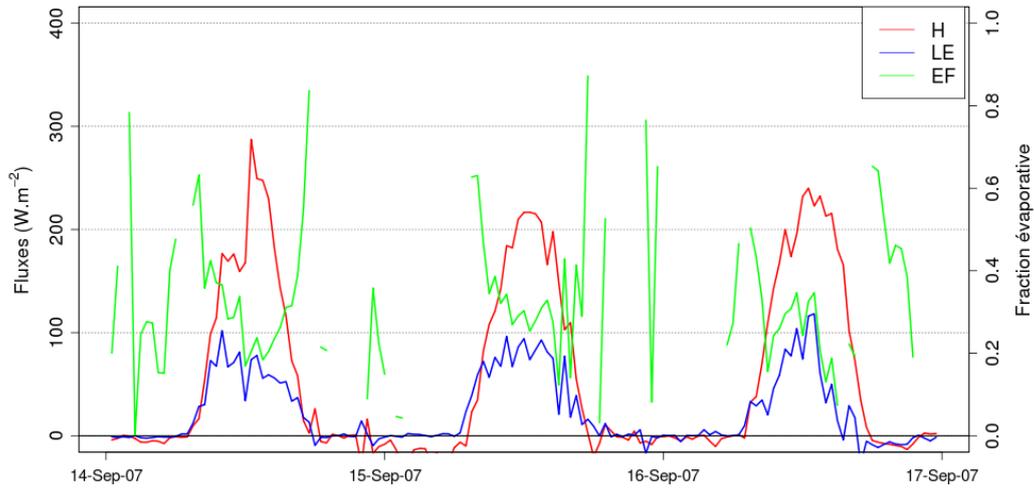
- Site 6 : deux périodes ont été retenues pour discuter la variation des flux horaires sur ce site ; la période de septembre 2007 et la période de juin 2008. La figure 3.5 illustre l'évolution des flux au cours de la journée. On observe d'importantes différences dans la valeur des flux. Pour la période de septembre 2007, qui est une période à forte contrainte hydrique, comme vu précédemment, le flux de chaleur sensible ( $H$ ) vaut plus du double de la valeur du flux de chaleur latente ( $\lambda E$ ), celui-ci dépassant rarement les  $100 \text{ W.m}^{-2}$ . La fraction évaporative fluctue entre 0.2 et 0.4 pendant la journée ce qui est faible. Ce phénomène est particulièrement visible pendant les journées du 14 et 16 septembre où une forte diminution de  $\lambda E$  se produit pendant l'après-midi. Il est probable que cette diminution de l'évapotranspiration durant l'après-midi soit due à la fermeture stomatique de la vigne. Ceci sera à prendre en compte lors de l'analyse des simulations de l'ETR par le modèle HYDRUS-1D puisque, comme déjà signalé, ce modèle n'est pas doté d'une représentation de la régulation stomatique.

Pour la période de juin 2008 où une alimentation en eau correcte est présente, le flux  $\lambda E$  est beaucoup plus important que  $H$  ce qui correspond à une forte fraction évaporative (toujours supérieure à 0.6). Ces résultats sont cohérents avec le contexte pluviométrique de cette année.

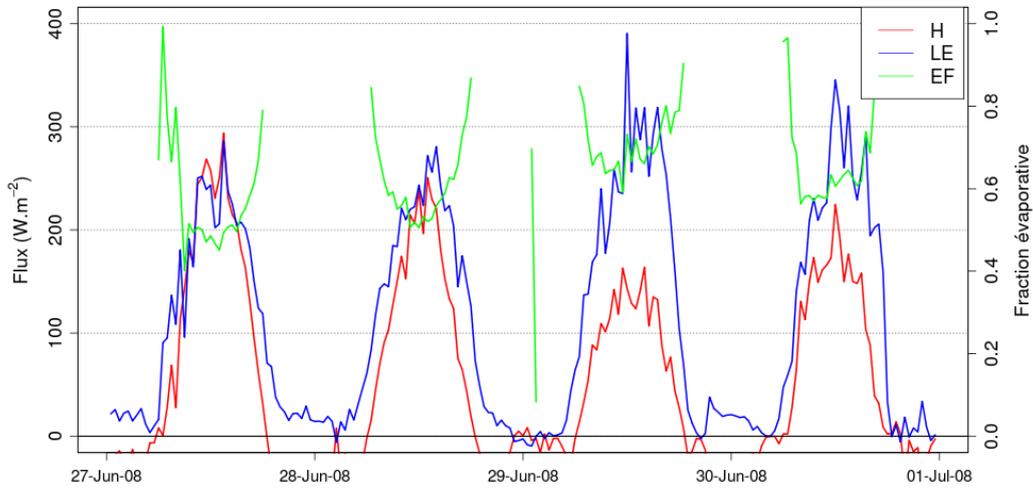
- site 7 : les flux mesurés sur ce site ont un comportement général très similaire à celui observé sur le Site 6 ce qui renforce l'idée que le signal composite perçu par la station de flux du Site 6 est bien un signal à dominance viticole. Sur ce site le signal paraît cependant moins bruité (figure 3.6) ce qui s'explique du fait de l'homogénéité du couvert végétal (site constitué d'une seule grande parcelle homogène). On perçoit aussi très nettement le phénomène de régulation stomatique dans la journée du 15 septembre 2007, qui était moins perceptible sur les mesures de flux du Site 6, constitué d'un ensemble de parcelles.

Le bouclage de bilan d'énergie obtenu sur le site 7 est de l'ordre de 80% pour la relation entre l'énergie disponible et la somme des flux convectifs ce qui est conforme à la littérature.

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE



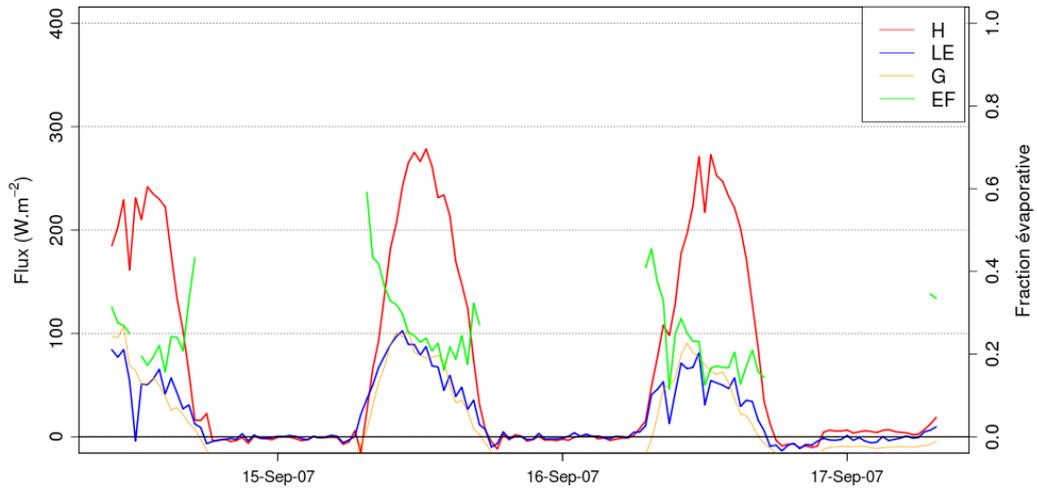
(a) Période de stress hydrique 15 septembre 2007



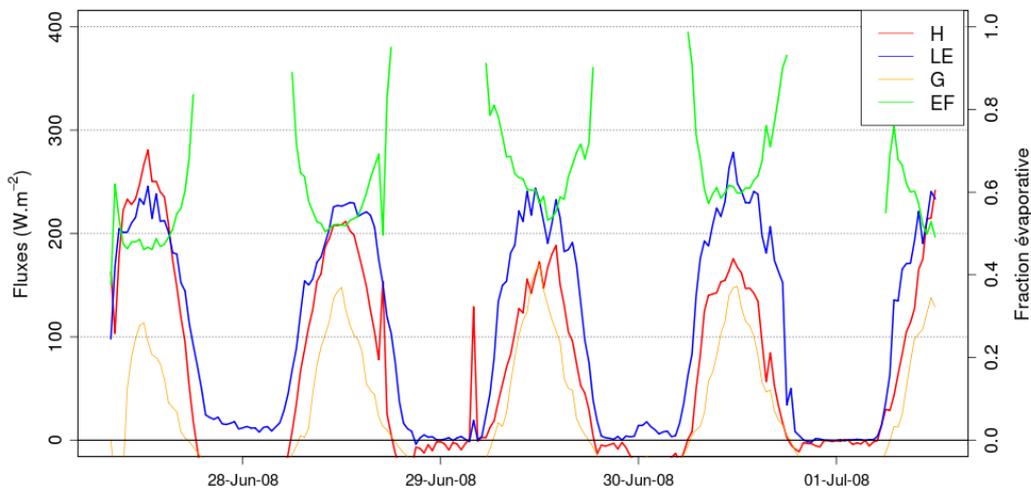
(b) Période sans stress hydrique 27 juin 2008

FIG. 3.5: Chroniques des flux mesurés par covariances turbulentes par la station du Site 6 sur deux périodes contrastées en termes de condition hydrique. En rouge est représenté le flux de chaleur sensible  $H$ , en bleu le flux de chaleur latente  $\lambda E$  et en vert la fraction évaporative, égale au rapport  $\lambda E / H + \lambda E$ .

### 3.3 Estimation du statut hydrique à partir de mesures des flux atmosphériques



(a) Période de stress hydrique 15 septembre 2007



(b) Période sans stress hydrique 06 juin 2008

FIG. 3.6: Chroniques des flux mesuré par covariances turbulentes par la station du site 7 sur deux période contrastées en termes de condition hydrique. En rouge est représenté le flux de chaleur sensible  $H$ , en bleu le flux de chaleur latente  $\lambda E$ , en orange le flux chaleur dans le sol  $G_0$  et en vert la fraction évaporative  $\lambda E / (H + \lambda E)$ .

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

#### 3.3.1.2 Comparaison entre sites

Les mesures de l'ETR journalier sur les deux stations sont très corrélées entre elles ( $R = 0.9$ ), sans biais significatif et avec un RMSE de  $0.1 \text{ mm.j}^{-1}$  ce qui est très faible. On observe cependant que malgré les faibles différences le Site 6 a généralement produit des ETR plus fortes ce qui est surtout visible en août 2007 et sur la période entre juin et septembre 2008 ce qui est visible sur la figure 3.4).

### 3.4 Calage du modèle HYDRUS-1D

HYDRUS-1D est un modèle de transferts hydriques qui à partir de l'information concernant l'humidité des sols est capable de simuler l'évapotranspiration réelle en continu sur une période de temps donnée. Dans notre cas, nous voulons obtenir une ETR journalière sur toute la période d'expérimentation qui comprend 433 jours. Pour que le modèle réussisse à obtenir des simulations correctes il faut impérativement réaliser le calage de celui-ci. Le calage du modèle consiste à trouver les propriétés hydrodynamiques qui donnent les simulations les plus exactes, par comparaison avec les profils d'humidité obtenus par mesures neutroniques.

#### 3.4.1 Calage

Le calage du modèle de transfert hydriques a été réalisé sur l'ensemble des points de mesure d'humidité du sol soit 22 dates de mesures comprenant une période allant de mi-juillet 2007 à la fin octobre 2008. Pour la réalisation des calages, plusieurs critères ont été considérés afin d'obtenir les simulations le plus réalistes possible :

##### 3.4.1.1 Critères de calage

En l'absence de méthodologie disponible dans la littérature, la démarche de calage que nous avons mise au point a consisté en une série d'essais erreurs dont les critères pour évaluer la qualité des simulations de l'humidité du sol par HYDRUS-1D ont été les suivants :

- Forme des profils : la forme générale des profils d'humidité au cours de la période d'expérimentation doit être le mieux possible respectée. Cependant le respect de la forme exacte des profils est très difficilement réalisable. Une explication possible correspond à la structure complexe des sols de la région dans lesquels les

### 3.4 Calage du modèle HYDRUS-1D

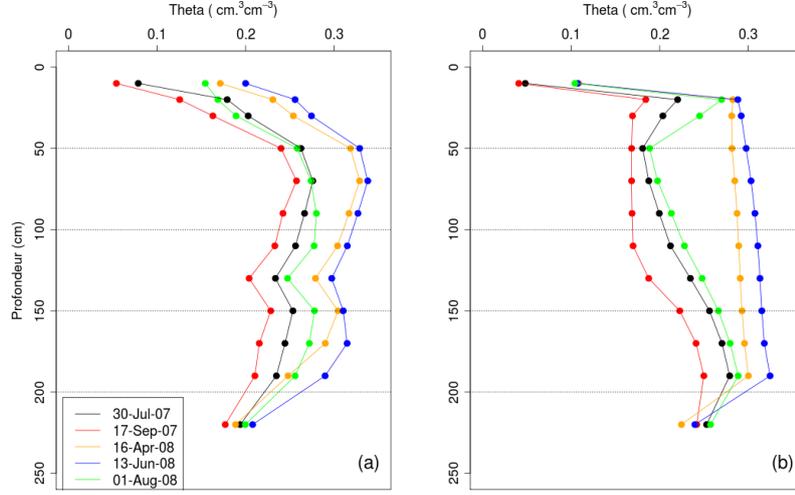


FIG. 3.7: Comparaison des profils d'humidité des sols mesuré (a) et simulé (b) par HYDRUS-1D sur le site 7.

discontinuités affectant la réserve hydrique sont fréquentes ce qui se traduit par des formes de profils complexes. L'introduction dans HYDRUS-1D des couches de sol ayant des propriétés hydrodynamiques différentes peut introduire des discontinuités peu réalistes dans la forme des profils simulés.

- Valeur extrêmes d'humidité : le respect des valeurs minimales et maximales des courbes d'humidités a été pris en compte lors du calage du modèle. Cet aspect a été contrôlé en partie dans la paramétrisation du modèle HYDRUS-1D (chapitre 2§ 2.3.3.4). En effet dans celui-ci, l'humidité résiduelle et l'humidité à saturation ont été introduites. Du fait de la grande gamme de conditions d'humidité rencontrées dans notre étude, avec un période extrêmement sèche pendant la fin de l'été 2007 et une période très humide pendant le printemps 2008, nous considérons que les mesures neutroniques ont capturé la gamme possible de variation des conditions hydrique du sol, pour chacun des sites.
- Stock hydrique : les stock hydriques simulés ont été comparés avec les stock hydriques issus des mesures, le stock hydrique étant défini comme :

$$Stock = \sum_{i=1}^n \theta_{meas} * \Delta_{Sol} \quad (3.1)$$

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

où  $\theta_{meas}$  en  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  représente l'humidité mesuré par profondeur et  $\Delta_{sol}$  l'épaisseur de couche considéré en cm.

Ainsi l'évolution de stock hydrique a été suivie pour chaque date de mesure. Le critère d'évaluation de l'erreur pour toutes les comparaison entre valeurs mesurées et simulées a été évalué avec le RMSE (Root Mean Square Error) définit par :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2} \quad (3.2)$$

où  $n$  correspond au nombre de mesures,  $S_i$  aux stocks simulées et  $M_i$  les stocks mesurées.

Le deuxième indicateur d'erreur utilisé est le RRMSE (Relative Root Mean Square Error) qui est définit par :

$$RRMSE = \frac{RMSE * 100}{\overline{M_i}} \quad (3.3)$$

où  $\overline{M_i}$  est la moyenne des valeurs mesurées. Cet estimateur est donné en pourcentage (%) est correspond à l'erreur relative à la mesure moyenne.

Ces deux indicateurs de l'erreur ont aussi été utilisée sur la plupart des analyses qui suivent.

- Bilan de masse : l'erreur de bilan de masse des simulations a été vérifiée pour chaque simulation de façon à ne pas dépasser le seuil de 0.05% d'erreur.

#### 3.4.1.2 Résultats des calages

Les résultats des calages seront présentés en deux parties, d'abord les resultats du calage par comparaison entre les stocks hydriques mesurés avec des profils neutroniques et simulés par HYDRUS dans trois cas. En premier le site 7 est analysé en détails car c'est un site de référence puisqu'il est équipé d'une station de flux permettant de réaliser une validation des ETR simulées par HYDRUS, puis les sites 1, 2, 3, 4 et 5, et finalement le site Roujan ou Site 6 (ORE OMERE). Bien que le bassin versant de Roujan soit inclus dans le bassin versant de la Payne, nous désignerons par la suite le Site 6 par "dépression de Roujan" et les autres sites (1 à 5 et 7) par "la Payne". Le calage a ensuite été évalué en fonction de l'erreur sur la variation des humidités mesurées et

simulées par horizon.

- site 7 : ce site correspond à une grande parcelle de vigne avec absence permanente de nappe phréatique. La figure 3.8 qui montre la comparaison des stocks en eau simulés par HYDRUS et mesurés par sonde neutronique, aux dates de mesure, montre que le calage d’HYDRUS était satisfaisant sur ce critère. On obtient une erreur relative (RRMSE) de 3.4% sur les 22 mesures distribuées sur une période de 433 jours. L’analyse temporelle du calage (figure 3.9) montre que le calage est plus satisfaisant à partir du printemps 2008, où les simulations suivent très correctement les points de mesures. Pendant l’année 2007 la simulation sous-estime légèrement en relation avec le calage. Entre janvier et avril 2008, période ou d’importantes précipitations se sont produites, il y a une surestimation par la simulation. La plus grande différence entre la simulation et la mesure représente 5% du stock. Comme nous le verrons par la suite, ces résultats sont de qualité légèrement inférieure à ceux obtenus sur les autres sites. La forme des profils visibles sur la figure 3.7 montre que la forme du profil obtenue par simulation n’est pas parfaitement égale à celle mesurée.
- Sites 1 à 5 : le calage sur les autres sites du bassin versant de la Payne (sites 1, 2, 3, 4 et 5) présente des résultats satisfaisants en terme d’erreur relative (RRMSE), avec des valeurs allant de 4.4 à 11% (annexe C). L’analyse temporelle de chacun des sites nous montre des fluctuations plus grandes de l’erreur obtenue que sur le site 7, pouvant monter jusqu’à 20% en différence relative avec la mesure dans le cas le plus extrême (site 1 pendant l’été 2007). Compte tenu du fait que ces simulations sont effectuées sur presque 2 saisons (15 mois) et correspondent à des situations très variées (avec ou sans nappe) nous pouvons considérer ces simulations comme numériquement satisfaisantes. Par la suite, les points de mesures 3h et 3b d’une part, 5h et 5b d’autre part, seront regroupés en sites 3 et 5.
- Site dépression de Roujan (Site 6) : ce site sera analysé en considérant les deux grands type d’occupation des sols présents parmi les 9 points de mesures existants. Le calage sur les points ne correspondant pas à de la vigne a été moins

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

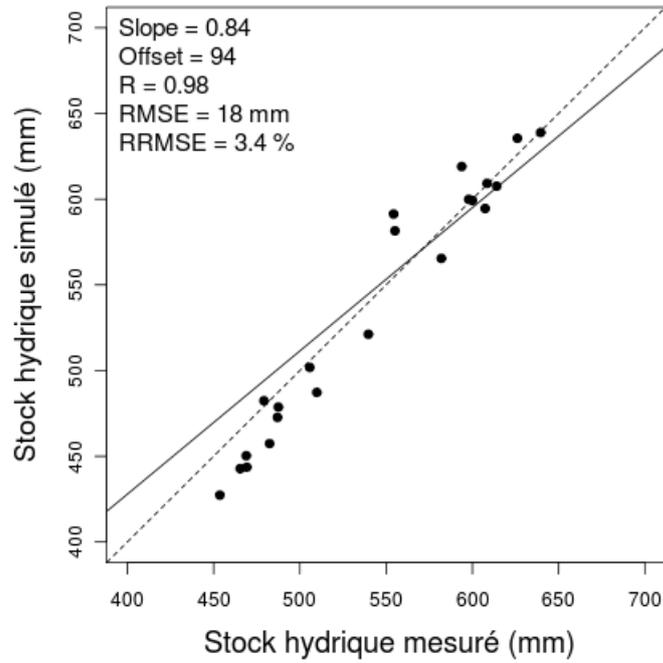


FIG. 3.8: Calage du modèle HYDRUS-1D sur les site 7 : comparaison des stocks en eau mesurés (profils neutroniques) et simulés par HYDRUS-1D.

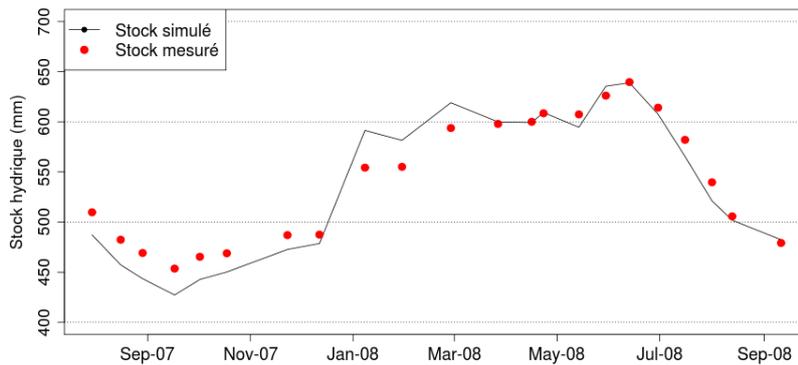


FIG. 3.9: Évolution du stock en eau mesuré et simulé sur le site 7

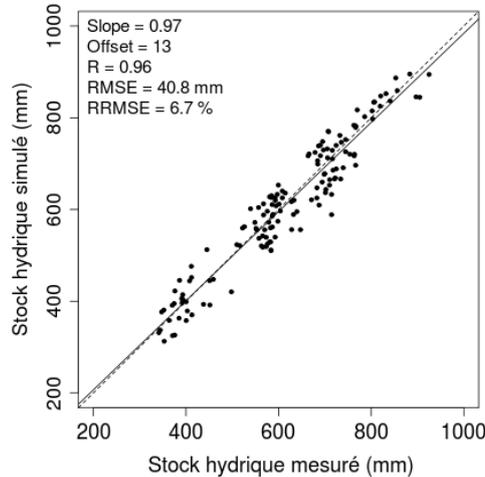


FIG. 3.10: Calage du modèle HYDRUS-1D sur tout les points de mesure du Site 6 : comparaison des stocks en eau mesurés (profils neutroniques) et simulés par HYDRUS-1D.

rigoureux du fait du manque des données, notamment sur les paramètres structuraux du blé (points aw83Pam et aw83Pav) et de la friche (aw81). Ces points étant relativement éloignés de la station de flux et ne correspondant pas à l'objet étudié dans ce travail (le vignoble), des formulations empiriques basées sur le taux de couverture végétale à partir de la télédétection (NDVI) et de la littérature ont été utilisées pour établir les paramètres de forçage de HYDRUS-1D. Malgré ces considérations, des résultats de qualité raisonnable ont été obtenus sur l'annexe C, avec une RRMSE toujours inférieure à 10%. À noter que pour la suite de l'étude, les sites aw 83Pav et aw 83PamHaut seront moyennés pour former un seul site appelé aw 83, correspondant à la parcelle de blé.

Pour les 6 points de mesures en vigne du Site 6 (aw97, aw88, aw92, aw104, aw124, aw126), des calibrations satisfaisantes ont été obtenues avec des RRMSE comprises entre 3,5 et 7,5 %. Il faut noter que pour l'ensemble des sites les simulations couvrent une large gamme de stocks hydriques. Un autre résultat à signaler concerne la calibration correcte des sites à nappes (aw87, aw88 et aw92). Finalement si l'on considère l'ensemble des points de mesures du Site 6, en faisant la moyenne arithmétique de tous les points de mesure, nous obtenons une valeur

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

de calage multi-locale pour ce site. Ce calage est représenté sur la figure 3.10 dans lequel on déduit une calibration avec une erreur relative de 6,7 %.

Le deuxième critère de calage analysé concerne l'erreur sur la forme des profils simulés. Les résultats issus de cette analyse, nous montrent pour les profils d'humidité simulés par horizons est comparés avec les mesures équivalentes que le RMSE obtenue sur l'ensemble des simulations est de  $0.04 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  qui en relatif représente 19%, visible sur la figure 3.11. Sur cette figure on remarque aussi que l'erreur est plus importante sur le premier mètre de profondeur où se concentrent la plupart des racines et où les plus grandes variations des teneurs en eau du sol se produisent. Malgré la difficulté à obtenir des profils d'humidité par simulation proches de la réalité, on peut conclure que des résultats satisfaisants ont été obtenus avec une erreur relative raisonnable, ce qui renforce les résultats obtenus sur le calage évalué par le stock hydrique.

A ce stade, nous disposons de jeux de paramètres permettant d'effectuer, pour chacun des sites de mesure, des simulations continues du stock hydrique.

#### 3.4.2 Variabilité spatio-temporelle du stock hydrique sur les sites d'étude

Dans cette section nous analyserons l'évolution temporelle du stock hydrique en considérant que les calages sont corrects mais avec une incertitude qui sera prise en compte dans l'analyse.

##### 3.4.2.1 Sites La Peyne

L'étude de la variabilité spatio-temporelle se fera en considérant les 150 cm premiers centimètres des profils de sols, étant donné la forme des profils d'humidité obtenus (§ 2.3.3.4) et les observations des travaux précédents (Bsaibes, 2007; Trambouze, 1996) qui ont montré que la majorité de l'absorption d'eau par le système racinaire de la vigne s'y produit. De plus la comparaison du stock hydrique entre sites devient plus cohérente puisqu'en considérant les 150 premiers centimètres, on "normalise" les sols des chacun des sites en enlevant des horizons non conventionnels par exemple sur le site 1, il y a un horizon de mollasses endurcies qui pourrait biaiser les comparaisons. L'effet des nappes perchées et lui aussi réduit puisqu'on s'éloigne de leur influence. De ce fait l'erreur mesurée (RMSE et RRMSE) et plus importante, le RRMSE augmente

### 3.4 Calage du modèle HYDRUS-1D

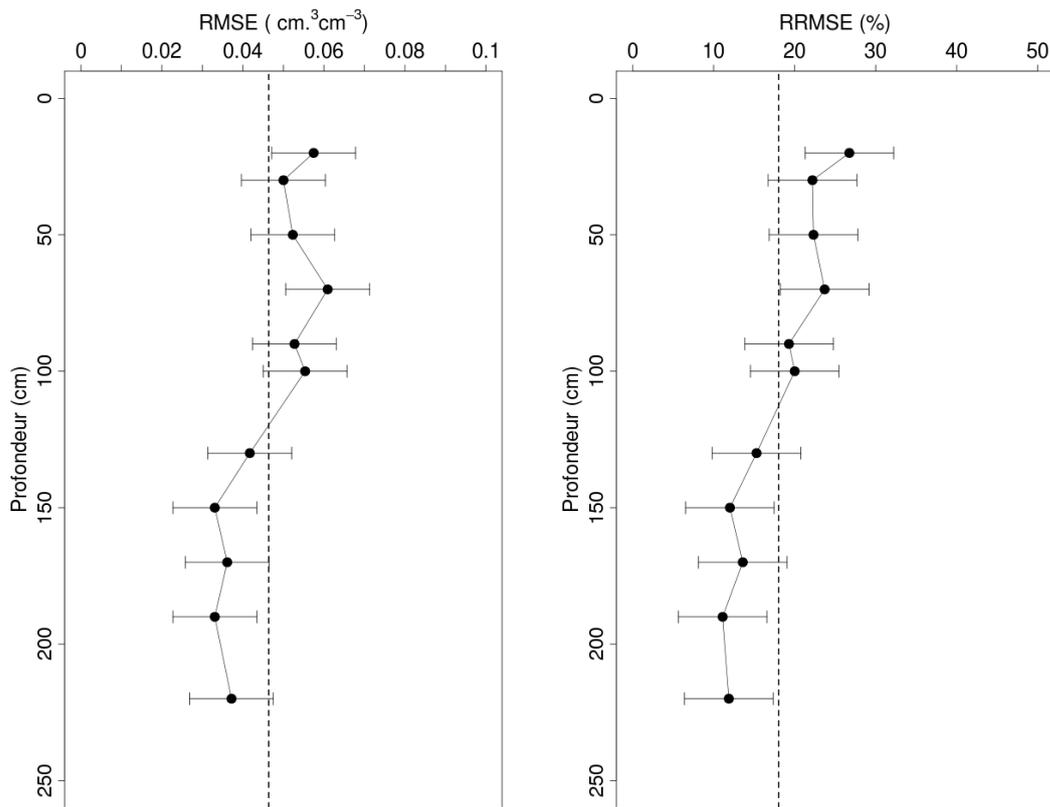


FIG. 3.11: Erreur (RMSE) et erreur relative (RRMSE) du calage du modèle HYDRUS-1D sur tous les points de mesure selon la profondeur. Les lignes pointillées représentent la valeur moyenne de l'erreur tout points confondus et les barres d'erreur, l'écart-type de l'erreur pour chaque profondeur.

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

de 6 à 9% sur le bassin versant de la Peyne et de 7 à 15% sur la dépression de Roujan (Site 6). En effet les horizons exclus de l'analyse (entre 150-250 cm) mais qui ont servi au calage (section précédente), sont beaucoup moins variables en terme de quantité d'eau. Trois effets probablement souvent combinés expliquent cette stabilité en profondeur. En premier lieu l'effet de l'absorption racinaire est moins important ce qui implique une faible variation de l'humidité, deuxièmement sur les sites avec présence de nappe permanente, il y a toujours une situation proche de la saturation donc des faibles variations dans le temps, ce qui est plus facile à simuler, finalement, au cas contraire il y a sur certains sites des horizons endurcis où la quantité d'eau ne varie guère pendant l'année et le modèle simule donc plus facilement. L'augmentation de l'erreur de calage lorsque l'on considère une profondeur de 150 cm est plus importante sur la dépression de Roujan (Site 6) puisque dans celle-ci il y a une importante présence de nappes pendant toute l'année, en particulier sur les sites aw81 et aw83 qui correspondent à de la friche et du blé respectivement. Dans ce contexte les variations sont donc plus fortes sur les 150 cm premiers centimètres ce qui explique une augmentation de l'erreur plus importante.

Lorsque l'on observe les graphiques de la variabilité temporelle de l'erreur de calage sur les sites de la Peyne ainsi que sur ceux de la dépression de Roujan, (figure 3.12 et figure 3.13), on voit nettement que le calage du modèle est plus satisfaisant en 2008 qu'en 2007. Cette moins bonne qualité des simulations en 2007 est probablement due au fait que pour des raisons pratiques, l'installation des tubes neutroniques n'a pu avoir lieu qu'au début juillet 2007 ce qui ne nous a permis d'obtenir des profils d'humidité du sol mesurées pour l'initialisation des simulations HYDRUS-1D, en mars 2007. Un autre effet intéressant que l'on peut observer dans les mêmes figures, est que pendant l'hiver le modèle a enregistré une erreur de calage beaucoup moins importante. Ceci pourrait être expliquée par le fait que pendant l'hiver, il y a une présence de nappes plus importante due aux précipitations de la période automne-hiver, dans la plupart des sites, ce qui entraîne à une situation de saturation presque permanente des sols, plus facile à simuler par HYDRUS-1D. Pendant le printemps-été 2008, le calage est moins précis à proximités des importantes précipitations du printemps 2008, moment où il y aurait les plus importantes variations du stock en eau en particulier.

Un dernier aspect visible sur les figures 3.12 et 3.13 concerne les points de mesure avec présence de nappe, ceux-ci étant représenté en lignes pointillés et les sites sans

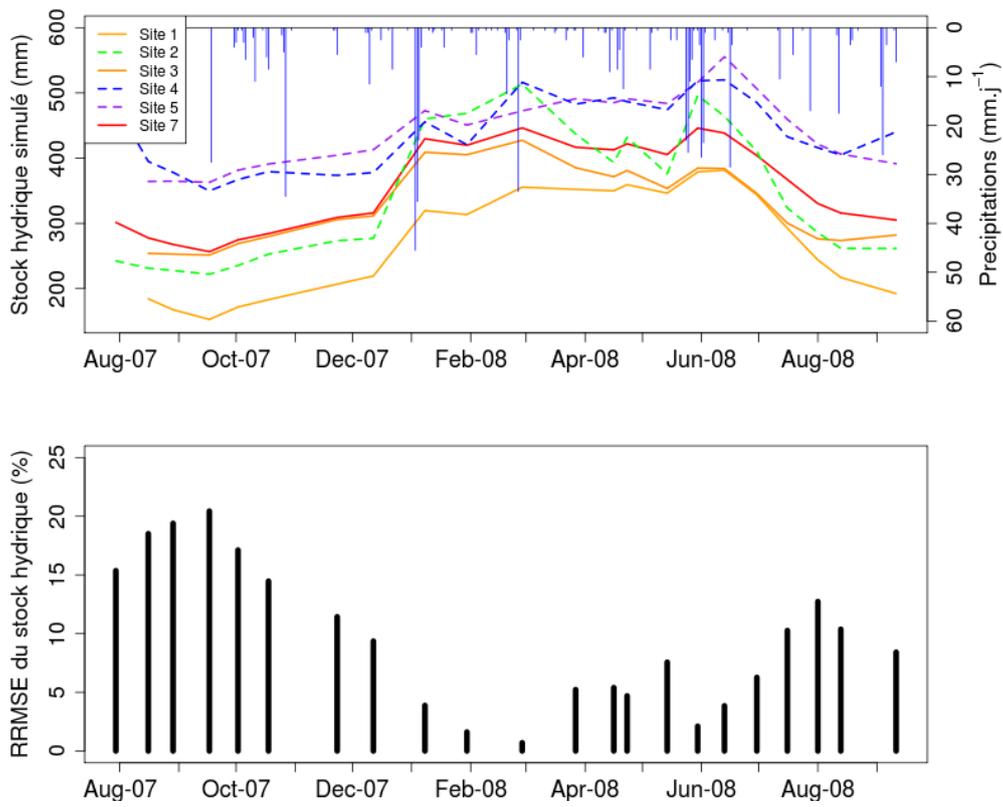


FIG. 3.12: Évolution du stock hydrique et évolution de l'erreur relative (RMSE relatif) sur 150 cm de profondeur pour tous les sites "la Peyne" avec les chroniques de précipitations, durant toute la période de simulation. En pointillés sont représenté les sites à nappes (permanente ou intermittente).

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

nappes en lignes continues. Les sites 4 et 5 ont une variabilité inférieure de leurs stocks hydriques du fait de la présence permanente des nappes à faible profondeur pendant toute l'année (§ 3.2.2). Le site 2 possède la variabilité de stock hydrique plus importante. Il s'agit d'un site avec une dynamique du niveau de nappe importante avec un rabattement très rapide au printemps (§ 3.2.2), un sol extrêmement caillouteux, à faible capacité de stockage en eau, donc un site à prédisposition au stress hydrique pendant les périodes d'été. Les sites 1, 3 et 7 ont un comportement similaire avec une importante variabilité du stock hydrique entre l'été et l'hiver, marquée par un dessèchement très important à partir de la moitié du printemps ce qui correspond à la période de développement maximal de la vigne. Le site 1 est un site à capacité de stockage très limitée du fait de ses textures majoritairement sableuses, ce qui lui confère une condition de sécheresse notable.

#### 3.4.2.2 Site dépression de Roujan (Site 6)

Les résultats des simulations des variations de stock hydrique sur les points de mesure du Site 6 ont un comportement général similaire à celle obtenue sur les sites "la Payne". On observe néanmoins une erreur relative du calage date par date supérieure, avec des valeurs pouvant monter jusqu'à 35% pendant l'été 2007. Ceci est probablement expliqué par des valeurs de stock hydrique inférieures car des textures à moindre capacité de stock sont présentes dans cette zone (moins argileuses). De plus, les sites friche et blé ont été moins bien simulées, ce qui engendre une augmentation générale de l'erreur du Site 6.

Sur le figure 3.13 on distingue clairement les sites friche (aw81) et blé (aw83) ont un comportement d'évolution de stock hydrique différents aux sites vignes. Cette différence peut être attribuée aux différences d'évolution de la végétation (présence de blé en hiver, récolte du blé fin juin à début juillet) ainsi qu'à la moindre profondeur d'enracinement, par comparaison avec les vignes.

### 3.5 Comparaison des ETR simulées par HYDRUS-1D avec celles mesurées par covariances turbulentes

Le modèle HYDRUS-1D devant in fine nous servir à simuler les ETR à l'échelle parcellaire, prise comme indicateur de statut hydrique de la vigne, nous les comparons

### 3.5 Comparaison des ETR simulées par HYDRUS-1D avec celles mesurées par covariances turbulentes

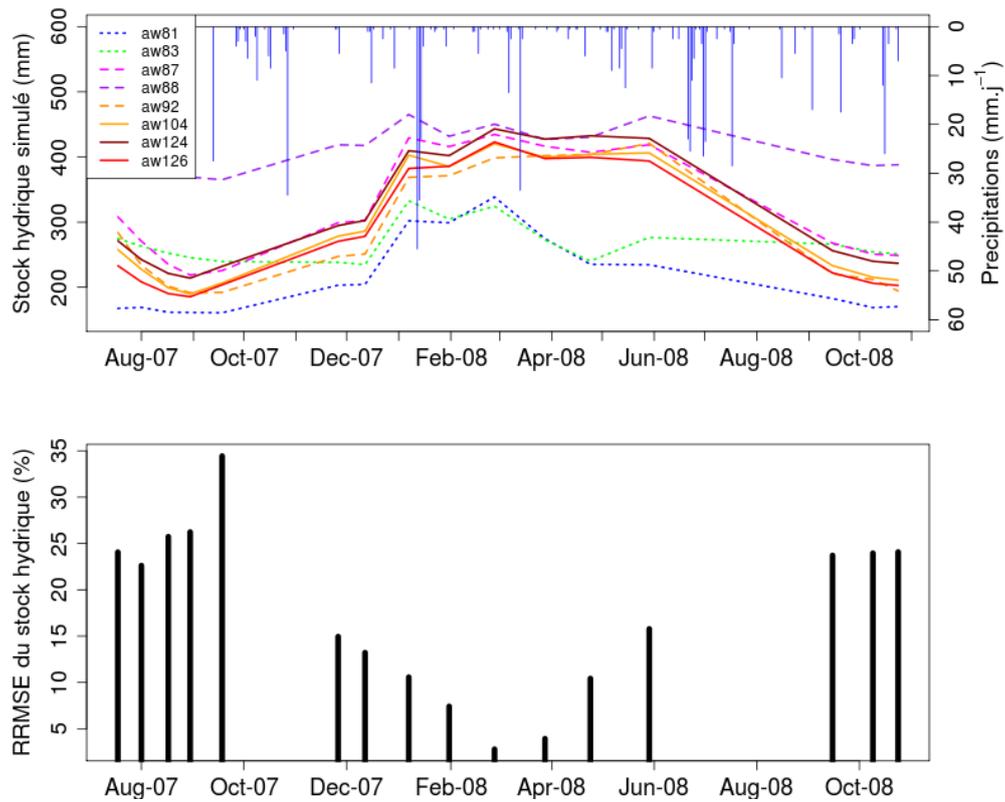


FIG. 3.13: Évolution du stock hydrique et évolution de l'erreur relative (RMSE relatif) sur 150 cm de profondeur pour tous les points de mesure de la dépression de Roujan (Site 6) avec les chroniques de précipitations, durant toute la période de simulation. En pointillés sont représenté les parcelles à nappes (permanente ou intermittente). La parcelle aw81 et aw83 correspondent à de la friche et du blé.

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

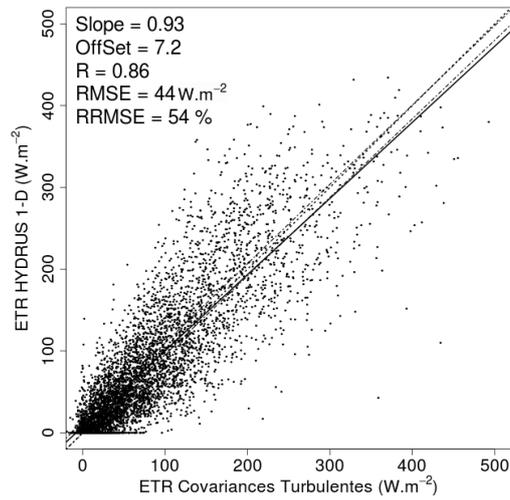
dans cette partie avec les ETR mesurées par covariances turbulentes. Rappelons que ces mesures des flux atmosphériques ont été conduites sur les sites 6 et 7. Les mesures sur le site 7, grande parcelle de vigne, étaient pour des raisons pratiques, occasionnelles. Les mesures sur le Site 6, étaient permanentes mais du fait de la hauteur de mesure (6.2 m) étaient représentatives d'une zone étendue. La zone contribuant aux flux mesurés sur le site 7 (ou footprint) a été étudiée par [Bsaibes \(2007\)](#) et correspond bien aux 9 points de mesures neutroniques de la dépression de Roujan que nous avons utilisés pour le calage d'HYDRUS sur ce site. Aussi, en première approximation, les simulations HYDRUS correspondant à ces 9 points de mesures ont été agrégées avant de les comparer aux mesures d'ETR.

#### 3.5.1 Validations à l'échelle horaire

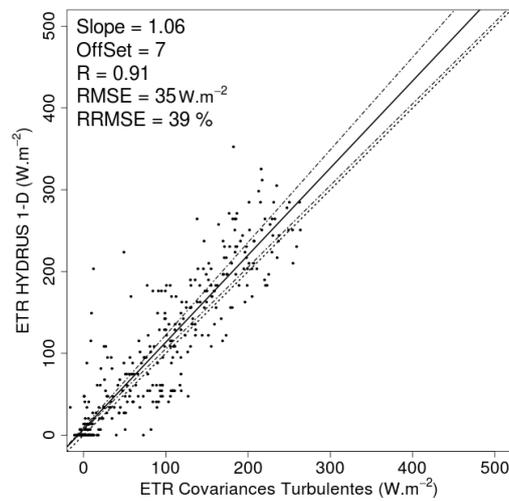
Les comparaisons horaires ont été effectuées en considérant seulement les heures diurnes (entre 6 UTC et 19 UTC) sur toute la période de simulation. Ces comparaisons ont montré des résultats satisfaisants, avec un RMSE de  $44 \text{ W.m}^{-2}$  pour le Site 6 et un RMSE de  $35 \text{ W.m}^{-2}$  pour le site 7. Sur la figure [3.14](#) représentant ces validations, on observe une légère sous-estimation des valeurs élevées d'ETR simulées avec une pente de 0.93 et un offset de  $7.2 \text{ W.m}^{-2}$  sur le Site 6. Sur le site 7 on observe au contraire une légère surestimation sur toutes les valeurs d'ETR simulées avec une pente de 1.06 et un offset de  $7 \text{ W.m}^{-2}$ . Sur les deux sites, de fortes corrélations ont été trouvées, quantifiées par les coefficients de corrélations de 0.85 et de 0.91 pour les sites 6 et 7 respectivement. Ces résultats montrent la bonne qualité des relations obtenues entre les ETR horaires simulées et mesurées, qui sont dans l'ordre de grandeur des validations obtenues par d'autres auteurs sur des simulations en parcelle de vigne ([Ortega-Farias et al., 2007](#)).

Malgré ces résultats encourageant un aspect à ne pas négliger est l'importante dispersion autour de la droite 1:1 des valeurs d'ETR (en considérant les bornes établies par les régressions des tolérances sur la mesure en rouge), ceux-ci nous indiquent que s'il y a bien une tendance générale à bien estimer les ETR à partir des simulations HYDRUS-1D, un important nombre d'ETR horaires sont mal simulées. Cette dispersion était prévisible du fait de la longueur de la période de simulation, plus de 400 jours englobant le cycle complet de la vigne et donc toutes les situations possibles du système sol-plante atmosphère.

### 3.5 Comparaison des ETR simulées par HYDRUS-1D avec celles mesurées par covariances turbulentes



(a) Site 6



(b) site 7

FIG. 3.14: Validation des ETR horaires diurnes simulées par le modèle HYDRUS-1D avec les ETR obtenues par covariances turbulentes sur le Site 6 (a) et sur le site 7 (b). Le trait continu représente la droite de régression, les traits en pointillés représentent les régressions des tolérances maximales et minimales des mesures d'ETR par covariances turbulentes.

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

Pour essayer de comprendre cette dispersion, une analyse par heure de la journée a été réalisé sur les 2 sites pour tenter de comprendre à quel moment de la journée les ETR simulées par HYDRUS étaient les plus proches des mesures par covariances turbulentes. Le tableau 3.2 résume le résultat de cette analyse dans laquelle la pente, l'offset, le coefficient de corrélation, les RMSE et RRMSE ont été calculés pour toutes les heures de la journée. Ce tableau nous montre que les simulations HYDRUS sont plus proches des mesures entre 8 et 17 heures pour le Site 6 et entre 9 et 19 heures pour le site 7. Le modèle simule donc mal les ETR aux heures du lever du soleil et au coucher du soleil ce type d'incertitudes, au moment des périodes d'inversion est classique mais ne concerne que des périodes où le rayonnement net, et donc les flux convectifs sont faibles. Sur le Site 6 ce phénomène est visible à partir de 17 heures parce que sur ce site, la validation inclu un nombre important de valeurs pendant la période d'hiver et d'automne où les journées sont plus courtes avec un coucher de soleil fluctuant entre 17 et 19 heures. Comme on verra dans la section suivante, ces mauvaises simulations ont une influence mineure sur l'ETR journalière puisque les valeurs d'ETR pendant ces heures sont le plus souvent très faibles.

Sites → Heure	Site 6					site 7				
	Pente	Offset (W.m <sup>-2</sup> )	R	RMSE (W.m <sup>-2</sup> )	RRMSE (%)	Pente	Offset (W.m <sup>-2</sup> )	R	RMSE (W.m <sup>-2</sup> )	RRMSE (%)
6	0.67	6.4	0.54	17	133	1.29	2.1	0.84	22	152
7	1.23	8.3	0.81	29	86	1.13	3.7	0.79	30	137
8	1.15	15.6	0.86	40	64	1.16	7.3	0.78	39	121
9	1.11	21.3	0.86	49	56	1.24	11.8	0.94	35	63
10	1.09	15.9	0.84	54	49	1.1	19.7	0.87	44	60
11	1.01	14	0.84	53	43	1.1	20.2	0.81	54	52
12	0.90	16.5	0.82	54	41	1.05	21.6	0.87	43	38
13	0.86	14.0	0.83	51	40	1.22	3.5	0.92	41	33
14	0.84	9.6	0.85	48	41	1.3	-23	0.92	38	28
15	0.85	3.6	0.84	44	44	1.21	-11.7	0.93	35	26
16	0.76	4.9	0.83	44	55	1.06	-5.9	0.94	28	22
17	0.72	-0.3	0.85	34	64	1.07	-9.6	0.96	23	19
18	0.56	1.5	0.76	30	98	0.92	-1.6	0.95	24	22
19	0.28	1.8	0.55	22	176	0.99	-0.8	0.97	17	18

TAB. 3.2: Évaluation de la pente, offset, coefficient de corrélation (R), RMSE et RRMSE sur les régressions des validations selon l'heure de la journée pour le Site 6 et 7.

### 3.5 Comparaison des ETR simulées par HYDRUS-1D avec celles mesurées par covariances turbulentes

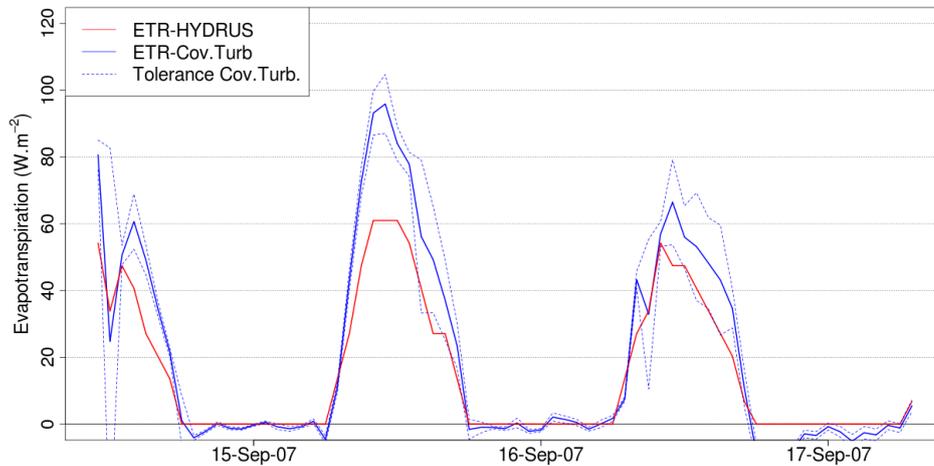


FIG. 3.15: Comparaison de l'ETR simulée par HYDRUS-1D avec l'ETR mesurée par covariances turbulentes sur une période à forte contrainte hydrique sur le site 7.

Les résultats de l'analyse horaire n'expliquent pas complètement la dispersion observée sur la figure 3.14. Ceci nous a amené à réaliser une deuxième analyse temporelle, en fonction des périodes de l'année, en lien avec le développement de la vigne. Cette analyse sera présentée dans une section spécifiquement dédiée (§3.5.3).

Un dernier aspect analysé à partir des valeurs des simulations horaires concerne la régulation stomatique de la vigne. Comme il était annoncé au chapitre 2 (§2.3.3.2), le modèle HYDRUS-1D ne tient pas en compte des phénomènes physiologiques lors d'une contrainte hydrique sévère, en particulier la régulation stomatique. Pour tenter de voir cet effet nous avons sélectionné une période de temps où la condition hydrique a été particulièrement contraignante pour la vigne, ce qui a été démontré par les mesures de flux par covariances turbulentes visibles sur les figures 3.5a et 3.6a de la section précédente où le flux de chaleur latente diminue durant l'après-midi du 15 septembre 2007. Lorsqu'on visualise la figure 3.15 on peut retrouver ce phénomène sur la courbe des ETR mesurées par covariances turbulentes. Entretemps les ETR simulées par HYDRUS ont une forme plus symétrique entre matin et après midi ce qui correspond bien à l'absence de considération de la régulation stomatique. Il faut quand même signaler que le modèle sous-estime la mesure à cette date.

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

#### 3.5.2 Validation à l'échelle journalière

Pour analyser le statut hydrique, le pas de temps horaire est le plus adapté. D'autre part le pas de temps journalier est bien adapté à l'étude du bilan hydrique sur de longues périodes, comme c'est le cas pour notre étude. De plus, le modèle HYDRUS ne simulant pas de façon explicite la régulation stomatique, une comparaison des simulations HYDRUS avec les mesures d'ETR intégrée sur la journée est plus adaptée, comme montré par [Bsaibes \(2007\)](#).

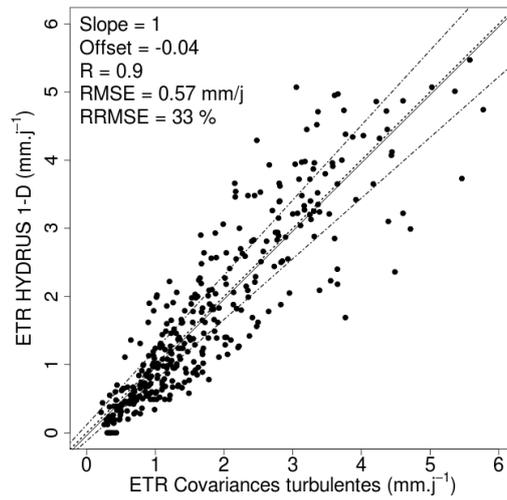
Les validations des mesures journalières pour toute la période de simulation nous montrent des résultats comparables à ceux obtenus à l'échelle horaire, pour les deux sites. Pour le Site 6, un RMSE de  $0.57 \text{ mm.j}^{-1}$  avec une pente de 1 et un offset de -0.04 ont été obtenus, tandis que pour le site 7, un RMSE de  $0.40 \text{ mm.j}^{-1}$  avec une pente de 1,17 et un offset de -0.18 ont été obtenus. Ceci nous indique que sur le site 7 une surestimation des fortes valeurs d'ETR (de l'ordre de 17%) simulées a été obtenue. La figure 3.16 illustre ces résultats.

Ces résultats peuvent être expliqués : d'une part parce que le site 7 est un grande parcelle homogène sans présence de nappes, conditions idéales pour l'application des deux méthodologies (HYDRUS-1D et covariances turbulentes), ce qui explique les résultats tout à fait satisfaisants. D'autre part, le site 6 est un ensemble de parcelles hétérogènes, il n'est donc pas surprenant d'obtenir des résultats moins satisfaisants. Sur ce site plusieurs facteurs contribuent à expliquer les résultats validation :

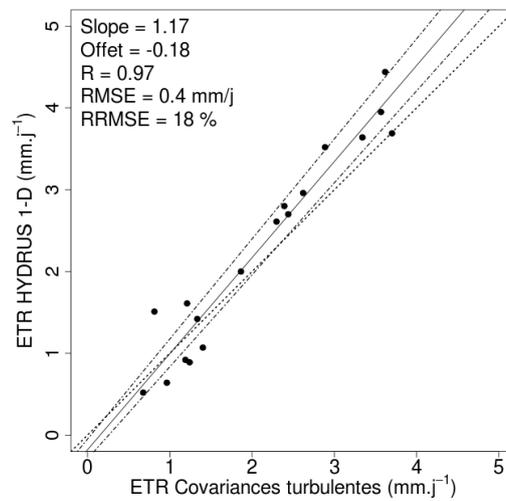
- la validation comprend une période beaucoup plus longue, incluant toutes les saisons ;
- mélange de culture (même si la vigne est majoritaire) ;
- [Bsaibes \(2007\)](#) a montré qu'il fallait pondérer les flux émis par chaque parcelle par la fonction de contribution aux flux mesurés (footprint), pour obtenir des estimations spatialisées satisfaisantes. Dans notre étude c'était pas réalisable compte tenu de la longueur de la période de simulation) ;
- existence possible de flux latéraux importants comme montré par [Dagès \(2006\)](#).

Compte tenu de ce qui précède des résultats finalement assez satisfaisants ont été obtenus.

### 3.5 Comparaison des ETR simulées par HYDRUS-1D avec celles mesurées par covariances turbulentes



(a) Site 6



(b) site 7

FIG. 3.16: Validation des ETR journalières diurnes simulées par le modèle HYDRUS-1D avec les ETR obtenues par covariances turbulentes sur le Site 6 (a) et sur le site 7 (b). Le trait continu représente la droite de régression, les traits en pointillés représentent les régressions des tolérances maximales et minimales des mesures d'ETR par covariances turbulentes.

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

#### 3.5.3 Analyse temporelle des validations

Dans cette section nous analyserons comment évolue la validation des ETR estimées par HYDRUS. Pour cela une comparaison avec les mesures de flux par covariances turbulentes a été réalisée en se focalisant sur les périodes importantes pour le développement de la vigne.

Les chroniques d'ETR sur le site "dépression de Roujan" (Site 6) visibles sur la figure 3.17, nous montrent une comparaison en continue de l'ETR simulée avec celle mesurée par covariances turbulentes. On observe que le modèle suit assez correctement les mesures pendant toute la période de simulation par comparaison avec l'évapotranspiration de référence (ET0). On distingue dans cette chronique que la période comprise entre le 20 août et le 30 septembre 2007, il y a sous-estimation des ETR simulées par le modèle. Les ETR simulées par HYDRUS-1D pendant les périodes postérieures aux précipitations (visible surtout en mai 2008) ont présenté une sur-estimation par rapport aux mesures. Les sub-figures inférieures de la figure 3.17 représentent une segmentation temporelle de la période de simulation. Trois périodes importantes dans le cycle viticole sont analysées séparément.

- Période été 2007 : pendant cette période les ETR obtenues à partir de HYDRUS-1D sous-estiment de façon systématique l'ETR mesurée par la tour à flux. La valeur du RMSE de cette période étant de  $0.62 \text{ mm.j}^{-1}$  on peut considérer que la simulation est correcte, cependant lorsque l'on considère la valeur de RRMSE le résultat est sensiblement moins bon avec une valeur de 50%. Plusieurs hypothèses sont envisageables pour expliquer ces résultats. Une explication possible est que l'ETR simulée qui est elle même constituée par la moyenne arithmétique de mesures sur plusieurs parcelles. Parmi celles-ci il y a deux parcelles en friche (aw81) et une en blé (aw83) qui ont eu un calage moins précis (§3.4.1.2) aient été moins bien simulés ce qui entraînerait une erreur dans la simulation de l'ETR moyen. Dans la section suivante (§ 3.6) où une analyse de l'ETR simulé sur chacune des parcelles du Site 6 a été réalisée on observe sur la figure 3.20 que ces deux sites ont une ETR proche de zéro, c'est à dire correspondant à un sol nu pendant tout l'été alors que sur le terrain une croissance de végétation a été observée sur ces parcelles mais néanmoins non pris en compte faute de caractérisation précise de cette végétation.

### 3.5 Comparaison des ETR simulées par HYDRUS-1D avec celles mesurées par covariances turbulentes

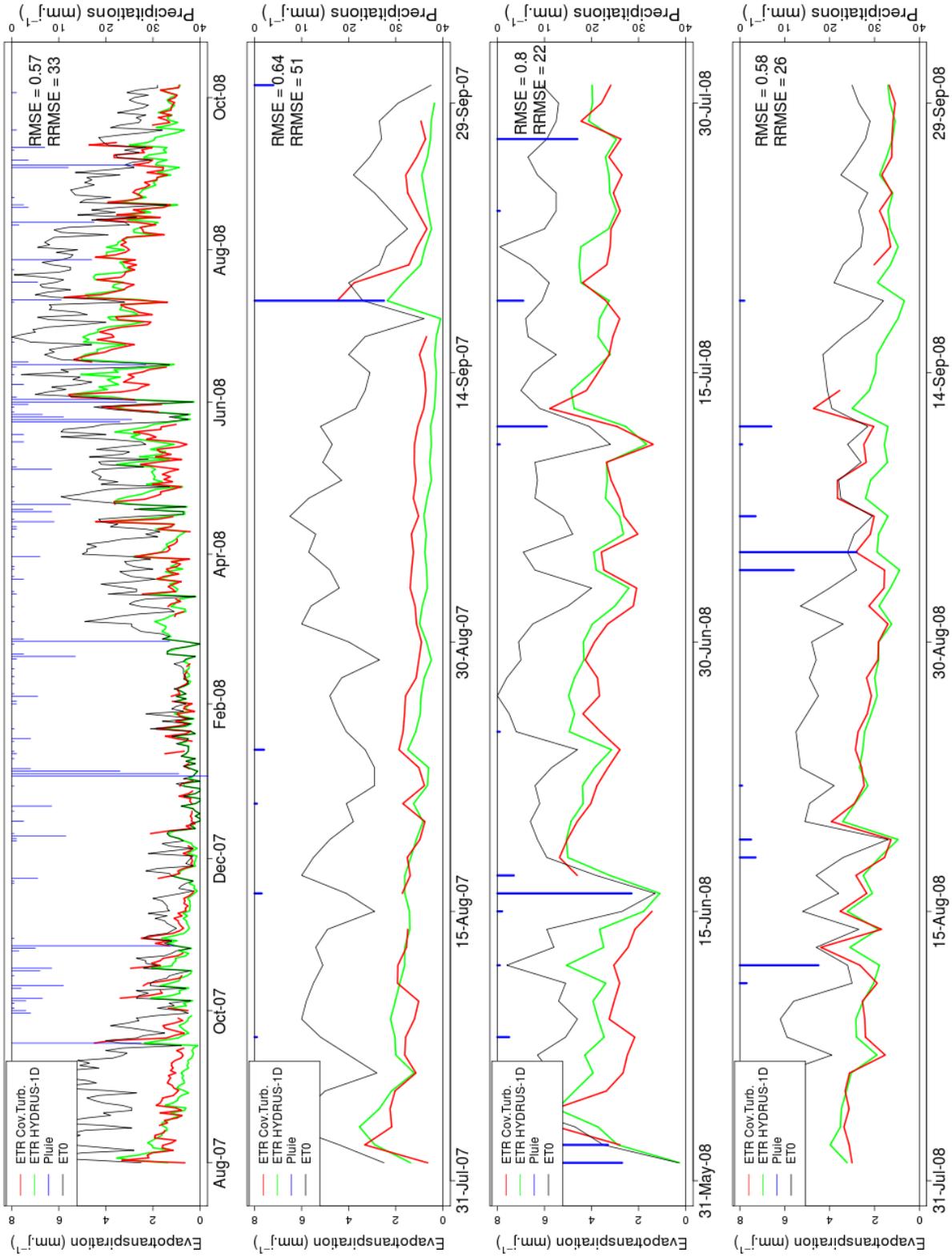


FIG. 3.17: Chroniques des ETR simulées par HYDRUS-1D et mesuré par covariances turbulentes, sur la dépression de Roujan (Site 6), du haut en bas : ensemble de la période, été 2007, printemps 2008 et été 2008.

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

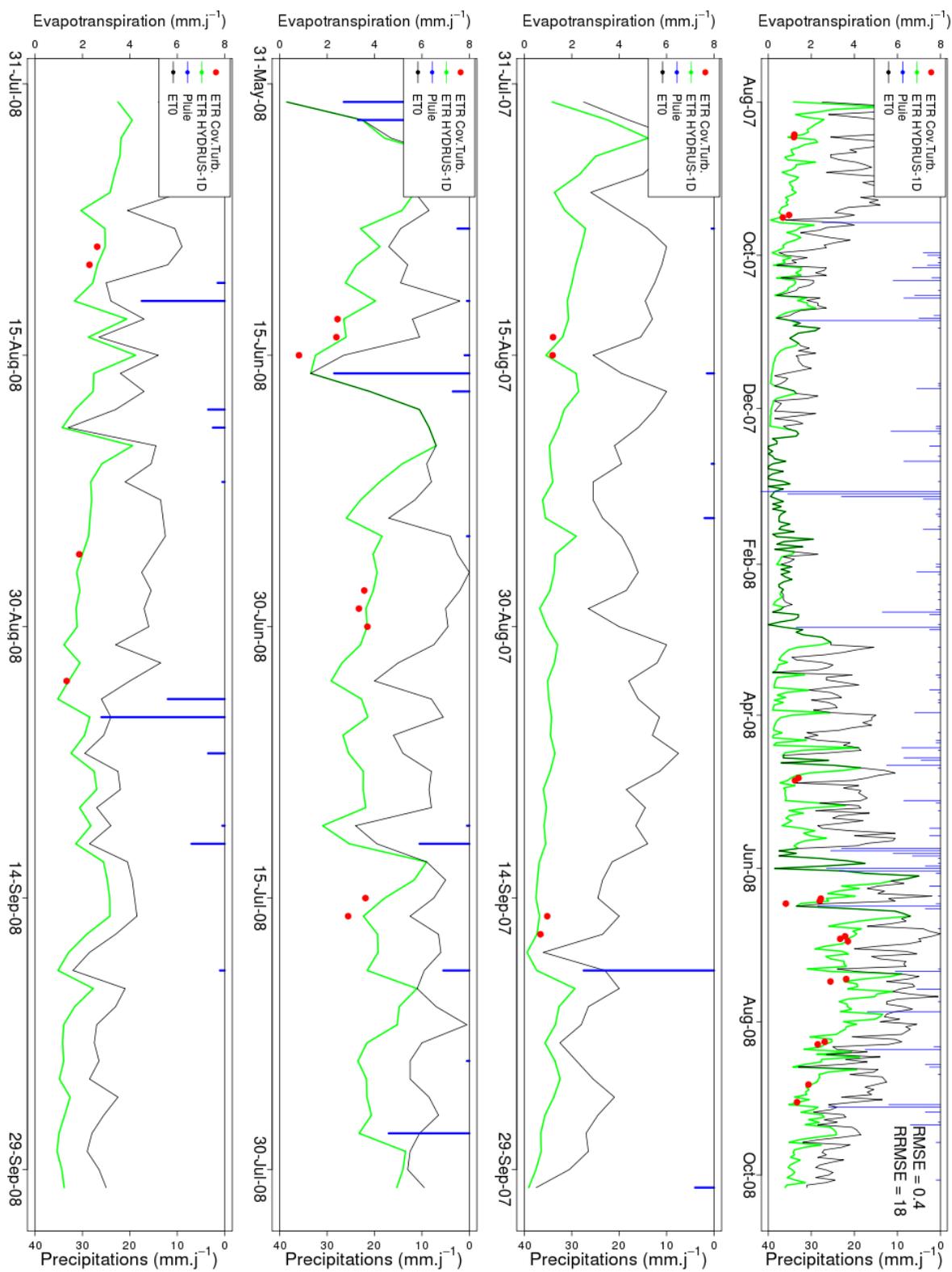


FIG. 3.18: Chroniques d'ETR simulé par HYDRUS-1D et validé par par covariances turbulentes, sur le site 7 du haut en bas; ensemble de la période, été 2007, et printemps 2008.

### 3.5 Comparaison des ETR simulées par HYDRUS-1D avec celles mesurées par covariances turbulentes

---

Une deuxième explication possible concerne la simulation en elle-même. En effet il est possible que le modèle n'ait pas atteint une stabilité suffisante du fait des difficultés d'initialisation déjà signalé.

- Période printemps 2008 : les résultats pendant cette période sont satisfaisants avec un RMSE de  $0.8 \text{ mm.j}^{-1}$  qui apparaît comme supérieur à ceux obtenus sur les autres périodes mais pas en relatif puisque les valeurs d'ETR mesurée sur cette période sont assez fortes, avec des valeurs pouvant aller jusqu'à  $6 \text{ mm.j}^{-1}$  ce qui conduit à une valeur de RRMSE de 22%. D'importantes différences sont surtout visibles pendant le mois de mai avec une surestimation des ETR par les simulations. Une probable explication serait liée, comme pour la chronique précédente à la présence des parcelles friche et surtout celle du blé. C'est en effet à cette période que le blé est à son potentiel évapotranspirant maximal ce qui expliquerait que son apport à l'ETR moyen soit surdimensionné par rapport à la mesure d'ETR capturé par la tour à flux. Un calcul de footprint pour estimer la contribution des parcelles de blé à l'ETR mesuré serait une stratégie à suivre pour améliorer ces résultats.
- Période été 2008. Des résultats satisfaisants ont été obtenus pendant cette période avec un RMSE de  $0.55 \text{ mm.j}^{-1}$  et un RRMSE de 25%. Ces résultats confirment la meilleure simulation obtenue pendant l'année 2008 bien que l'été 2008 ait été différent de celui de 2007. Des valeurs manquantes visible pendant 3<sup>ème</sup> semaine de septembre sont due à une panne de la tour à flux.

Sur le site 7 (figure 3.18) les simulations ont été très proches des mesures, pour les quelques jours de mesure disponible sur toutes les périodes analysées.

Finalement la figure 3.19 présente une validation générale de HYDRUS sur les sites 6 et 7 sur les périodes de développement végétatif de la vigne. La date du 13 mars 2008 correspond au début du stade phénologique de débourrement calculé par l'approche des sommes des températures (§3.1) alors que la date du 15 octobre correspond à la date de début de chute des feuilles observé sur le terrain. On obtient des valeurs correctes de simulation avec un RMSE de  $0.62 \text{ mm.j}^{-1}$  (29% de RRMSE). La pente est proche de 1 tandis que l'offset est proche de zéro, ce qui nous indique que les simulations en

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

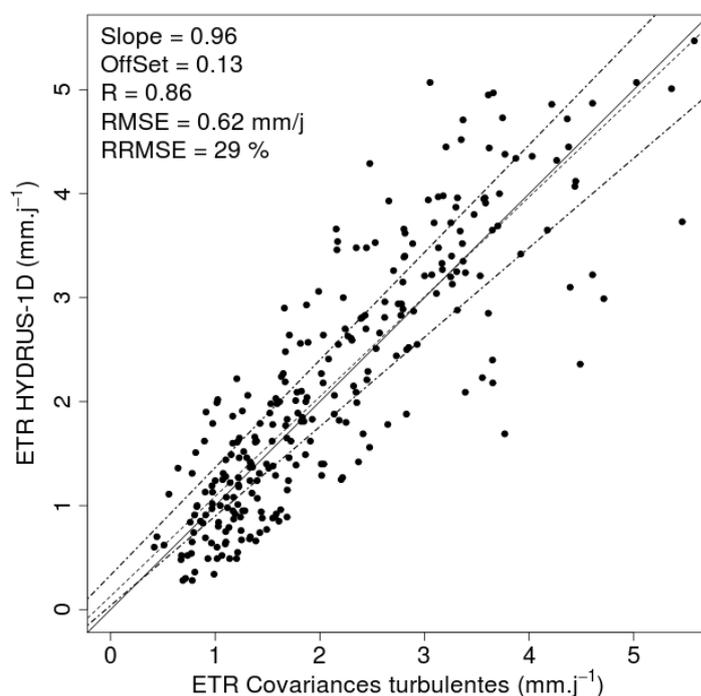


FIG. 3.19: Validation des ETR journalières simulées par le modèle HYDRUS-1D avec les ETR mesurés par covariances turbulentes sur toutes les périodes de développement végétatif de la vigne simulées (01/08/07 au 15/10/07 et 13/03/08 au 15/10/08) sur les sites 6 et 7. Le trait continu représente la droite de régression, les traits en pointillés représentent les régressions des tolérances maximales et minimales des mesures d'ETR par covariances turbulentes.

### 3.6 Analyse spatio-temporelle des ETR simulées par HYDRUS-1D

---

période de développement de la vigne n'ont pas présenté de biais, malgré une dispersion relativement importante.

## 3.6 Analyse spatio-temporelle des ETR simulées par HYDRUS-1D

D'après les résultats exposés dans les sections précédentes, des simulations satisfaisantes du statut hydrique de la vigne ont été obtenues tout au long de la période de simulation par le modèle HYDRUS-1D. Dans cette section, une analyse des résultats issus des simulation HYDRUS a été réalisée pour étudier les variations des ETR entre nos différents sites pendant la période de simulation. Dans un premier temps les différents points de mesures du Site 6 ont été étudiés, puis une analyse incluant l'ensemble des sites du bassin versant de la Peyne a été réalisée.

### 3.6.1 Dépression de Roujan (Site 6)

Dans les chroniques des ETR (figure 3.20), on observe d'abord une gamme de variation assez importante des ETR par rapport à l' $ET_0$ . Lorsque nous analysons en détail ces chroniques, on observe que pour la période d'été 2007 toutes les parcelles ont des ETR très faibles, mais avec une légère différence pour les sites à nappes qui ont des ETR un peu plus fortes. A remarquer que sur la parcelle aw83 (blé), après les précipitation du 20 septembre 2007, un rapide pic d'ETR se produit, une explication serait due aux mauvaises herbes et au repousses qui se sont produites rapidement. Au printemps 2008 on distingue plusieurs groupes : les parcelles en vigne qui ont toutes un comportement similaire à l'exception de la parcelle aw88 et les parcelles en friche (aw81) et en blé (aw83). Sur ces derniers on observe des faibles valeurs d'ETR produites par le site friche (en fin de période) et le blé pendant toute la période car le blé est déjà en fin de sa période végétative, au mois de mai.

La parcelle aw88 aurait un comportement plus précoce, semblable à celui de certains sites du bassin versant de la Peyne.

### 3.6.2 Sites "la Peyne"

La figure 3.21 illustre l'évolution des ETR pour tous les sites étudiés en incluant le site 6 comme la moyenne arithmétique des parcelles mesurées sur la dépression du bassin

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

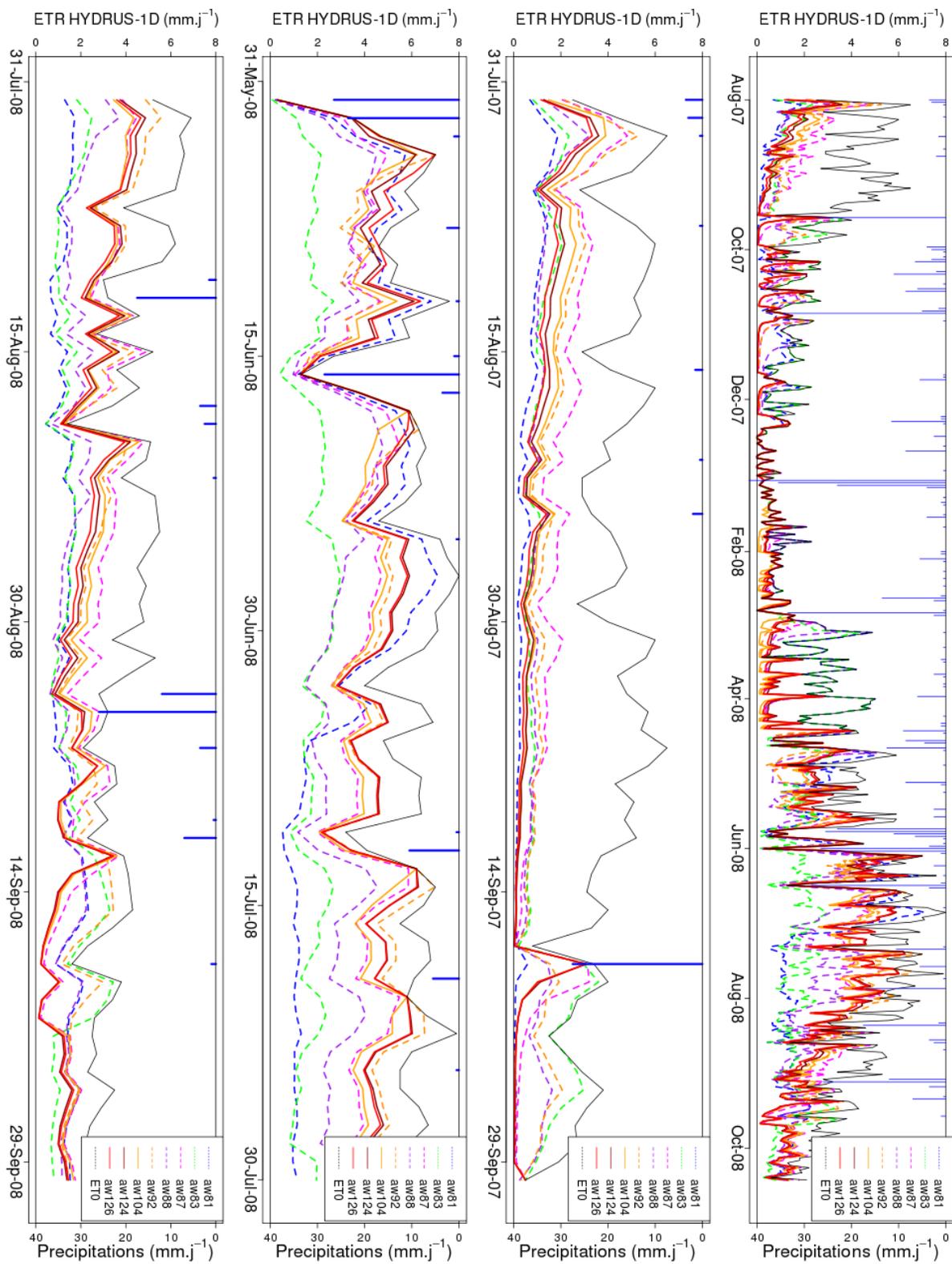


FIG. 3-20: Chroniques des ETR simulés par HYDRUS-1D sur les différents sites de mesure de la dépression de Roujan (Site 6), du haut en bas période total, été 2007, printemps 2008 et été 2008. En pointillé sont représentées les sites à nappe.

### 3.6 Analyse spatio-temporelle des ETR simulées par HYDRUS-1D

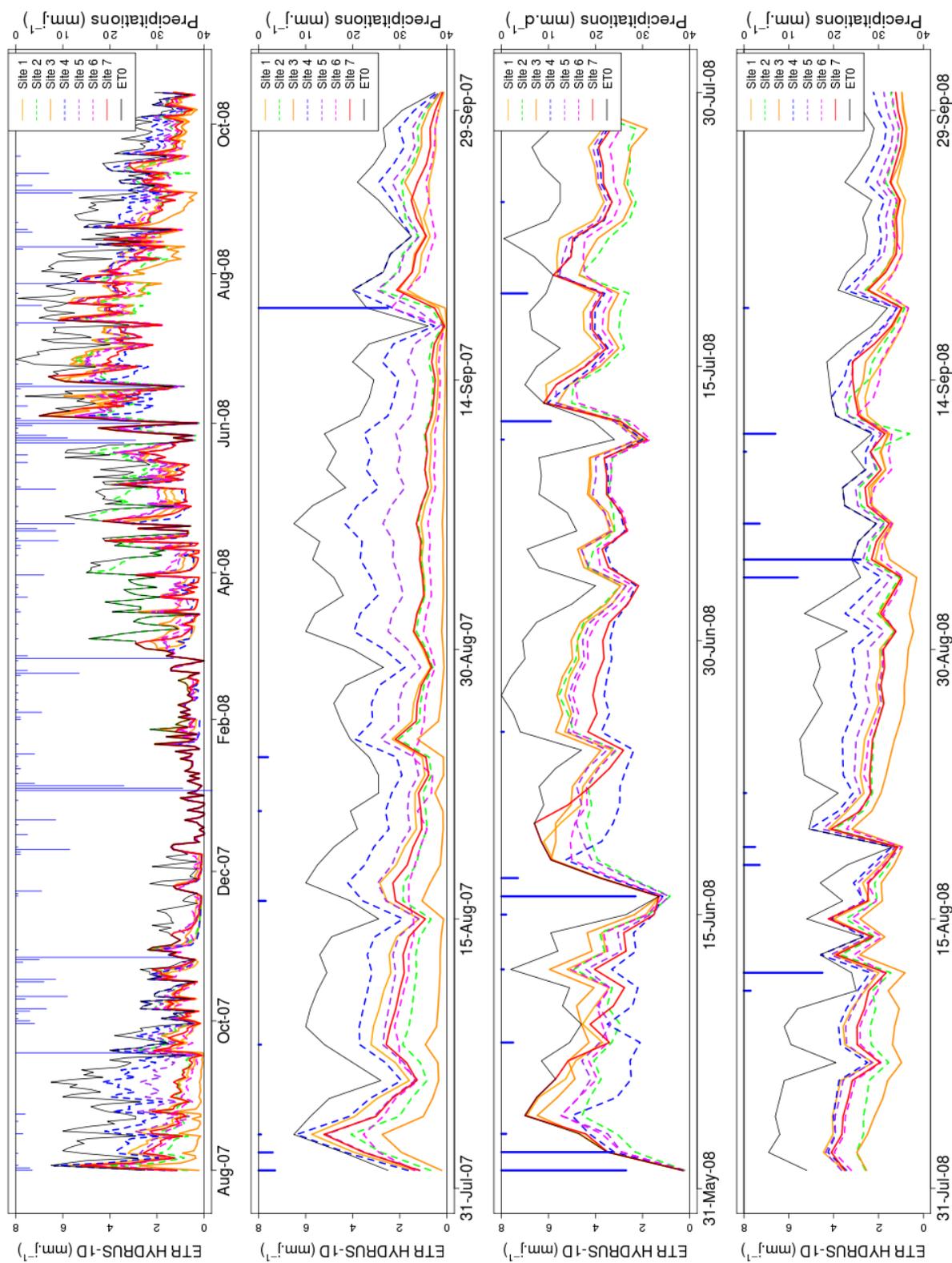


FIG. 3.21: Chroniques d'ETR simulé par HYDRUS-1D sur l'ensemble des sites du bassin versant de la Peyne. Du haut en bas période total, été 2007, printemps 2008 et été 2008. En pointillé sont représentées les sites à nappe.

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

versant de Roujan. Sur cette figure on observe encore une fois que la gamme de variation des ETR par rapport à l'ET<sub>0</sub> est assez importante. Sur le graphique supérieur de la figure, on observe des comportements similaires pour toutes les parcelles ce qui montre bien qu'il s'agit du même type de culture. Des différences locales ont néanmoins été observées pendant certaines périodes de l'année. Le deuxième graphique qui représente l'été 2007 est particulièrement intéressant puisqu'il montre les fortes différences de l'ETR simulée entre nos sites. On distingue nettement les sites à nappe permanente (site 4) qui ont continué à évapotranspirer fortement grâce à une alimentation en eau permanente. Le site 5 qui a une nappe saisonnière et des textures permettant un stock en eau conséquent pendant l'été a aussi une ETR considérable pendant cette période. A l'autre extrême on trouve le site 3 avec une ETR très faible pendant une longue période ce qui suppose une situation de stress hydrique important. Les sites 1, 2, 6 et 7 ont un comportement similaire pendant cette période avec des ETR faibles (inférieures à 2 mm.j<sup>-1</sup>) ce qui représente un signe de stress hydrique marqué. Finalement il est intéressant de remarquer que vers le 20 septembre 2007 (après des précipitations importantes), tous les sites recommencent à évapotranspirer ce qui pourrait être expliqué par ces apports d'eau (28 mm). Le troisième graphique décrit les variations de l'ETR pendant le printemps 2008. Pendant cette période il a été observé en début de période une forte évapotranspiration des sites sans nappes, beaucoup plus forte que pour les sites à nappes pourtant constamment bien alimentés en eau. Le site 2 qui est un site à nappe mais avec un sol à très faible capacité de stock hydrique a présenté ce comportement avec notamment une très forte ETR pendant le mois de mai, au dessus de tous les autres sites. Ceci laisse penser que ces sites ont un comportement plus précoce en terme d'ETR. Il semblerait donc que certains vignobles aurait un comportement adapté à la situation hydrique dans laquelle ils évoluent, la différente adaptabilité des cépages est une explication possible. En effet, le site 2 correspond à un cépage précoce comme il a été décrit dans la section 2.3.1.3. Sur ce site, un désherbage intégral est pratiqué, de plus il y a une présence de nappe saisonnière ce qui renforce cette hypothèse de facteur précocité dû au cépage puisque la vigne est alors la source principale d'ETR via sa transpiration.

Finalement la période de l'été 2008, qui a été une période beaucoup moins sèche que l'été 2007, ne permet pas de différencier aussi facilement les sites avec ou sans présence de nappe. On distingue le site 3 qui encore une fois a présenté une ETR plus faible

### 3.6 Analyse spatio-temporelle des ETR simulées par HYDRUS-1D

que les autres sites mais cette fois avec des valeurs comprises entre 1 et 2  $\text{mm.j}^{-1}$ . Les autres sites sont entre 2 et 4  $\text{mm.j}^{-1}$  avec des valeurs plus proches de 4  $\text{mm.j}^{-1}$  pour les sites à nappes (en pointillés).

Site	ETR-Cumul total (mm)	ETR-Cumul "vigne" (mm)	ETR-Moyen "vigne" ( $\text{mm.j}^{-1}$ )	ETR-Écart type "vigne" ( $\text{mm.j}^{-1}$ )	ETR-CV "vigne" (%)
site 1	705	376	2.07	1.45	70
site 2	805	339	1.87	1.01	54
site 3	656	265	1.46	1.24	85
site 4	791	522	2.87	1.09	38
site 5	806	446	2.45	1.17	48
Site 6	680	324	1.79	1.19	62
Site 6V	689	361	1.98	1.37	69
site 7	695	366	2.01	1.28	63

TAB. 3.3: Statistiques des ETR simulées par HYDRUS-1D sur l'ensemble des sites d'étude. ETR-Cumul total correspond à la somme des ETR pour toute la période de simulation, ETR-Cumul "vigne" est la somme des ETR pour les périodes de plein développement végétatif de la vigne, ETR-Moyen, ETR-Écart type et ETR-CV "vigne" correspondent à la moyenne de l'ETR, à l'écart type de l'ETR et au coefficient de variation. Le Site 6 correspond à l'ensemble de parcelles et le Site 6V les parcelles de vigne seules.

Nous avons enfin réalisé une analyse des indicateurs statistiques de l'ETR sur chacun des sites, résumée dans le tableau 3.3. Cette analyse confirme de façon quantitative les observations déjà réalisées. On observe d'abord que les sites à nappes (sites 2, 4, 5) ont eu les plus fortes valeurs d'ETR cumulée tout au long de la période de simulation (à l'exception du site 6 dans lequel la parcelle aw88 présente une ETR cumulée très faible). Nous avons calculé les mêmes indicateurs sur la période de plein développement de la vigne, définie à partir des sommes de températures (§ 3.1). Les périodes concernées pour les simulations sont du 01/08/2007 au 15/10/2007 et du 01/07/2008 au 15/10/2008. Le 1 juillet a correspondu avec l'étape de fermeture de grappe qui correspond à l'arrêt de croissance végétative, tandis que le 15 octobre correspond au début de la chute du feuillage (observé sur le terrain). Sur cette période on observe que l'ETR cumulée et les valeurs moyennes les plus fortes ont été observées sur les sites 4 et 5 qui ont des

### 3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE

---

nappes permanentes proche des racines et une capacité de stock hydrique importante. Le site 2 a présenté une valeur faible d'ETR cumulé, ce qui est expliqué par la précocité de ce site qui a sa plus grande partie de l'ETR dans les mois précédant à la période considérée. Ceci est confirmé lorsque la valeur d'ETR cumulée sur toute l'année est considérée car on voit que c'est une des plus fortes valeurs parmi les sites d'étude. Le site 1 a un comportement similaire ce qui laisse supposer une explication similaire à celle du site 2 mais avec des valeurs plus faibles du fait de l'absence de nappes pendant toute l'année. Dans ce contexte le site 3 a montré les valeurs d'ETR les plus faibles que ce soit en cumul total ou en cumul pendant la période de plein développement végétatif et logiquement en valeur moyenne. Les sites 6 et 7 ont des comportements similaires en termes d'ETR malgré la présence de nappes sur certaines des parcelles du site 6.

Un autre aspect intéressant est la variabilité des ETR simulés (écart-type et coefficient de variation). Ceux-ci nous indiquent que les sites à nappes (2, 4 et 5) sont les plus stables dans le temps car ils ont présenté les coefficients de variation les plus faibles. Les sites 1, 3, 6 et 7 ont des variations beaucoup plus importantes. Ces résultats renforcent l'hypothèse de l'adaptabilité des vignes aux conditions pédo-climatiques dans laquelle elles se trouvent.

### 3.7 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons d'abord étudié les différents indicateurs pédo-climatiques intervenant dans le statut hydrique de la vigne. D'importantes différences inter et intramillésimes ont été observées pour les variables intervenant directement dans le statut hydrique : précipitations, niveaux piézométriques, et température et évapotranspiration de référence. L'analyse de ces indicateurs a permis de différencier les comportements des différents sites de façon à les placer dans un contexte hydrique utilisable par la suite.

Une fois ces indicateurs identifiés la mise en œuvre des simulations HYDRUS-1D a été présentée. En premier lieu, les critères du calage et l'estimation de son erreur, puis les résultats sur chacun des sites étudiés avec l'analyse des erreurs correspondante. Des résultats satisfaisants ont été obtenus pour le calage ce qui nous a permis de réaliser des simulations de l'ETR sur une longue période (433 jours).

La section suivante a traité des résultats des ETR simulées par HYDRUS-1D et validées par les mesures d'ETR par la méthode des covariances turbulentes, avec des résultats corrects pour les simulations horaires et journalières. Des valeurs d'erreur évaluées par le RMSE entre 34 et 42  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  et 0.4 et 0.57  $\text{mm}\cdot\text{j}^{-1}$  ont respectivement été obtenues pour l'ETR instantanée et journalière respectivement. Une analyse détaillée de la variabilité temporelle des validations ETR a été réalisée avec des résultats qui ont permis de comparer l'évolution des simulations et des mesures en continu tout au long des 433 jours de la période d'étude. Ceci a permis de déterminer à quels moments de la journée et de l'année le modèle est moins précis. Accessoirement, une analyse a été réalisée pour essayer d'identifier des phénomènes physiologiques liés à la fermeture stomatique sur les mesures ainsi que sur les simulations HYDRUS-1D. La régulation stomatique a effectivement été observée sur les mesures par covariances turbulentes pendant une journée de stress hydrique, alors que HYDRUS-1D a été incapable de le simuler du fait de l'absence de prise en compte de ce phénomène.

Dans la dernière partie de ce chapitre, des comparaisons des ETR simulées pour chacun des sites ont été effectuées. Celles-ci nous ont permis de caractériser les différents comportements hydriques de chacun des sites, avec d'importantes écart dans les valeurs des d'ETR obtenues.

Ce chapitre a permis de montrer la validation d'une méthode relativement innovatrice pour évaluer de façon continue des statuts hydriques des vignes pendant une longue période et avec une précision proche des valeurs décrites dans la littérature. Cette méthode présente des avantages indéniables puisqu'il s'agit d'une méthode relativement simple à mettre en œuvre expérimentalement et qui est moins couteuse que la méthode des covariances turbulentes, qu'il aurait été difficile de mettre en œuvre sur un grand nombre de sites. Cette méthode a donc permis de documenter l'ETR, sur une longue période (433 jours) et sur une large gamme de variabilité d'états hydriques de la vigne.

Finalement les simulations de l'ETR en continu obtenues sur un important nombre de sites sont un atout important puisqu'ils permettront d'obtenir un plus grand nombre de points de validation lors de l'application d'une démarche de spatialisation par télédétection ce qui sera présentée dans les chapitres suivants.

### **3. ESTIMATIONS LOCALES DU STATUT HYDRIQUE**

---

## Chapitre 4

# Spatialisation de l'évapotranspiration journalière à partir des données ASTER

### 4.1 Introduction

Le chapitre qui suit décrit la spatialisation de l'ETR journalière et du statut hydrique de la vigne par l'utilisation conjointe des données ASTER et du modèle spatialisé S-SEBI. Le statut hydrique est caractérisé par la fraction évaporative dont on déduit l'ETR journalière. S-SEBI est un modèle semi-empirique qui calcule la fraction évaporative à partir de la variabilité spatiale capturée par télédétection optique en lien avec l'état hydrique des surfaces observées. Nous avons choisi ce modèle à cause de la simplicité de sa paramétrisation et de sa capacité à fournir des résultats satisfaisants sous un large panel de conditions environnementales et d'échelles spatiales. Dans le cadre de notre étude, il est appliqué pour la première fois dans le contexte viticole méditerranéen.

Les résultats présentés ici sont sous forme de publication, le format retenu ayant des contraintes au niveau rédactionnel (format short-letter), le présent chapitre se propose de fournir des résultats et analyses complémentaires, en vue de mieux comprendre les performances de la méthodologie proposée. Nous présentons dans un premier temps les résultats publiés, et ensuite les résultats et analyses complémentaires.

### 4.2 Résultats publiés (Geosciences and Remote Sensing Letters) Mapping daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed

#### Abstract

Daily Evapo-Transpiration (ET) was mapped over a Mediterranean vineyard watershed by using ASTER imagery and the S-SEBI model. Validation over seven contrasted sites was performed using simulations from the HYDRUS-1D model calibrated against neutron probe data. Once verified the consistency of HYDRUS-1D simulations, validation indicated a  $0.8 \text{ mm.d}^{-1}$  accuracy. Analysis suggested partial influences from row orientation and residual error of HYDRUS-1D calibration.

#### 4.2.1 Introduction

By driving micrometeorology and soil moisture, land surface evapotranspiration (ET) is a key variable in hydrology and agronomy. Knowledge of daily ET is paramount for determining crop water use which represents up to 70% of the yearly water balance within semiarid watersheds (Moussa et al., 2007). Since they are chiefly rain-fed, Mediterranean vineyards experience severe water stresses, especially in summer when evaporative demand is maximal and rainfall is negligible. Water stress allows to regulate vine metabolism, but excessive stress can cause severe damages that affect production. Vineyard daily ET and hydric status should therefore be diagnosed at appropriate growth stages and prognosticated under expected climate changes.

Most attempts to estimate daily ET over vineyards addressed the field scale (Ortega-Farias et al., 2007), and the monitoring of vineyards in a spatially distributed manner from remote sensing dealt with plant functioning (Zarco-Tejada et al., 2005). Meanwhile, numerous models aim to map daily ET from optical remote sensing, with complexity degrees ranging from empirical formulations to deterministic modeling (Courault et al., 2005), and mostly were used over full canopies like cereal crops, with a wanted accuracy of  $0.8 \text{ mm.d}^{-1}$  (Kalma et al., 2008).

Row structured vineyards induce specific processes such as influence on convective fluxes of air turbulence within vine canopy and inter-row, or influence on remote sensing data of sunshine and shading effects for soil and vine canopy. It seems relevant

## 4.2 Résultats publiés (Geosciences and Remote Sensing Letters) Mapping daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed

---

using two source modeling that split soil and vegetation for sparse canopies, with additional differentiating between sunlit and shaded parts (Verhoef et al., 2007). This however can induce large errors since the required parameterizations are not straightforward. Another possibility is using differencing methods, where ET is characterized from differences in surface temperature rather than absolute values, thus minimizing errors on data and parameterization. Then, differencing approaches based on spatial contrasts can benefit from variabilities captured with high spatial resolution remote sensors (Jacob et al., 2002a).

Amongst the differencing methods based on spatial contrasts, such as Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) (Bastiaanssen et al., 1998b), or Water Deficit Index (WDI) (Moran et al., 1994), Simplified Surface Energy Balance Index (S-SEBI) (Roerink et al., 2000) is characterized by simplicity and feasibility, and is therefore a good candidate for operational purposes. It has been applied over various agrosystems (Gomez et al., 2005; Sobrino et al., 2005) and at different spatial resolutions (Sobrino et al., 2007; Verstraeten et al., 2005). Assessing S-SEBI over vineyards is of interest since the model relies on albedo calculation and difference in surface temperature only, thus avoiding delicate computations for biophysical variables such as vegetation fraction cover.

This paper reports first results obtained when using S-SEBI to map daily ET over vineyards. S-SEBI is used along with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) optical imageries that span almost two growth cycles, where ASTER is the unique spaceborne sensor capable of collecting high quality surface temperature data with high spatial resolution (French et al., 2008). Validation relies on ground based estimates over sites that differ in canopy structure, soil hydrodynamic properties and watertable. After the presentation of the study site (§ 4.2.2.1), of the ground based estimates (§ 4.2.2.2), of the remotely sensed retrievals (§ 4.2.2.3), and of the validation strategy (§ 4.2.3), we report results for ground based estimates (§ 4.2.4.1) and for remotely sensed retrievals (§ 4.2.4.2).

## 4. SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE À PARTIR DES DONNÉES ASTER

---

TAB. 4.1: Validation site features with predominant soil texture, watertable conditions (permanent or seasonal in winter and spring), and row angle with north as origin.

Site	Soil texture	Watertable conditions	Row angle (°)	Canopy structure
1	Sandy, Silty	Absent	343	Row spacing : 2.5 m
2	Clay, Gravels	Seasonal	42	
3	Silty, Sandy	Absent	326	
4	Clay Loam	Permanent	24	Row width (max) : 1 m
5	Clay	Seasonal	35	
6N	Clay loam	Seasonal	85	Row height 1.22 - 1.75 m
6S	Silty	Absent	359	
7	Clay	Absent	318	

### 4.2.2 Materials and Methods

#### 4.2.2.1 Study site

The Peyne watershed (43.49°N, 3.37°E, 80 m asl) is located in Languedoc - Roussillon southern French region. This 65 km<sup>2</sup> size watershed contains vine mono-cultures over flat terrains (70%), mostly rainfed (>95%), while the remaining 30% includes olive and wheat crops, forests, native scrubland and urban zones. Yearly Penman ET is close to 1100 mm, and annual rainfalls range between 400 and 1300 mm (Trambouze and Voltz, 2001).

The area holds a large suite of conditions for soil (with various parental materials) and watertable. To capture this variability for validation purposes, seven sites were selected, corresponding to rainfed vineyards with similar trellis structures apart from row orientation (Tab. 4.1). Each of Site 1 to 5 and 7 corresponded to one field, with size ranging from 0.03 to 0.09 km<sup>2</sup>. Site 6, with a 0.15 km<sup>2</sup> size, spread over nine fields including vineyards by 90% in surface area. It was split into north (6N) and south (6S) parts for validation purposes.

tab :Sites

#### 4.2.2.2 Ground based estimates of daily ET

Amongst numerous possibilities for *in-situ* estimation of daily ET, we chose a method that alleviated experimental efforts for device maintenance and data collection. It

## 4.2 Résultats publiés (Geosciences and Remote Sensing Letters) Mapping daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed

---

made use of the HYDRUS-1D model that simulates water transfers in the vadose zone once calibrated against soil moisture profiles, provided meteorological forcing is known.

### Field data

Hourly values of air temperature, wind speed, relative humidity, solar irradiance and rainfall were collected within Site 6 with a CIMEL ENERCO 400 station, following meteorological standards apart from wind speed (measured at 2 m height rather than 10 m). Hourly net radiation was measured over a representative vineyard within Site 6 by using a Campbell NR-lite device whose footprint held vine canopy by up to 66%.

Each site was monitored for vegetation, watertable and soil moisture, biweekly and after rainfalls. Vegetation was monitored for canopy height and width. Watertable was monitored down to 2.5 m with manual piezometric devices. The number of locations for collecting soil moisture profiles varied according to soil heterogeneity from a pedological map and to site size : one location for Site 1, 2, 4, 7; two locations for Site 3 and 5; and nine locations for Site 6. Profiles were sampled every 0.2 m down to 2.5 m with a Vectra 503-DR CPN Neutron Probe (NP) device, and completed for top 0.15 m using a Soil Moisture Equipment TRASE 6050 TDR sensor.

Eddy Covariance (EC) devices were setup for direct ET measurements within two sites which differed in canopy structure, soil hydrodynamic properties and watertable : a permanent flux tower on Site 6, and a temporary flux station on Site 7 for three day windows centered on ASTER overpasses. Each flux station was equipped with a R.M. Young 81000 3D sonic anemometer and a fast hygrometer (Licor LI7500 for Site 6 and Campbell KH2O for Site 7) to measure wind speed components, air temperature and humidity. For Site 6 (resp. Site 7), that included nine (resp. one) fields, the sensors were setup 5.7 m (resp. 1.5 m) above canopy and acquisition frequency was 10 Hz (resp. 20 Hz), which allowed to avoid spectral loss for wind speed values up to 6 m.s<sup>-1</sup> (resp. 3 m.s<sup>-1</sup>). Sensible and latent heat fluxes were calculated over hourly intervals by applying double rotation and all instrumental corrections from the ECPACK version 2.5.20 library [Dijk et al. \(2004\)](#). Fluxes were calculated along with tolerance intervals, about 20% and 12% for Sites 6 and 7. For energy balance closure, convective fluxes agreed with available energy within 80%. Daily ET was finally calculated as the sum of hourly ET.

#### 4. SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE À PARTIR DES DONNÉES ASTER

---

Ground based data were collected from August 2007 to October 2008. Each instrument was manufacture calibrated. The NP device was calibrated by accounting for soil type and moisture. Calibration was performed against gravimetric soil moisture measurements at each measurement depth (soil density was estimated using a Campbell DR 501 gamma probe), with a residual error of  $0.04 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$  (15% in relative).

##### The HYDRUS-1D model

HYDRUS-1D is a deterministic model that simulates water flows in the vadose zone from Richards equation (Simunek and van Genuchten, 2008). Actual plant transpiration is estimated as the sum, over soil layers, of water uptake by roots, where the latter is derived from maximum transpiration through a reduction coefficient that depends on moisture. Actual soil evaporation is derived from potential evaporation according to surface pressure head.

Rainfalls were measured at the meteorological station (§ 4.2.2.2). Maximum transpiration and potential evaporation were derived from potential ET using the Riou's model designed for vineyards (Bsaibes, 2007; Riou et al., 1994; Trambouze and Voltz, 2001). Following Riou et al. (1994), potential ET was derived from meteorological data by using the Penman formulation under standard conditions. Then Riou's model inferred potential transpiration as a fraction of potential ET (potential evaporation was the residual), by assuming this fraction is almost equals to the ratio of solar radiation absorbed by vine leaves to that absorbed by the whole vineyard. For this, solar irradiance absorbed by leaves was geometrically derived from solar position and canopy structure (see Tab. 4.1), and vegetation albedo was set to 0.2. Maximum transpiration was set to potential transpiration, which was within the confidence interval reported by Trambouze and Voltz (2001) who suggested a 10% larger value.

The soil was split into 251 layers between 0 and 2.5 m depth and into  $N$  horizons including topsoil ( $N \in [2 - 4]$  following *in-situ* observations and expert knowledge). Root water uptake was distributed according to *in-situ* observations and previous studies (Bsaibes, 2007; Trambouze and Voltz, 2001). The resulting averaged profile considered 75% of roots between 25 and 125 cm, with a 2.2 m maximum depth. The reduction coefficient for transpiration was parameterized using the Feddes functions (Feddes et al., 1978), along with threshold pressures of -0.1 and -1.5 mbar for potential root water uptake (Trambouze and Voltz, 2001). Lower boundary conditions were set to free outflow

## 4.2 Résultats publiés (Geosciences and Remote Sensing Letters) Mapping daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed

---

when piezometric data indicated watertable absence, and to fixed pressure head at the watertable level otherwise. Finally, residual and saturated soil moisture were derived from maximal and minimal moisture values from NP data, and topsoil hydraulic properties were estimated by following former studies over the Payne watershed (Bsaibes, 2007; Trambouze and Voltz, 2001).

Soil hydraulic properties, retention curves and hydraulic conductivity curves were characterized using functions of van Genuchten (1980). The latter were calibrated (parameters  $\alpha$  and  $n$ ), along with saturated hydraulic conductivity, by using the HYDRUS-1D inverse mode. The cost function minimized differences between measured and simulated soil moisture profiles over the simulation period. Initial guesses for the three parameters to be retrieved were derived from values proposed in the literature for similar soils (Bsaibes, 2007; Trambouze and Voltz, 2001). When values were not available, we used the HYDRUS-1D ROSETTA module.

For each location of NP measurements (§ 4.2.2.2), HYDRUS-1D was calibrated against the resulting chronicle over the [August 2007 - October 2008] period. Hourly simulations allowed to account for changes in sunshine over vineyard rows, and resulting ET was totaled at the daily scale. Calibration relied on noon values centered on NP data acquisition period.

### 4.2.2.3 Remote sensing retrievals of daily ET

#### ASTER retrievals of land surface radiative variables

We used ASTER official products for surface reflectance, waveband emissivity and radiometric temperature, whose accuracies were 5%, 0.01 and 1.5 K respectively (Jacob et al., 2008; Thome et al., 1998). These products resulted from 11 cloud-free imageries sun-synchronously collected around nadir viewing at 11 :00 UTC in 2007 (DOY 226, 258, 306) and 2008 (DOY 174, 190, 197, 206, 213, 245, 270, 277). Reflectances at 15 m (visible and near infrared) or 30 m (shortwave infrared) were averaged at the 90 m resolution of emissivity and radiometric temperature. Images were carefully geolocated against aerial orthophotos.

ASTER albedo was computed as a linear combination of reflectances. Due to deficient shortwave infrared channels in 2008, we used the generic two channel formulation from Jacob et al. (2002c), linearly corrected against the ASTER devoted seven channel formulation from Liang (2001). The correction was calibrated over the 2007 dataset

#### 4. SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE À PARTIR DES DONNÉES ASTER

---

(relative unsystematic error of 6%) and applied to the 2007-2008 dataset. ASTER broadband emissivity was computed as a linear combination of channel emissivities following [Ogawa et al. \(2003\)](#). Finally, ASTER net radiation was classically computed following [Jacob et al. \(2002a\)](#). Additionally to albedo, broadband emissivity and radiometric temperature, this required solar irradiance data from the meteorological station (§ 4.2.2.2), and atmospheric irradiance derived, following [Bsaibes \(2007\)](#), from air temperature and humidity measured at the same station.

##### The S-SEBI model

Below is a model overview, see [Gomez et al. \(2005\)](#); [Roerink et al. \(2000\)](#); [Sobrino et al. \(2005\)](#); [Verstraeten et al. \(2005\)](#) for detailed descriptions. Deriving daily ET  $ET_d$  from S-SEBI along with optical imagery, where the latter captures contrasts driven by evaporation processes, is twofold. Evaporative fraction  $\Lambda$ , i.e. the ratio of latent heat flux to convective fluxes, is computed from the differences between pixel temperature  $T_S$  and extrema temperatures within the corresponding albedo class ( $T_{max}$  and  $T_{min}$  for maximum and minimum). Next, assuming  $\Lambda$  is constant during daytime and neglecting daily soil heat flux,  $ET_d$  is derived from  $\Lambda$  by extrapolating, at the daily scale, instantaneous net radiation at satellite overpass  $R_{ni}$ , through the ratio  $Cd_i=R_{nd}/R_{ni}$  where  $R_{nd}$  is daily net radiation. This yields ( $L$  is latent heat of vaporization) :

$$ET_d = \Lambda \frac{R_{nd}}{L} = \frac{T_{max} - T_S}{T_{max} - T_{min}} \frac{Cd_i R_{ni}}{L} \quad (4.1)$$

S-SEBI was implemented over ASTER retrievals as following. The temperature - albedo space was characterized by calculating, for each  $10^{-3}$  width albedo class, albedo mean value and extrema temperatures. Next,  $T_{max}$  (resp.  $T_{min}$ ) outer limit was determined from the linear regression between mean albedo and maximum (resp. minimum) temperature. As originally proposed by [Roerink et al. \(2000\)](#),  $T_{max}$  outer limit was computed excluding albedoes below the threshold value that discriminates evaporative and radiative regimes, where threshold albedo corresponded to the maximum temperature of the concave temperature - albedo relationship ([Bastiaanssen et al., 1998b](#)). To reduce noise influence,  $T_{min}$  outer limit was computed by including all albedoes, rather than excluding classes above threshold value ([Verstraeten et al., 2005](#)). To include all (temperature, albedo) pairs within the outer limits, an offset was added to  $T_{max}$  (resp.

## 4.2 Résultats publiés (Geosciences and Remote Sensing Letters) Mapping daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed

---

subtracted to  $T_{min}$ ) slopping line, which corresponded to the variability of maximum (resp. minimum) temperature over albedo classes.

Extrapolating instantaneous net radiation at the daily scale required calibrating the  $Cd_i$  coefficient. This was performed using ground based measurements of net radiation collected within Site 6 (§ 4.2.2.2), and therefore assuming  $Cd_i$  was uniform within the Peyne watershed. Finally, implementing S-SEBI over the Peyne watershed assumed the latter simultaneously held dry and wet areas, which was consistent with inclusion of rivers, water impoundments and dry bare soils.

### 4.2.3 Assessment and validation strategy

Fig. 4.1 displays a daily ET map retrieved from S-SEBI along with ASTER imagery. A large range of ET values was observed in time and space for validation sites (from 1 to 7 mm.d<sup>-1</sup>), which confirmed their selection was appropriate for capturing spatio-temporal variabilities (§ 4.2.2.1). We first controlled the consistency of HYDRUS-1D simulations, by 1/ quantifying calibration residual error (i.e. differences between measured and simulated soil moisture profiles at noon), and 2/ comparing simulated daily ET against EC direct measurements. For comparison over Site 6, we spatially averaged the nine HYDRUS-1D simulations that corresponded to the locations of NP measurements within the footprint of EC measurements. Second, we compared ASTER / S-SEBI retrievals against HYDRUS-1D simulations of daily ET, by differentiating years and sites in relation with soil type, watertable conditions and canopy structure. For comparison over sites with two locations of NP measurements, we spatially averaged the HYDRUS-1D simulations. For comparison over Site 6, HYDRUS-1D simulations were spatially averaged for each sub-site 6N and 6S (§ 4.2.2.1). From an ASTER viewpoint, we extracted each pixel matching a site or sub-site.

### 4.2.4 Results and discussion

#### 4.2.4.1 Assessing quality of ET ground based estimates

In average over all dates and locations of NP measurements, Root Mean Square Error (RMSE) between measured and simulated water content decreased along soil moisture profile from upper to lower boundaries, between 0.06 and 0.03 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> (30 and 10% in relative), with largest values around 1 m depth. The RMSE lowering was

#### 4. SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE À PARTIR DES DONNÉES ASTER

---

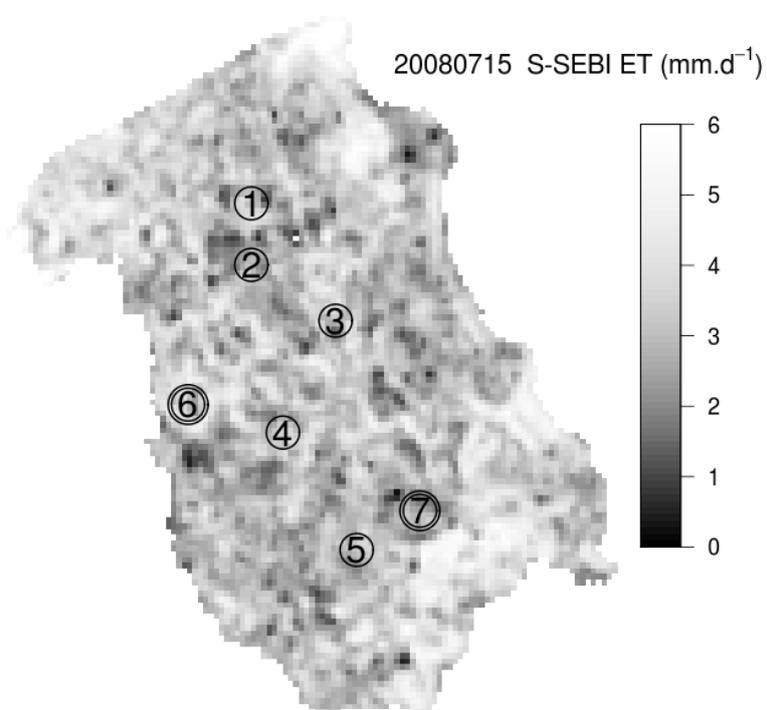


FIG. 4.1: Daily ET map over the Peyne watershed derived from ASTER imagery along with S-SEBI on July, 15, 2008. Validation sites are labeled 1 to 7, and double circles correspond to sites with EC measurements.

## 4.2 Résultats publiés (Geosciences and Remote Sensing Letters) Mapping daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed

---

ascribed to larger temporal stability for deep soil moisture, and the larger values around 1 m depth were imputed to temporal variations of soil moisture in relation with root water uptake. RMSE between measurements and simulations, calculated for each soil moisture profile, varied from one date and one location to another, between 0 and  $0.15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  (0% and 60% in relative). For a given location, it diminished with simulation time, due to stabilization of numerical computations as simulation time increased. Lowest (resp. largest) RMSE was observed within Site 4 (resp. Site 1), but no link could be underlined with watertable conditions or soil type (Tab. 4.1). When focusing on temporal variations of soil water storage at noon obtained by integrating soil moisture profile, relative RMSE between measurements and simulations was around 10%. This was acceptable, given i) the large suite of conditions in soil type and watertable, and ii) the errors on NP data, about 15% in relative (§ 4.2.2.2).

RMSE between HYDRUS-1D estimates and EC measurements of daily ET was  $0.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  (18% in relative) for Site 7, where hydric stress resulted from a deep watertable and a clay soil. For Site 6, with an intermediate hydric status related to a shallow watertable and silty / clay loam soils, RMSE was  $0.57 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  (33% in relative). The larger discrepancy observed for Site 6 was ascribed to a larger amount of data (nine locations of NP measurements). Over both sites, HYDRUS-1D simulations overestimated EC estimates for large ET values after significant rainfalls. Absolute RMSE was stable along the simulations, resulting in larger relative RMSE between August and December 2007, as compared to the [January - October] 2008 period. Overall, these results were acceptable, since the two estimates were independent, based either on near surface turbulent fluxes or on vadose-zone water transfers.

From i) calibration results that involved various hydrodynamic conditions, and ii) comparison against independent EC data, we underlined the consistency of HYDRUS-1D simulated daily ET. This made possible using the latter as ground based reference for validating remotely sensed retrievals.

### 4.2.4.2 Validating ASTER / S-SEBI retrievals of daily ET

A first step focused on net radiation which is a key variable in S-SEBI calculation (§ 4.2.2.3). Validation of ASTER retrievals against *in-situ* data collected within Site 6 (§ 4.2.2.2) provided a RMSE of  $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , which may be explained by differences between soil and vegetation portions within footprints of Campbell NR-lite and ASTER

#### 4. SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE À PARTIR DES DONNÉES ASTER

---

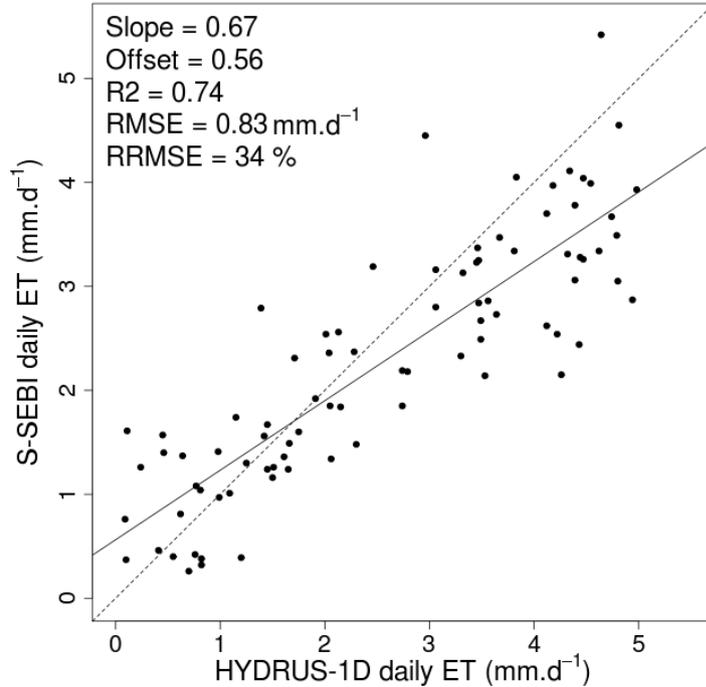


FIG. 4.2: Comparison, over the seven sites, of ASTER / S-SEBI daily ET estimates against those derived from HYDRUS-1D simulations. R is correlation coefficient, Slope and Offset are from linear regression between predictions and references (continuous line). Dashed line is the 1 :1 line.

pixels (66% and 40%). A second step aimed to quantify standard deviation of daily ET within  $3 \times 3$  pixel windows centered on validation sites. The result, about  $0.4 \text{ mm.d}^{-1}$ , indicated the spatial variability at the ASTER spatial resolution in the neighborhood of validation sites had no significant influence on the validation exercise.

Validation of ASTER / S-SEBI retrievals against HYDRUS-1D estimates for the seven sites are displayed in Fig. 4.2. For daily ET values ranging between 0 and  $5 \text{ mm.d}^{-1}$  throughout two vineyard growth cycles, RMSE was  $0.8 \text{ mm.d}^{-1}$  (30% in relative), and correlation was about 86%. This was slightly better than reports from [Gomez et al. \(2005\)](#); [Sobrino et al. \(2007, 2005\)](#) for higher ( $\leq 20 \text{ m}$ ) and coarser ( $\sim 1 \text{ km}$ ) spatial resolutions (between 1 and  $1.5 \text{ mm.d}^{-1}$ ). RMSE was slightly lower ( $0.6 \text{ mm.d}^{-1}$ ) when replacing HYDRUS-1D estimates by EC direct measurements.

## 4.2 Résultats publiés (Geosciences and Remote Sensing Letters) Mapping daily evapotranspiration over a Mediterranean vineyard watershed

Site	1	2	3	4	5	6N	6S	7	2007	2008
ARMSE	0.99	0.54	0.59	0.64	0.98	0.69	0.72	1.30	0.69	0.88
RRMSE	40	26	28	23	23	31	26	60	57	30
Slope	0.55	0.74	0.77	0.94	0.62	0.65	0.80	0.45	0.76	0.68
Offset	0.85	0.32	0.51	0.01	0.41	0.56	0.77	0.62	0.52	0.49
R	0.87	0.93	0.95	0.84	0.98	0.89	0.93	0.91	0.72	0.83

TAB. 4.2: Statistical indicators when comparing ground based and spaceborne values : Absolute and Relative RMSE, Slope and Offset from linear regression between predictions and references, correlation coefficient. Columns 2-9 are related to each validation site for both years. Columns 10-11 are related to mean values over sites in 2007 and 2008.

On a yearly basis, remote sensing and *in situ* estimates agreed better in 2008 (Tab. 4.2). On a daily basis, relative RMSE was better (27%) in spring than in summer (38%) and autumn (44%). These results were ascribed to S-SEBI poorer performances when variability in hydric conditions was lower.

Analyzing validation results on a site basis underlined low unsystematic and large systematic errors. Statistical indicators (Tab. 4.2) were compared against watertable conditions, soil type, row orientation (Tab. 4.1), and soil color. Two correlations were underlined. First, RMSE decreased, with a 60% correlation, when row orientation changed from  $-50^\circ$  West to  $+50^\circ$  East (North being  $0^\circ$ ), which may result from influence on ASTER data of sunshine and shading effects for soil and vine canopy. Second, slope and offset were correlated by 70% with the residual error of HYDRUS-1D calibration, where the latter was averaged for each site over temporal chronicles.

### 4.2.5 Conclusion

Overall, although several questions raised when using a very simple model like S-SEBI over complex landscapes like vineyards, the first results reported here showed S-SEBI performances were similar to those obtained over simpler canopies. We noted partial influences from accuracies of ground based estimates and row orientation, but not from the other land surface features we considered. This suggested possible influences of aerodynamic factors that result from the coupling between wind direction and rows (e.g. roughness lengths). Further, S-SEBI performances depended on agreement between supposed and captured spatial variabilities. On the other hand,

## 4. SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE À PARTIR DES DONNÉES ASTER

---

theoretically deriving outer limits within the temperature - albedo space requires characterizing micrometeorological and aerodynamic conditions (e.g. WDI, SEBI), and is therefore subject to errors in such characterizations.

### Acknowledgments

The authors thank LISAH technical staff for experiment. This study was funded by CONICYT (Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica, Chile) and PNTS (Programme National de Télédétection Spatiale, France).

### 4.3 Résultats et analyses complémentaires

L'objectif était de spatialiser l'ETR journalière et le statut hydrique de la vigne par l'utilisation conjointe des données ASTER et du modèle S-SEBI. Les résultats obtenus sont originaux en ce sens où un modèle très simple de type S-SEBI peut fournir des résultats très acceptables sur des paysages complexes du type canopée viticole. Les contraintes rédactionnelles concernant la présentation des résultats sous forme de "short letter" nous amène à présenter des résultats et analyses complémentaires en vue de mieux comprendre les performances observées pour la méthodologie proposée. Dans cette deuxième partie nous proposons de présenter les résultats en rapport avec le rayonnement net instantané et journalier, les mesures terrain et les estimations télédétectées de l'ETR instantanée et journalière, et les variabilités spatio-temporelles des cartographies d'ETR obtenues à partir des données ASTER. Pour cela, nous avons additionally considéré les images d'archives ASTER collectées entre 2002 et mi-2007.

#### 4.3.1 Validation du rayonnement net

Les valeurs instantanées et journalières du rayonnement net sont des variables clé pour S-SEBI. Nous avons donc regardé en détail la précision des calculs pour ces deux variables.

La validation du rayonnement net instantané a fourni des résultats acceptables avec un RMSE de  $45 \text{ W.m}^2$  et un coefficient de corrélation  $R$  de 0.84, bien que la valeur de RMSE soit plus élevée que celles reportées dans la littérature, entre 25 et  $40 \text{ W.m}^2$  (French et al., 2005; Gomez et al., 2005; Jacob et al., 2002a). On observe sur la figure 4.3 une sous estimation des fortes valeurs correspondant à de la végétation et une

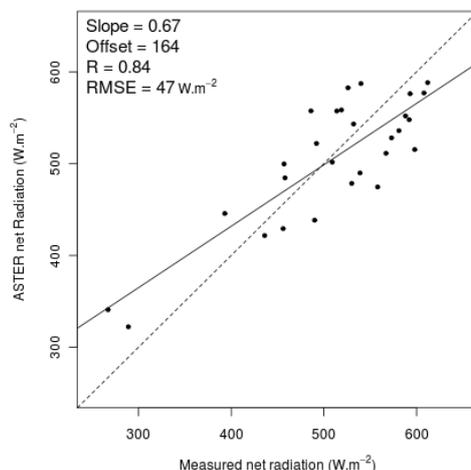


FIG. 4.3: Validation pour la période d'expérimentation aux moments des passages satellite, à partir des mesures de terrain instantanées, du rayonnement net obtenu par imagerie ASTER.

sur estimation des faibles valeurs correspondant à des sols nus. Une possible explication est la proportion de végétation à l'intérieur du footprint de l'instrument Campbell NR-Lite utilisé pour la mesure terrain (66% selon une installation à 50 cm au dessus de la canopée et au dessus du rang de vigne), en comparaison avec la proportion de végétation à l'intérieur du pixel ASTER (40% selon une visée nadir pour un inter-rang de 2.5 m et une largeur de treillis de 1 m).

Par suite, les mesures de rayonnement net instantané ont été extrapolées à l'échelle journalière, en vue de calculer l'ETR journalière à partir de la fraction évaporative. Cette extrapolation journalière reposait sur le coefficient  $Cd_i$  qui représente le ratio entre valeur journalière et valeur instantanée du rayonnement net (§ 4.2.2.3). Le coefficient  $Cd_i$  a été défini dans un premier temps comme une constante égale à 0.3 (Seguin and Itier, 1983), puis comme une valeur variable au cours de l'année (Gomez et al., 2005). En conséquence, nous avons calculé  $Cd_i$  pour chaque jour de passage ASTER qui correspondait à des conditions de ciel clair, et ce à partir des mesures collectées entre août 2005 et novembre 2008 par l'instrument Campbell NR-Lite installé sur le site 6. Notons que pour les observations ASTER avant 2005, nous avons utilisé les

#### 4. SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE À PARTIR DES DONNÉES ASTER

---

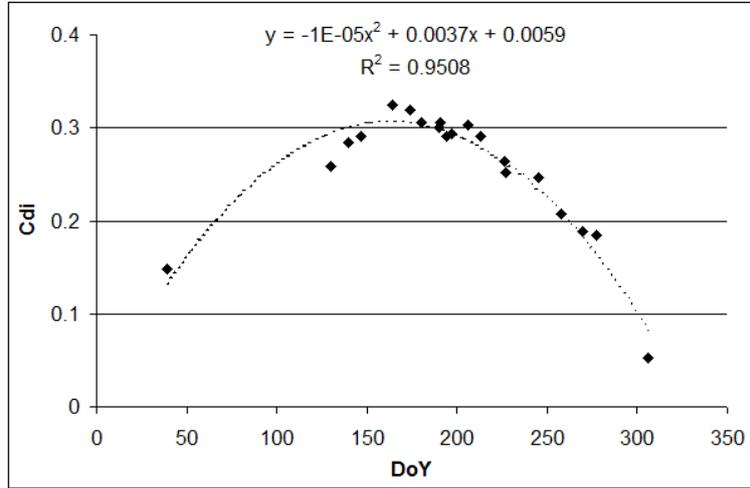


FIG. 4.4: Évolution annuelle du ratio  $Cd_i$  entre le rayonnement net journalier ( $Rn_d$ ) et instantané ( $Rn_i$ ), ( $Cd_i = Rn_d/Rn_i$ ). Les valeurs ont été obtenues pour chaque jour de passage ASTER, à partir des mesures de rayonnement net sur le Site 6 entre août 2005 à novembre 2008, et à partir d'une régression polynomiale d'ordre 2 (courbe en pointillés). Le coefficient de détermination ( $r^2$ ) ainsi que les coefficients de la régression polynomiale d'ordre 2 sont indiqués.

données de la période de mesure 2005-2008, en considérant les mêmes jours calendaires en conditions de ciel clair. Ceci était possible car  $Cd_i$  est constant d'une année sur l'autre pour un même jour calendaire (Gomez et al., 2005). Nous avons exprimé les valeurs instantanées à partir de mesures horaires aux alentours des passages ASTER, et les valeurs journalières sous forme de moyennes. Pour vérifier la cohérence des valeurs de  $Cd_i$  obtenues, qui étaient similaires à celles reportées par Gomez et al. (2005), nous avons regardé la forme quadratique de  $Cd_i$  à l'échelle de l'année (figure 4.4). Le RRMSE entre les estimations de  $Cd_i$  obtenues avec une fonction polynomiale et les mesures était de 22%. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Sobrino et al. (2007).

##### 4.3.2 Validation de l'ETR simulée par HYDRUS-1D aux dates de passage ASTER

Les validations de l'ETR instantanée obtenues à partir de S-SEBI n'ont pas été présentées dans l'article, étant donné qu'une échelle journalière a été choisie. Ce choix

### 4.3 Résultats et analyses complémentaires

résultait de la difficulté à estimer le flux de chaleur dans le sol  $G_0$  pour des couvert végétaux en rang de type vigne (recours à des variables biophysiques de type indice foliaire et pourcentage de couverture). Par ailleurs l'échelle journalière était pertinente dans des contextes agronomique et hydrologique. En revanche, l'échelle instantanée prend tout son sens dans un contexte météorologique ou physiologique puisqu'elle permet de capturer des phénomènes sub-journaliers (e.g. variation de la résistance stomatique ou encore dynamique de la couche limite atmosphérique). Dans ces conditions nous avons analysé les estimations terrain et satellite à l'échelle horaire. Ces résultats sont synthétisés et comparés avec ceux obtenus à l'échelle journalière dans le tableau 4.3.

Pas de temps Méthode	Horaire					Journalière				
	Pente	Offset ( $\text{W.m}^{-2}$ )	$R$	RMSE ( $\text{W.m}^{-2}$ )	RRMSE (%)	Pente	Offset ( $\text{mm.j}^{-1}$ )	$R$	RMSE ( $\text{mm.j}^{-1}$ )	RRMSE (%)
HYDRUS/EC	1.32	-26	0.87	57	33	1.3	-0.46	0.97	0.49	22
EC/S-SEBI	0.67	97	0.78	64	36	0.92	0.19	0.9	0.48	22
HYDRUS/S-SEBI	0.39	129	0.69	82	38	0.67	0.56	0.86	0.82	33

TAB. 4.3: Statistiques (pente, offset, coefficient de corrélation  $R$ , RMSE et RRMSE) pour les intercomparaisons entre les estimations terrain (EC pour covariances turbulentes et HYDRUS-1D) et satellite, pour l'ETR aux échelles horaire et journalière, en considérant les dates de passages ASTER.

Lorsque l'on compare, pour les dates de passage ASTER, les estimations d'ETR HYDRUS-1D et S-SEBI avec les mesures par covariances turbulentes, nous observons des différences de l'ordre de  $60 \text{ W.m}^{-2}$  à l'échelle instantanée et de  $0.5 \text{ mm.j}^{-1}$  à l'échelle journalière. Ces valeurs sont très similaires à celles reportées dans la littérature (Kalma et al., 2008). Lorsque l'on intercompare les estimations d'ETR HYDRUS-1D et S-SEBI, les différences sont un peu plus importantes, de l'ordre de  $82 \text{ W.m}^{-2}$  à l'échelle instantanée et de  $0.8 \text{ mm.j}^{-1}$  à l'échelle journalière. Ces valeurs restent aussi proches de celle reportées dans la littérature (French et al., 2005; Gomez et al., 2005; Jacob et al., 2002a).

#### 4.3.3 Analyses spatio-temporelles des ETR obtenu par S-SEBI

La mise en évidence d'importantes dynamiques spatiales et temporelles ont été observées sur les estimations des ETR spatialisées par S-SEBI sur l'ensemble des dates AS-

#### 4. SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE À PARTIR DES DONNÉES ASTER

---

TER. Ces résultats sont en lien direct avec les ETR obtenues par simulation HYDRUS-1D sur les 7 sites de validation ainsi que sur ETR mesurées sur les sites de mesure par covariances turbulentes. Les figures 4.5 et 4.6 montrent que, pour chacun des sites de validations, les ETR estimées par S-SEBI sont cohérentes avec celles simulées par HYDRUS-1D. Ceci est vérifié pour tous les sites, avec des RMSE comprises entre  $0.54 \text{ mm.d}^{-1}$  et  $1.3 \text{ mm.d}^{-1}$  (sites 2 et 7 respectivement). L'analyse de la variabilité temporelle capturée pour chaque site étant déjà étayée dans le chapitre précédent (chapitre 3 § 3.6), nous nous contenterons dans cette section de regarder cette variabilité pour les dates de passage ASTER.

Une importante dynamique temporelle est observée sur les ETR estimées par S-SEBI. Pour les sites sans nappes ou à faible capacité de stock hydrique (sites 1, 2, 3, 6N et 7), nous observons des valeurs proches de  $0 \text{ mm.d}^{-1}$  en automne (02/11/2007) et des valeurs comprises entre 1 et  $2 \text{ mm.d}^{-1}$  en phase de sénescence de la vigne (15/09/2007, 01/09/2008, 26/09/2008) et 03/10/2008). Les sites 4, 5 et 6S présentent des valeurs plus élevées durant la phase de sénescence, ce qui s'explique par la présence de nappes permanentes et/ou de capacités de stock hydrique plus élevées du fait des caractéristiques pédologiques (sols argileux profonds, voir tableau 4.1). Pendant la période de printemps durant laquelle les sols sont bien alimentés en eau grâce à des précipitations importantes (chapitre 3 § 3.6), l'ensemble des sites présente des valeurs d'ETR plus élevées comprises entre 2 et  $5.5 \text{ mm.d}^{-1}$ .

L'analyse des résultats de validation de S-SEBI sur les sites considérés a montré l'existence d'importantes dynamiques spatiales et temporelles de l'ETR. L'obtention de cartographie d'ETR à l'échelle du bassin versant de la Peyne grâce à l'imagerie ASTER nous a permis ensuite de regarder les variabilité spatio-temporelles à l'échelle du bassin versant pour l'ensemble des passages ASTER. Nous avons alors noté l'existence d'une stabilité spatiale sur l'ensemble des dates d'expérimentation mais aussi, pour les dates correspondant aux images d'archives (imagerie ASTER collectée entre 2002 et mi-2007).

Pour illustrer cette stabilité temporelle, deux cartes d'ETR (figure 4.7) ont été choisies au cours de la période d'expérimentation, pour deux dates correspondant à des conditions hydriques contrastées (15/09/2007 et 24/07/2008). On observe que l'ETR maximale est deux fois plus importante d'une date à l'autre, tandis que les structures spatiales restent très similaires.

### 4.3 Résultats et analyses complémentaires

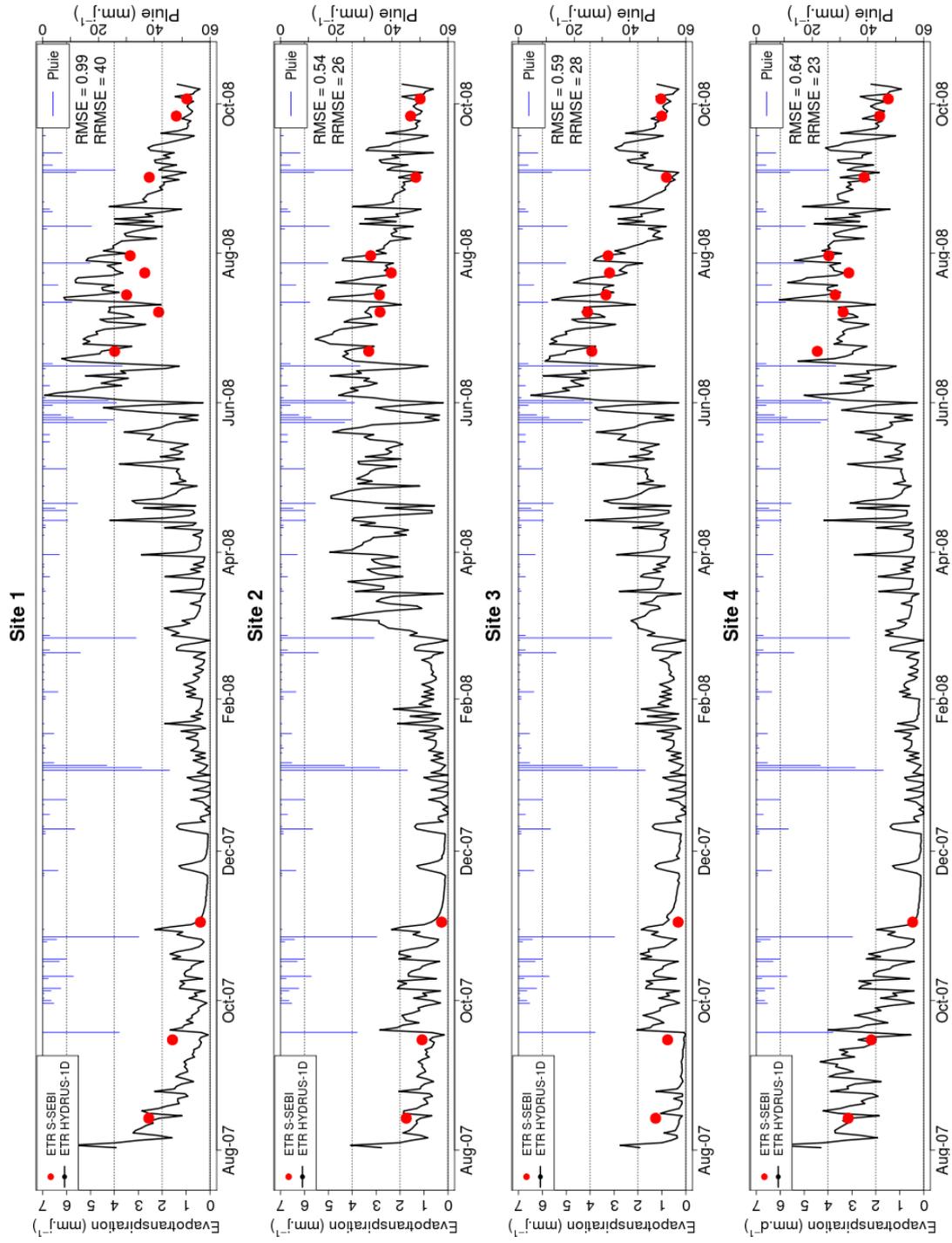


FIG. 4.5: Chroniques des ETR obtenues par S-SEBI (en cercles rouges) et validées par HYDRUS-1D (lignes noires continues), sur les sites 1, 2, 3 et 4 pour toute la période de simulation.

## 4. SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE À PARTIR DES DONNÉES ASTER

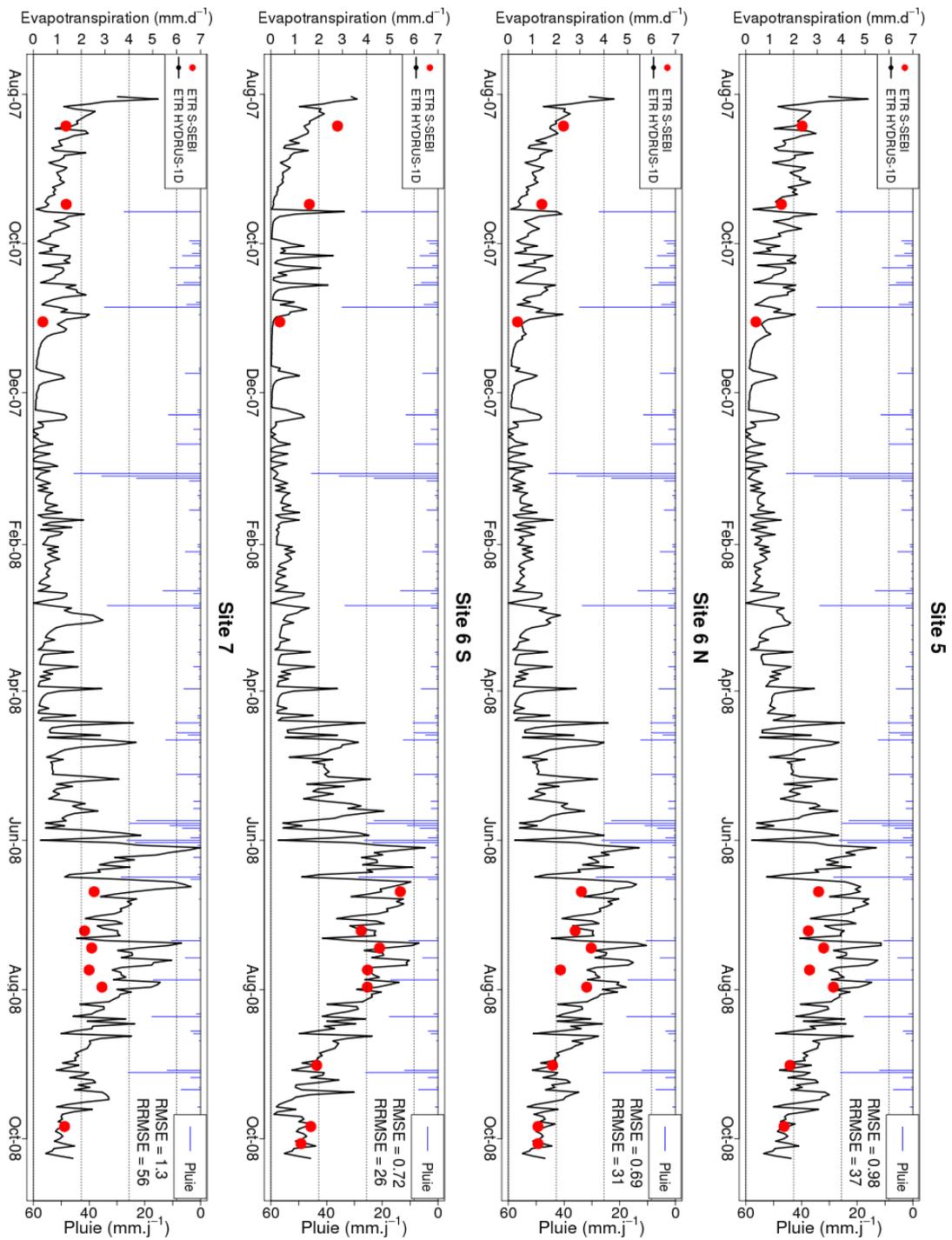


Fig. 4.6: Chroniques des ETR obtenues par S-SEBI (en cercles rouges) et validées par HYDRUS-1D (lignes noires continues), sur les sites 5, 6N, 6S et 7 pour toute la période de simulation.

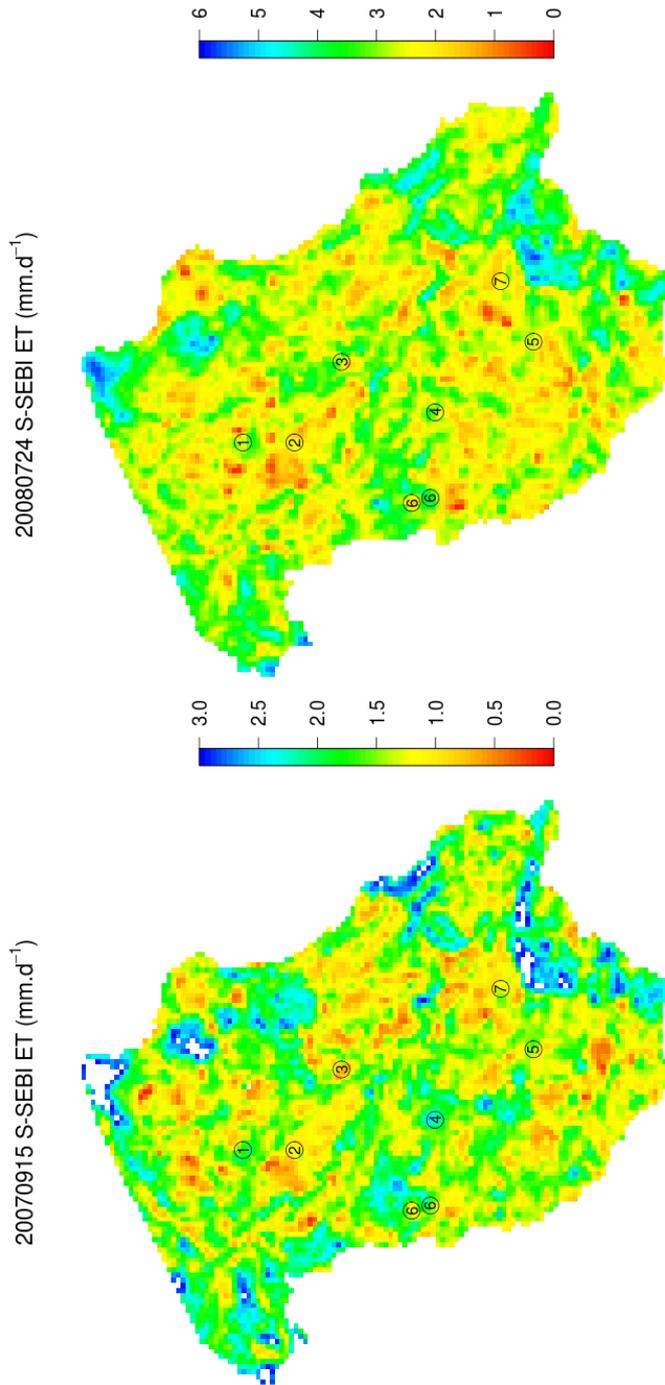


FIG. 4.7: Cartes des ETR pour la date du 15/09/2007 correspondant à une période de contrainte hydrique et pour la date du 24/07/2008 correspondant à une période où les sols sont bien alimentés en eau. En cercles sont représentés les sites d'étude. Pour une meilleure visualisation des dynamiques spatiales, ces dernières ont été réduites aux intervalles apparaissant dans la légende (échelle de couleur). Il en résulte des zones de couleur blanche qui correspondent à des valeurs en dehors des intervalles choisis.

#### 4. SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE À PARTIR DES DONNÉES ASTER

---

Pour confirmer cette hypothèse de stabilité spatiale deux cartes supplémentaires sont présentées : une datant du 02/11/2007, période sans végétation, et une autre datant du 29/06/2002 période de plein développement végétatif (figure 4.8). Sur la première on observe, malgré les faibles valeurs d'ETR rencontrées, des structures spatiales relativement similaires à celles observées sur les cartographies précédentes (i.e. cartographies obtenues durant la période d'expérimentation). Ceci est d'autant plus vrai que la cartographie issue de l'image d'archive (29/06/2002) est très semblable aux cartographies obtenues durant la période d'expérimentation, en particulier à celle du 24/07/2008 qui correspond à des conditions hydriques similaires.

Pour approfondir les résultats précédents, nous avons analysé les cartographies d'ETR issue de l'imagerie ASTER via S-SEBI en considérant, pour chaque pixel, les valeurs minimales et maximales sur l'ensemble des dates de passage ASTER durant les périodes de plein développement végétatif de la vigne. Le choix de ces périodes permettait de normaliser les estimations télédéteectées par rapport à la couverture végétale, tandis que le peu d'images disponibles en dehors de ces périodes rendait difficile l'obtention de résultats statistiquement tangibles. Les périodes de plein développement végétatif ont été déterminées par l'approche des sommes des températures (chapitre 3 §3.2.3), avec des dates comprises entre fin juin et mi-octobre. La figure 4.9 présente les cartographies des ETR maximales et minimales obtenues. Sur cette figure, on distingue des zones avec des ETR maximales assez faibles (valeurs dépassant à peine les  $2 \text{ mm.d}^{-1}$ ), ces zones étant associées à des unités de sol dans lesquelles il y a une faible capacité de stock hydrique. Pour les ETR minimales, des structures spatiales similaires sont observées, avec un distinguo pour la partie nord du bassin versant (proche du site 1) sur laquelle nous notons une forte contrainte hydrique avec des valeurs d'ETR proche de  $0 \text{ mm.d}^{-1}$ . Au centre et au sud du bassin versant (dans le secteur du site 5), nous distinguons des ETR minimales proches de  $1.5 \text{ mm.d}^{-1}$ . Ces zones sont souvent caractérisées par la présence de nappes superficielles comme le cas du site 5, ce qui justifie une disponibilité en eau et donc des valeurs minimales d'ETR plus importantes. Il convient de signaler que l'interprétation des valeurs maximales et minimales proposée ici est à prendre avec précaution, puisque ces valeurs dépendent du nombre et de la répartition temporelle des passages ASTER.

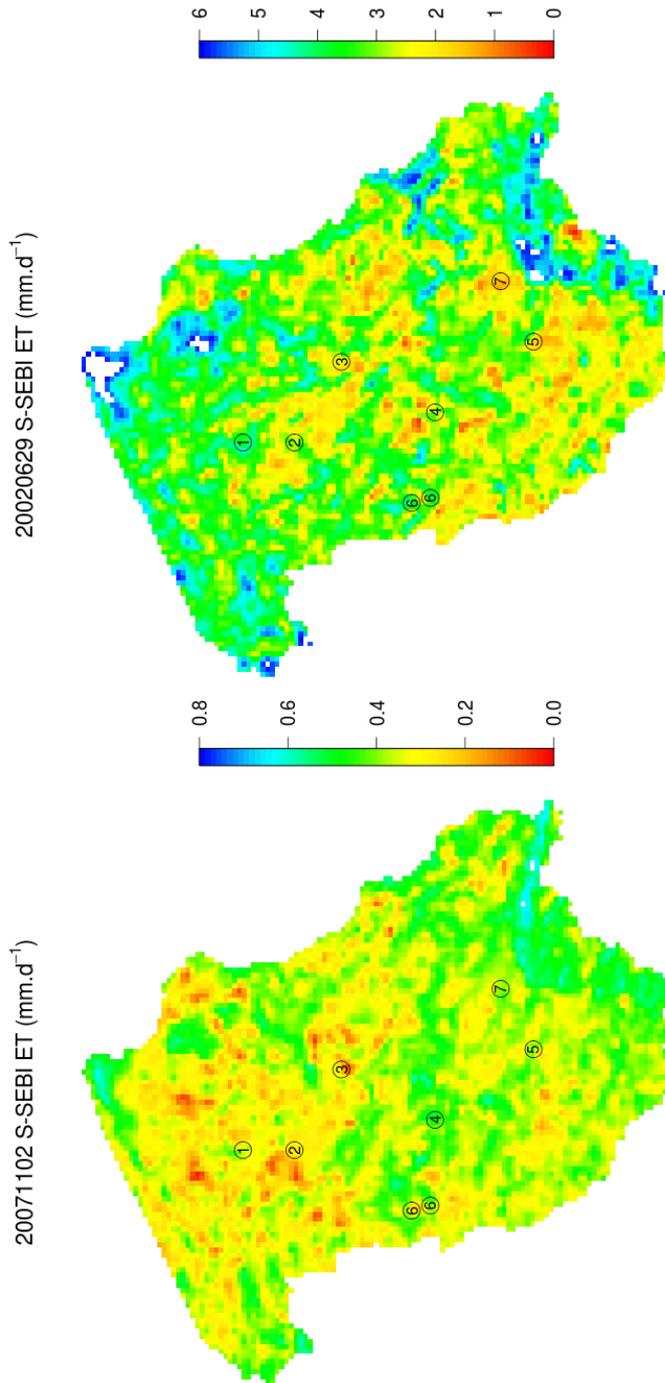


FIG. 4.8: Cartes des ETR pour la date du 02/11/2007 correspondant à une période sans végétation et pour la date du 29/06/2002 correspondant à une période où les sols sont bien alimentés en eau (archive). En cercles sont représentés les sites d'étude. Pour une meilleure visualisation des dynamiques spatiales, ces dernières ont été réduites aux intervalles apparaissant dans la légende (échelle de couleur). Il en résulte des zones de couleur blanche qui correspondent à des valeurs en dehors des intervalles choisis.

#### 4. SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE À PARTIR DES DONNÉES ASTER

---

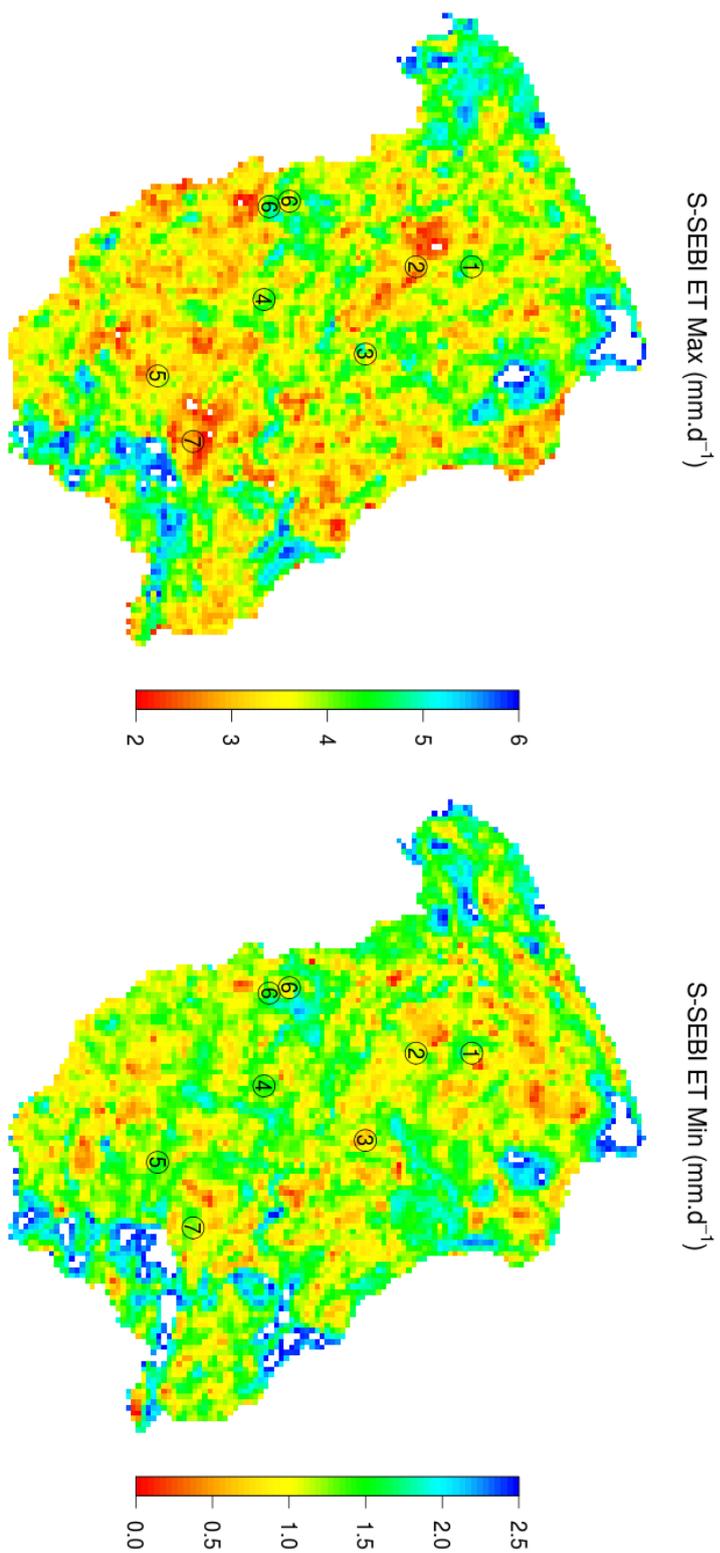


FIG. 4.9: Cartes des ETR maximales et minimales sur toute la période de pleine végétation de la vigne (juillet et octobre) pour les données comprenant période d'expérimentation et les données archivées. En cercles sont représentés les sites d'étude. Pour une meilleure visualisation des dynamiques spatiales, ces dernières ont été réduites aux intervalles apparaissant dans la légende (échelle de couleur). Il en résulte des zones de couleur blanche qui correspondent à des valeurs en dehors des intervalles choisis.

Une dernière analyse réalisée, concerne la variabilité des ETR évaluées par une cartographie des coefficients de variation (CV) correspondant au rapport entre écart-type et valeur moyenne de chaque pixel pour la période de plein développement végétatif (figure 4.10). Sur la cartographie obtenue, nous observons que les ETR d'une grande partie du bassin versant ont des valeurs de coefficient de variation entre 20 et 60%. Deux groupes peuvent être différenciés, ceux ayant un CV proche de 30%, et ceux ayant un CV supérieur avec des valeurs aux alentours de 40%. Malgré ces différences les structures spatiales se maintiennent ce qui renforce l'hypothèse de l'existence d'une stabilité des structures spatiales.

Les cartographies présentées dans cette section ont un intérêt particulier dans un contexte viticole, puisqu'elles permettent de différencier des zones d'évapotranspiration plus ou moins importante, zones qu'il est difficile de caractériser à partir d'observations sur le terrain. Il est ainsi possible d'identifier des zones de forte ETR qui peuvent ne pas convenir à la réalisation d'un vin de qualité. Il est aussi possible d'identifier des zones susceptibles de subir de fortes contraintes hydriques, ce qui peut être limitant pour la culture de la vigne. L'identification de ces zones pourrait théoriquement permettre de meilleures prises de décisions sur certains aspects décisifs de la viticulture, telles que la détermination adéquate d'un cépage selon la zone considérée.

## 4.4 Conclusions

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté la validation du modèle spatialisé S-SEBI qui permet de cartographier le statut hydrique et l'ETR journalière à partir de données de télédétection optique issues du capteur ASTER. Un premier point important est l'obtention de performances acceptables pour un modèle très simple lorsqu'il est appliqué sur des paysages complexes tel que des cultures en rang de type vignes. Un autre point important est la possibilité d'utiliser le modèle de transfert hydrique dans les sols HYDRUS-1D conjointement avec des mesures de sonde neutronique et des mesures de forçage météorologique, en vue de valider des estimations d'ETR par télédétection. La validation de S-SEBI a donné des résultats acceptables avec des RMSE entre prédictions et observations de l'ordre de  $0.8 \text{ mm.d}^{-1}$ , et ce pour sept sites de validation permettant de capturer la variabilité spatio-temporelle à l'échelle du bassin versant de la Peyne. L'analyse des résultats de validation a montré que de possibles

#### 4. SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE À PARTIR DES DONNÉES ASTER

---

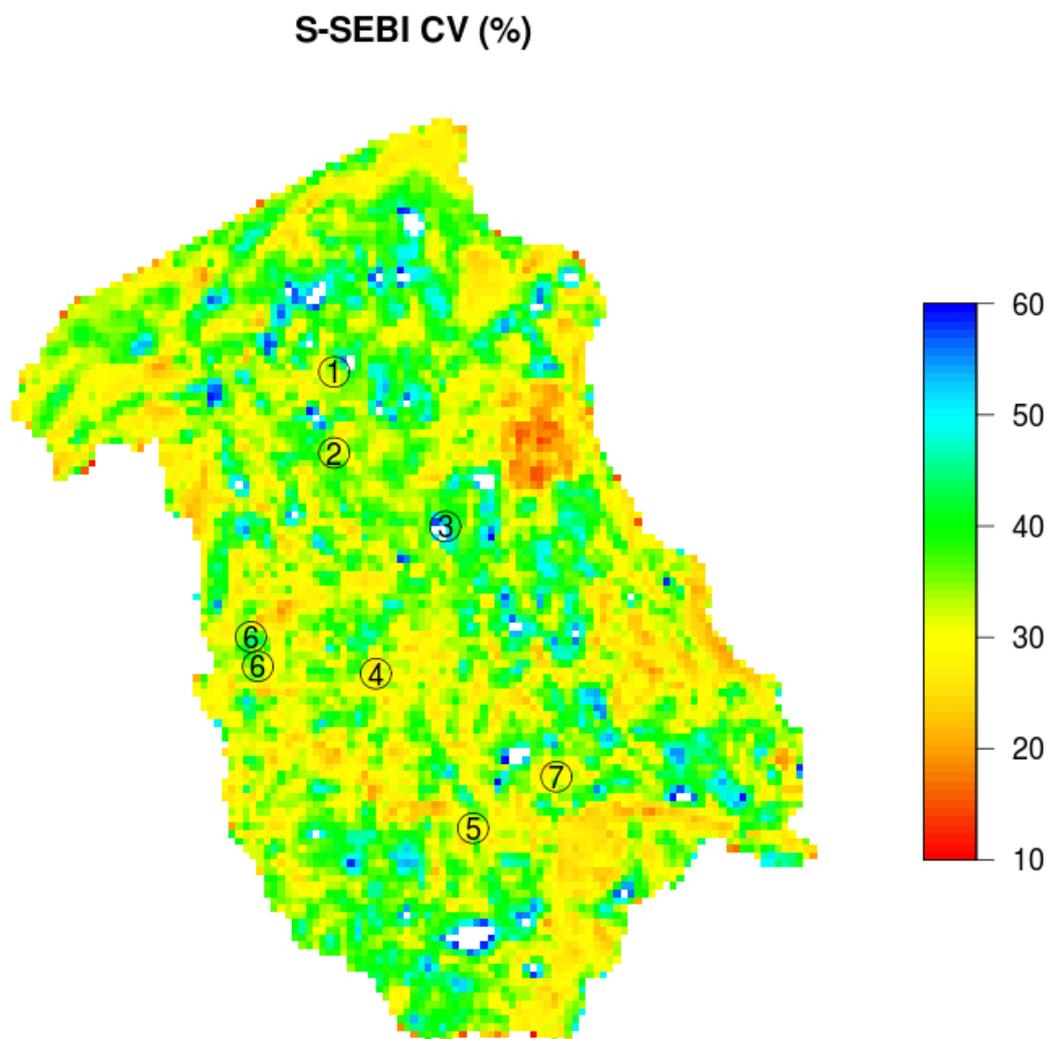


FIG. 4.10: Carte des coefficients de variation sur l'ensemble des ETR obtenues pour la période de plein développement végétatif de la vigne (fin juin à octobre) pour les données comprenant période d'expérimentation et les données archives. En cercles sont représentés les sites d'étude. Pour une meilleure visualisation des dynamiques spatiales, ces dernières ont été réduites aux intervalles apparaissant dans la légende (échelle de couleur). Il en résulte des zones de couleur blanche qui correspondent à des valeurs en dehors des intervalles choisis. Ces zones correspondent à des changements d'occupation du sol majeure sur la période où l'ensemble des images ASTER a été collecté (archives+expérimentation, de 2002 à 2008)

pistes d'amélioration pour les performances de S-SEBI seraient la prise en compte des variations de l'aérodynamisme du couvert végétal de la vigne, selon le couplage entre l'orientation des rangs et la direction du vent.

La deuxième partie de ce chapitre comporte les résultats complémentaires en vue d'approfondir les résultats publiés sous forme de "short-letter". Dans un premier temps, les estimations télédéteectées du rayonnement net se sont avérées, via un exercice de validation, avoir une précision de l'ordre de  $45 \text{ W.m}^{-2}$ . Ce résultat, expliqué par des différences de couverture végétale à l'intérieur des footprint instrumentaux, est similaire à ceux reportés dans la littérature (French et al., 2005; Gomez et al., 2005; Jacob et al., 2002a). Dans un second temps, nous avons évalué la pertinence de la méthode utilisée pour extrapoler à l'échelle journalière les estimations de rayonnement net instantané. Les résultats obtenus se sont avéré cohérents, au regard de leur grande similitude avec ceux reportés dans la littérature. Dans un troisième temps, nous avons évalué les différences entre les valeurs d'ETR instantanée et journalière issues des mesures par covariances turbulentes, des simulations HYDRUS-1D et des estimations ASTER via S-SEBI. Les résultats obtenus, avec des RMSE variant de 60 à  $85 \text{ W.m}^{-2}$  pour les valeurs instantanées et de 0.5 à  $0.8 \text{ mm.d}^{-1}$  pour les valeurs journalières, sont similaires à ceux reportés dans la littérature (French et al., 2005; Gomez et al., 2005; Jacob et al., 2002a; Kalma et al., 2008; Sobrino et al., 2007).

La dernière étape de cette deuxième partie consistait en une analyse des variabilités spatio-temporelles capturées par les observations terrain et les estimations ASTER / S-SEBI. Au delà des dynamiques spatiales et temporelles observées sur les sites de validation, le résultat le plus marquant est l'existence d'une structure spatiale à l'échelle du bassin versant de la Peyne, quelque soit la date d'observation. Les analyses des cartographies d'ETR et des statistiques dérivées ont montré l'existence d'une structure spatiale stable au cours des saisons et des années. Il est supposé que cette structure spatiale est en rapport avec des propriétés pédologiques et des conditions hydriques à l'échelle du bassin versant, cette piste d'explication devant être approfondie dans l'avenir.

#### **4. SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION JOURNALIÈRE À PARTIR DES DONNÉES ASTER**

---

## Chapitre 5

# Étude de deux indicateurs spatialisés de statut hydrique

### 5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que l'utilisation conjointe des données ASTER et du modèle spatialisé S-SEBI, a permis de restituer l'ETR journalière de façon acceptable en comparaison avec les valeurs décrites dans la littérature. En dépit de la simplicité de S-SEBI, qui repose sur la variabilité spatiale des conditions hydriques capturées à l'intérieur d'une image télédéteectée (modèle contextuel selon [Kalma et al. \(2008\)](#)), et de la complexité du paysage étudié (cultures en rang de type vigne), nous avons obtenus des estimations satisfaisantes puisqu'elles ont été, à peine moins précises que celles issues d'un modèle de terrain (i.e. HYDRUS-1D).

Par suite, nous nous sommes interrogés quant à l'introduction d'un deuxième modèle spatialisé à base plus physique que le modèle contextuel S-SEBI, dans l'optique d'obtenir des estimations plus précises. L'indicateur de statut hydrique Water Deficit Index (WDI) a été considéré à ce propos. C'est un modèle simplifié qui, à la différence de S-SEBI, considère de l'information auxiliaire et in-situ pour estimer les extrêmes théoriques. En d'autres termes, alors que S-SEBI caractérise les extrêmes évaporatoires (pixels avec des régimes évaporatoires maximum ou nuls) à partir des valeurs de température capturées par imagerie infrarouge, WDI détermine ses conditions extrêmes à partir de considérations théoriques et de mesures in-situ (i.e. inversion du flux de chaleur sensible pour déterminer le gradient entre température de surface et température de

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

l'air). L'autre grande différence entre les deux approches repose sur la caractérisation de la variabilité spatiale, via l'espace température de surface -albédo pour S-SEBI. Cette différence peut s'avérer importante selon les conditions de surface, l'espace température de surface /albédo étant plus adéquat pour caractériser les variabilités spatiales en conditions de couvert végétales diverses (e.g considération de la végétation sénescente) (Merlin et al., 2010).

Au regard de ces éléments, il est intéressant dans un premier temps d'évaluer l'apport d'un paramétrage plus fin tel que celui proposé par WDI. Pour cela nous effectuons une intercomparaison à la fois sur les sites de validation et à la fois à l'échelle du bassin versant. L'intercomparaison sur les sites de validation nous permet de confronter les deux approches à des mesures terrain de référence, tandis que l'intercomparaison à l'échelle du bassin versant nous permet de confronter les deux modèles selon un panel de conditions environnementales plus important que celui capturé sur les sites de validation. L'ensemble de ces investigations représente la première partie de ce chapitre.

Dans un deuxième temps, les deux méthodes diffèrent de par les hypothèses sur lesquelles elles reposent (extrêmes hydriques définis théoriquement ou empiriquement, représentativité des mesures in-situ, différenciation de la couverture végétale) et qui leur confèrent une originalité, un intérêt, mais aussi des faiblesses. Compte-tenu de ces éléments, il est intéressant d'évaluer la sensibilité de chacune de ces deux méthodes par rapport aux hypothèses sur lesquelles elles s'appuient. Cette question est le coeur de la seconde partie de ce chapitre, dans lequel des analyses de sensibilité sont présentées sur WDI et sur S-SEBI.

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

---

### 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

#### Abstract

Daily Evapo-Transpiration (ET) was spatialized over a Mediterranean vineyard watershed by using ASTER data along with the S-SEBI and the WDI models. The consideration of these two spatialized approaches allowed intercomparing their potential and limitations, in terms of feasibility and accuracy, especially according to the determination of evaporative extremes that are used for the differencing based retrieving of daily ET. Validation exercise was performed using simulations from the HYDRUS-1D model calibrated against neutron probe data over seven contrasted sites. The HYDRUS-1D simulations were controlled through a comparison against eddy covariance estimations over two contrasted sites, where quadratic error between both was about  $0.6 \text{ mm.d}^{-1}$ . Then, estimates of daily ET derived from ASTER along with S-SEBI or WDI were validated against HYDRUS-1D simulations over seven contrasted sites. The obtained accuracies were about  $0.8 \text{ mm.d}^{-1}$  and  $1.1 \text{ mm.d}^{-1}$  for S-SEBI and WDI retrievals, accuracies regularly quoted as a requirement for further applications. The obtaining of better results with the more empirical approach was consistent with recent studies from the literature. The obtaining of better results with the more empirical approach was in agreement with recent studies. We finally compared S-SEBI and WDI maps at the watershed extent and over validation sites, and similar results were found between models and against ground based estimated. Despite this similarity spatio-temporal differences were detected between models. Finally S-SEBI and WDI ET maps suggested similar permanent spatial patterns probably mainly related to pedological conditions.

#### 5.2.1 Introduction

Land surface evapotranspiration (ET) is a key variable for hydrology, agronomy and meteorology research fields, because of its influence on boundary layer micrometeorology and soil moisture. Given daily ET involves up to 70% of the yearly water balance in semiarid contexts (Moussa et al., 2007), its knowledge is paramount when

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

studying crop water use. In that sense, the particular case of vine crop is specifically concerned, because of hydric status implication for quality and quantity. Vineyard crops in Mediterranean region are typically managed without irrigation and are subject to severe water stress, particularly during the period before harvest (August - September), when evaporative demand is maximal while rainfall is insignificant. Water stress is necessary to regulate vegetative and fruit growth, canopy microclimate and fruit metabolism, but an excess can cause severe damage in fruit development, thus affecting production. Vineyard hydric status should therefore be diagnosed at appropriate growth stages. Additionally, water use in Mediterranean regions is characterized by increasing competition between the actors (including various cropping systems based on irrigation), which can indirectly affect vineyards through watertable extraction. This competition may be further increased under the influence of global warming, for which Mediterranean regions has been recognized as a Hot-Spot (Diffenbaugh et al., 2007). Consequently, a better comprehension of hydric status is required for prognosticating future changes affecting vine cultures in Mediterranean regions.

Many studies focused on estimating vineyard ET, relying on various approaches. The field scale has been often considered, by implementing soil water balance models (Lebon et al., 2003; Pellegrino et al., 2006), by directly estimating latent heat flux ( $LE$ ) from ground based micrometeorological measurements (Heilman et al., 1994; Li et al., 2009; Oliver and Sene, 1992; Ortega-Farias et al., 2007; Sene, 1994; Trambouze et al., 1998) or by indirectly estimating  $LE$  as the energy balance residual (Giordani et al., 1996; Spano et al., 2000). On the other hand, the use of remote sensing over vineyards was investigated for monitoring plant performances only, by using chlorophyll fluorescence indexes or changes in canopy reflectance (Flexas et al., 2000; Montero et al., 1999; Moya et al., 2004). Although numerous models were developed to map ET from remote sensing (Courault et al., 2005), most were applied over full canopy cultures like cereals, or over sparse natural vegetation (Chehbouni et al., 2008; Courault et al., 2009; French et al., 2005; Jacob et al., 2002a; Zwart and Bastiaanssen, 2007), with a wanted accuracy of  $0.8 \text{ mm.d}^{-1}$  at the daily scale (Kalma et al., 2008; Seguin et al., 1999). Thus, little information is available for vineyard row crops that usually include small fields, whereas row structures induce specific processes such as influence on convective fluxes of air turbulence within vine canopy and inter-row, or influence on remote sensing data of sunshine and shading effects for soil and vine canopy.

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

---

Several methods, either empirical or deterministic, are candidate for mapping vineyard daily ET from remote sensing (Courault et al., 2005; Kalma et al., 2008). Amongst these candidates, the logical choice for row structured vineyards is two source modeling that discriminates soil and vegetation components (Norman et al., 1995; Sanchez et al., 2008) and even differentiates sunlit and shaded components (van der Tol et al., 2009; Verhoef et al., 2007). Nevertheless, the required information for two source description (roughness lengths for momentum and heat, net radiation and wind profile within canopy...) may induce large errors when implemented over row structured vineyards. An alternate possibility is using differencing methods based on spatial contrasts, where ET is characterized from differences in surface temperature rather than absolute values (Bastiaanssen et al., 1998b; Menenti and Choudhury, 1993; Moran et al., 1994; Roerink et al., 2000; Su, 2002). This allows to minimize errors on data and parameterization and to benefit from variabilities captured with high spatial resolution remote sensors (Bastiaanssen, 2000; Choi et al., 2009; French et al., 2005; Gomez et al., 2005; Hong et al., 2009; Jacob et al., 2002a; Moran et al., 1996; Sobrino et al., 2005; Teixeira et al., 2008; Timmermans et al., 2007; Zwart and Bastiaanssen, 2007). Further, using a very simple model amongst the panel of proposed differencing methods is an attractive solution, since Kalma et al. (2008) and Timmermans et al. (2007) suggested accuracies are often similar regardless of model complexities. This is convergent with the study from Galleguillos et al. (2010), who reported the Simplified Surface Energy Balance Index (S-SEBI) from Roerink et al. (2000) was able to generate acceptable estimates of daily ET over a Mediterranean vineyard watershed, when implemented over Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) optical imagery.

From the results obtained by Galleguillos et al. (2010) with a very simple differencing approach, a raising question is the possibility to improve accuracies on daily ET retrievals over vineyards, by considering a more physically based differencing model such as Water Deficit Index (WDI) designed by Moran et al. (1994). Both models differ in using the spatial information captured over the solar and thermal domains, for the differencing based retrieving of water status and ET. The first difference relies on characterizing spatial variability, either through the temperature – vegetation cover space that is controlled by soil moisture (WDI), or through the temperature – albedo space

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

that is controlled by radiative and evaporative processes (S-SEBI). This is of importance, since temperature – albedo space may be more appropriate when land surfaces depict various vegetation types and phenological stages (Merlin et al., 2010). The second difference relies on estimating the evaporative extremes. S-SEBI uses remotely sensed information only, where extremes are characterized from spatial variabilities captured within the thermal infrared imagery. WDI relies on additional ground based meteorological measurements, to theoretically determine evaporative extremes from surface - air temperature gradient obtained by inverting sensible heat flux.

The main objective of this study is to compare S-SEBI and WDI performances, for the retrieval of daily ET maps over a Mediterranean vineyard watershed. The consideration of these two differencing methods allows to compare their potential and limitations, in terms of feasibility and accuracy. Intercomparisons are conducted over validation sites that allow confronting both models to ground truthing, and over the whole watershed that implies a larger panel of environmental conditions. Both models are implemented over ASTER imagery that spans almost two growth cycles, where ASTER is the unique spaceborne sensor capable of collecting high spatial resolution data of surface temperature with high radiometric quality (French et al., 2008). We first present the study site (§ 4.2.2.1), the involved ground based and remote sensing observations, (§ 5.2.2.2), the *in-situ* estimates (§ 5.2.2.3) and the remote sensing retrievals (§ 5.2.2.4) of daily ET, as well as the assessment and validation strategies (§ 5.2.3). We next report results when checking ground based estimates (§ 5.2.4.1), when validating S-SEBI and WDI retrievals against ground based references (§ 5.2.4.2), and when intercomparing both models over the whole vineyard watershed (§ 5.2.4.3). Outlines are finally discussed and confronted against literature materials (§ 5.2.5).

### 5.2.2 Material and methods

#### 5.2.2.1 Study site : la Peyne watershed

The Peyne watershed (43.49°N, 3.37°E, 80 m asl) is located in the Languedoc - Roussillon region, southern France. This 65 km<sup>2</sup> size watershed contains vine monocultures (70%), where the latter are mostly rainfed (>95%). The remaining 30% include olive and wheat crops, forests, native scrublands, urban zones, and free water areas due to land surface impoundments. Annual rainfalls ranges from 400 mm to 1300 mm

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

distributed in autumn and spring, with significant inter-annual variability, and yearly Penman ET is close to 1100 mm (Trambouze and Voltz, 2001). Vineyards are located over relatively flat terrains that depict 4% slopes in average, whereas 90% of these terrains have slopes lower than 10%.

The area holds a large suite of conditions for soil (with various parental materials) and watertable depth, with consequences on the functioning of vineyard rooting system. To capture this variability for validation purposes, seven sites were selected, corresponding to rainfed vineyards. The latter included similar trellis structures (2.5 m row spacing, 1 m max row width and 1.5 m averaged canopy height) apart from row orientation (Tab. 4.1). Each of site 1 to 5 and 7 corresponded to one field, with size ranging from 0.03 to 0.09 km<sup>2</sup>. Site 6, with a 0.15 km<sup>2</sup> size, spread over nine fields including vineyards by 90% in surface area. It was split into north (6N) and south (6S) sub-sites for validation purposes.

Site number	Devices	Soil Depth	Soil texture	water table conditions	Size (m <sup>2</sup> )	Row angle (°)
1	1 NP	Shallow	Sandy, Silty	Absent	32701	343
2	1 NP	Shallow	Clay, Gravels	Seasonal	74966	42
3	2 NP	Shallow	Silty, Sandy	Absent	29894	326
4	1 NP	Deep	Clay loam	Permanent	53851	24
5	2 NP	Deep	Clay	Seasonal	81052	35
6N	5 NP, EC	Deep	Clay loam	Seasonal	87493	85
6S	4 NP, EC	Shallow	Silty	Absent	58328	359
7	1 NP, EC	Deep	Clay	Absent	92312	318

TAB. 5.1: Main characteristics of the validation sites within the Peyne watershed. The "devices" columns indicates the number of locations within each site for collecting soil moisture profile from neutron probe (NP) device, and the collection of Eddy Covariance (EC) measurements. A soil was considered as shallow when the underlying parental material was above a 2.5 m depth. Row angle is indicated according to north origin. Watertable conditions are related to winter and spring seasons. Eddy covariance footprint over site 6 encompassed both sub-sites 6N and 6S.

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

### 5.2.2.2 Data

Among numerous possibilities for *in-situ* estimation of daily ET, we chose a method that alleviated experimental efforts for device maintenance and data collection. It made use of the HYDRUS-1D model that simulates water transfers in the vadose zone once calibrated against soil moisture profiles, provided meteorological forcing is known. We therefore present hereafter the ground based measurements to be used for implementing this ground truthing procedure, and next the remote sensing data to be used along with S-SEBI and WDI.

#### Ground-Based data

Hourly values of air temperature, wind speed, relative humidity, solar irradiance and rainfall were collected within site 6 with a CIMEL ENERCO 400 station, following meteorological standards apart from wind speed (measured at 2 m height rather than 10 m). Hourly net radiation was measured over a representative vineyard within site 6 by using a Campbell NR-lite device whose footprint held vine canopy by up to 66%.

Each site was monitored, biweekly and after each significant rainfall, for vegetation canopy structure, for watertable depth and soil moisture. The number of locations for collecting soil moisture profiles varied according to site size and to soil heterogeneity derived from a pedological map (see table 5.1). The data collection included the following measurements.

- Profiles were sampled every 0.2 m down to 2.5 m with a Vectra 503-DR CPN Neutron Probe (NP) device, and completed for top 0.15 m using a Soil Moisture Equipment TRASE 6050 TDR sensor.
- Watertable was monitored down to 2.5 m with manual piezometric devices.
- For each location of soil moisture profile, soil properties were derived from horizon texture and expert knowledge. Additional archive information from former studies within the region (Bsaibes, 2007; Trambouze and Voltz, 2001) were used for deriving soil surface properties.
- Vegetation structures was monitored for vine height and canopy structure (height and width), over one (site 1 to 5 and 7) or more (site 6) fields. Row orientation and spacing were measured once.

Eddy Covariance (EC) devices were setup for direct ET measurements within two sites

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

---

which differed in canopy structure, soil hydrodynamic properties and watertable : a permanent flux tower on site 6, and a temporary flux station on site 7 for three day windows centered on ASTER overpasses. Each flux station was equipped with a R.M. Young 81000 3D sonic anemometer and a fast hygrometer (Licor LI7500 for site 6 and Campbell KH20 for Site 7) to measure wind speed components, air temperature and humidity. For site 6 (resp. site 7), that included nine (resp. one) fields, the sensors were setup 5.7 m (resp. 1.5 m) above canopy and acquisition frequency was 10 Hz (resp. 20 Hz), which allowed to avoid spectral loss for wind speed values up to  $6 \text{ m.s}^{-1}$  (resp.  $3 \text{ m.s}^{-1}$ ). EC footprint over site 6 encompassed both sub-sites 6N and 6S.

Ground based data were collected from August 2007 to October 2008. Each instrument was manufacturer calibrated. The NP device was calibrated by accounting for soil type and moisture. Calibration was performed against gravimetric soil moisture measurements at each measurement depth (soil density was estimated using a Campbell DR 501 gamma probe), with a residual error of  $0.04 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$  (15% in relative).

### Remote Sensing data

We used ASTER official products for surface reflectance, waveband emissivity and radiometric temperature (Abrams, 2000), whose accuracies were 5%, 0.01 and 1.5 K respectively (Jacob et al., 2008; Sabol et al., 2009; Thome et al., 1998). These products resulted from 20 cloud-free imageries sun-synchronously collected around 11 :00 UTC with a nadir viewing. Among these 20 scenes, 11 were available for validation purposes : three in 2007 (DOY 226, 258, 306) and nine in 2008 (DOY 174, 190, 197, 206, 213, 245, 270, 277). Archive imageries were additionally used for intercomparison purposes : two in 2002 (DOY 164,180) ; one in 2003 (DOY 39) ; three in 2005 (DOY 140, 147, 227) ; one in 2006 (DOY 191) and two in 2007 (DOY 130, DOY 194). Reflectances at 15 m (visible and near infrared) or 30 m (shortwave infrared) were averaged at the 90 m resolution of emissivity and radiometric temperature. A digital 0.5-m pixel orthophoto collected in summer 2007 was used to geolocate ASTER images.

### 5.2.2.3 In situ Estimation of Daily ET

#### Direct estimation from Eddy Covariance

For site 6 and 7, sensible and latent heat fluxes were calculated from EC data over hourly intervals by applying double rotation and all instrumental corrections proposed

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

by the ECPACK version 2.5.20 library (Dijk et al., 2004). Fluxes were calculated along with tolerance intervals, about 20% and 12% for site 6 and 7, respectively. For energy balance closure, convective fluxes and available energy agreed within 80%. Daily ET was finally calculated as the sum of hourly ET.

### Indirect estimation from HYDRUS-1D model simulations

For the seven validation sites that corresponded to vineyard canopies, ground truthing of daily ET was obtained from HYDRUS simulations, where the model was calibrated against soil moisture profiles and forced with meteorological data. We present here the model implementation, as well as the derivation of daily ET from model simulations of actual plant transpiration and soil evaporation. HYDRUS-1D (Simunek et al., 2008) is a physically-based model that simulates water flow in the vadose zone from Richard equation (Richards, 1931) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] - S(h) \quad (5.1)$$

where  $\theta$  is volumetric water content ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ),  $t$  is time,  $z$  is vertical coordinate, and  $K$  is hydraulic conductivity.  $S(h)$  represents water uptake by roots. It corresponds to the volume of extracted water per soil volume unit and per time unit, and is a function of pressure head  $h$ .

For the current study, the soil was split into 251 layers between 0 and 2.5 m depth. Root water uptake was distributed according to *in-situ* observations and previous studies (Bsaibes, 2007; Trambouze and Voltz, 2001). The resulting averaged profile considered 75% of roots between 0.25 and 1.25 m, with a 2.2 m maximum depth. The sink term  $S(h)$ , which represents the transpiration regulation when soil moisture content drops below a threshold, was determined using the Feddes functions that depend on potential root water uptake (Feddes et al., 1978). Following observations for vineyards by Trambouze and Voltz (2001), threshold pressures were set at  $-0.1$  mbar and  $-1.5$  mbar. Lower boundary conditions were set to free outflow when piezometric data indicated watertable absence, and to fixed pressure head at the watertable level otherwise. Residual and saturated soil moisture were derived from maximum and minimum moisture values from NP data, and topsoil hydraulic properties were estimated by following former studies over the Peyne watershed (Bsaibes, 2007; Trambouze and Voltz, 2001).

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

---

Soil hydraulic properties, retention curves and hydraulic conductivity curves were characterized using functions of [van Genuchten \(1980\)](#). The latter were calibrated (parameters  $\alpha$  and  $n$ ), along with saturated hydraulic conductivity, by using the HYDRUS-1D inverse mode. The cost function minimized differences between measured and simulated soil moisture profiles over the simulation period. Initial guesses for the three parameters to be retrieved were derived from values proposed in the literature for similar soils ([Bsaibes, 2007](#); [Trambouze and Voltz, 2001](#)), or from the HYDRUS-1D ROSETTA module.

Meteorological forcing involved rainfalls, soil reference evaporation  $E_p$  and plant maximum transpiration  $T_v$ . Rainfalls were measured at the meteorological station (§ 4.2.2.2).  $T_v$  was set to reference transpiration, which was within the confidence interval reported by [Trambouze and Voltz \(2001\)](#) who suggested a 10% larger value. Both  $T_v$  and  $E_p$  were derived from reference evapotranspiration  $ET_0$  by using the Riou's model designed for vineyards ([Bsaibes, 2007](#); [Riou et al., 1994](#); [Trambouze and Voltz, 2001](#)). Following [Riou et al. \(1994\)](#),  $ET_0$  was estimated from meteorological data by using the Penman formulation under standard conditions. Riou's model next inferred  $T_v$  as a fraction of  $ET_0$ , by assuming this fraction is almost equal to the ratio of solar irradiance absorbed by vine leaves  $R_v$  (geometrically derived from solar position and canopy structure, see Sec. 4.2.2.1) to that absorbed by the whole vineyard :

$$T_v = ET_0 \frac{R_v}{(1 - a_v)R_g} \quad (5.2)$$

where  $R_g$  is solar irradiance, and vegetation albedo  $a_v$  was set to 0.2 ([Bsaibes, 2007](#)). Reference evaporation  $E_p$  was next determined as the residual :

$$E_p = ET_0 - T_v = ET_0 \left( 1 - \frac{R_v}{(1 - a_v)R_g} \right) \quad (5.3)$$

Finally, actual soil evaporation and plant transpiration were inferred as follows. First, soil evaporation was derived from  $ET_0$  according to surface pressure head, by using Neuman's conditionality, where evaporation is driven by rainfall, infiltration, soil surface hydrodynamics properties and  $ET_0$  ([Neuman et al., 1974](#)). The threshold values for Neuman's conditionality were set to  $-10$  m (respectively  $+0.01$  m) for the minimum (respectively maximum) soil potential pressure that corresponds to complete dryness (respectively runoff) conditions. Second, actual plant transpiration was estimated as the

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

sum, over soil layers, of water uptake by roots. The latter was derived from maximum transpiration  $T_v$  through the modulation coefficient  $S(h)$  that depends on moisture via pressure head  $h$ .

For each location of soil moisture profile collection from NP measurements (§ 4.2.2.2 and Tab. 4.1), HYDRUS-1D was calibrated against the resulting chronicle over the [August 2007 -October 2008] period. Hourly simulations allowed to account for changes in sunlit and shadow effects within vineyard rows, and resulting ET was aggregated at the daily scale. Calibration relied on noon values centered on NP data acquisition period.

### 5.2.2.4 Remote Sensing retrieval

#### Retrieval of meteorological and biophysical models inputs

Values of meteorological variables at the time of ASTER overpass were obtained by interpolating the hourly data collected at the meteorological station (§ 4.2.2.2). Air temperature and solar irradiance were interpolated thanks to the formulations proposed by de Wit (1978) and Jackson et al. (1983), respectively. Air humidity, wind speed and pressure were linearly interpolated, since they did not depict any specific temporal profile.

Net radiation  $R_n$  was derived from ASTER imagery by using the standard formulation (Jacob et al., 2002a), which required beforehand estimating the involved components.

- ASTER albedo was computed as a linear combination of reflectances. Due to deficient shortwave infrared channels in 2008, we used the generic two channel formulation proposed by Jacob et al. (2002c), linearly corrected against the ASTER devoted seven channel formulation proposed by Liang (2001). The correction was calibrated over the 2007 dataset, with a relative unsystematic error of 6%, and was applied to the 2007-2008 dataset.
- ASTER broadband emissivity was computed as a linear combination of channel emissivities following Ogawa et al. (2003).
- Atmospheric irradiance for clear-sky conditions was estimated from measurements of air temperature and vapor pressure collected at the meteorological station (§ 4.2.2.2), by considering values at the time of ASTER overpasses, and by using the formulation proposed by Brutsaert (1975).

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

---

- Solar irradiance was derived from measurements collected at the meteorological station (§ 4.2.2.2), by considering values at the time of ASTER overpasses.

The Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) proposed by [Huete \(1988\)](#) was considered as an indicator of fractional vegetation cover. The choice of this index was motivated by its ability to account for soil effects, which was appropriated when studying row structured vineyard canopies. The coefficient  $L$  (soil adjusted constant) was set to  $1/2$ , following [Huete et al. \(1992\)](#) for a large variety of vegetation covers, since no value was available for vineyards. SAVI is defined as follows ( $\rho_{nir}$  are  $\rho_{red}$  are surface reflectances over near infrared and red bands).

$$SAVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{(\rho_{nir} - \rho_{red} + L)(1 + L)} \quad (5.4)$$

Finally, soil heat flux  $G_0$  was derived from ASTER imagery by using the formulation proposed by [Clothier \(1986\)](#). This formulation was chosen since it was recommended by [Moran et al. \(1994\)](#) when implementing WDI over optical remote sensing imagery. Then,  $G_0$  is expressed as following ( $R_n$  is net radiation).

$$G_0 = R_n \left( 0.295 - 0.01331 \frac{\rho_{nir}}{\rho_{red}} \right) \quad (5.5)$$

**S-SEBI implementation** Below is a model overview, see [Gomez et al. \(2005\)](#); [Roerink et al. \(2000\)](#); [Sobrino et al. \(2005\)](#); [Verstraeten et al. \(2005\)](#) for detailed descriptions. Deriving daily  $ET_d$  from S-SEBI along with optical imagery is twofold, where the latter captures contrasts driven by evaporation processes. Evaporative fraction  $\Lambda$ , i.e. the ratio of latent heat flux to convective fluxes, is computed from the differences between pixel temperature  $T_S$  and extreme temperatures within the corresponding albedo class ( $T_{max}$  and  $T_{min}$  for maximum and minimum). Next, assuming  $\Lambda$  is constant during daytime and neglecting daily soil heat flux,  $ET_d$  is derived from  $\Lambda$  by extrapolating, at the daily scale, instantaneous net radiation at satellite overpass  $R_{ni}$ , through the ratio  $Cd_i=R_{nd}/R_{ni}$  where  $R_{nd}$  is daily net radiation. This yields ( $L$  is latent heat of vaporization) :

$$ET_d = \Lambda \frac{R_{nd}}{L} = \frac{T_{max} - T_S}{T_{max} - T_{min}} \frac{Cd_i R_{ni}}{L} \quad (5.6)$$

S-SEBI was implemented over ASTER retrievals as follows (Fig. 5.1). The temperature - albedo space was characterized by calculating, for each  $10^{-3}$  wide albedo

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

class, albedo mean value and extrema temperatures. Next,  $T_{max}$  (resp.  $T_{min}$ ) outer limit was determined from the linear regression between mean albedo and maximum (resp. minimum) temperature. As originally proposed by [Roerink et al. \(2000\)](#),  $T_{max}$  outer limit was computed excluding albedoes below the threshold value that discriminates evaporative and radiative regimes, where threshold albedo corresponded to the maximum temperature of the concave temperature - albedo relationship ([Bastiaanssen et al., 1998b](#)). To reduce noise influence,  $T_{min}$  outer limit was computed by including all albedoes, rather than excluding classes above threshold value ([Verstraeten et al., 2005](#)). To include all (temperature, albedo) pairs within the outer limits, an offset was added to  $T_{max}$  (resp. subtracted to  $T_{min}$ ) slopping line, which corresponded to the variability of maximum (resp. minimum) temperature over albedo classes.

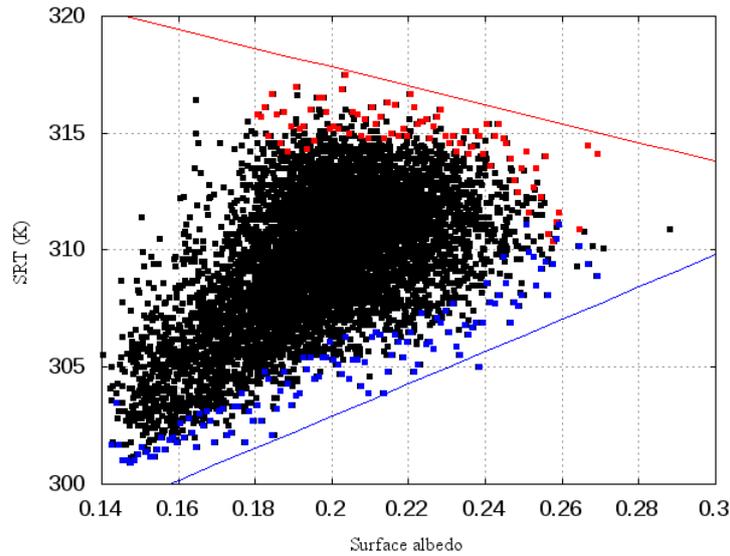


FIG. 5.1: Typical example of the scatterplots we obtained for the surface temperature (y-abcissa) versus albedo (x-abcissa) diagram used to compute evaporative fraction from S-SEBI. Blue points correspond to the (temperature-albedo) pairs for minimum temperature values of each albedo class, to be used for computing the lower limit through linear regression. Red points correspond to the (temperature-albedo) pairs for maximum temperature values of each albedo class, to be used for computing the upper limit through linear regression. Such a scatterplot is obtained for an ASTER scene collected on a given day.

Extrapolating instantaneous net radiation at the daily scale required calibrating the

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

$Cd_i$  coefficient on a daily basis. This was performed using ground based measurements of net radiation collected within site 6 (§ 4.2.2.2), and therefore assuming  $Cd_i$  was uniform at the scale of the Payne watershed.

Finally, implementing S-SEBI over the Payne watershed assumed the latter simultaneously held dry and wet areas, which was consistent with the presence of rivers, water impoundments and dry bare soils. It was then not necessary to apply any mask on ASTER imagery, for preserving the captured spatial variability. From a differencing viewpoint, this implicitly assumes that roughness lengths, and therefore aerodynamic resistance, were identical for all vegetation canopies within the watershed. Although it was obviously far from reality, the resulting errors was expected to be low. Indeed, previous studies showed S-SEBI performed well when applied, at different spatial resolutions, over various agrosystems that included patchworks of vegetation canopies (Boronina and Ramillien, 2008; Gomez et al., 2005; Roerink et al., 2000; Sobrino et al., 2007, 2005; Verstraeten et al., 2005).

### WDI implementation

The Water Deficit Index (WDI) is a physically based index devoted to characterizing land surface hydric status Moran et al. (1994). Similarly to S-SEBI, deriving daily ET from WDI along with optical remote sensing imagery is twofold. WDI, which is directly linked to the ratio of actual to maximum ET (both are complementary to unit), is first computed from the differences between pixel temperature and extrema temperatures for a given value of fractional vegetation cover characterized through SAVI (Fig. 5.2) :

$$WDI = 1 - \frac{ET}{ET_m} = \frac{BA}{CA} \quad (5.7)$$

where  $ET$  and  $ET_m$  are actual and maximum evapotranspiration, respectively. The trapezoid displayed in Fig. 5.2 characterizes the possible extremes (in that sense they do not systematically occur) in terms of vegetation cover and water status. Segment 1–3 represents wet edge with well watered situations for bare soils and full canopies (WDI=0), segment 2–4 represents dry edge with complete absence of water for bare soils and full canopies (WDI=1). segment 1–2 represents full canopies for wet and dry conditions, and segment 3–4 represents bare soils for wet and dry conditions.

Conversely to S-SEBI, WDI characterizes maximum and minimum temperatures by inverting sensible heat flux, rather than from extrema captured within ASTER imagery.

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

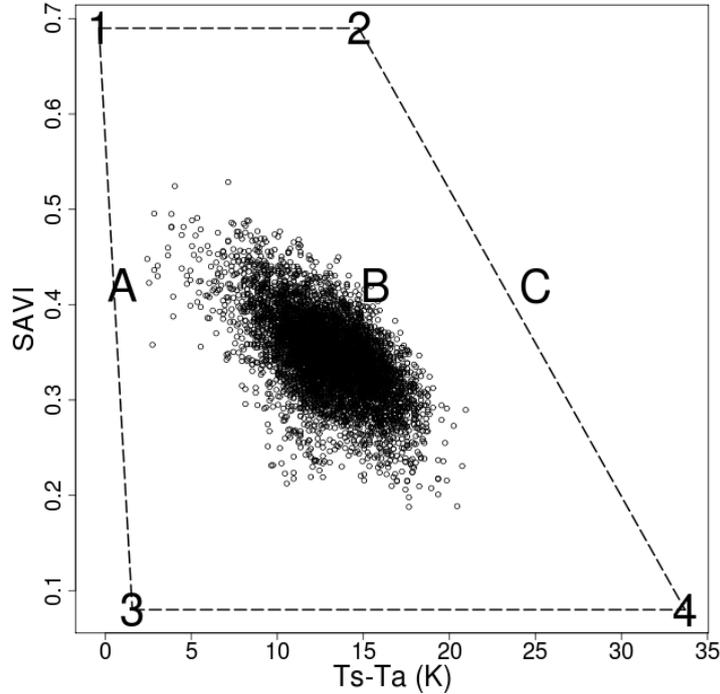


FIG. 5.2: Typical example of the scatterplots obtained for the SAVI (y-abscissa) versus  $T_s - T_a$  (x-abscissa) diagram used to compute WDI. Numbers are vertex that determine theoretical extremes (in dotted lines) A, B and C correspond to possible hydric status situations for a vineyard with 50% cover, where A is for fully wet condition, C is for complete dry condition and B is an intermediate situation that represent the pixel position. Such a scatterplot is obtained for an ASTER scene collected on a given day.

This requires beforehand estimating the four vertex that delineate the temperature - fraction cover space (Fig 5.2), which relies on sensible heat flux formulation in forward mode :

$$(T_s - T_a) = r_a \frac{(R_n - G_0)}{C_v} \frac{\gamma(1 + r_c/r_a)}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (5.8)$$

where  $r_a$  is aerodynamic resistance ( $\text{s.m}^{-1}$ ),  $R_n$  is net radiation ( $\text{W.m}^{-2}$ ),  $G_0$  is soil heat flux ( $\text{W.m}^{-2}$ ),  $C_v$  is volumetric heat capacity ( $\text{J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-3}$ ),  $r_c$  is canopy resistance ( $\text{s.m}^{-1}$ ) to vapor transport,  $\gamma$  is psychrometric constant ( $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\Delta$  is the slope of the saturated vapor pressure–temperature relation ( $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), and  $VPD$  is air vapor

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

---

pressure deficit (Pa). Then, the four vertex are determined by changing the resistances terms ( $r_c$  and  $r_a$ ) in Eq. 5.8.

In a second time, obtained values of instantaneous ET (Eq. 5.7) were next extrapolated at the daily scale. Assuming WDI is constant during daytime, similarly to  $\Lambda$  (§ 5.2.2.4), daily ET was computed by using Eq. 5.7 along with estimates of reference transpiration  $ET_0$  at the daily scale. Considering  $ET_0$  rather than  $ET_m$  was within the confidence interval reported by [Trambouze and Voltz \(2001\)](#) who suggested a 10% larger value for reference transpiration as compared to maximum transpiration.

The first step when implementing WDI over ASTER imagery was estimating maximum and minimum values for fractional vegetation cover. Since SAVI values for vineyard full covers and bare soils were unknown, we used the maximum and minimum values observed within the watershed and throughout the experiment that spanned two growth cycles.

The second step when implementing WDI over ASTER imagery was setting vineyard canopy resistance values for the four vertex.

- Vertex 1 : full-cover, well-watered vegetation, where  $r_c = r_{cp}$  is the canopy resistance at reference evapotranspiration, set at  $25 \text{ s.m}^{-1}$  for vineyard ([Ortega-Farias et al., 2007](#)).
- Vertex 2 : full-cover vegetation with no available water ( $\lambda_E = 0$ ), where  $r_c = r_{cx}$  is the canopy resistance associated with nearly complete stomatal closure, for vineyard assumed to be  $2000 \text{ s.m}^{-1}$  ([Giordani et al., 1996](#)).
- Vertex 3 : saturated bare soil, where  $r_c = 0$ , and
- Vertex 4 : dry bare soil, where  $r_c = \infty$  (equivalent to complete stomatal closure).

It was also necessary determining net radiation  $R_n$  and soil heat flux  $G_0$  for each of the vertex, whereas no information was available since these situations were theoretical and not observed within the watershed (Fig 5.2). We therefore averaged  $R_n$  and  $G_0$  values by selecting pixels that belongs to the four pairs of extreme quintiles for both SAVI and  $T_s - T_a$  values.

Finally, each of the four vertex also required estimating aerodynamic resistances  $r_a$ . For this, we used the reference formulation from [Thom \(1975\)](#) :

$$r_a = \frac{1}{k^2 U} \left[ \ln \left( \frac{Z-d}{z_{0m}} \right) - \psi_m \right] \left[ \ln \left( \frac{Z-d}{z_{0h}} \right) - \psi_h \right] \quad (5.9)$$

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

where  $k$  is the von Karman constant,  $U$  is wind speed ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $Z$  is reference height (m),  $d$  is displacement height (m),  $z_{om}$  and  $z_{oh}$  are roughness lengths for momentum and heat respectively (m), and  $\psi_h$  and  $\psi_m$  are the stability correction functions for heat and momentum, respectively. Following [Sene \(1994\)](#), roughness length for momentum was set to 3% of maximum canopy height. The  $z_{om}/z_{oh}$  ratio was set to 100, as recommended by [Giordani et al. \(1996\)](#). The  $KB^{-1}$  factor was then close to five, which was greater than the value of two proposed for a full vegetation cover ([Garrack and Hicks, 1973](#)) and lower than the value of eight obtained by [Verhoef et al. \(1996\)](#) for a vineyard site. Finally, measurements collected at the meteorological station (§ 4.2.2.2) and interpolated at the time of ASTER overpass were used to determine volumetric heat capacity, psychrometric constant, the slope of the saturated vapor pressure–temperature relation, air temperature, pressure and vapor pressure deficit.

Conversely to S-SEBI, which has been widely used by considering all land surfaces within the study area, [Moran et al. \(1994\)](#) recommended using WDI for a unique biome, accordingly to further studies ([Holifield et al., 2003](#); [Li and Lyons, 1999](#); [Luquet et al., 2003](#); [Vidal and Devaux-Ros, 1995](#); [Wang and Takahashi, 1999](#)). In this way, it was assumed that roughness length and aerodynamic resistance were identical for all vegetation canopies within the watershed, but this assumption was more restricted as compared to S-SEBI, since a unique biome (i.e. vineyard) was selected. Vineyards within ASTER imagery were selected by using a mask, where the later was derived from land registration information along with orthophotos.

### 5.2.3 Assessment and validation strategy

We first controlled the consistency of HYDRUS-1D simulations, by quantifying calibration residual error, and by comparing simulated daily ET against direct EC measurements. Next, we validated S-SEBI and WDI retrievals against ground truthing, over the seven validation sites within the Payne watershed. Third, we compared S-SEBI and WDI retrievals at the extent of the whole watershed.

When comparing HYDRUS simulated daily ET against EC estimates over site 6, we spatially averaged the nine HYDRUS-1D simulations that corresponded to the locations of NP measurements within the footprint of EC measurements. For site 7, one HYDRUS-1D simulation only was involved, corresponding to one location of NP measurements within the footprint of EC measurements.

## **5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed**

---

When validating ASTER / S-SEBI and ASTER / WDI retrievals against HYDRUS-1D simulations of daily ET, we differentiated years and sites in relation with soil type, watertable conditions and canopy structure. For comparison over sites with two locations of NP measurements (site 3 and 5), we spatially averaged the two resulting HYDRUS-1D simulations. For comparison over site 6, HYDRUS-1D simulations were spatially averaged for each sub-site 6N and 6S (§ 4.2.2.1 and Tab. 4.1). From an ASTER viewpoint, we carefully extracted each pixel matching a site or sub-site. Finally, we note intercomparing S-SEBI and WDI was performed for vineyards only, since WDI did not provide any estimate due to the masking of other biomes.

### **5.2.4 Results**

In the following section, the HYDRUS-1D model demonstrated an important consistency for simulated daily ET related to satisfactory calibration results that involved various hydrodynamic conditions, and satisfactory results of the comparison against independent EC data. This made possible using the latter as ground based reference for validating remotely sensed retrievals. Results of models validation were based on this ground based references as presented below. Finally the consideration of these two spatialized approaches allows intercomparing their potential and limitations, in terms of feasibility and accuracy.

#### **5.2.4.1 HYDRUS-1D assessment and control**

In average over all dates and locations of NP measurements, Root Mean Square Error (RMSE) between measured and simulated water content decreased along with soil moisture profile from upper to lower boundaries, between 0.06 and 0.03  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  (30 and 10% in relative), with largest values around 1 m depth. RMSE between measurements and simulations, calculated for each soil moisture profile, varied from one date and one location to another, between 0 and 0.15  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  (0% and 60% in relative). Lowest and largest RMSE values were observed within site 4 and site 1, respectively. For a given location, RMSE between measurements and simulations decreased with simulation time. When focusing on temporal variations of soil water storage at noon obtained by integrating soil moisture profile, relative RMSE (i.e. ratio of absolute RMSE to observation mean value) between simulations and measurements was around 10%.

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

RMSE between HYDRUS-1D estimates and EC measurements of daily ET was  $0.4 \text{ mm.d}^{-1}$  (18% in relative) for site 7, where hydric stress resulted from a deep watertable and a clay soil (figure not shown). For site 6, with an intermediate hydric status related to a shallow watertable and silty / clay loam soils, RMSE was  $0.57 \text{ mm.d}^{-1}$  (33% in relative). The merging of statistics for each of the two sites yielded an RMSE of about  $0.56 \text{ mm.d}^{-1}$  (32% in relative). Over both sites, HYDRUS-1D simulations overestimated EC estimates for large ET values after significant rainfall. Absolute RMSE was stable along the simulations, resulting in larger relative RMSE between August and December 2007, as compared to the [January - October] 2008 period. Similar results were obtained with a dataset restricted to vineyard growing seasons (Fig. 5.3a) or to ASTER overpass days (Fig. 5.3b), with RMSE of  $0.62 \text{ mm.d}^{-1}$  (29% in relative) and  $0.49 \text{ mm.d}^{-1}$  (22% in relative), respectively.

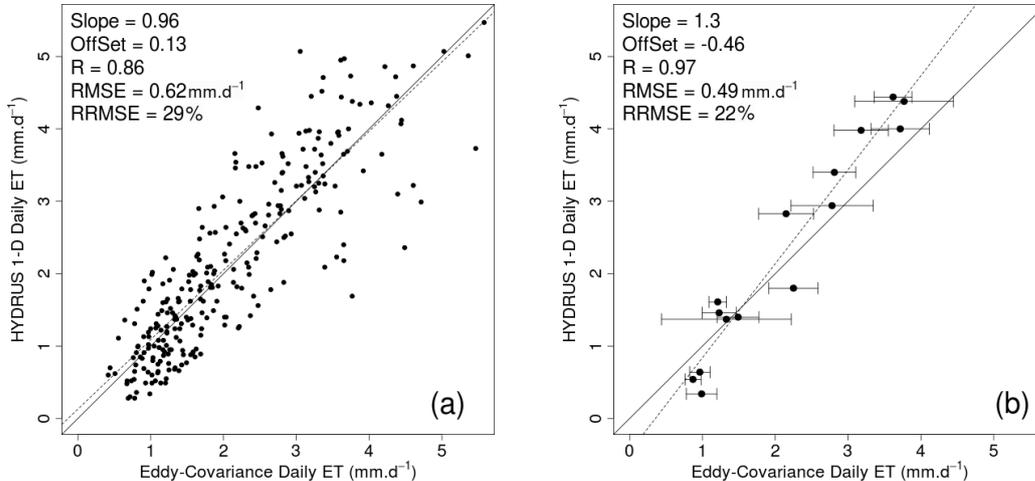


FIG. 5.3: Comparison of ET HYDRUS-1D estimates against Eddy-Covariance measurements for sites 6 and 7 when selecting (a) the vineyard growing seasons (1 Aug 2007 to 15 Oct 2007 and 8 Mar 2008 to 15 Oct 2008) and (b) ASTER overpasses only. R is correlation coefficient, Slope and Offset results from linear regression between X and Y axis data (dotted line). Continuous line is the 1 :1 line. Error bars indicate the tolerance intervals provided by the ECPACK version 2.5.20 library along with ET calculations.

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

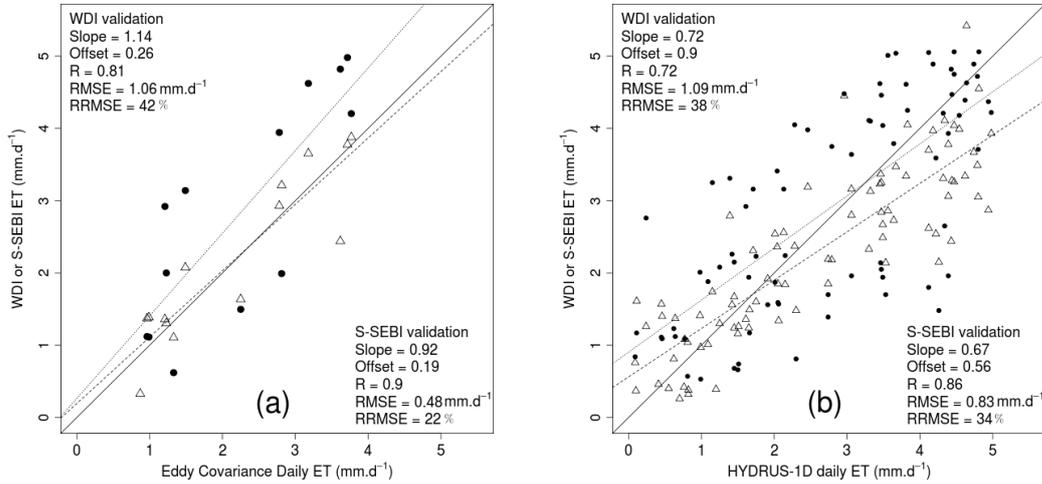


FIG. 5.4: Comparison of ASTER / S-SEBI (triangles) and ASTER / WDI (points) daily ET estimates against those derived from (a) Eddy-Covariences estimations within site 6 and 7, and (b) HYDRUS-1D simulations over the seven validation sites. R is correlation coefficient. Slope and Offset result from linear regression between X and Y axis data (dotted line). Continuous line is the 1 :1 line.

### 5.2.4.2 Remote sensing validations

A first step focused on net radiation which is a key variable in S-SEBI and WDI calculation (§ 5.2.2.4). Validation of ASTER retrievals against *in-situ* data collected within site 6 (§ 5.2.2.2) provided a RMSE of 45 W.m<sup>-2</sup>, which may be explained by differences between soil and vegetation portions within footprints of Campbell NR-lite and ASTER pixels (66% and 40%). A second step aimed to quantify standard deviation of daily ET within 3×3 pixel windows centered on validation sites. The result, about 0.4 mm.d<sup>-1</sup>, indicated the spatial variability at the ASTER spatial resolution in the neighborhood of validation sites had no significant influence on the validation exercise.

ET accuracies obtained with S-SEBI and WDI were similar, although slightly better results were observed with S-SEBI validation based on EC measurements. Direct validations performed with EC measurements over sites 6 and 7 were satisfactory for the S-SEBI ET retrievals, with a RMSE of 0.48 mm.d<sup>-1</sup> and 90% correlation displayed in Figure 5.4 (a), and acceptable for WDI with an RMSE of 1.06 mm.d<sup>-1</sup> and 81% correlation. When using HYDRUS-1D references, HYDRUS-1D daily ET simulation

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

used as validation for the seven selected sites produced similar results with an RMSE of  $0.83 \text{ mm.d}^{-1}$  and a 86% correlation for S-SEBI, and a RMSE of  $1.09 \text{ mm.d}^{-1}$  and 72% correlation for WDI. The scatter for WDI validations displayed in figure 5.4 (b) was more important than for S-SEBI validation. More unsystematic errors for WDI were therefore suspected.

Table 5.2 summarized statistical indicators for both models on a site basis. When analyzing S-SEBI validation results, correlations ranged from 84 to 95%, and ARMSE from  $0.54$  to  $1.3 \text{ mm.d}^{-1}$ . WDI validation results were similar, although slightly less accurate with correlations ranging from 66% to 81% and ARMSE ranging from  $0.83$  to  $1.24 \text{ mm.d}^{-1}$ . Indeed, ET was systematically better estimated by S-SEBI model for all sites except for Site 7. Additionally, statistical indicators for ET-error obtained with WDI, were more similar between sites.

Model → Site	S-SEBI					WDI				
	Slope	Offset ( $\text{mm.d}^{-1}$ )	$R$	ARMSE ( $\text{mm.d}^{-1}$ )	RRMSE (%)	Slope	Offset ( $\text{mm.d}^{-1}$ )	$R$	ARMSE ( $\text{mm.d}^{-1}$ )	RRMSE (%)
1	0.54	0.85	0.87	0.99	40	0.66	0.77	0.76	1.05	37
2	0.73	0.38	0.91	0.54	26	0.84	0.89	0.66	1.18	45
3	0.77	0.51	0.95	0.59	28	0.65	1.3	0.77	1.24	50
4	0.94	0	0.84	0.64	23	1.54	1.82	0.68	1.13	36
5	0.62	0.41	0.93	0.98	37	0.73	0.69	0.66	1.09	34
6 N	0.65	0.58	0.88	0.66	29	0.91	0.39	0.81	0.83	31
6 S	0.8	0.77	0.93	0.69	25	0.69	0.91	0.75	1.1	38
7	0.45	0.62	0.91	1.3	56	0.65	1.16	0.77	0.97	32

TAB. 5.2: Summary of statistical indicators when comparing spaceborne values from S-SEBI and WDI algorithms against ET ground based by site : absolute and Relative RMSE, Slope and Offset from linear regression between ASTER based predictions and HYDRUS-1D simulations, correlation coefficient.

When analyzing the temporal dynamics of simulated ET-derived sources (Eddy-Covariance, HYDRUS-1D, S-SEBI and WDI) during the experimental period, an important ET temporal dynamic was observed for all sites with values ranging from 0 to  $6.5 \text{ mm.d}^{-1}$  for winter and spring periods respectively. Figure 5.5 displayed the daily ET temporal dynamics performed over two contrasted sites in terms of ET behavior and soil moisture conditions. site 1 correspond to a shallow soil, with sandy-silty textures, and absence of water-table that generate restrictive hydric conditions for vine. Site 4

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

---

correspond to a deep soil with silty clay textures, and a permanent water table providing a permanent water supply for rooting system § 5.1). The comparison between the two sites shows different behaviors in ET distributions. As expected, the averaged value over the chronicle was more important within site 4 ( $2.87 \text{ mm.d}^{-1}$ ) than within site 1 ( $2.07 \text{ mm.d}^{-1}$ ), whereas daily ET chronicle was more stable over site 4 ( $1.09 \text{ mm.d}^{-1}$  of standard deviation) than over site 1 ( $1.45 \text{ mm.d}^{-1}$  of standard deviation). The first specific period spanned over the [August - October] period, where the difference between reference and actual evapotranspiration was larger for site 1 (daily ET values between 0 and  $2 \text{ mm.d}^{-1}$ ) than for site 4 (daily ET values between 2 and  $4 \text{ mm.d}^{-1}$ ). On the other hand, the opposite was observed for the second specific period that spanned over the [May - July] period, with ET values ranging between 4 and  $6 \text{ mm.d}^{-1}$  over site 1 as compared to values ranging between 2 and  $4 \text{ mm.d}^{-1}$  over site 4.

Concerning remote sensing ET estimations, results were consistent with HYDRUS-1D simulations with better ET validation results for S-SEBI than WDI for both described sites. We can observe however, that differences in temporal ET estimation were obtained between the models. S-SEBI normally produced best ET estimation except for DOY 197, 206 and 213, where the model underestimate ET for both sites (and for all the others). Results seems to indicate that S-SEBI provided poorer performances during this period when hydric status conditions within the watershed were more uniform. In these cases, the watershed did not present enough hydric variability. Thus, ASTER scenes were not able to capture the required hydric variability especially because of a lack of non-evaporating areas.

Another observation displayed in figure 5.5 concerns the impossibility of WDI to produce ET simulation when vine canopy is absent. For ASTER dates DOY 306 and DOY 39 (archive), WDI simulations produced negative values.

We finally analyzed the spatial vineyard ET distribution patterns from the S-SEBI and WDI simulations. Results were displayed in figure 5.6, in which the median ET values was calculated from ASTER scenes corresponding to fully vegetated period including archives files (DOY 227 in 2005, DOY 191 in 2006, DOY 194, 226, 256 in 2007 and DOY 190, 197, 206, 213, 245, 270, 277 in 2008). The same patterns were retrieved with both models, however the S-SEBI median ET map depicted a more important ET dynamic related to the more extended captured area that contains more variability of hydric situations.

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

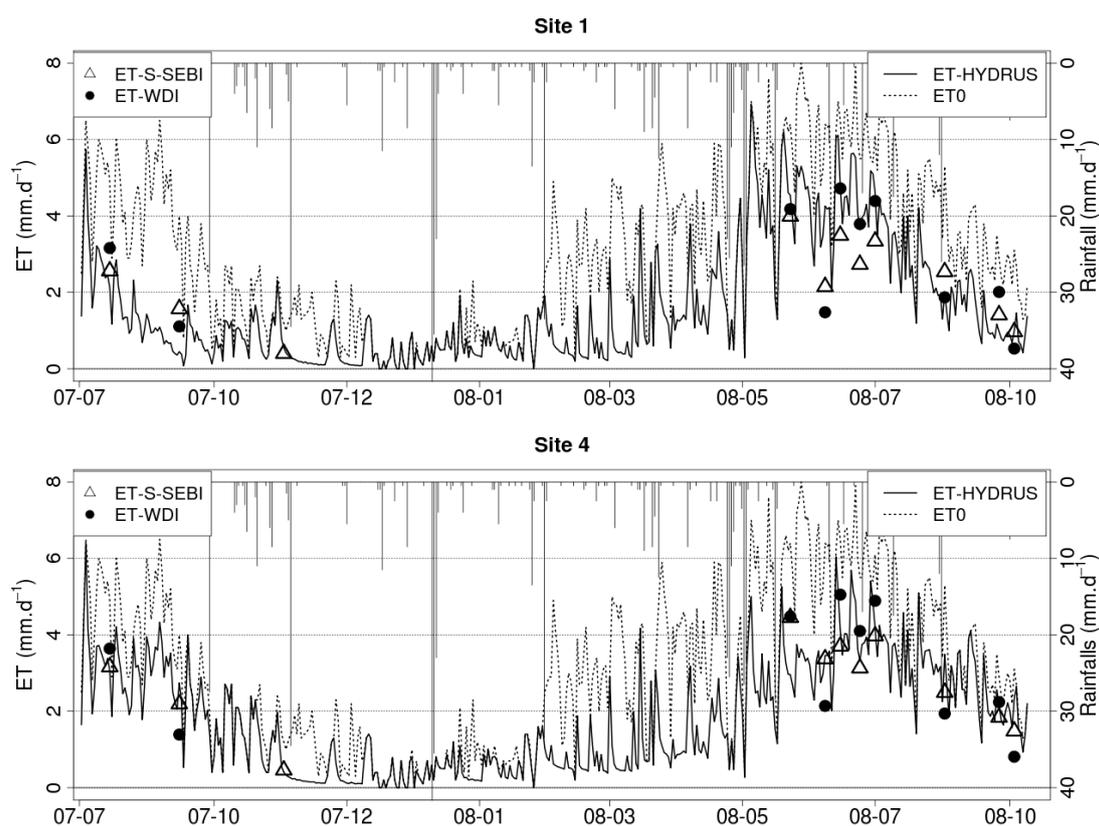


FIG. 5.5: Daily rainfall distribution and daily simulated ET-derived from HYDRUS-1D, and remote sensing models (S-SEBI, WDI) within sites 1 and 4 over 2007-2008 vineyard growing seasons (DOY 213 to DOY 288 for 2007 and DOY 68 to DOY 289 for 2008). Continuous lines represents HYDRUS-1D ET derived and dotted lines represents Penman-Monteith reference (ET<sub>0</sub>).

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

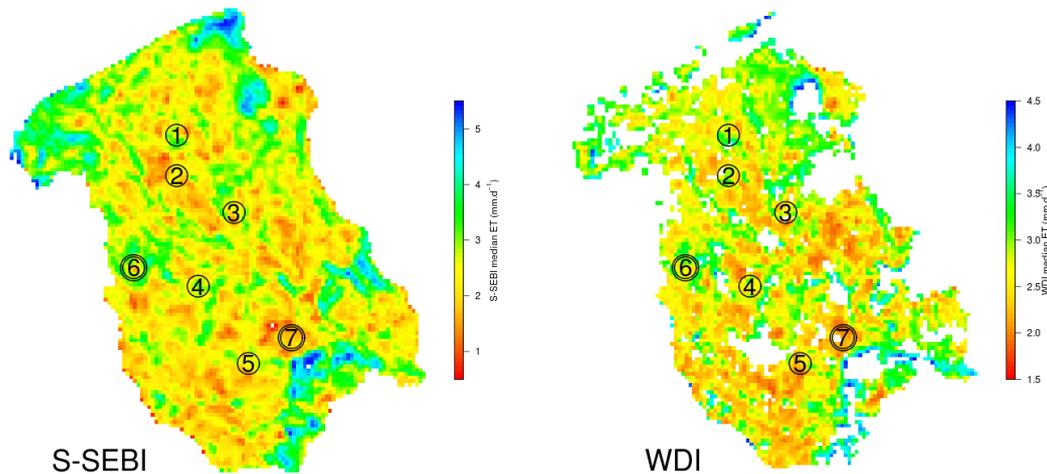


FIG. 5.6: S-SEBI and WDI median ET maps for all ASTER scenes covering full canopy vineyard periods (including archives). Validation sites are labeled 1 to 7, and double circles correspond to sites with EC measurements.

### 5.2.4.3 S-SEBI/WDI intercomparison

Intercomparison between S-SEBI and WDI models demonstrated the performances similarities obtained when individual validation exercised were considered. Comparison between models displayed in figure 5.7 clearly illustrate the relation of the models. An  $1.1 \text{ m.d}^{-1}$  RMSE which represents a 39% in relative error was obtained when comparing the models over all ASTER scenes. Additionally, a correlation of 72% was obtained between models with a slope of 0.95. Otherwise, the median value for all pixels and all dates (including archives files) for WDI ET estimation was  $3.44 \text{ mm.d}^{-1}$  with a coefficient of variation 34%, which was larger than  $2.64 \text{ mm.d}^{-1}$  and 41% of coefficient of variation, obtained with S-SEBI model. Figure 5.7 displayed the comparison of all the daily ET estimated with both models. In this figure, we found also, differences similar to validation results. Three main results groups are displayed in figure 5.7. Group 1 corresponded to high ET values, and contains the spring and early summer dates. In this case, WDI strongly overestimated S-SEBI estimates for low ET values. Group 2 corresponded to an intermediary situation where medium ET values were included corresponding to early spring and middle summer dates. In this situation, WDI slightly

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

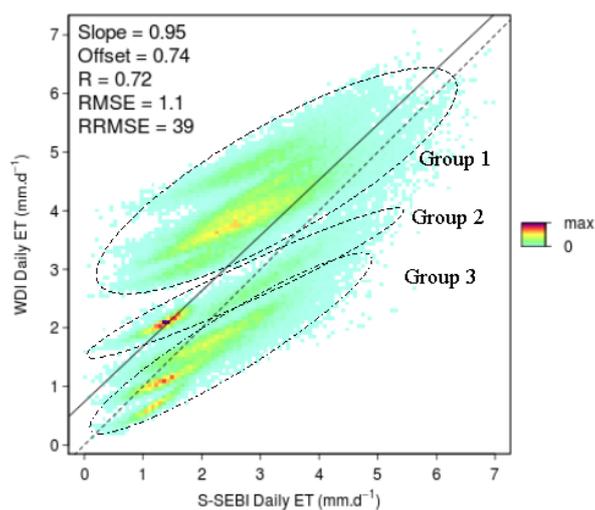


FIG. 5.7: Intercomparison, between daily S-SEBI and WDI ET estimates. Dashed line is the 1 :1 line. R is correlation coefficient, Slope and Offset results from linear regression between X and Y axis data (continuous line).

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

---

overestimated S-SEBI estimates for low ET values. Group 3, was a group representing the lower ET values registered and corresponding to the end of summer dates. The better correlations between models were produced for these scenes, but with a slightly underestimation of high ET values for WDI estimates.

The absolute difference between the mean S-SEBI daily ET map minus the mean WDI daily ET map displayed in figure 5.8 illustrate that spatial pattern results slightly differs between models with maximal mean differences around  $1.4 \text{ mm.d}^{-1}$  observed in particular areas. Figure 5.6, allow to confirm that areas with low ET values have the highest differences between models. Indeed, WDI computed higher ET values than S-SEBI. This results do not signify that WDI ET estimations are poorer than S-SEBI during these period, as discussed before, S-SEBI probably presents parameterization problems, fact confirmed with the more important RMSE obtained for S-SEBI within the references sites for early summer dates (DOY 197, 206 and 213).

Another observation concerns WDI temporal variability. WDI produced closed to 50% of temporal variability evaluated with a coefficient of variation map over fully vegetation period (mid-June to mid-October) while S-SEBI produced 10% less. The spatial structures of this variability was however preserved between models as displayed in figure 5.6 which confirms spatial structures discriminated by median ET within the Payne watershed.

### 5.2.5 Discussion

When comparing HYDRUS simulations of soil moisture profiles against NP measurements, the RMSE lowering was ascribed to a larger temporal stability for deep soil moisture, whereas the largest RMSE values around 1 m depth were imputed to temporal variations of soil moisture in relation with root water uptake. Further, the diminution of RMSE with simulation time was explained by stabilization of numerical computations as simulation time increased, whereas no evident link could be underlined between RMSE values on a site basis and watertable conditions or soil type. Finally, the obtaining of a 10% relative accuracy on simulated temporal dynamics of soil water storage at noon was considered as acceptable, given i) the large suite of conditions in soil type and watertable, and ii) the errors on NP data, about 15% in relative (§ 5.2.2.2).

When comparing HYDRUS-1D estimates of daily ET against EC based retrievals, the larger discrepancy observed for site 6 was ascribed to a larger amount of data

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

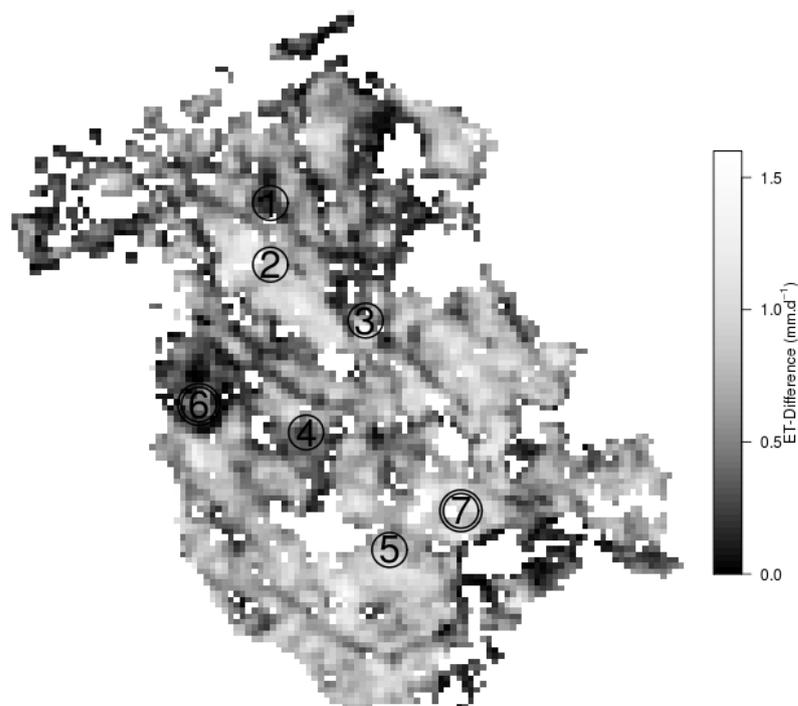


FIG. 5.8: Map of absolute differences between mean S-SEBI ET daily maps and mean WDI ET daily maps in  $\text{mm.d}^{-1}$  for fully developed canopy period. Validation sites are labeled 1 to 7, and double circles correspond to sites with EC measurements.

(nine NP measurements locations versus one for site 7). The obtained accuracy, around  $0.6 \text{ mm.d}^{-1}$ , was close to that wanted for further applications, of about  $0.8 \text{ mm.d}^{-1}$  (Kalma et al., 2008; Seguin et al., 1999). Further, these results were obtained by comparing two independent estimation methods, based either on near surface turbulent fluxes or on vadose-zone water transfers. As compared to outcomes reported in the literature for summer periods only (Bsaiibes, 2007; Trambouze et al., 1998), with RMSE values ranging from  $0.37$  to  $0.61 \text{ mm.d}^{-1}$ , the current study enlarged the assessment of HYDRUS capabilities, with similar RMSE values for a continuous period that spanned almost two vineyard growing seasons. Finally, the slightly lower RMSE value we obtained when restricting the dataset to ASTER overpass days ( $0.5 \text{ mm.d}^{-1}$ ) was ascribed

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

---

to meteorological conditions that were favorable with clear sky days. This emphasized the pertinence of HYDRUS simulations for being used as ground truthing.

The two specific periods we observed when analyzing the temporal dynamics of HYDRUS-1D simulations required foreseeing a larger panel of possible factors that drove vineyard ET. Indeed larger values of daily ET were observed during the [May - July] period over a validation site with supposedly restrictive hydric conditions (site 1), as compared to another validation site with permanent watertable (site 4). This case suggested additionally considering physiological factors, in relation with vine adaptation to pedo-climatic conditions, since the grape variety established within site 1 (Syrah) was premature as compared to that established on site 4 (Cabernet Sauvignon).

The  $45 \text{ W.m}^{-2}$  RMSE value obtained when validating ASTER retrievals of net radiation against ground based measurements was lower than those usually reported in the literature (French et al., 2005; Gomez et al., 2005; Jacob et al., 2002a; Timmermans et al., 2007). This was ascribed to the differences between soil and vegetation portions within footprints of Campbell NR-lite and ASTER pixels (66% versus 40%). Further, the  $0.4 \text{ mm.d}^{-1}$  value obtained for daily ET standard deviation within  $3 \times 3$  pixel windows centered on validation sites was lower than accuracy on ground based estimates (around  $0.6 \text{ mm.d}^{-1}$ ). This indicated the spatial variability at the ASTER spatial resolution in the neighborhood of validation sites had no significant influence on the validation exercise.

Validation exercises for ASTER / S-SEBI and ASTER / WDI over the seven validation sites indicated similar performances for the two models, as well as performances similar to those reported in the literature for S-SEBI (no validation exercise was found for WDI retrievals of daily ET), with accuracies ranging between 1 and  $1.5 \text{ mm.d}^{-1}$  for finer ( $\sim 20 \text{ m}$ ) and coarser ( $\sim 1 \text{ km}$ ) spatial resolutions (Boronina and Ramillien, 2008; Gomez et al., 2005; Roerink et al., 2000; Sobrino et al., 2007, 2005; Verstraeten et al., 2005). Further, performances were better, by 30% in relative, for S-SEBI as compared to WDI, in spite of more determinism for the latter. Indeed, S-SEBI determines evaporative extremes from variabilities captured within thermal infrared imagery (concept of contextual model suggested by Kalma et al. (2008)), whereas WDI deterministically determines these extremes through the inversion of sensible heat flux along with meteorological data. Then, poor performances for WDI may be explained by the inclusion of significant errors into flux calculations, when considering the watershed

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

extent while using unique values for meteorological forcing. This may also explain why S-SEBI appeared more robust than WDI, where unsystematic error was significantly lower regardless of validation exercise (i.e. based on EC measurements or on HYDRUS simulations), as indicated by Fig.5.4. Overall, the obtaining of better performances with the more empirical model was in agreement with conclusions from Kalma et al. (2008) who reported deterministic and analytical methods are not necessarily more accurate than statistical or empirical methods.

When analyzing validation results on a site basis, we observed correlations between model performances, in relation with row orientation, which suggested the latter drove the accuracy of remotely sensed retrievals. The influence could be radiative, with illumination and shadow effects on ASTER data, according to sun position and row orientation. It could also be aerodynamic, with the coupling between wind direction and row orientation that affects vineyard ET (Heilman et al., 1996). This aerodynamic issue might be sharpened by strong wind speed that often occurred within the Payne watershed. These outcomes suggested future investigations should account for row orientation, where the latter can be retrieved from aerial images along with automated frequency analysis (Deleenne et al., 2008).

From a temporal viewpoint, we noted S-SEBI performed worse, as compared to WDI, for specific dates during early summer. A possible explanation is the failure of the assumption on which rely contextual models (and therefore S-SEBI), that states the variability captured within the thermal infrared imagery is large enough for properly characterizing the hydric status over the whole study area. In our case, this failure may be ascribed to a lack of dry conditions within the watershed, because of water storage filling after spring rainfall. This was in agreement with conclusions from Vidal and Devaux-Ros (1995) who addressed the performances of the triangle method (a contextual model) when used along with Landsat data on early summer.

Intercomparison of ASTER / S-SEBI and ASTER / WDI retrievals at the watershed extent provided results similar to those obtained when intercomparing over the validation sites or when validating against ground based estimates. This *a posteriori* confirmed the choice of the validation sites for capturing the variability within the watershed. Overall, obtained differences between models are within the range of accuracies reported in the literature, between 1 and 1.5 mm.d<sup>-1</sup> (Boronina and Ramillien, 2008; Gomez et al., 2005; Roerink et al., 2000; Sobrino et al., 2007, 2005; Verstraeten et al.,

## 5.2 Résultats soumis (Remote Sensing of Environment) Validating and intercomparing two simplified models for inferring daily evapotranspiration from ASTER over a Mediterranean vineyard watershed

---

2005), and close to the  $0.8 \text{ mm.d}^{-1}$  accuracy regularly quoted in literature as a requirement for many applications (Kalma et al., 2008; Seguin et al., 1999). On the other hand, intercomparison at the watershed extent emphasized three groups of scatterplots that correspond to different periods of the year, and therefore to different magnitudes in terms of ET and fractional vegetation cover. Further investigations are necessary for deepening these differences, which result either from the ways the models characterized the evaporative extremes or from the characterization of spatial variability through fraction cover or albedo (Merlin et al., 2010).

Finally, averaging maps of daily ET over the growing seasons underlined the existence of spatial patterns at the watershed extent. Given we focus on perennial plants, these spatial structures may result from pedological conditions. Ongoing investigations address a possible link between these spatial patterns and soil types.

### 5.2.6 Conclusion

The objective of this study was to compare the performances of two differencing methods (S-SEBI and WDI) for the retrieval of daily ET over a Mediterranean vineyard watershed. The models were implemented over ASTER imageries that spans almost two growth cycles and were validated against eddy covariance ET measurements for two contrasted sites and against HYDRUS-1D ET retrievals over seven sites that contains an important ET dynamics related to soil and water-table condition. First of all, HYDRUS-1D ET estimates were controlled using eddy covariance data over two contrasted sites, with satisfactory results as a quadratic error of  $0.6 \text{ mm.d}^{-1}$  between both methods was found. Next, obtained accuracies from S-SEBI and WDI were about  $0.8 \text{ mm.d}^{-1}$  and  $1.1 \text{ mm.d}^{-1}$  respectively, which is regularly quoted as a requirement for further applications (Kalma et al., 2008; Seguin et al., 1999). Results demonstrated that the more empirical approach (S-SEBI) produced better results than the physically based method (WDI) which is in agreement with recent studies (Kalma et al., 2008). Analysis suggested partial influences of row orientation for both models. Intercomparison of ET models retrievals at the watershed extent or when considering only the validation sites provided similar results with an RMSE close to  $1 \text{ mm.d}^{-1}$  which is closed to validation results with ground based estimates. Even though similar results were found when intercomparing models ET estimates, spatio-temporal differences were detected between models. Finally we underlined the existence of spatial patterns at the

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

watershed extent probably explain mainly by pedological conditions. Future works will focus on the one hand on the determination of model sensibilities to inputs variability with the aim to improve models accuracies, and on the other hand on the relationship between these spatial patterns and pedological information.

### 5.3 Résultats et analyses complémentaires

Le principal objectif de ce chapitre consistait à analyser les performances du modèle WDI et de les comparer avec le modèle S-SEBI dans le but d'évaluer les estimations de l'ETR journalière spatialisée. La considération des ces deux approches, une complètement dépendante de l'information de télédétection (S-SEBI) et l'autre à base plus physique (WDI), à permis de réaliser une intercomparaison de ces avantages et limitations. Au vu des résultats acceptables obtenus préalablement sur un milieu complexe par un modèle simple (S-SEBI), nous nous interrogeons sur la pertinence d'introduire un algorithme à base plus physique (le WDI) dans le but d'améliorer les performances obtenues. En effet, WDI considère un certain nombre d'inputs d'ordre météorologiques et biophysiques propres à l'objet d'étude (le vignoble). Ceux-ci permettent d'accéder à une représentation plus "réelle" du couvert viticole en tenant en compte par exemple des résistances aérodynamiques. Malgré ces considérations, les résultats présentés indiquent que WDI a été moins performant que S-SEBI sur notre contexte viticole. En quête, d'explication à ces résultats, nous avons réalisés des analyses de sensibilité sur les modèles afin d'évaluer quels paramètres sont les plus influent dans la sensibilité des modèles.

Les résultats issus de cette étude sont présentés dans cette deuxième partie. Dans un premier temps, nous présentons l'analyse de sensibilité de WDI, dans laquelle, nous analysons d'abord la variabilité des inputs intervenant dans le calcul des vertex du WDI, ensuite sont présentées les résultats de cette analyse. Additionnellement, nous avons étudié la cohérence du calcul des résistances aérodynamiques, qui s'est avérée une variable clé du modèle WDI. Dans un second temps, nous présentons les résultats de l'analyse de sensibilité réalisée sur S-SEBI, en particulier sur la détermination des droites extrêmes. Pour se faire, nous avons considéré deux étendues spatiales différentes dans le but de modifier la variabilité capturée affectant directement la détermination

des droites théoriques et nous les avons comparé aux simulations de référence. La comparaison avec un domaine spatial plus étendu sont présentée en premier lieu sous la forme de résultats préliminaires, puis la comparaison avec un domaine spatial plus restreint incluant uniquement le parcellaire viticole est enfin présentée.

### 5.3.1 Analyse de sensibilité sur le WDI

#### 5.3.1.1 Variabilité des inputs

Pour la réalisation de l'analyse de sensibilité sur WDI, nous avons d'abord eu besoin d'identifier les inputs utilisés par le modèle en particulier pour le calcul des vertex représentant les conditions extrêmes. Une fois l'ensemble des inputs connus, nous avons déterminé la gamme de variabilité en fonction de l'input considéré selon différents critères :

- Information bibliographique pour les paramètres physiologiques de type résistance stomatique maximale ( $r_{cx}$ ) et minimale ( $r_{cp}$ ), ainsi que structuraux tel le paramètre  $z_{om}$  pour la végétation, le ratio  $z_{om}/z_{oh}$  ou la hauteur des vignes  $Ht$  (Giordani et al., 1996; Sene, 1994).
- Information bibliographique sur les erreurs des estimations dérivées à partir des données ASTER. Température de surface ( $SRT$ ), réflectance de surface par intermédiaire de l'indicateur  $SAVI$ , rayonnement net ( $R_n$ ) et flux de chaleur dans le sol ( $G_0$ ) sont inclus (Jacob et al., 2002a; Thome et al., 1998).
- Information expérimentale concernant la variabilité spatiale des variables météorologiques à l'intérieur du bassin versant. L'utilisation des mesures d'une deuxième station météorologique située en bordure de bassin a été considérée pour estimer la variabilité spatiale des ces variables. Température de l'air ( $T_a$ ), vitesse du vent ( $U$ ), humidité relative ( $HR$ ) et pression atmosphérique ( $Pa$ ) complètent ainsi le dernier groupe des inputs étudiés.

Dans la publication présentée dans la première partie de ce chapitre, nous avons fait référence à la variabilité intra bassin versant des variables météorologiques. La com-

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

paraison des mesures horaires enregistrées par la station météorologique de Roujan (à l'intérieur du bassin) et celle de Pézenas (en bordure), nous montrent qu'une variabilité non négligeable a été observée entre les deux stations pour les jours de passage ASTER. La comparaison des températures de l'air entre stations, visible sur la figure 5.9, ne présente pas de biais significatif, cependant la dispersion atteinte mesurée par le RMSE a été de 1.5 °C. La vitesse du vent a aussi présenté des variations non-négligeables avec une différence de 0.5 m.s<sup>-1</sup>. Enfin, l'humidité relative a aussi présentée une différence considérable avec plus de 8% de RMSE ce qui représente plus de 12% en relatif. La pression atmosphérique s'est avéré très similaire entre les deux stations.

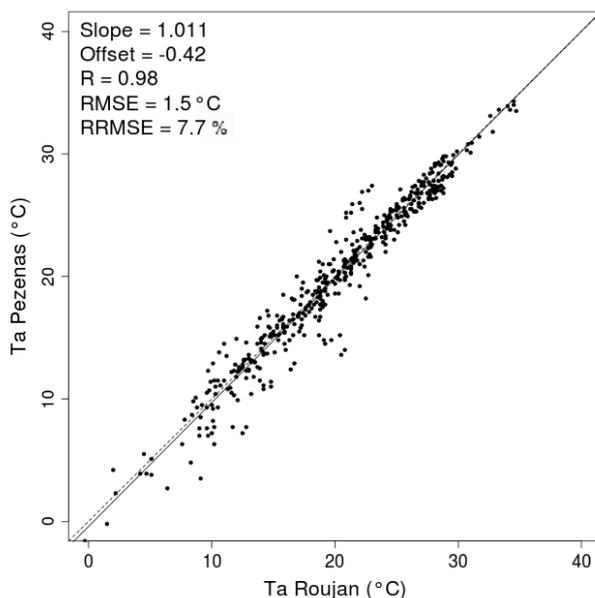


FIG. 5.9: Comparaison de la température de l'air ( $T_a$  en °C) mesurée sur les stations météorologiques de Roujan (intérieur du bassin versant d'étude) et de Pezenas (bordure du bassin versant), à pas horaire, pour les jours de passage ASTER.

### 5.3.1.2 Caractérisation des variables et paramètres d'influence

Pour réaliser l'évaluation du degré d'influence des inputs intervenant dans le calcul de WDI, nous nous sommes focalisés sur les différences obtenues entre les estimations de WDI à partir des données nominales et celles à partir de la modification individuelle de

### 5.3 Résultats et analyses complémentaires

Paramètre	Offset inférieur	Valeur (gamme)	Offset supérieur	Sensibilité
<i>AirPres</i> (Pa)	-3000	100300-101640	+3000	+
$r_{cx}$ (s.m <sup>-1</sup> )	1000	2000	3000	+
$G_0$ (W.m <sup>-2</sup> )	-25	99-165	+25	++
<i>SAVI</i>	-0.1	0.1-0.69	+0.1	++
<i>Ht</i> (m)	1.0	1.5	2	++
<i>HR</i> (%)	-20	27-67	+20	++
$T_a$ (°C)	-1.5	16-33.8	+1.5	++
<i>SRT</i> (°C)	-1.5	14.2-56.3	+1.5	++
$r_{cp}$ (s.m <sup>-1</sup> )	10	25	100	++
$z_{om}/z_{oh}$	1	100	1000	++
$z_{om}$	0.02	0.05	0.195	++
$R_n$ (W.m <sup>-2</sup> )	-50	392-632	+50	++
$U$ (m.s <sup>-1</sup> )	-1	1.1-6.1	+1	+++

TAB. 5.3: Variabilité considérée pour chacun des paramètres intervenant dans le calcul de WDI et résultats de leurs sensibilités, où + représente une sensibilité de < 5%, ++ de > 5 à < 10 % et +++ de > 10%.

l'input étudié. Pour obtenir ces différences, nous avons dans un premier temps calculé le WDI avec les inputs de référence utilisée pour le calcul des vertex comme expliqué dans l'article (§ 5.2.2.4) ce qui constitue le WDI référence. Ensuite, nous avons relancé le calcul de WDI, en modifiant uniquement l'input étudié, entre la gamme des valeurs définies pour celui-ci. La différence entre le WDI référence et le WDI obtenu, nous a permis d'évaluer la sensibilité du modèle sur chacun des inputs considérés. Ainsi, les résultats de l'analyse ont permis d'identifier différents degrés d'influence sur la sensibilité de WDI selon l'input considéré.

Les résultats de cette analyse résumés dans le tableau 5.3, nous montrent un premier groupe d'inputs qui ont montré une influence négligeable sur l'estimation de WDI. Des différences sur le WDI calculé avec la paramétrisation de référence toujours inférieures à 5% ont été retrouvé pour la pression atmosphérique (*AirPres*) et la résistance de canopée maximale ( $r_{cx}$ ). Un deuxième groupe d'inputs intermédiaires ont présenté une influence de 5 à 15% sur le calcul de WDI. Dans se groupe se trouvent la plupart des variables et paramètre du modèle : flux de chaleur dans le sol ( $G_0$ ), la fraction de

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

couverture végétale ( $SAVI$ ), la hauteur du couvert ( $Ht$ ), l'humidité relative ( $HR$ ), la température de l'air ( $T_a$ ), la température de surface ( $SRT$ ), la résistance minimale de la canopée ( $r_{cp}$ ), le ratio  $z_{om}/z_{oh}$  et la rugosité mécanique de la végétation ( $z_{om}$ ). Finalement, la vitesse du vent ( $U$ ) s'est largement montrée comme l'input le plus déterminant dans la paramétrisation de WDI. En effet, la figure 5.10 illustre l'influence de cette variable où l'inclusion d'un offset de  $\pm 1 \text{ m.s}^{-1}$  provoque une différence par rapport au calcul de référence de presque 40%. Ce qui est d'autant plus vrai puisque avec l'inclusion d'un offset de  $\pm 0.5 \text{ m.s}^{-1}$  (différence retrouvée entre les deux stations météorologiques) les différences sont de l'ordre de 20%.

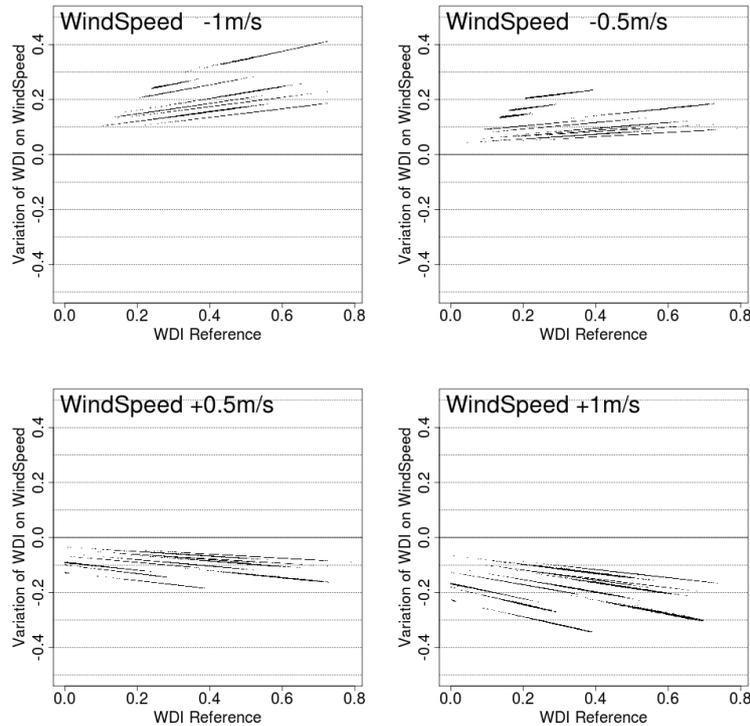


FIG. 5.10: Analyse de sensibilité de WDI sur la vitesse du vent pour toutes les dates ASTER en incluant les archives (à exception de 2003/02/08 et 2007/11/02). L'axe des abscisses représente le WDI estimé avec les paramètres de référence et l'axe des ordonnées la différence entre le WDI de référence et celui calculé avec l'introduction de l'offset. Quatre vitesse de vent (valeurs d'offset) ont été considéré en rapport avec la variabilité spatiale mesuré entre stations météorologiques (à l'intérieur et en bordure du bassin versant) : -1, -0.5, + 0.5, 1  $\text{m.s}^{-1}$ .

---

## 5.3 Résultats et analyses complémentaires

Avant l'analyse, plusieurs inputs étaient suspectés d'avoir une influence importante dans la sensibilité de WDI. Par exemple, dans [Li and Lyons \(1999\)](#) les températures de surface et de l'air ont été considéré comme les variables les plus sensibles dans le calcul de WDI alors que la vitesse du vent n'a pas présenté d'influence significative. Dans notre étude, ces inputs ont montré une faible influence dans la sensibilité du modèle. Une possible explication est que cette étude se base sur des couverts complètement couvrants (maïs et plantation d'eucalyptus) où l'aérodynamisme est complètement différent à celui que l'on trouve dans des conditions viticoles. Dans ces cas, la vitesse du vent jouerait un rôle moins important dans l'estimation des résistances aérodynamiques aux conditions limites (vertex de WDI), ce qui expliquerait pourquoi les auteurs n'ont pas trouvé d'influence de celle-ci sur la sensibilité du modèle.

Un autre paramètre étudié dans la littérature correspond au ratio  $z_{om}/z_{oh}$  qui intervient aussi dans le calcul des résistances aérodynamiques. Pour celui-ci une faible influence sur la sensibilité du modèle a été déterminée pour une gamme de valeurs entre 1 et 1000, ce qui en accord avec les résultats de [Giordani et al. \(1996\)](#) sur vigne.

L'importante sensibilité de WDI à la vitesse du vent peut être expliquée par plusieurs facteurs. Dans un premier temps, des valeurs de vitesse de vent relativement fortes (jusqu'à  $6 \text{ m.s}^{-1}$ ) comparées à celles annoncées dans des travaux précédents concernant la vigne est possiblement une explication de cette sensibilité. Cependant, dans un second temps l'explication la plus probable de cette sensibilité à la vitesse du vent, viendrait du fait que cette variable est directement prise en compte à partir des mesures météorologiques obtenues sur la station, or comme il a été démontré par [Heilman et al. \(1996\)](#), le statut hydrique des vignes, en particulier l'ETR, est fortement influencé par la structure en rang de la culture (orientation des rangs). Cette structure influe directement dans la direction et vitesse du vent ce qui n'est pas tenu en compte par la paramétrage de WDI. Ceci pourrait donc expliquer l'importante sensibilité de WDI à cette variable car elle serait mal prise en compte.

### 5.3.1.3 Cohérence des résistances aérodynamiques

Nous avons montré l'importance des résistances aérodynamiques pour le calcul de WDI, c'est pour cela que nous avons réalisée une dernière analyse sur la comparaison des résistances aérodynamiques obtenues à partir des mesures de flux et de terrain (mesures réelle pour le vignoble) avec les estimations réalisées pour l'obtention des

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

vertex du trapézoïde WDI (mesures extrêmes théoriques). Ainsi nous pouvons vérifier que les résistances estimées sur le site 7, grande parcelle exclusivement planté en vignes, sont en accord avec les résistances calculées pour les vertex de WDI.

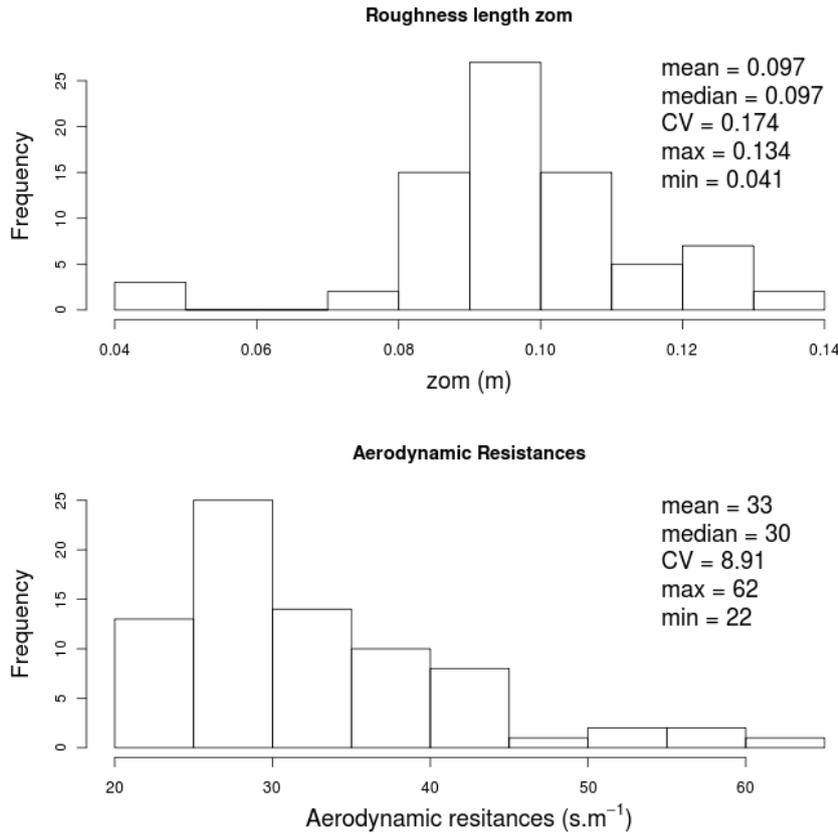


FIG. 5.11: Histogramme des rugosités de surface ( $z_{om}$ ) et des résistances aérodynamiques ( $ra$ ) pour une vigne représentative de la zone, calculées par calcul itératif sur le site 7 à 11 UTC

Pour obtenir des résistances aérodynamiques sur les vignes du Site 7, une estimation des valeurs de rugosité de surface  $z_{om}$  a été nécessaire dans un premier temps. Ceci a été réalisée par calcul itératif avec les valeurs de Ustar et de Longueur de Monin-Obukhov ( $LMO$ ) obtenu directement par la station de flux.  $z_{om}$  a donc été calculée pour toutes les dates de mesures de la station celle-ci n'étant pas forcément coïncidentes avec les dates de passage ASTER. Les résultats de ce calcul, visibles sur la figure 5.11, ont donné une valeur médiane de  $z_{om}$  pour 11 UTC du matin de 0.097 ce qui est cohérent

## 5.3 Résultats et analyses complémentaires

---

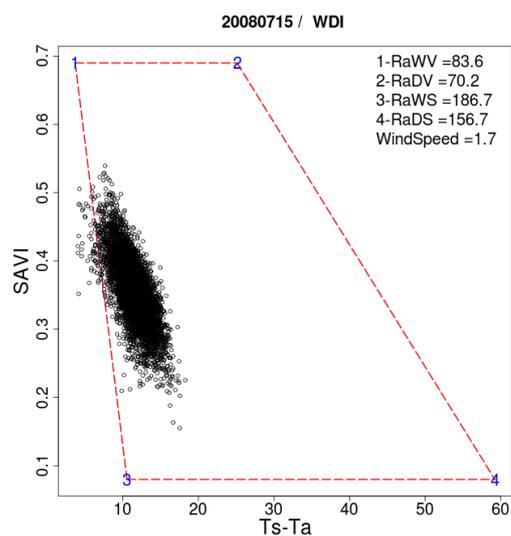
aux valeurs retrouvées dans la littérature (Bsaibes, 2007; Giordani et al., 1996; Sene, 1994). Cette même figure illustre les résultats des résistances aérodynamiques pour un couvert de vigne représentatif du bassin versant de la Peyne. Les valeurs retrouvées indiquent une valeur médiane de  $30 \text{ s.m}^{-1}$  avec des valeurs maximum et minimum de 62 et  $22 \text{ s.m}^{-1}$ , respectivement. Ces valeurs sont similaires avec celles obtenues par Sene (1994) mais cependant supérieures à celle obtenus par Li et al. (2009).

Les valeurs de résistances obtenues sont donc cohérentes avec les valeurs extrêmes établie dans le calcul des trapèzes WDI, elle sont en effet inférieures aux valeurs extrêmes établies pour un sol nu et aussi relativement plus faibles aux valeurs pour un couvert de vigne complètement couvrant. Dans Liu et al. (2007), étude dans laquelle plusieurs paramétrisations de résistances aérodynamiques ont été testées, des valeurs pour du sol nu bien supérieures à  $100 \text{ s.m}^{-1}$  ont été retrouvées, ce qui est aussi cohérent avec les valeurs retrouvées pour les vertex inférieures de WDI. Les valeurs de résistance aérodynamique obtenues pour des dates contrastées en termes de condition hydrique sont visibles sur la figure 5.12 avec des valeurs calculées pour ces 4 extrêmes. Cette figure nous permet aussi de voir que le trapézoïde WDI obtenu a réussi à localiser les nuages de points dans la logique espérée avec la date du 15 juin 2008 où une alimentation correcte en eau était présente, beaucoup plus proche de la droite "wet edge" alors que la date du 15 septembre, date à forte prédisposition au stress hydrique, a été plus proche du coté "dry edge" (fig. 5.2).

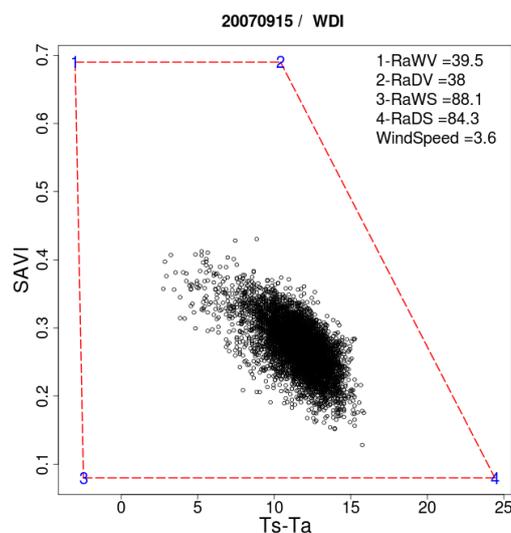
### 5.3.2 Analyse de sensibilité sur S-SEBI

Nous avons réalisé une analyse de sensibilité sur S-SEBI, se focalisant sur la pertinence de la stratégie de sélection des droites représentant les conditions extrêmes. Pour cela, nous avons réalisé une analyse qui sera présentée sous forme de résultats préliminaires. Pour cette analyse, nous avons considéré un nouveau domaine spatial, plus étendu que le bassin versant de la Peyne, et nous avons observé si les résultats évalués en termes de fraction évaporative sur les sites d'étude étaient modifiés. La nouvelle étendue choisie, visible sur la figure 5.13, contient en plus des surfaces du bassin versant de La Peyne, un lac, des forêts, des cultures (oliviers et arbres fruitiers), des céréales mais aussi la présence d'un relief plus marqué. Pour la comparaison, les dates sans nuages à l'échelle de cette étendue suivantes ont été considérées (2002-06-13, 2003-02-08, 2005-05-20, 2005-05-27, 2005-08-15, 2007-09-15, 2007-11-02).

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE



(a) Correct statut hydrique



(b) Stress hydrique

FIG. 5.12: Trapèzes WDI pour deux situation de statut hydrique contrastées, où  $RaWV$  est la résistance aérodynamique d'une vigne complètement couvrante en situation humide (vertice 1),  $RaDV$  celles d'une vigne complètement couvrante en situation sèche (vertice 2),  $RaWS$  celles d'un sol nu humide (vertice 3),  $RaDS$  celle d'un sol nu sec (vertice 4) et windspeed est la vitesse du vent mesuré ( $m.s^{-1}$ ). Les Résistances aérodynamiques sont en  $s.m^{-1}$

### 5.3 Résultats et analyses complémentaires

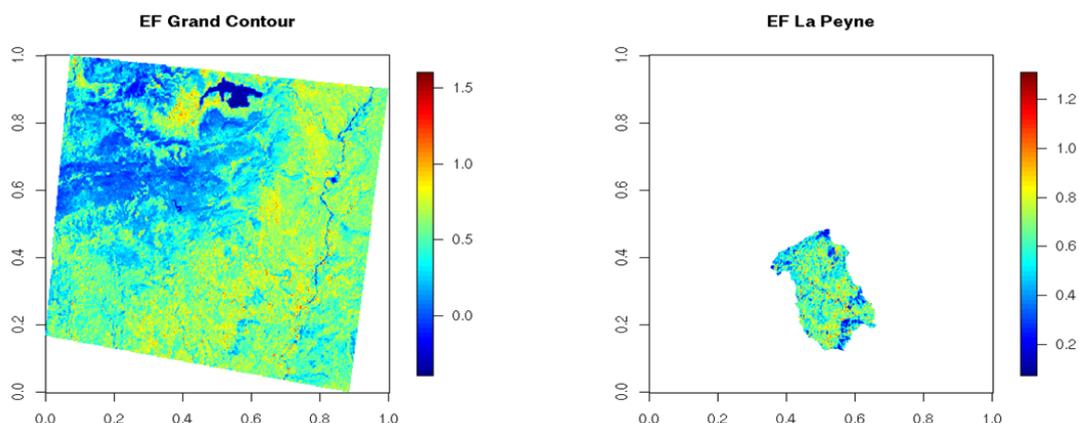


FIG. 5.13: Fraction évaporative calculée par S-SEBI sur le bassin versant de la Peyne (à droite) et sur le même bassin mais en considérant une étendue plus importante.

Lorsque un domaine plus important est considéré, nous observons dans un premier temps que les droites extrêmes diffèrent considérablement. En effet, étant donné que le contenu de l'information spatiale varie significativement, il est évident que l'espace température de surface/albédo n'est plus le même ce qui a pour conséquence une détermination des droites extrêmes différente par rapport à celle de l'étendue originale. Pour quantifier l'importance des différences enregistrées, la comparaison réalisée sur les sites de validation visible sur la figure 5.14 nous permet de vérifier que des différences proches des 40% se sont produites entre les deux considérations d'étendues spatiales, malgré l'existence d'une corrélation de 80%. Sur cette figure nous pouvons aussi observer, que lorsqu'une étendue spatiale plus importante est considérée, S-SEBI produit une plus faible variabilité de statut hydriques sur les sites de validation, évalués par la fraction évaporative. Comme nous avons vu précédemment, le modèle S-SEBI considère une valeur unique de rugosité de surface sur toute l'étendue spatiale considérée. Une des hypothèses pour expliquer les différences obtenues, viendrait de la considération d'une zone trop hétérogène qui impliquerait un "lissage" des conditions établies pour un bassin versant viticole, ce qui aurait une effet dans les résultats, notamment en diminuant la variabilité capturée. De ce fait, la variabilité de statuts hydrique existants entre nos sites de validation viticoles ne serait pas suffisamment importante par rapport à la gamme de statuts hydriques contenus dans la grande étendue étant donné que des surfaces complètement divergentes en termes de variabilité hydrique sont considérées.

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

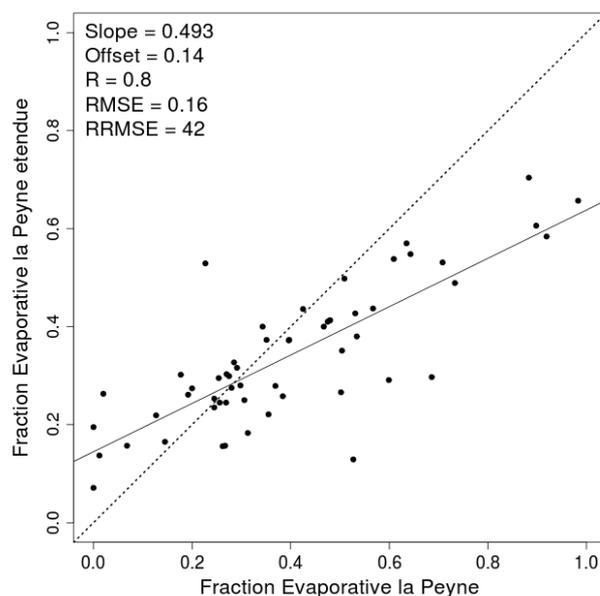


FIG. 5.14: Comparaison des fractions évaporatives sur les sites de validation (à exception du site 6) obtenues sur le bassin versant de la Peyne et sur une étendue plus grande du même bassin.

Nous avons ensuite réalisée une deuxième analyse concernant la détermination des droites extrêmes. Cette fois, nous avons restreint le domaine spatiale au parcelle viticole du bassin versant de la Peyne. Une intercomparaison entre les ETR journalières obtenus à partir du modèle S-SEBI de référence et celui implémentant le masque vigne est présentée sur la figure 5.15. Sur cette figure on observe une corrélation parfaite entre les ETR provenant des deux applications du modèle, avec cependant une surestimation de 13% des ETR obtenus à partir de S-SEBI appliqué sur masque vigne. L'erreur enregistrée entre méthodes est de  $0.33 \text{ mm.d}^{-1}$  ce qui est proche à l'erreur de mesure et inférieur aux estimations sur les sites de validations.

D'autre part, lorsque nous évaluons les performances des validations obtenues avec cette nouvelle configuration, une amélioration générale des résultats de validation sur l'ensemble des sites de mesure *in situ* se produit. Ces résultats sont visibles sur la figure 5.16 où on obtient un RMSE de  $0.78 \text{ mm.d}^{-1}$  pour la validation du S-SEBI

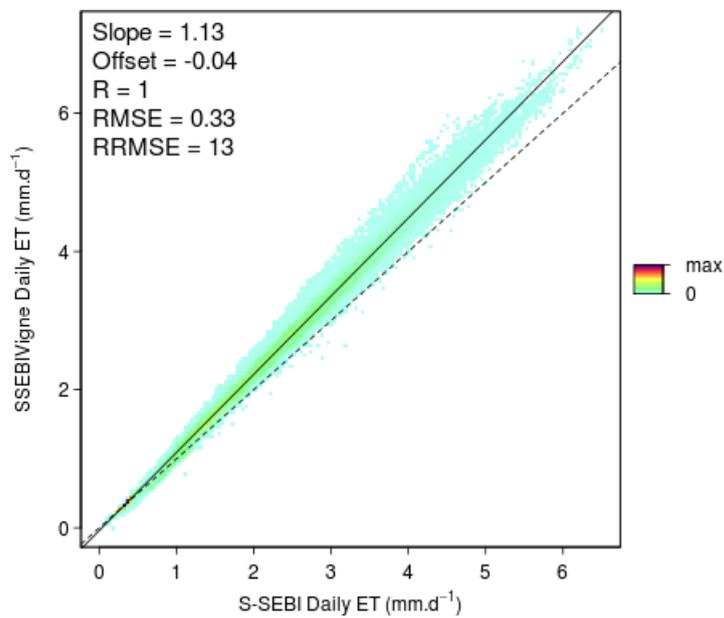


FIG. 5.15: Comparaison des ETR journalières calculées par S-SEBI en considérant le masque vigne, avec les ETR journalières estimés avec le calcul S-SEBI standard sur le bassin versant de la Peyne. L'ensemble des dates en incluant les images d'archives ont été considérées.

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

avec masque vigne comparé au  $0.83 \text{ mm.d}^{-1}$  obtenu auparavant. On observe aussi, une augmentation de la pente ce qui est cohérent avec les résultats de l'intercomparaison présenté ci-dessus. Une amélioration des performances sur l'ensemble des sites à été constatée lorsque nous avons fait l'exercice de validation par site. Ces résultats permettent d'inférer que l'introduction d'un masque sur le zone étudié permet d'améliorer les résultats obtenus par paramétrisation classique. Une hypothèse pour expliquer ceci, viendrait du fait que le modèle S-SEBI considère une rugosité de surface unique, or lorsque nous appliquons le masque vigne nous améliorons cette considération puisqu'il y aurait moins de mélange de type de surface. Une autre implication vérifiée ici, est que les parcelles viticoles contiennent une variabilité d'état hydriques suffisante pour établir les limites extrêmes du modèle tout en fournissant des résultats corrects. Le modèle serait donc assez robuste pour fournir des résultats corrects avec une variabilité de conditions hydriques restreint au parcellaire viticole du bassin versant de la Peyne.

En conclusion, l'analyse de sensibilité des droites extrêmes de S-SEBI, nous permet d'inférer que le modèle est sensible aux types de surfaces capturées. Il serait donc nécessaire, dans le cas des bassin versant viticoles méditerranéen, de tenir compte d'une certaine homogénéité des couverts considérés de façon à bien représenter les caractéristiques aérodynamiques de la surface étudiée, tout en considérant une variabilité des conditions hydriques suffisante pour inclure un nombre suffisant de pixels sec et complètement évaporant. Ainsi, le modèle serait capable d'établir l'ensemble de la variabilité d'états hydriques possibles, pour le paysage considéré.

### 5.4 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté l'intercomparaison de l'indicateur WDI (Water Déficit Index) avec le modèle S-SEBI, qui permettent de cartographier l'ETR journalière à partir des données ASTER. Dans un premier temps, nous avons montré que WDI produit des performances acceptables mais légèrement moins précises que celles obtenues par S-SEBI. En effet, en dépit de la simplicité du modèle S-SEBI, celui-ci s'est avéré plus précis que WDI, malgré que ce dernier présente un algorithme à base plus physique en incluant des mesures *in situ*. Des différences se sont produites d'un point de vue temporelle ainsi que spatial. Le modèle WDI a généralement surestimé l'ETR journalière par rapport à S-SEBI, en particulier durant

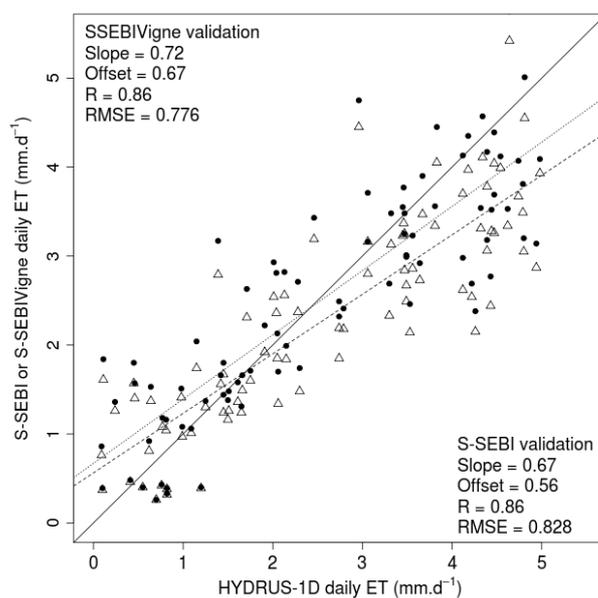


FIG. 5.16: Comparaison des estimations d'ETR journalières pour ASTER / S-SEBI (triangles) et ASTER / S-SEBI appliqué au masque vigne (points) validées avec celles obtenues à partir des estimations de HYDRUS-1D sur les sites de validation. R correspond au coefficient de corrélation. "Slope" et Offset proviennent des régression linéaires entre X et Y (lignes pointillés). Les lignes continues correspondent aux droites 1 :1.

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

les périodes de fin de printemps et début d'été où des fortes ETR se sont produites. Dans ces conditions, WDI a fortement surestimé les valeurs d'ETR des pixels à plus faibles ETR. Des estimations relativement similaires ont été obtenues entre les deux modèles au cours des périodes de début de printemps et fin d'été où des valeurs plus faibles d'ETR ont été enregistrées. Des différences spatiales ont aussi été identifiées entre estimateurs en fonction de la condition hydrique prépondérante. Ainsi les plus importantes différences se sont produites sur des zones à faible ETR. L'analyse de ces résultats nous a permis de mettre en avant les différentes performances obtenues par les deux modèles et d'en déduire que malgré les différences les performances sont plutôt similaires.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons réalisé des analyses de sensibilités sur WDI puis sur S-SEBI, pour tenter d'élucider les sources d'erreur et des différences obtenues. Pour se faire, nous avons d'abord déterminé les inputs utilisés par WDI et leurs gammes respectives de variabilité de façon à tester la sensibilité du modèle à leurs variations. Lors de cette analyse, nous avons identifié des variables météorologiques tel que la vitesse du vent, la température de l'air et l'humidité relative, présentant une variabilité spatiale, intra-bassin versant, non négligeable. L'analyse de sensibilité effectuée sur WDI nous a permis d'identifier le paramètre le plus déterminant dans la sensibilité du modèle, à savoir les résistances aérodynamiques qui sont particulièrement gouvernées par la vitesse du vent. Cette dernière a généré une différence de jusqu'à 40% dans le calcul de WDI pour un offset de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ . L'importance de ce résultat nous a permis d'inférer qu'une détermination correcte de la vitesse du vent est essentielle dans le calcul de WDI. Cependant, ceci est loin d'être le cas en contexte de vignes en rang, car WDI ne considère point l'orientation des rangs et la direction du vent, facteurs ayant déjà démontré leur importance dans la détermination de l'ETR sur vigne (Heilman et al., 1996). Les températures de surface et de l'air se sont avérées faiblement sensibles dans le calcul de WDI, ce qui ne correspond pas à ceux déterminés par Li and Lyons (1999), possiblement à cause des différences dans l'aérodynamisme des couverts étudiés car ces auteurs ont travaillé sur des couverts complètement couvrants. Finalement, nous avons comparé les valeurs de rugosité mécanique de surface et de résistances aérodynamiques calculés sur vigne à partir des mesures de flux et de terrain avec les valeurs publiées dans la littérature pour ce même type de couvert. Des résultats cohérents ont été retrouvés ce qui confirme l'exactitude de nos calculs. Les valeurs

de résistances aérodynamiques calculées sur vigne ont ensuite été comparées avec les valeurs de résistances obtenues pour les vertex du trapèze (valeurs extrêmes). Dans ce cas, des résultats cohérents se situant dans la gamme définie par les vertex ont été obtenus. Cependant, la sensibilité du modèle envers ce paramètre, spécialement sur sa composante vitesse du vent semble être limitant pour l'obtention de meilleures performances puisque celui-ci s'est montré variable spatialement, mais aussi, il serait influencé par la structure en rang de la vigne.

Dans un second temps, l'analyse de sensibilité de S-SEBI en particulier des ces droites théoriques nous a permis de vérifier que le modèle est effectivement sensible à la détermination de celles-ci notamment lorsque différentes étendues spatiales sont considérées. Une amélioration générale des performances à été vérifiée lorsque un paysage ne contenant que des parcelles viticoles est considéré. Ceci viendrait du fait d'une meilleure prise en compte de la rugosité de surface en évitant le mélange de type de surface étudiées. Une dernière hypothèse issue de ces résultats est que l'ensemble des parcelles viticoles du bassin versant de la Peyne contiennent une variabilité d'états hydriques suffisantes pour un correct fonctionnement du modèle S-SEBI sur vigne.

Finalement, à partir de l'analyse des résultats des analyses de sensibilité sur WDI et S-SEBI, nous pouvons établir l'hypothèse que les meilleures performances du modèle S-SEBI seraient expliquées en partie par la simplification de son algorithme de calcul des conditions extrêmes. En effet, nous avons démontré que ce modèle est sensible au domaine spatial considéré, ce qui aurait une incidence directe sur la considération de la rugosité mécanique, paramètre représentant l'aérodynamisme de la surface étudiée. D'autre part, l'analyse de sensibilité sur WDI nous a permis de conclure que la vitesse du vent est l'input le plus déterminant sur la sensibilité de WDI. Cette variable, intervenant en grande partie sur l'estimation de l'aérodynamisme du couvert viticole par l'intermédiaire des résistances aérodynamiques serait alors mal prise en compte du fait du manque de documentation sur les facteurs influant sur celle-ci (orientation et direction du vent) en particulier sous contexte viticole.

## 5. ÉTUDE DE DEUX INDICATEURS SPATIALISÉS DE STATUT HYDRIQUE

---

# Conclusion Générale

## 1.5 Principaux résultats

L'estimation et la cartographie du statut hydrique des cultures, en particulier celui des couverts à forte hétérogénéité spatiale comme les vignes, constitue aujourd'hui un pré-requis incontournable dans la perspective de gérer et de prévoir l'évolution future des ressources en eau des zones méditerranéennes. De fait, si un nombre considérable de travaux décrivant des méthodes d'estimation du statut hydrique des cultures sont reportés dans la littérature, ceux-ci ont le plus souvent été conduits à l'échelle de la parcelle, la complexité des variabilités du paysage limitant leur extension à de plus grandes étendues, et ce en dépit d'une importante littérature concernant l'estimation spatialisée du statut hydrique à partir de données de télédétection. C'est dans ce contexte que se situait l'objectif principal de notre étude qui visait à tester la pertinence de la télédétection dans le domaine optique, en particulier sa composante thermique, pour déterminer de manière spatialisée le statut hydrique de la vigne, sur un bassin versant majoritairement viticole et d'une superficie de plusieurs dizaines de kilomètres carrés.

Parmi le nombre assez important de candidats possibles, nous avons choisi deux estimateurs simples, permettant de se concentrer sur les aspects spatiaux de l'étude et d'alléger le plus possible la démarche expérimentale. Ce choix a été motivé par l'analyse bibliographique réalisée dans ce travail de thèse, dont nous avons conclu que des résultats acceptables pouvaient être obtenus indépendamment de la complexité des estimateurs utilisés et de la complexité du milieu étudié. Cette hypothèse s'appuie notamment sur la récente revue des travaux sur l'estimation de l'ETR spatialisée de [Kalma et al. \(2008\)](#).

## Conclusion Générale

---

Dans un premier temps, nous avons testé l'estimateur S-SEBI (Roerink et al., 2000), modèle semi-empirique entièrement basé sur l'information télédéteectée. Ce modèle a permis d'estimer l'ETR journalière avec une précision acceptable ( $0.8 \text{ mm.j}^{-1}$ ), valeur se situant dans la gamme des estimations spatialisées de l'ETR journalière déjà publiées pour d'autres cultures (French et al., 2005; Gomez et al., 2005; Jacob et al., 2002c). Il faut noter que ces résultats ont été obtenus sur des parcelles choisies pour leur relativement grande taille et pour leur homogénéité spatiale, de manière à ne pas altérer la qualité des estimations. Finalement l'analyse de ces résultats de validation a montré qu'une piste d'amélioration des performances de l'estimateur S-SEBI pourrait être la prise en compte des variations des résistances aérodynamiques des couverts de vigne en fonction de la direction du vent par rapport à celle des rangs.

Le deuxième estimateur choisi a été le WDI Moran et al. (1994), indicateur comprenant une paramétrisation plus physique que celle du S-SEBI et se basant sur des informations météorologiques et biophysiques mesurées sur le terrain. Les résultats de validation du WDI ont été moins bons que ceux du S-SEBI puisque une précision de  $1.1 \text{ mm.j}^{-1}$  a été obtenue pour l'ETR journalière, ce qui reste tout de même acceptable. La comparaison du WDI avec le S-SEBI et l'analyse de sensibilité réalisée sur les paramètres de WDI montrent que ce dernier est très sensible à la vitesse du vent, variable intervenant directement dans la détermination des résistances aérodynamiques du couvert végétal. Comme dans le cas du S-SEBI, la non prise en compte de l'influence de la direction du vent par rapport à celle des rangs de vigne pourrait être la cause principale de la relativement moins bonne précision observée, puisque l'estimation des flux échangés entre couvert végétal et atmosphère, en particulier de l'ETR, est très dépendante de la paramétrisation des résistances aérodynamiques, comme observé par Heilman et al. (1996).

Un résultat important de notre étude est que l'utilisation d'estimateurs de statut hydrique de la vigne, basés des images de télédétection optique a permis d'identifier des structures spatiales permanentes au sein du bassin versant de la Payne, cette structuration spatiale expliquant entre 60 et 70% des variations spatiales de l'ETR capturées par les images de télédétection, les 30% restants pouvant être attribués imputés aux dynamiques temporelles.

Au plan méthodologique, nous avons développé une méthode originale de validation des estimations spatialisées de l'ETR, permettant d'obtenir un ensemble important de références locales d'ETR à un coût d'expérimentation raisonnable en termes humains et financiers. Cette méthode s'appuie sur le suivi temporel des profils d'humidité du sol et de niveau des nappes, couplés avec le modèle de transferts hydriques monodimensionnel, HYDRUS 1-D (Simunek et al., 2008). Nous avons montré que ce modèle pouvait être inversé à partir des données d'humidité du sol, permettant d'estimer des propriétés hydrodynamiques du sol. Ceci nous a permis d'obtenir des chroniques continues de l'ETR, à pas de temps horaire et journalier, sur une période de 16 mois. La comparaison avec les mesures d'ETR par la méthode des covariances turbulentes a donné de très bons résultats, avec des précisions de l'ordre  $40 \text{ W.m}^{-2}$  à l'échelle horaire et de  $0.5 \text{ mm.j}^{-1}$  à l'échelle journalière. La précision de ces validations est tout à fait comparable à celles obtenues dans des études similaires sur vigne à l'échelle parcellaire (Bsaibes, 2007; Ortega-Farias et al., 2007; Trambouze et al., 1998). L'analyse des résultats obtenus par HYDRUS sur les différents sites de notre étude a montré que d'importants écarts de l'ETR ont été observés, ce qui nous a permis de confirmer la diversité de comportement du vignoble méditerranéen non-irrigué face à la contrainte hydrique. Nous pouvons conclure que l'application du modèle HYDRUS 1-D est une méthode de simulation de l'ETR originale, basée sur des données faciles d'obtention et qui pourra être réutilisée dans l'avenir.

## 1.6 Perspectives

Le travail de thèse ouvre plusieurs perspectives, du plus court terme au plus lointain :

En premier lieu, il est envisageable d'améliorer l'estimation spatialisée du statut hydrique de la vigne, à l'échelle de la petite région, en utilisant le jeu de données constitué à l'occasion de ce travail de thèse. Pour ce faire, le test d'autres indicateurs d'état hydriques (SEBAL, SEBS, SEBI), en particulier les approches à deux sources (TSEB) ainsi que l'amélioration du S-SEBI pourraient être réalisés, en se basant, comme indiqué plus haut, sur les résultats de l'étude de sensibilité réalisée. Ceci permettrait de confirmer ou d'infirmer l'avantage des méthodes plus empiriques par rapport aux

## Conclusion Générale

---

indicateurs à base plus physique.

En second lieu, les estimations spatiales de statut hydrique des vignes par indicateurs de télédétection pourraient être étendues à des zones plus larges ou plus hétérogènes spatialement. Par exemple, l'obtention d'images de télédétection à résolution spatiale supérieure (images aéroportées ou futures missions satellitaires dans l'infrarouge thermique) permettrait l'obtention de pixels homogènes, ce qui permettrait d'affiner les estimations de statut hydrique. On pourrait aussi envisager la mise en oeuvre de méthodes de séparation de sources, permettant de distinguer, au sein des pixels, les signatures thermique des vignes de celles des autres éléments constitutif du paysage cultivé (bosquets, routes, haies, ...)

En troisième lieu, les indicateurs d'états hydriques spatialisés élaborés dans ce travail de thèse ouvrent la perspective d'accéder au bilan hydrique spatialisé de la vigne, notamment à des périodes clés du développement de la vigne, permettant ainsi d'obtenir des informations cruciales pour la conduite de cette culture. Cette perspective pourrait être réalisée par la mise en oeuvre de techniques d'assimilation permettant le couplage entre données de télédétection et modèles dynamiques de type SVAT ou de transferts hydriques dans les sols.

Enfin, la stabilité temporelle des structures spatiales de l'ETR mise en évidence par cette étude nous laisse penser que ces indicateurs spatialisés de statut hydrique de la vigne pourraient être utilisés pour estimer des caractéristiques hydrodynamiques permanentes des sols, permettant ainsi de paramétrer des modèles de bilan hydrique susceptible de prédire les comportements de la vigne en situation de changement climatique. Pour ce faire, deux voies sont possibles :

1. voie statistique : recherche de loi statistiques pour estimer une réserve utile en fonction de l'ETR estimée par télédétection ; dans ce cas, les terrains d'études devront être limités aux zones majoritairement plantées en vigne et non irrigué, les fonctions statistiques ne permettant pas de prendre en compte explicitement les autres facteurs de variation des statuts hydriques ;
2. voie à base physique : par inversion de modèles déterministes (modèles SVAT ou modèles de transferts hydriques) à partir de données de télédétection, permettant

d'estimer les caractéristiques hydrodynamiques des sols; la mise en oeuvre de techniques d'assimilation serait là encore à privilégier.

Les paramètres ainsi estimés pourraient utilement alimenter la cartographie des propriétés des sols.

## Conclusion Générale

---

# Bibliographie

- Abrams, M., 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) : Data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing* 21, 847–859. [169](#)
- Alarcon, J., Domingo, R., Green, S., Sanchez-Blanco, M., Rodriguez, P., A.Torrecillas, 2000. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees. *Plant and Soil* 227, 77–85. [16](#)
- Allen, R., Raes, L. P. D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements, Irrigation and Drain, Paper No. 56.* FAO of United Nation. [90](#), [98](#)
- Améglio, T., Archer, P., Cohen, M., Valancogne, C., Daudet, F.-A., Dayau, S., Cruiziat, P., 1999. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant and Soil* 207, 155–167. [13](#)
- Ansley, S., Dugas, W., Heuer, M., Trevino, B., 1994. Stem flow and porometer measurements of transpiration from honey mesquite (*Prosopis glandulosa*). *Journal of Experimental Botany* 45, 847–865. [16](#)
- Aradhya, M. K., Dangi, G., Prins, B. H., Boursiquot, J., Walker, M., Meredith, C., Simon, C., 2003. Genetic structure and differentiation in cultivated grape, *Vitis vinifera* L. *Genetic Research Cambridge* 81, 179–192. [9](#)
- Baeza, P., Ruiz, C., Cuevas, E., Sotés, V., Lissarrague, J.-R., 2005. Ecophysiological and agronomic response of tempranillo grapevines to four training systems. *Am. J. Enol. Vitic.* 56(2), 129–138. [98](#)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Baret, F., Guyot, G., 1991. Potential and limits of vegetation index for lai and par assessment. *Remote Sensing of Environment* 35, 161–173. [23](#)
- Bastiaanssen, W., Allen, R., Droogers, P., D’Urso, G., Steduto, P., 2007. Twenty-five years modeling irrigated and drained soils : State of the art. *Agricultural Water Management* 92 (3), 111 – 125. [55](#)
- Bastiaanssen, W., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J., Roerink, G., van der Wal, T., 1998a. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology* 212–213, 213–229. [32](#)
- Bastiaanssen, W. G. M., 2000. Sebal-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated gediz basin, turkey. *Journal of Hydrology* 229 (1-2), 87 – 100. [165](#)
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., Holtslag, A. A. M., 1998b. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology* 212-213, 198 – 212. [32](#), [68](#), [135](#), [140](#), [165](#), [174](#)
- Bastiaanssen, W. G. M., Molden, D. J., Makin, I. W., 2000. Remote sensing for irrigated agriculture : examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management* 46, 137 – 155. [32](#)
- Bonhomme, 2000. Bases and limits to using "degree.day" units. *European Journal of Agronomy* 13, 1–10. [48](#)
- Boronina, A., Ramillien, G., 2008. Application of AVHRR imagery and GRACE measurements for calculation of actual evapotranspiration over the Quaternary aquifer (Lake Chad basin) and validation of groundwater models. *Journal of Hydrology* 348 (1-2), 98 – 109. [33](#), [56](#), [175](#), [189](#), [190](#)
- Bramley, R., Lamb, D., 2003. Making sense of vineyard variability in australia. In : *Precision Viticulture. Proceedings of an international symposium held as part of the IX Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enologia, Chile.* [12](#)
- Branas, J., 1974. *Viticulture.* [6](#)
- Branas, J., Vergnes, A., 1957. Morphologie du système racinaire. *Progrès Agricole et Viticole*, 29–209. [9](#)

- Braud, I., Dantas-Antonino, A. C., Vauclin, M., Thony, J. L., Ruelle, P., 1995. A simple soil-plant-atmosphere transfert model (sispat) development and field verification. *Journal of Hydrology* 31, 213–250. [21](#)
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., F, F. B., Cabidoche, Y., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy* 18, 309–332. [20](#)
- Broge, N. H., Leblanc, E., 2001. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment* 76 (2), 156 – 172. [23](#)
- Brunet, Y., Pradel, E., Carmenen, L., 1995. Introduction aux transferts turbulents. actes de l'école chercheurs INRA en bioclimatologie. Tome I : De la plante au couvert végétal. INRA. [70](#), [71](#)
- Brutsaert, W., 1975. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water Resources Research* 11(5), 742–744. [68](#), [172](#)
- Bsaibes, A., 2007. Évaluation d'une approche multi-locale d'estimation spatiale de l'évapotranspiration. Ph.D. thesis, Université de Montpellier II. [22](#), [35](#), [59](#), [74](#), [80](#), [86](#), [87](#), [108](#), [114](#), [118](#), [138](#), [139](#), [140](#), [168](#), [170](#), [171](#), [188](#), [199](#), [211](#), [240](#), [260](#)
- Calvet, J.-C., Noilhan, J., Roujean, J.-L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Olioso, A., Wigneron, J.-P., 1998. An interactive vegetation svat model tested against data from six contrasting sites. : . *Agricultural and Forest Meteorology* 92, 73–95. [21](#)
- Carbonneau, A., 1998. Aspects qualitatifs. Tiercelin J.R, Ch. *Traité d'irrigation*, pp. 258–276. [8](#)
- Carlson, T. N., Gillies, R. R., Schmugge, T. J., 1995. An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content. *Agricultural and Forest Meteorology* 77 (3-4), 191 – 205, thermal Remote Sensing of the Energy and Water Balance over Vegetation. [19](#)
- Chamayou, H., 1994. Élement de bioclimatologie. [65](#)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Champagnol, F., 1984. *Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale*. 8, 9, 74, 76, 95, 249
- Chehbouni, A., Hoedjes, J. C., Rodriguez, J.-C., Watts, C. J., Garatuza, J., Jacob, F., Kerr, Y. H., 2008. Using remotely sensed data to estimate area-averaged daily surface fluxes over a semi-arid mixed agricultural land. *Agricultural and Forest Meteorology* 148 (3), 330 – 342. 164
- Choi, M., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Allen, R. G., Li, F., Kjaersgaard, J. H., 2009. An intercomparison of three remote sensing-based surface energy balance algorithms over a corn and soybean production region (Iowa, U.S.) during SMACEX. *Agricultural and Forest Meteorology* 149 (12), 2082 – 2097. 165
- Choné, X., van Leeuwen, C., Dubourdieu, D., Gaudillère, J., 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany* 87, 477–483. 13
- Cifre, J., Bota, J., Escalona, J., Medrano, H., Flexas, J., 2005. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*vitis vinifera* L.) : An open gate to improve water-use efficiency ? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 106 (2-3), 159 – 170, photosynthesis and Abiotic Stresses. 16, 24
- Claudio, H. C., Cheng, Y., Fuentes, D. A., Gamon, J. A., Luo, H., Oechel, W., Qiu, H.-L., Rahman, A. F., Sims, D. A., 2006. Monitoring drought effects on vegetation water content and fluxes in chaparral with the 970 nm water band index. *Remote Sensing of Environment* 103 (3), 304 – 311, spectral Network. 24
- Cleugh, H. A., Leuning, R., Mu, Q., Running, S., 2007. Regional evaporation estimates from flux tower and modis satellite data. *Remote Sensing of Environment* 106, 285–304. 30
- Clothier, B., 1986. Estimation of soil heat flux from a net radiation during the growth of alfalfa. *Agricultural and Forest Meteorology* 37, 319–329. 69, 173
- Conolly, R., 1998. Modelling effects of soil structure on the water balance of soil-crop systems : a review. *Soil and Tillage* 48(1-2), 1–19. 28

- Corban, C., 2006. Reconnaissance des états de surface en milieu cultivé méditerranéen par télédétection optique à très haute résolution spatiale. Ph.D. thesis, Université de Montpellier II. [46](#)
- Cosh, M. H., Jackson, T. J., Bindlish, R., Famiglietti, J. S., Ryu, D., 2005. Calibration of an impedance probe for estimation of surface soil water content over large regions. *Journal of Hydrology* 311, 49–58. [15](#)
- Coulouma, G., 2008. Carte des sols de la basse vallée de la peyne, échelle 1/25000ème. Tech. rep., INRA, IRD, Montpellier Supagro. [42](#)
- Courault, D., Jacob, F., Benoit, V., Weiss, M., Marloie, O. ., Hanocq, J.-F., Dedieu, G., Gouaux, P., Gay, M., French, A., 2009. Influence of agricultural practices on micrometeorological spatial variations at local and regional scales. *International Journal of Remote Sensing* 30(5), 1183 – 1205. [164](#)
- Courault, D., Seguin, B., Olioso, A., 2005. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data : From empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and Drainage Systems* 19 (3), 223 – 249. [134](#), [164](#), [165](#)
- Crow, W. T., Kustas, W. P., Prueger, J. H., 2008. Monitoring root-zone soil moisture through the assimilation of a thermal remote sensing-based soil moisture proxy into a water balance model. *Remote Sensing of Environment* 112 (4), 1268 – 1281, remote Sensing Data Assimilation Special Issue. [32](#)
- Cuevas, E., Baeza, P., Lissarrague, J., 2006. Variation in stomatal behaviour and gas exchange between mid-morning and mid-afternoon of north–south oriented grapevines (*vitis vinifera* l. cv. tempranillo) at different levels of soil water availability. *Scientia Horticulturae* 108, 173–180. [15](#)
- Dagès, C., 2006. Analyse et modélisation de l’influence de réseaux de fossés sur les échanges surface-souterrain en bassin versant méditerranéen. Ph.D. thesis, Université de Montpellier II. [48](#), [93](#), [118](#)
- de Souza, C., Maroco, J., dos Santos, T., Rodrigues, M., Lopes, C., Pereira, J., Chaves, M., 2003. Partial rootzone drying : regulation of stomatal aperture and carbon assimilation in field-grown grapevines. *Functional Plant Biology* 30, 653–662. [19](#)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- de Wit, C., 1978. Simulation of Assimilation, Respiration and Transpiration of Crops. Pudoc. [172](#)
- Delenne, C., Rabatel, G., Deshayes, M., JUL 2008. An automatized frequency analysis for vine plot detection and delineation in remote sensing. IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS 5 (3), 341–345. [190](#)
- Deloire, A., Carbonneau, A., Wang, Z., Ojeda, H., 2004. Vine and water. a short review. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 38 (1) (2), 1–13. [8](#)
- Deloire, A., Ojeda, H., Zebiv, O., Bernard, N., Hunter, J.-J., Carbonneau, A., 2005a. Influence de l'état hydrique de la vigne sur le style de vin. Le Progrès Agricole et Viticole 21, 455–462. [8](#)
- Deloire, A., Vaudour, E., Carey, V., Bonnardot, V., van Leeuwen, C., 2005b. Grapevine responses to terroir : a global approach. Journal International Science Vigne Vin 39(4), 149–162. [11](#)
- Diffenbaugh, N., Pal, J., Giorgi, F., Gao, X., 2007. Heat stress intensification in the mediterranean climate change hotspot. Geophysical research letters 34 (11), L11706. [12](#), [164](#)
- Dijk, A. V., Moene, A., Bruin, H. D., 2004. The principle of surface flux physics : theory, practice and description of the ecpack library. Tech. rep., Internal Report 2004/1, Meteorology and Air Quality Group, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 99p. [70](#), [73](#), [137](#), [170](#)
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Hoedjes, J., Ezzahar, J., Duchemin, B., Jacob, F., 2008. Improvement of fao-56 method for olive orchards through sequential assimilation of thermal infrared-based estimates of et. Agricultural Water Management 95 (3), 309 – 321. [30](#)
- Escalona, J., Flexas, J., Medrano, H., 2002. Drought effects on water flow, photosynthesis and growth of potted grapevines. Vitis 41, 57–62. [16](#)
- Evain, S., Flexas, J., Moya, I., 2004. A new instrument for passive remote sensing : 2. measurement of leaf and canopy reflectance changes at 531 nm and their relationship

- with photosynthesis and chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment* 91 (2), 175 – 185. [24](#)
- Faivre, R., Leenhardt, D., Voltz, M., Benoît, M., Papy, F., Dedieu, G., Wallach, D., 2004. Spatialising crop models. *Agronomie* 24, 205–217. [28](#)
- Farquhar, G. D., Richards, R. A., 1984. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. . . : *Australian Journal of Plant Physiology* 11, 539–552. [19](#)
- Feddes, R., Kowalik, P., Zaradny, H., 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation monographs. PUDOC, Wageningen, 189 pp. [77](#), [78](#), [87](#), [138](#), [170](#), [240](#), [249](#)
- Fensholt, R., Sandholt, I., 2003. Derivation of a shortwave infrared water stress index from modis near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment* 87 (1), 111 – 121. [24](#)
- Flexas, J., Briantais, J.-M., Cerovic, Z., Medrano, H., Moya, I., 2000. Steady-state and maximum chlorophyll fluorescence responses to water stress in grapevine leaves : A new remote sensing system. *Remote Sensing of Environment* 73 (3), 283 – 297. [24](#), [164](#)
- Fortin, J., Moussa, R., Bocquillon, C., Villeneuve, J., 1995. Hydrotel, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographiques. *Revue des Sciences de l'eau* 8(1), 97–124. [22](#)
- French, A., Jacob, F., Anderson, M., Kustas, W., Timmermans, W., Gieske, A., Su, Z., Su, H., McCabe, M., Li, F., Prueger, J., Brunsell, N., 2005. Surface energy fluxes with the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) at the Iowa 2002 SMACEX site (USA). *Remote Sensing of Environment* 99 (1-2), 55 – 65. [146](#), [149](#), [159](#), [164](#), [165](#), [189](#), [210](#)
- French, A., Schmugge, T., Ritchie, J., Hsu, A., Jacob, F., Ogawa, K., 2008. Detecting land cover change at the Jornada Experimental Range, New Mexico with ASTER emissivities. *Remote Sensing of Environment* 112 (4), 1730 – 1748. [135](#), [166](#)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Galet, P., 1999. Précis de pathologie viticole. 3ème Edition. 8
- Galleguillos, M., Jacob, F., Prévot, L., Lagacherie, P., Liang, S., 2010. Mapping daily evapotranspiration over a mediterranean vineyard watershed. *Geosciences and Remote Sensing Letters Under revision*, -. 165
- Gamon, J., Field, C., Bilger, W., Björkman, O., Fredeen, A., Peñuelas, J., 1990. Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. *Oecologia* 85, 1–7. 24
- Gao, B., 1996. NdwI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58, 257–266. 24
- GarciadeCortazar, I., 2006. Adaptation du modèle stics à la vigne (*vitis vinifera* l.). utilisation dans le cadre d’une étude d’impact du changement climatique à l’échelle de la france. Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. 20
- Garnier, E., Berger, A., 1986. Effect of water stress on stem diameter changes of peach trees growing in the field. *Journal of Applied Ecology* 23, 193–209. 16
- Garrack, J., Hicks, B., 1973. Momentum, heat and water vapour transfer to and from natural and artificial surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 99, 680–687. 178
- Gaudillère, J., Leeuwen, C. V., Ollat, N., 2002. Carbon isotope composition of sugras in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *Journal of Experimental Botany* 53(369), 1–7. 19
- Ghesquière, J., 2008. Intégration des mécanismes de débordement dans la modélisation hydrologique spatialisée des crues en milieu agricole. Ph.D. thesis, Montpellier SupAgro, France, 257 p. 48
- Gilabert, M. A., Gonzalez-Piqueras, J., Garcia-Haro, F. J., Melia, J., 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 82 (2-3), 303 – 310. 23

- Gillies, R. R., Carlson, T. N., Kustas, W. P., Humes, K. S., 1997. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the normalized difference vegetation index ( ndvi ) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing* 18 (15), 3145–3166. [19](#)
- Giordani, H., Noilhan, J., Lacarrère, P., Bessemoulin, P., Mascart, P., 1996. Modelling the surface processes and the atmospheric boundary layer for semi-arid conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 80 (2-4), 263 – 287. [164](#), [177](#), [178](#), [193](#), [197](#), [199](#)
- Girona, J., Mata, M., del Campo, J., Arbonés, A., Bartra, E., Marsal, J., 2006. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrigation Science* 24(2), 115–127. [13](#), [15](#)
- Gomez, M., Olioso, A., Sobrino, J., Jacob, F., 2005. Retrieval of evapotranspiration over the alpillles/reseda experimental site using airborne polder sensor and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment* 96, 399–408. [33](#), [56](#), [68](#), [135](#), [140](#), [144](#), [146](#), [147](#), [148](#), [149](#), [159](#), [165](#), [173](#), [175](#), [189](#), [190](#), [210](#)
- Gonzalez-Dugo, M. P., Moran, M. S., Mateos, L., Bryant, R., 2006. Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity. *Irrigation Science* 24, 233–240. [19](#)
- Goodrich, D. C., Scott, R., Qi, J., Goff, B., Unkrich, C. L., Moran, M. S., Williams, D., Schaeffer, S., Snyder, K., MacNish, R., Maddock, T., Pool, D., Chehbouni, A., Cooper, D. I., Eichinger, W. E., Shuttleworth, W. J., Kerr, Y., Marsett, R., Ni, W., 2000. Seasonal estimates of riparian evapotranspiration using remote and in situ measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 105 (1-3), 281 – 309. [30](#)
- Goward, S. N., Xue, Y., Czajkowski, K. P., 2000. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements. an exploration with the simplified simple biosphere model. *Remote Sensing of Environment* 79, 225 – 242. [31](#)
- Granger, R., Gray, D., 1989. Evaporation from natural nonsaturated surfaces. *Journal of Hydrology* 111, 21–29. [30](#)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Guix, N., 2005. Prise en compte des nappes superficielles pour spatialiser le bilan hydrique à l'échelle sub-regionale, cas de la vigne en basse vallée de la peyne-hérault, france. Ph.D. thesis, Université Montpellier II. [9](#), [44](#), [60](#), [83](#), [86](#), [92](#), [93](#)
- Guix-Hébrard, N., Voltz, M., Trambouze, W., Gaudillère, F. G. J., Lagacherie, P., 2007. Influence of watertable depths on the variation of grapevine water status at the landscape scale. *European Journal of Agronomy* 27 Issues 2-4, 187–196. [45](#), [90](#)
- Hall, A., Lamb, D., Holzzapfel, B., Louis, J., 2002. Optical remote sensing applications in viticulture – a review. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 8, 36–47. [12](#)
- Hardisky, M. A., V., L., R.M., S., 1983. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of spartina alternifolia canopies. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 49, 77–83. [24](#)
- Hébrard, O., 2004. Stratégie de prévision des humidités de surface sur un bassin versant agricole en milieu méditerranéen. Ph.D. thesis, Thèse de Doctorat de l'Université Montpellier II. [95](#), [249](#)
- Heilman, J., McInnes, K., Gesch, R., Lascano, R., Savage, M., 1996. Effects of trellising on the energy balance of a vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology* 81, 79–93. [190](#), [197](#), [206](#), [210](#)
- Heilman, J., McInnes, K., Savage, M., Gesch, R., Lascano, R., 1994. Soil and canopy energy balances in a west texas vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology* 71 (1-2), 99 – 114. [98](#), [164](#)
- Heller, R., E. R. L. C., 1993. *Physiologie végétale, 1.Nutrition*. Paris. [7](#)
- Hera-Orts, M. L., Roca, A. M.-C. J. L., Gomez-Plaza, L. P.-P. E., 2005. Effect of deficit irrigation on anthocyanin content of monastrell grapes and wines. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 39 (2), 47–55. [8](#)
- Holifield, C., McElroy, S., Moran, M., Bryant, R., Miura, T., Emmerich, W. E., 2003. Temporal and spatial changes in grassland transpiration detected using landsat tm and etm+ imagery. *Canadian journal of remote sensing* 29 (2), 259–270. [178](#)

- Hong, S., Hendrickx, J. M., Borchers, B., 2009. Up-scaling of SEBAL derived evapotranspiration maps from Landsat (30 m) to MODIS (250 m) scale. *Journal of Hydrology* 370 (1-4), 122 – 138. [165](#)
- Huete, A., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25 (3), 295 – 309. [23](#), [54](#), [173](#)
- Huete, A., Hua, G., Qi, J., Chehbouni, A., van Leeuwen, W., 1992. Normalization of multidirectional red and NIR reflectances with the SAVI. *Remote Sensing of Environment* 41 (2-3), 143 – 154. [173](#)
- Idso, S., Jackson, R., Jr., P. P., Reginato, R., Hatfield, J., 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology* 24, 45–55. [18](#)
- Ionescu, E., Budan, C., Calistru, G., Pomohaci, N., Pituc, P., Popa, V., Vladu, C., 1978. Parité du développement de l'appareil racinaire de la vigne induite par le spécifique écologique du sol. In : In : *Compte-Rendu du 1er Symposium International Ecologie de la Vigne*, 209-217. [9](#)
- Jackson, R., Hatfield, J., Reginato, R., Idso, S., Jr., P. P., 1983. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements. *Agricultural Water Management* 7 (1-3), 351 – 362, plant production and management under drought conditions. [172](#)
- Jackson, R., Idso, S., Reginato, R., Printer, P., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources* 17, 1133–1138. [18](#)
- Jacob, F., Olioso, A., Gu, X. F., Su, Z., B., S., 2002a. Mapping surface fluxes using airborne visible near infrared, thermal infrared remote sensing data and a spatialized surface energy balance model. *Agronomie* 22, 669–680. [68](#), [135](#), [140](#), [146](#), [149](#), [159](#), [164](#), [165](#), [172](#), [189](#), [193](#)
- Jacob, F., Olioso, A., Weiss, M., Baret, F., Hautecoeur, O., 2002b. Mapping short-wave albedo of agricultural surfaces using airborne polder data. *Remote Sensing of Environment* 80 (1), 36 – 46. [32](#)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Jacob, F., Oliosio, A., Weiss, M., Baret, F., Hautecoeur, O., 2002c. Mapping short-wave albedo of agricultural surfaces using airborne POLDER data. *Remote Sensing of Environment* 80, 36–46. [139](#), [172](#), [210](#)
- Jacob, F., Schmugge, T., Oliosio, A., French, A., Courault, D., Ogawa, K., Petitcolin, F., Chehbouni, G., Pinheiro, A., Privette, J., 2008. Modeling and inversion in thermal infrared remote sensing over vegetated land surfaces. In : Liang, S. (Ed.), *Advances in Land Remote Sensing : System, Modeling, Inversion and Application*. Springer, pp. 245–292. [139](#), [169](#)
- Jiang, G.-M., Li, Z.-L., Nerry, F., 2006. Land surface emissivity retrieval from combined mid-infrared and thermal infrared data of msg-seviri. *Remote Sensing of Environment* 105 (4), 326 – 340. [25](#)
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Gillespie, A., Sabol, D., Gustafson, W. T., 2006. Improved land surface emissivities over agricultural areas using aster ndvi. *Remote Sensing of Environment* 103, 474 – 487. [25](#)
- Jones, H., 1980. *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. Wiley, New York, USA., Ch. Interaction and integration of adaptive responses to water stress : the implications of an unpredictable environment, p. 353–365. [9](#)
- Jong, R. D., Shaykewich, F., 1981. A soil water budget model with a nearly impermeable layer. *Canadian Journal of Soil Science* 61, 361–371. [28](#)
- Kalma, J. D., McVicar, T. R., McCabe, M. F., 2008. Estimating land surface evaporation : A review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics* Volume 29, Numbers 4-5, 421–469. [25](#), [134](#), [149](#), [159](#), [161](#), [164](#), [165](#), [188](#), [189](#), [190](#), [191](#), [209](#)
- Kar, G., Kumar, A., 2007. Surface energy fluxes and crop water stress index in groundnut under irrigated ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology* 146, 94–106. [19](#)
- Kustas, W., Choudhury, B., Moran, M., Reginato, R., Jackson, R., Gay, L., Weaver, H., 1989. Determination of sensible heat flux over sparse canopy using thermal infrared data. *Agricultural and Forest Meteorology* 44 (3-4), 197 – 216. [19](#)

- Kustas, W. P., Li, F., Jackson, T. J., Prueger, J. H., MacPherson, J. I., Wolde, M., 2004. Effects of remote sensing pixel resolution on modeled energy flux variability of croplands in iowa. *Remote Sensing of Environment* 92 (4), 535 – 547, 2002 Soil Moisture Experiment (SMEX02). [32](#)
- Kustas, W. P., Norman, J. M., 1999. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology* 94 (1), 13 – 29. [32](#)
- Kustas, W. P., Zhan, X., Schmugge, T. J., 1998. Combining optical and microwave remote sensing for mapping energy fluxes in a semiarid watershed. *Remote Sensing of Environment* 64 (2), 116 – 131. [27](#)
- Lagouarde, J., Loustau, D., Courault, D., Tournebize, R., 1995. Actes de l'école chercheurs INRA en bioclimatologie. Ch. Le bilan d'énergie d'un couvert végétal., pp. 383–404. [26](#)
- Lascano, R., Baumhardt, R., Lipe, W., 1992. Measurement of water flow in young grapevines using the stem heat balance method. *Am. J. Enol. Vitic.* 43, 159–165. [98](#)
- Lascano, R., Hatfield, J., van Bavel, C., 1986. Field calibration of neutron meters using a two-probe, gamma density gauge. *Soil Science* 141, 442–477. [83](#)
- Lebon, E., Dumas, V., Pieri, P., Schultz, H. R., 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology* 30, 699–710. [9](#), [48](#), [164](#)
- Li, F., Kustas, W., Prueger, J., Neale, C., Jackson, J., 2005. Utility of remote sensing based two-source energy balance model under low and high vegetation cover conditions. *Journal of Hydrometeorology*, 878–891. [32](#)
- Li, F., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Jackson, T. J., Bindlish, R., Prueger, J. H., 2006. Comparing the utility of microwave and thermal remote-sensing constraints in two-source energy balance modeling over an agricultural landscape. *Remote Sensing of Environment* 101 (3), 315 – 328. [32](#)
- Li, F., Lyons, T., 1999. Estimation of regional evapotranspiration through remote sensing. *Journal of applied meteorology* 38, 1644–1654. [178](#), [197](#), [206](#)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Li, S., Kang, S., Li, F., Zhang, L., Zhang, B., 2008. Vineyard evaporative fraction based on eddy covariance in an arid desert region of northwest china. *Agricultural and Water Management*. [98](#)
- Li, S., Tong, L., Li, F., Zhang, L., Zhang, B., Kang, S., 2009. Variability in energy partitioning and resistance parameters for a vineyard in northwest china. *Agricultural Water Management* 96 (6), 955 – 962. [164](#), [199](#)
- Liang, S., 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I : Algorithms. *Remote Sensing of Environment* 76 (2), 213 – 238. [139](#), [172](#)
- Liang, S., Shuey, C. J., Russ, A. L., Fang, H., Chen, M., Walthall, C. L., Daughtry, C. S. T., Hunt, R., 2003. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo : Ii. validation. *Remote Sensing of Environment* 84 (1), 25 – 41. [66](#), [67](#), [240](#)
- Liu, S., Lu, L., Mao, D., Jia, L., 2007. Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 769–783. [199](#)
- Luquet, D., A. Bégué, A., Vidal, A., Clouvel, P., Dautzat, J., Oliosio, A., Gu, X. F., Tao, Y., 2003. Using multidirectional thermography to characterize water status of cotton. *Remote Sensing of Environment* 84 (3), 411 – 421. [178](#)
- McCabe, M. F., Wood, E. F., 2006. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing of Environment* 105, 271 – 285. [33](#)
- Menenti, M., Bastiaanssen, W., van Eick, D., el Karim, M. A. A., 1989. Linear relationships between surface reflectance and temperature and their application to map actual evaporation of groundwater. *Advances in Space Research* 9 (1), 165 – 176. [55](#)
- Menenti, M., Choudhury, B., 1993. Parameterization of land surface evapotranspiration using a location- dependent potential evapotranspiration and surface temperature range. In : et al., H. B. (Ed.), *Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales*. IAHS, pp. 561–568. [31](#), [165](#)

- Merlin, O., Duchemin, B., Hagolle, O., Jacob, F., Coudert, B., Chehbouni, G., Dedieu, G., Garatuza, J., Kerr, Y., 2010. Disaggregation of modis surface temperature over an agricultural area using time series of formosat-2 images. *Remote Sensing of Environment Under revision*, -. [162](#), [166](#), [191](#)
- Mohamed, Y. A., Bastiaanssen, W. G. M., Savenije, H. H. G., 2004. Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques. *Journal of Hydrology* 289 (1-4), 145 – 164. [32](#)
- Montaigne, E., Couderc, J., d’Hauteville, F., Hannin, H., 2006. Enjeux, stratégies et pratiques dans la filière vitivinicole. [5](#)
- Monteith, J., 1965. Evaporation and environment. In : 19th Symposia of the Society for Experimental Biology vol. 19. University Press, Cambridge pp 205-234. [30](#)
- Montero, F., Meliab, J., Brasa, A., Segarra, D., Cuesta, A., Lanjeri, S., 1999. Assessment of vine development according to available water resources by using remote sensing in la Mancha, Spain. *Agricultural Water Management* 40, 363–375. [164](#)
- Moran, M., Clarke, T., Inoue, Y., Vidal, A., 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 49 (3), 246 – 263. [31](#), [37](#), [56](#), [58](#), [135](#), [165](#), [173](#), [175](#), [178](#), [210](#)
- Moran, M., Rahman, A., Washburne, J., Goodrich, D., Weltz, M., Kustas, W., 1996. Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology* 80 (2-4), 87 – 109. [165](#)
- Morlat, R., Penavayre, M., Jacquet, A., Asselin, C., Lemaitre, C., 1992. Influences des terroirs sur le fonctionnement hydrique et la photosynthèse de la vigne en millésime exceptionnellement sec (1990), conséquences sur la maturation du raisin. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 26, 197–220. [9](#), [11](#), [96](#), [98](#)
- Moussa, R., Chahinian, N., Bocquillon, C., 2007. Distributed hydrological modelling of a Mediterranean mountainous catchment - model construction and multi-site validation. *Journal of Hydrology* 337 (1-2), 35 – 51. [134](#), [163](#)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Moya, I., Camenen, L., Evain, S., Goulas, Y., Cerovic, Z. G., Latouche, G., Flexas, J., Ounis, A., 2004. A new instrument for passive remote sensing : 1. measurements of sunlight-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment* 91 (2), 186 – 197. [164](#)
- Mu, Q., Heinsch, F. A., Zhao, M., Running, S. W., 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on modis and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment* 111, 519 – 536. [30](#)
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Engineering* 12, 513–522. [78](#)
- Neuman, S., Feddes, R., E.Bresler, 1974. Finite element simulation of flow in saturated-unsaturated soils considering water uptake by plants. Tech. rep., Third Annual Report, Project No. A10-SWC-77. [79](#), [171](#)
- Norman, J. M., Kustas, W. P., Humes, K. S., 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 77 (3-4), 263 – 293, thermal Remote Sensing of the Energy and Water Balance over Vegetation. [31](#), [165](#)
- Ogawa, K., Schmugge, T., Jacob, F., French, A., 2003. Estimation of land surface window (8-12  $\mu\text{m}$ ) emissivity from multi-spectral thermal infrared remote sensing - a case study in a part of sahara desert. *Geophysical Research Letters* 30(2), 1067. [67](#), [140](#), [172](#)
- Ojeda, H., 1999. Influence de la contrainte hydrique sur la croissance du péricarpe et sur l'évolution des phenols des baies de raisin (*vitis vinifera* l.) cv.syrah. Ph.D. thesis, Ecole Supérieure Agronomique de Montpellier. [8](#)
- Ojeda, H., Deloire, A., Wang, Z., Carbonneau, A., 2004. Determinación y control del estado hídrico de la vid. efectos morfológicos y fisiológicos de la restricción hídrica en vides. *Viticultura/Enología Profesional* 90, 27–43. [8](#)
- Oliver, H., Sene, K., 1992. Energy and water balances of developing vines. *Agricultural and Forest Meteorology* 61 (3-4), 167 – 185. [96](#), [164](#)

- Ortega-Farias, S., Carrasco, M., Oliosio, A., Acevedo, C., Poblete, C., 2007. Latent heat flux over cabernet sauvignon vineyard using the shuttleworth and wallace model. *Irrigation Science* 25 number 2, 161–170. [98](#), [114](#), [134](#), [164](#), [177](#), [211](#)
- Patakas, A., Noitsakis, B., Chouzouri, A., 2005. Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106, 253–259. [16](#)
- Pellegrino, A., 2003. Elaboration d'un outil de diagnostic du stress hydrique utilisable sur la vigne en parcelle agricole par couplage d'un modèle de bilan hydrique et d'indicateurs de fonctionnements de la plante. Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. [95](#), [249](#)
- Pellegrino, A., Goze, E., Lebon, E., Wery, J., 2006. A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. *European Journal of Agronomy* 25 (1), 49 – 59. [164](#)
- Penuelas, J., Filella, I., 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science* 3 (4), 151 – 156. [24](#)
- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., Savé, R., 1993. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of water status. *International Journal of Remote Sensing* 14, 1887–1905. [24](#)
- Quattrochi, D. A., Luvall, J. C., 1999. Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes : methods and applications. *Landscape Ecology* 15, 577–598. [25](#)
- Reynier, A., 2003. Manuel de viticulture, 9ème Edition. [8](#)
- Richards, L., 1931. Capillary conduction of liquids through porous media. *Physics* 1, 318–333. [77](#), [170](#)
- Riou, C., Pieri, P., Clech, B. L., 1994. Consommation d'eau de la vigne en conditions hydriques non limitantes. formulation simplifiée de la transpiration. *Vitis* 33, 109–115. [35](#), [75](#), [85](#), [98](#), [138](#), [171](#)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Riou, C., Pieri, P., Valancogne, C., 1987. Variation de la vitesse du vent a l'intérieur et au-dessus d'une vigne. *Agricultural and Forest Meteorology* 39 (2-3), 143–154. [74](#)
- Riou, C., Valancogne, C., Pieri, P., 1989. Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne - verification expérimentale. *Agronomie* 9, 441 – 450. [22](#), [35](#), [75](#), [76](#), [81](#)
- Ristic, R., Iland, P., 2005. Relationships between seed and berry development of vitis vinifera l. cv shiraz : Development changes in seed morphology and phenolic composition. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 11 Issue1, 43–58. [8](#)
- Roerink, G. J., Su, Z., Menenti, M., 2000. S-SEBI : A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B : Hydrology, Oceans and Atmosphere* 25 (2), 147 – 157. [32](#), [37](#), [54](#), [135](#), [140](#), [165](#), [173](#), [174](#), [175](#), [189](#), [190](#), [210](#)
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J., Deering, D., Harlan, J., 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Tech. rep., NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA, pp. 1-371. [54](#)
- Sabol, D. E., Jr., Gillespie, A. R., Abbott, E., Yamada, G., 2009. Field validation of the aster temperature-emissivity separation algorithm. *Remote Sensing of Environment* 113 (11), 2328 – 2344. [169](#)
- Salva, G., Zanardo, D., 2004. L'alimentation hydrique de la vigne et ses incidences sur les caractéristiques de la récolte. *Revue Française d'Œnologie* 209, 10–11. [8](#)
- Sanchez, J., Kustas, W., Caselles, V., Anderson, M., 2008. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment* 112, 1130 – 1143. [165](#)
- Sayah, M., 2008. Climatologie du bassin versant de roujan sur la periode 1992-2008. Master's thesis, Montpellier Supagro. [40](#), [41](#), [249](#)
- Schultz, H., 2003. Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown vitis vinifera l. cultivars during drought. *Plant, Cell and Environment* 26, 1393–1405. [8](#), [10](#)

- Seguin, B., Becker, F., Phulpin, T., Guyot, G., Kerr, Y., 1999. IRSUTE : a minisatellite project for land surface heat flux estimation from field to regional scale. *Remote Sensing of Environment* 68, 357–369. [164](#), [188](#), [191](#)
- Seguin, B., Itier, B., 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal ir data. *International JOurnal of Remote Sensing* 4, 371–383. [147](#)
- Seguin, G., 1986. "terroirs" and pedology of vinegrowing. *Experientia* 42, 861–873. [11](#)
- Sene, K., 1994. Parameterisations for energy transfers from a sparse vine crop. *Agricultural and Forest Meteorology* 71 (1-2), 1 – 18. [164](#), [178](#), [193](#), [199](#)
- Serrano, L., Ustin, S. L., Roberts, D. A., Gamon, J. A., Peñuelas, J., 2000. Deriving water content of chaparral vegetation from aviris data. *Remote Sensing of Environment* 74 (3), 570 – 581. [23](#), [24](#)
- Shulze, E., Cermak, J., Matyssek, R., Penka, M., Zimmermann, R., Vasicek, F., Gries, F., Kucera, W., 1985. Canopy transpiration and water flux in the xylem flow, porometer and cuvette measurements. *Oecologia* 66, 475–483. [16](#)
- Shuttleworth, W., Wallace, J., 1985. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 111, 839–855. [31](#)
- Sims, D. A., Gamon, J. A., 2003. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance : a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment* 84 (4), 526 – 537. [24](#)
- Simunek, J., Sejna, M., van Genuchten, M., Sejna, M., 2008. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 4.0. Dep. of Environmental Sciences, University of California, Riverside. [21](#), [35](#), [76](#), [170](#), [211](#)
- Simunek, J., van Genuchten, M. T., 2008. Modeling Nonequilibrium Flow and Transport Processes Using HYDRUS. *Vadose Zone Journal* 7, 782–797. [138](#)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Smart, R., 1973. Sunlight interception by vineyards. *American Journal of Enology and Viticulture* 24, 141–147. [74](#), [76](#)
- Smart, R., Coombe, B., 1983. Water deficits and plant growth. Ch. Water relation of grapevines, pp. 137–196. [9](#)
- Sobrino, J., Gomez, M., Jimenez-Munoz, J., Olioso, A., 2007. Application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA-AVHRR images for the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment* 110 (2), 139 – 148. [56](#), [135](#), [144](#), [148](#), [159](#), [175](#), [189](#), [190](#)
- Sobrino, J., Gomez, M., Jimenez-Munoz, J., Olioso, A., Chehbouni, G., 2005. A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data : Application to the DAISEX campaigns. *Journal of Hydrology* 315 (1-4), 117 – 125. [33](#), [56](#), [135](#), [140](#), [144](#), [165](#), [173](#), [175](#), [189](#), [190](#)
- Spano, D., Snyder, R. L., Duce, P., U, K. T. P., 2000. Estimating sensible and latent heat flux densities from grapevine canopies using surface renewal. *Agricultural and Forest Meteorology* 104 (3), 171 – 183. [164](#)
- Stylinski, C., Gamon, J., Oechel, W., 2002. Seasonal patterns of reflectance indices, carotenoid pigments and photosynthesis of evergreen chaparral species. *Oecologia* 131, 366–374. [24](#)
- Su, Z., 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences* 6(1), 85–99. [33](#), [68](#), [165](#)
- Tardieu, F., Simonneau, T., 1998. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand : Modelling isohydric and anisohydric behaviours. *Journal of Experimental Botany* 49, 419–432. [10](#)
- Tassinari, C., Lagacherie, P., Bouzigues, R., Legros, J. P., 2002. Estimating soil water saturation from morphological soil indicators in a pedologically contrasted mediterranean region. *Geoderma* 108 (3-4), 225 – 235. [83](#)
- Teixeira, A., Bastiaanssen, W., Ahmad, M., Bos, M., 2008. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle

- Sao Francisco River basin, Brazil : Part A : Calibration and validation. Agricultural and Forest Meteorology In Press, Corrected Proof, -. [165](#)
- Thom, A., 1975. J.L Monteith Vegetation and the Atmosphere. Academic press, London, Ch. Momentum, mass and heat exchange of plant communities, pp. 57–109. [177](#)
- Thome, K., Arai, K., Hook, S., Kieffer, H., Lang, H., Matsunaga, T., Ono, A., Palluconi, F., Sakuma, H., Slater, P., Takashima, T., Tonooka, H., Tsuchida, S., Welch, R. M., Zalewski, E., Jul. 1998. ASTER preflight and inflight calibration and the validation of Level 2 products. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 36, 1161–1172. [139](#), [169](#), [193](#)
- Timmermans, W. J., Kustas, W. P., Anderson, M. C., French, A. N., 2007. An inter-comparison of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Two-Source Energy Balance (TSEB) modeling schemes. Remote Sensing of Environment 108 (4), 369 – 384. [68](#), [165](#), [189](#)
- Trambouze, W., 1996. Caractérisation et éléments de modélisation de l'évapotranspiration réelle de la vigne à l'échelle de la parcelle. Ph.D. thesis, ENSAM, INRA. [7](#), [9](#), [59](#), [85](#), [86](#), [87](#), [96](#), [98](#), [108](#), [240](#)
- Trambouze, W., Bertuzzi, P., Voltz, M., 1998. Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a row-cropped vineyard. Agricultural and Forest Meteorology 91 (3-4), 193 – 208. [16](#), [164](#), [188](#), [211](#)
- Trambouze, W., Voltz, M., 2001. Measurement and modelling of the transpiration of a mediterranean vineyard. Agricultural and Forest Meteorology 107 (2), 153 – 166. [87](#), [136](#), [138](#), [139](#), [167](#), [168](#), [170](#), [171](#), [177](#)
- Tucker, C., 1979. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. Tech. rep., US National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md, NASA-TM-80291. [23](#)
- van den Hurk, B., 2001. Energy balance based surface flux estimation from satellite data, and its application for surface moisture assimilation. Meteorology and Atmospheric Physics 76, 43–52. [31](#), [32](#)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- van der Tol, C., Verhoef, W., Timmermans, J., Verhoef, A., Su, Z., 2009. An integrated model of soil-canopy spectral radiances, photosynthesis, fluorescence, temperature and energy balance. *Biogeosciences* 6 (12), 3109–3129. [165](#)
- van Genuchten, M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892–898. [78](#), [139](#), [171](#)
- van Leeuwen, C., Seguin, G., 1994. Incidents de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (vitis vinifera variété cabernet franc, saint-emilion 1990). *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 28 (2), 81–110. [8](#), [13](#)
- Verhoef, A., Bruin, H. A. R. D., van den Hurk, B. J. J. M., 1996. Some Practical Notes on the Parameter  $kB^{-1}$  for Sparse Vegetation. *Journal of applied meteorology* 36, 560–572. [178](#)
- Verhoef, W., Jia, L., Xiao, Q., Su, Z., 2007. Unified optical - thermal four - stream radiative transfer theory for homogeneous vegetation canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45 (6), 1808–1822. [135](#), [165](#)
- Verstraeten, W. W., Veroustraete, F., Feyen, J., 2005. Estimating evapotranspiration of european forests from noaa-imagery at satellite overpass time : Towards an operational processing chain for integrated optical and thermal sensor data products. *Remote Sensing of Environment* 96 (2), 256 – 276. [56](#), [135](#), [140](#), [173](#), [174](#), [175](#), [189](#), [190](#)
- Vidal, A., Devaux-Ros, C., 1995. Evaluating forest fire hazard with a landsat tm derived water stress index. *Agricultural and Forest Meteorology* 77 (3-4), 207 – 224, thermal Remote Sensing of the Energy and Water Balance over Vegetation. [178](#), [190](#)
- Voltz, M., Albergel, J., 2002. Omere : Observatoire méditerranéen de l'environnement rural et de l'eau - impact des actions anthropiques sur les transferts de masse dans les hydrosystèmes méditerranéens ruraux, proposition d'observatoire de recherche en environnement. Tech. rep., Ministère de la Recherche, pp25. [39](#), [72](#)

- Wang, Q., Takahashi, H., 1999. A land surface water deficit model for an arid and semiarid region : Impact of desertification on the water deficit status in the loess plateau, china. *Journal of Climate* 12, 244 – 257. [178](#)
- Wang, Z.-P., Deloire, A., Carbonneau, A., Federspiel, B., Lopez, F., 2003. An in vivo experimental system to study sugar phloem uploading in ripening grape berries during water deficiency stress. *Annals of Botany* 92, 523–528. [9](#)
- Weiss, A., Allen, J., 1976. Air-flow patterns in vineyard rows. *Agricultural Meteorology* 16, 329–342. [74](#)
- Weiss, M., Baret, F., Leroy, M., Bégué, A., Hautecoeur, O., Santer, R., 1999. Hemispherical reflectance and albedo estimates from the accumulation of across-track sun-synchronous satellite data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 104, 221–232. [66](#), [67](#), [240](#)
- Wesseling, J., 1991. Meerjarige simulaties van grondwateronttrekking voor verschillende bodemprofielen, grondwatertrappen en gewassen met het model swatre. rep. 152. Tech. rep., Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands. [87](#)
- Williams, J., Jones, C., Dyke, P., 1984. A modelling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transaction of the ASAE* 27, 129–144. [20](#)
- Winkel, T., Méthy, M., Thénot, F., 2002. Radiation use efficiency chlorophyll fluorescence, and reflectance indices associated with ontogenic changes in water-limited chenopodium quinoa leaves. *Photosynthetica* 40, 227–232. [24](#)
- Wu, W., Hall, C. A., Scatena, F. N., Quackenbush, L. J., 2006. Spatial modelling of evapotranspiration in the luquillo experimental forest of puerto rico using remotely-sensed data. *Journal of Hydrology* 328, 733– 752. [30](#)
- Xue, Y., Sellers, P., Kinter, J. L. I., Shukla, J., 1991. A simplified biosphere model for global climate studies. *Journal of Climate* 4, 345–364. [30](#)
- Yunusa, I., Walker, R., Loveys, B., Blackmore, D., 2000. Determination of transpiration in irrigated grapevines : comparison of the heat-pulse technique with gravimetric and micrometeorological methods. *Irrigation Science* 20, 1–8. [16](#)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Zarco-Tejada, P., Berjon, A., Lopez-Lozano, R., Miller, J., Martin, P., Cachorro, V., Gonzalez, M., de Frutos, A., 2005. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices : Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sensing of Environment* 99 (3), 271 – 287. [134](#)
- Zarco-Tejada, P. J., Pushnik, J. C., Dobrowski, S., Ustin, S. L., 2003. Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double-peak red-edge effects. *Remote Sensing of Environment* 84 (2), 283 – 294. [24](#)
- Zufferey, V., Murisier, F., 2006. Distance interligne et hauteur de la haie foliaire en viticulture 2. incidence sur le statut hydrique de la vigne. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture Horticulture* 38, 161–164. [10](#)
- Zwart, S. J., Bastiaanssen, W. G., 2007. Sebal for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems. *Agricultural Water Management* 89 (3), 287 – 296. [164](#), [165](#)

# Liste des figures

1.1	Schéma synthétique du cycle de la vigne, les lettres P, D, F, A, M et Ch, correspondent aux stades phénologiques : pleurs, débourrement, floraison, aoûtement (véraison), maturité et chute des feuilles, respectivement.	7
1.2	Diagramme de la démarche de travail adopté pour la thèse . . . . .	36
2.1	Localisation et représentation du bassin versant de la Peyne avec son réseau hydrographique. . . . .	40
2.2	Carte des pentes et histogramme des distributions des pentes sur milieu viticole du bassin versant de la Peyne en % . . . . .	44
2.3	Carte d'occupation des sols du bassin versant de la Peyne (dans laquelle les zones urbaines sont sans couleurs). . . . .	47
2.4	Résolutions spectrale et spatiale du capteur ASTER et LANDSAT représentées sur le spectre de transmission atmosphérique (courbe en bleue). . . . .	50
2.5	Chaîne de traitement de l'information ASTER pour fournir des cartes adaptées au contexte de l'étude. . . . .	52
2.6	Principes du S-SEBI : représentation schématique de la relation entre la température de surface et l'albédo. Les droites $LET_{max}(\alpha)$ et $H_{max}(\alpha)$ correspondent aux situations de surface parfaitement sèche (LE=0) et parfaitement alimentées en eau (H=0). . . . .	55
2.7	Illustration du WDI théorique calculé par la méthode du trapèze. Les points 1-4 correspondent aux vertex théoriques représentant les situations extrêmes pour le biome représenté. . . . .	57
2.8	Localisation des sites représentant la variabilité des conditions hydriques du bassin de la Peyne sélectionnés pour la réalisation des mesures terrain.	63

## LISTE DES FIGURES

---

2.9	Régression entre l'ensemble des albédos calculés par la méthode de <a href="#">Liang et al. (2003)</a> et la méthode <a href="#">Weiss et al. (1999)</a> . Les coefficients pour la pente et offset sont représentés ainsi que l'erreur RMSE et l'erreur relative RRMSE. . . . .	67
2.10	Carte et histogramme du rayonnement net du 22 juin 2008 ( $W.m^2$ ) sur le bassin versant de la Peyne. . . . .	69
2.11	Station de flux par covariances turbulentes sur le site 7. . . . .	72
2.12	Représentation de la fonction de réponse au stress hydrique $a(h)$ défini par <a href="#">Feddes et al. (1978)</a> . Les valeurs de $h_1, h_2, h_3, h_4$ sont définies dans le texte . . . . .	78
2.13	Dispositif expérimental sur le bassin versant de Roujan . . . . .	81
2.14	Localisation des dispositifs de mesure sur le bassin versant de la Peyne. Les cercles rouges représentent les sites "chaud", les cercles verts les sites "moyen" et les cercles bleue les sites "froids". Les cercles doubles représentent les sites où une station de flux a été installée. . . . .	82
2.15	Moyenne sur l'ensemble des sites de la variation des teneurs en eau volumique brute et relative (Theta), en fonction de la profondeur. En barres sont représentées les valeurs maximales et minimales rencontrés. Les lignes en pointillées correspondent à 10% de variation de teneur en eau. . . . .	86
2.16	Densité de la distribution verticale des racines adoptée, (d'après <a href="#">Trambouze (1996)</a> et <a href="#">Bsaibes (2007)</a> ). . . . .	87
3.1	Chroniques des précipitations et de l'ET0 référence pour les années hydrologiques (du 1 <sup>er</sup> septembre au 31 août) concernés par l'étude (2001-2002, 2004-2005, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008). . . . .	91
3.2	Piézométrie des sites à nappe du bassin versant de la Peyne. . . . .	92
3.3	Piézométrie des sites à nappes de la dépression de Roujan (Site 6). . . . .	94
3.4	Climatologie de l'évapotranspiration réelle mesuré par covariances turbulentes pendant la période des simulations sur les sites 6 et 7. Dans la figure supérieure sont représentées les variables météorologiques pluie et évapotranspiration potentielle de référence. La figure inférieure représente la fraction évaporative pour la même période. . . . .	97

3.5	Chroniques des flux mesurés par covariances turbulentes par la station du Site 6 sur deux périodes contrastées en termes de condition hydrique. En rouge est représenté le flux de chaleur sensible $H$ , en bleu le flux de chaleur latente $\lambda E$ et en vert la fraction évaporative, égale au rapport $\lambda E / H + \lambda E$ . . . . .	100
3.6	Chroniques des flux mesuré par covariances turbulentes par la station du site 7 sur deux période contrastées en termes de condition hydrique. En rouge est représenté le flux de chaleur sensible $H$ , en bleu le flux de chaleur latente $\lambda E$ , en orange le flux chaleur dans le sol $G_0$ et en vert la fraction évaporative $\lambda E / H + \lambda E$ . . . . .	101
3.7	Comparaison des profils d’humidité des sols mesuré (a) et simulé (b) par HYDRUS-1D sur le site 7. . . . .	103
3.8	Calage du modèle HYDRUS-1D sur les site 7 : comparaison des stocks en eau mesurés (profils neutroniques) et simulés par HYDRUS-1D. . . . .	106
3.9	Évolution du stock en eau mesuré et simulé sur le site 7 . . . . .	106
3.10	Calage du modèle HYDRUS-1D sur tout les points de mesure du Site 6 : comparaison des stocks en eau mesurés (profils neutroniques) et simulés par HYDRUS-1D. . . . .	107
3.11	Erreur (RMSE) et erreur relative (RRMSE) du calage du modèle HYDRUS-1D sur tout les points de mesure selon la profondeur. Les lignes pointillées représentent la valeur moyenne de l’erreur tout points confondus et les barres d’erreur, l’écart-type de l’erreur pour chaque profondeur. . . . .	109
3.12	Évolution du stock hydrique et évolution de l’erreur relative (RMSE relatif) sur 150 cm de profondeur pour tous les sites ”la Payne” avec les chroniques de précipitations, durant toute la période de simulation. En pointillés sont représenté les sites à nappes (permanente ou intermittente).111	111
3.13	Évolution du stock hydrique et évolution de l’erreur relative (RMSE relatif) sur 150 cm de profondeur pour tous les points de mesure de la dépression de Roujan (Site 6) avec les chroniques de précipitations, durant toute la période de simulation. En pointillés sont représenté les parcelles à nappes (permanente ou intermittente). La parcelle aw81 et aw83 correspondent à de la friche et du blé. . . . .	113

## LISTE DES FIGURES

---

- 3.14 Validation des ETR horaires diurnes simulées par le modèle HYDRUS-1D avec les ETR obtenues par covariances turbulentes sur le Site 6 (a) et sur le site 7 (b). Le trait continu représente la droite de régression, les traits en pointillés représentent les régressions des tolérances maximales et minimales des mesures d’ETR par covariances turbulentes. . . . . 115
- 3.15 Comparaison de l’ETR simulée par HYDRUS-1D avec l’ETR mesurée par covariances turbulentes sur une période à forte contrainte hydrique sur le site 7. . . . . 117
- 3.16 Validation des ETR journalières diurnes simulées par le modèle HYDRUS-1D avec les ETR obtenues par covariances turbulentes sur le Site 6 (a) et sur le site 7 (b). Le trait continu représente la droite de régression, les traits en pointillés représentent les régressions des tolérances maximales et minimales des mesures d’ETR par covariances turbulentes. . . . . 119
- 3.17 Chroniques des ETR simulées par HYDRUS-1D et mesuré par covariances turbulentes, sur la dépression de Roujan (Site 6), du haut en bas : ensemble de la période, été 2007, printemps 2008 et été 2008. . . . 121
- 3.18 Chroniques d’ETR simulé par HYDRUS-1D et validé par par covariances turbulentes, sur le site 7 du haut en bas ; ensemble de la période, été 2007, et printemps 2008. . . . . 122
- 3.19 Validation des ETR journalières simulées par le modèle HYDRUS-1D avec les ETR mesurés par covariances turbulentes sur toutes les périodes de développement végétatif de la vigne simulées (01/08/07 au 15/10/07 et 13/03/08 au 15/10/08) sur les sites 6 et 7. Le trait continu représente la droite de régression, les traits en pointillés représentent les régressions des tolérances maximales et minimales des mesures d’ETR par covariances turbulentes. . . . . 124
- 3.20 Chroniques des ETR simulés par HYDRUS-1D sur les différents sites de mesure de la dépression de Roujan (Site 6), du haut en bas période total, été 2007, printemps 2008 et été 2008. En pointillé sont représentées les sites à nappe. . . . . 126

3.21 Chroniques d'ETR simulé par HYDRUS-1D sur l'ensemble des sites du bassin versant de la Peyne. Du haut en bas période total, été 2007, printemps 2008 et été 2008. En pointillé sont représentées les sites à nappe. . . . .	127
4.1 Daily ET map over the Peyne watershed derived from ASTER imagery along with S-SEBI on July, 15, 2008. Validation sites are labeled 1 to 7, and double circles correspond to sites with EC measurements. . . . .	142
4.2 Comparison, over the seven sites, of ASTER / S-SEBI daily ET estimates against those derived from HYDRUS-1D simulations. R is correlation coefficient, Slope and Offset are from linear regression between predictions and references (continuous line). Dashed line is the 1 :1 line. . . . .	144
4.3 Validation pour la période d'expérimentation aux moments des passages satellite, à partir des mesures de terrain instantanées, du rayonnement net obtenu par imagerie ASTER. . . . .	147
4.4 Évolution annuelle du ratio $Cdi$ entre le rayonnement net journalier ( $Rn_d$ ) et instantané ( $Rn_i$ ), ( $Cdi = Rn_d/Rn_i$ ). Les valeurs ont été obtenues pour chaque jour de passage ASTER, à partir des mesures de rayonnement net sur le Site 6 entre août 2005 à novembre 2008, et à partir d'une régression polynomiale d'ordre 2 (courbe en pointillés). Le coefficient de détermination ( $r^2$ ) ainsi que les coefficients de la régression polynomiale d'ordre 2 sont indiqués. . . . .	148
4.5 Chroniques des ETR obtenues par S-SEBI (en cercles rouges) et validées par HYDRUS-1D (lignes noires continues), sur les sites 1, 2, 3 et 4 pour toute la période de simulation. . . . .	151
4.6 Chroniques des ETR obtenues par S-SEBI (en cercles rouges) et validées par HYDRUS-1D (lignes noires continues), sur les sites 5, 6N, 6S et 7 pour toute la période de simulation. . . . .	152

## LISTE DES FIGURES

---

- 4.7 Cartes des ETR pour la date du 15/09/2007 correspondante à une période de contrainte hydrique et pour la date du 24/07/2008 correspondant à une période où les sols sont bien alimentés en eau. En cercles sont représentés les sites d'étude. Pour une meilleure visualisation des dynamiques spatiales, ces dernières ont été réduites aux intervalles apparaissant dans la légende (échelle de couleur). Il en résulte des zones de couleur blanche qui correspondent à des valeurs en dehors des intervalles choisis. . . . . 153
- 4.8 Cartes des ETR pour la date du 02/11/2007 correspondante à une période sans végétation et pour la date du 29/06/2002 correspondant à une période où les sols sont bien alimentés en eau (archive). En cercles sont représentés les sites d'étude. Pour une meilleure visualisation des dynamiques spatiales, ces dernières ont été réduites aux intervalles apparaissant dans la légende (échelle de couleur). Il en résulte des zones de couleur blanche qui correspondent à des valeurs en dehors des intervalles choisis. . . . . 155
- 4.9 Cartes des ETR maximales et minimales sur toute la période de pleine végétation de la vigne(juillet et octobre) pour les données comprenant période d'expérimentation et les données archives. En cercles sont représentés les sites d'étude. Pour une meilleure visualisation des dynamiques spatiales, ces dernières ont été réduites aux intervalles apparaissant dans la légende (échelle de couleur). Il en résulte des zones de couleur blanche qui correspondent à des valeurs en dehors des intervalles choisis. . . . . 156

- 4.10 Carte des coefficients de variation sur l'ensemble des ETR obtenues pour la période de plein développement végétatif de la vigne (fin juin à octobre) pour les données comprenant période d'expérimentation et les données archives. En cercles sont représentés les sites d'étude. Pour une meilleure visualisation des dynamiques spatiales, ces dernières ont été réduites aux intervalles apparaissant dans la légende (échelle de couleur). Il en résulte des zones de couleur blanche qui correspondent à des valeurs en dehors des intervalles choisis. Ces zones correspondent à des changements d'occupation du sol majeure sur la période où l'ensemble des images ASTER a été collecté (archives+expérimentation, de 2002 à 2008) . . . . . 158
- 5.1 Typical example of the scatterplots we obtained for the surface temperature (y-abscissa) versus albedo (x-abscissa) diagram used to compute evaporative fraction from S-SEBI. Blue points correspond to the (temperature-albedo) pairs for minimum temperature values of each albedo class, to be used for computing the lower limit through linear regression. Red points correspond to the (temperature-albedo) pairs for maximum temperature values of each albedo class, to be used for computing the upper limit through linear regression. Such a scatterplot is obtained for an ASTER scene collected on a given day. . . . . 174
- 5.2 Typical example of the scatterplots obtained for the SAVI (y-abscissa) versus  $T_s - T_a$  (x-abscissa) diagram used to compute WDI. Numbers are vertex that determine theoretical extremes (in dotted lines) A, B and C correspond to possible hydric status situations for a vineyard with 50% cover, where A is for fully wet condition, C is for complete dry condition and B is an intermediate situation that represent the pixel position. Such a scatterplot is obtained for an ASTER scene collected on a given day. . 176

## LISTE DES FIGURES

---

- 5.3 Comparison of ET HYDRUS-1D estimates against Eddy-Covariance measurements for sites 6 and 7 when selecting (a) the vineyard growing seasons (1 Aug 2007 to 15 Oct 2007 and 8 Mar 2008 to 15 Oct 2008) and (b) ASTER overpasses only. R is correlation coefficient, Slope and Offset results from linear regression between X and Y axis data (dotted line). Continuous line is the 1 :1 line. Error bars indicate the tolerance intervals provided by the ECPACK version 2.5.20 library along with ET calculations. . . . . 180
- 5.4 Comparison of ASTER / S-SEBI (triangles) and ASTER / WDI (points) daily ET estimates against those derived from (a) Eddy-Covariances estimations within site 6 and 7, and (b) HYDRUS-1D simulations over the seven validation sites. R is correlation coefficient. Slope and Offset result from linear regression between X and Y axis data (dotted line). Continuous line is the 1 :1 line. . . . . 181
- 5.5 Daily rainfall distribution and daily simulated ET-derived from HYDRUS-1D, and remote sensing models (S-SEBI, WDI) within sites 1 and 4 over 2007-2008 vineyard growing seasons (DOY 213 to DOY 288 for 2007 and DOY 68 to DOY 289 for 2008). Continuous lines represents HYDRUS-1D ET derived and dotted lines represents Penman-Monteith reference (ET<sub>0</sub>). . . . . 184
- 5.6 S-SEBI and WDI median ET maps for all ASTER scenes covering full canopy vineyard periods (including archives). Validation sites are labeled 1 to 7, and double circles correspond to sites with EC measurements. . . 185
- 5.7 Intercomparison, between daily S-SEBI and WDI ET estimates. Dashed line is the 1 :1 line. R is correlation coefficient, Slope and Offset results from linear regression between X and Y axis data (continuous line). . . 186
- 5.8 Map of absolute differences between mean S-SEBI ET daily maps and mean WDI ET daily maps in  $\text{mm.d}^{-1}$  for fully developed canopy period. Validation sites are labeled 1 to 7, and double circles correspond to sites with EC measurements. . . . . 188

5.9	Comparaison de la température de l'air ( $T_a$ en °C) mesurée sur les stations météorologiques de Roujan (intérieur du bassin versant d'étude) et de Pezenas (bordure du bassin versant), à pas horaire, pour les jours de passage ASTER. . . . .	194
5.10	Analyse de sensibilité de WDI sur la vitesse du vent pour toutes les dates ASTER en incluant les archives (à exception de 2003/02/08 et 2007/11/02). L'axe des abscisses représente le WDI estimé avec les paramètres de référence et l'axe des ordonnées la différence entre le WDI de référence et celui calculé avec l'introduction de l'offset. Quatre vitesse de vent (valeurs d'offset) ont été considéré en rapport avec la variabilité spatiale mesuré entre stations météorologiques (à l'intérieur et en bordure du bassin versant) : -1, -0.5, + 0.5, 1 m.s <sup>-1</sup> . . . . .	196
5.11	Histogramme des rugosités de surface ( $z_{om}$ ) et des résistances aérodynamiques ( $ra$ ) pour une vigne représentative de la zone, calculées par calcul itératif sur le site 7 à 11 UTC . . . . .	198
5.12	Trapèzes WDI pour deux situation de statut hydrique contrastées, où $RaWV$ est la résistance aérodynamique d'une vigne complètement couvrante en situation humide (vertice 1), $RaDV$ celles d'une vigne complètement couvrante en situation sèche (vertice 2), $RaWS$ celles d'un sol nu humide (vertice 3), $RaDS$ celle d'un sol nu sec (vertice 4) et windspeed est la vitesse du vent mesuré (m.s <sup>-1</sup> ). Les Résistances aérodynamiques sont en s.m <sup>-1</sup> . . . . .	200
5.13	Fraction évaporative calculée par S-SEBI sur le bassin versant de la Peyne (à droite) et sur le même bassin mais en considérant une étendue plus importante. . . . .	201
5.14	Comparaison des fractions évaporatives sur les sites de validation (à exception du site 6) obtenues sur le bassin versant de la Peyne et sur une étendue plus grande du même bassin. . . . .	202
5.15	Comparaison des ETR journalières calculées par S-SEBI en considérant le masque vigne, avec les ETR journalières estimé avec la calcul S-SEBI standard sur le bassin versant de la Peyne. L'ensemble des dates en incluant les images d'archives ont été considérées. . . . .	203

## LISTE DES FIGURES

---

5.16	Comparaison des estimations d'ETR journalières pour ASTER / S-SEBI (triangles) et ASTER / S-SEBI appliqué au masque vigne (points) validées avec celles obtenues à partir des estimations de HYDRUS-1D sur les sites de validation. R correspond au coefficient de corrélation. "Slope" et Offset proviennent des régression linéaires entre X et Y (lignes pointillés). Les lignes continues correspondent aux droites 1 :1. . . . .	205
B.1	Comparaison des $\theta_v$ mesuré avec ceux estimé par la sonde à neutron. . .	261
C.1	Calage du modèle HYDRUS-1D sur les sites 1 et 3 (sites sans nappe) : comparaison des stocks en eau mesurés (profils neutroniques) et simulés par HYDRUS. . . . .	264
C.2	Calage du modèle HYDRUS-1D sur les sites 2, 4 et 3 (sites à nappe) : comparaison des stocks en eau mesurés (profils neutroniques) et simulés par HDYRUS. . . . .	265
C.3	Calage du modèle HYDRUS-1D sur le site 6 (points de mesure non vigne) : comparaison des stocks en eau mesurés (profils neutroniques) et simulés par HYDRUS. . . . .	266
C.4	Calage du modèle HYDRUS-1D sur le site 6 (points de mesure vigne) : comparaison des stocks en eau mesurés (profils neutroniques) et simulés par HYDRUS. . . . .	267

# Liste des tableaux

2.1	Évolution de variables météorologiques sur le site de Roujan au cours de la période 1992-2008, ETO correspond à l'évapotranspiration de référence (selon Penman), en * sont représentées les différences significatives, d'après <a href="#">Sayah (2008)</a> . . . . .	41
2.2	Résumé des longueurs d'onde des bandes ASTER selon le domaine spectrale. VIS = visible, PIR = proche infrarouge, SWIR = moyen infrarouge, TIR = infrarouge thermique. . . . .	51
2.3	Résumé des dates des données ASTER archives et programmées, avec la couverture sur la zone d'étude. . . . .	53
2.4	Résumé des caractéristiques viticoles et pédologiques des sites de mesure.	64
2.5	Résumé des dates d'installation de la station située au site 7. . . . .	73
2.6	Pressions matricielles (en mbar) correspondant aux valeurs seuils de la fonction d'extraction racinaire de <a href="#">Feddes et al. (1978)</a> (équation 2.29). . . . .	87
3.1	Dates de début de stade phénologiques calculées à partir des sommes des températures, pour les années concernés par l'étude. Estimation à partir des données météorologiques acquises à la station de Roujan (* d'après <a href="#">Hébrard (2004)</a> , ** d'après <a href="#">Champagnol (1984)</a> , *** d'après <a href="#">Pellegrino (2003)</a> ). . . . .	95
3.2	Évaluation de la pente, offset, coefficient de corrélation (R), RMSE et RRMSE sur les régressions des validations selon l'heure de la journée pour le Site 6 et 7. . . . .	116

## LISTE DES TABLEAUX

---

3.3	Statistiques des ETR simulées par HYDRUS-1D sur l'ensemble des sites d'étude. ETR-Cumul total correspond à la somme des ETR pour toute la période de simulation, ETR-Cumul "vigne" est la somme des ETR pour les périodes de plein développement végétatif de la vigne, ETR-Moyen, ETR-Écart type et ETR-CV "vigne" correspondent à la moyenne de l'ETR, à l'écart type de l'ETR et au coefficient de variation. Le Site 6 correspond à l'ensemble de parcelles et le Site 6V les parcelles de vigne seules. . . . .	129
4.1	Validation site features with predominant soil texture, watertable conditions (permanent or seasonal in winter and spring), and row angle with north as origin. . . . .	136
4.2	Statistical indicators when comparing ground based and spaceborne values : Absolute and Relative RMSE, Slope and Offset from linear regression between predictions and references, correlation coefficient. Columns 2-9 are related to each validation site for both years. Columns 10-11 are related to mean values over sites in 2007 and 2008. . . . .	145
4.3	Statistiques (pente, offset, coefficient de corrélation R, RMSE et RRMSE) pour les intercomparaisons entre les estimations terrain (EC pour covariances turbulentes et HYDRUS-1D) et satellite, pour l'ETR aux échelles horaire et journalière, en considérant les dates de passages ASTER. . . .	149
5.1	Main characteristics of the validation sites within the Peyne watershed. The "devices" columns indicates the number of locations within each site for collecting soil moisture profile from neutron probe (NP) device, and the collection of Eddy Covariance (EC) measurements. A soil was considered as shallow when the underlying parental material was above a 2.5 m depth. Row angle is indicated according to north origin. Watertable conditions are related to winter and spring seasons. Eddy covariance footprint over site 6 encompassed both sub-sites 6N and 6S. . . . .	167

5.2 Summary of statistical indicators when comparing spaceborne values from S-SEBI and WDI algorithms against ET ground based by site : absolute and Relative RMSE, Slope and Offset from linear regression between ASTER based predictions and HYDRUS-1D simulations, correlation coefficient. . . . . 182

5.3 Variabilité considérée pour chacun des paramètres intervenant dans le calcul de WDI et résultats de leurs sensibilités, où + représente une sensibilité de < 5%, ++ de > 5 à < 10 % et +++ de > 10%. . . . . 195

## **LISTE DES TABLEAUX**

---

## Annexe A

### Description des sites

- **Site 1** : la parcelle a une surface de 32701 m<sup>2</sup> mais d'autres parcelles de vigne de caractéristiques similaires l'entourent, ce qui a été de grande aide lors de l'extraction du pixel représentant ce site. Il s'agit d'une zone plate (pente inférieure à 5%) mais qui se situe en position sommitale dans le paysage. Planté en vigne depuis au moins 5 ans, en cépage Syrah, qui est un cépage de vin rouge à maturation précoce. La parcelle a une structure de plantation de 2.5 m d'inter-rang et 1 m de distance entre pieds. La hauteur du couvert est de 1.7 m et aucun rognage est pratiqué. Un enherbement naturel est pratiqué pendant le début et la fin du période de développement de la vigne, ce qui pourrait avoir des conséquences dans la distribution du stock hydrique du sol. L'orientation des rangs de vigne est d'un angle géographique de 343°. Le site est situé sur un sol développé sur miocène marin. Il s'agit d'un sol peu profond dans lequel on retrouve le matériau d'origine à 1.7 m. Les textures sont de type Limono-sableuse avec des textures de plus en plus sableuses en profondeur. Du fait des textures et de sa profondeur ce site est considéré comme un site à faible capacité de stock hydrique. Le site est classé dans la catégorie 1 des nappes (sites sans nappes). L'ensemble des caractéristiques analysés nous amène à le décrire comme un site à haute probabilité de subir une contrainte hydrique.
- **Site 2** : il s'agit d'une grande parcelle de (74966 m<sup>2</sup>) qui cependant, d'après les images d'archives, ne possède pas une homogénéité intra-parcellaire idéale en

## A. DESCRIPTION DES SITES

---

termes de couverture végétale, ce qui faudra prendre en compte, surtout dans les période à faible développement végétatif, lorsque cette différence est plus marquée. Ce site est situé sur une zone plate (moins de 5% de pente) avec des vignes plantées depuis au moins 10 ans. Le cépage est du Grenache blanc, cépage de vin blanc à maturité très précoce et à faible tolérance au stress hydrique. La parcelle a une structure de plantation de 2.5 m d'inter-rang et 1 m de distance entre pieds. Un désherbage intégrale est pratiqué. L'orientation des rangs de vigne est d'un angle géographique de 42°. Le site est situé sur des alluvions anciens de la Peyne, c'est un sol qui a subi une évolution importante avec un premier horizon en partie lessivé, de texture grossière, caillouteux et acide. À partir de 60 cm, on observe un horizon enrichi en argile témoignant d'un début de fersialisation non calcaire. Les textures sont argilo-limono-sableuses en surface et argileuses à partir de 50 cm, mais qui du fait du taux de cailloux et de mélange de textures grossières a pour résultat un sol à moyenne capacité de stock hydrique. Ce contraste de texture entraîne en période humide l'apparition de flaques temporaires, qui sont drainés par un système de fossés ceinturant la parcelle. La nappe est permanente pendant toute l'année, pouvant resurgir en surface pendant les mois pluvieux. Avec des cinétiques de remontée et de rabattement très rapides, ce site est donc classé dans la catégorie 2 vis à vis des nappes (§ 2.1.6). Les températures de surface enregistrés pour ce site ont des valeurs moyennes ce qui, avec les caractéristiques de ce site nous permettent de le classer comme un site à probabilité de contrainte hydrique moyenne.

- **Site 3** : ce site est la plus petite des parcelles sélectionnées dans cette étude avec une surface de 29894 m<sup>2</sup>. Jusqu'à octobre 2007, cette parcelle avait pour voisine une parcelle de très grande taille avec des caractéristiques similaires, ce qui nous a motivé à la sélectionner, cependant cette grande parcelle voisine a subi un arrachage pour y implanter du blé dur pendant la saison 2008. Cela explique que pendant l'année 2008 l'extraction du pixel représentant le site a été une tâche très ardue. Il faudra donc considérer qu'une interférence du signal capturé pour les images 2008 de la parcelle voisine en blé est possible. La parcelle a une pente entre 5 et 10% ce qui a motivé en partie le choix d'installer 2 points de mesures

---

locales. Planté depuis au moins 10 ans en cépage Cabernet franc. Ce cépage producteur de vin rouge est à maturation intermédiaire et tolère relativement bien le stress. La parcelle a une structure de plantation de 2.5 m d'inter-rang et 1 m de distance entre pieds. La hauteur du couvert est de 1.6 m avec pratique de rognage. Un enherbement naturel est pratiqué un rang sur deux pendant la période de repos hivernal de la vigne. L'orientation des rangs de vigne est d'un angle géographique de 326°. Le site est situé sur un sol développé sur le miocène marin avec le matériau d'origine est présent dans la partie haute de la parcelle à une profondeur de 2.2 m tandis que dans la partie basse il est absent dans les 4 premiers mètres. Les textures sont de type limono-sableuses à limono-argilo-sableuses dans la partie basse, avec une augmentation des sables en profondeur. C'est un site dans son ensemble considéré comme ayant une capacité de stock hydrique moyenne. Il est classé dans la catégorie 1 de nappes. Du fait de la présence d'un sol plus profond (dans la partie basse) et de température de surface peu élevées pour ce site, nous avons classé ce site dans la catégorie à probabilité moyenne de subir une contrainte hydrique.

- **Site 4** : la parcelle de ce site a une surface de 53851 m<sup>2</sup> avec un grand nombre de parcelles environnantes à caractéristiques similaires, ce qui en fait un site idéal pour l'interprétation du signal télé-déecté du fait de l'absence d'interférences possibles. La parcelle est situé dans une dépression, à faible pente (moins de 5%). Planté depuis au moins 15 ans, en cépage Cabernet Sauvignon, générateur de vins rouges à maturation plutôt tardive et qui a une tolérance au stress plus élevée que d'autres. La parcelle a une structure de plantation de 2.5 m d'inter-rang et 1 m de distance entre pieds. La hauteur du couvert est de 1.7 m avec pratique de rognage. L'orientation de rangs de vigne est d'un angle géographique de 24°. Le site est situé sur un sol développé sur du miocène marin. C'est un sol très profond où peu d'éléments grossiers sont présents. La texture est limono-argileuse, avec des traces d'hydromorphie visible en profondeur. Ces caractéristiques en font un sol à forte capacité de stockage hydrique. Une nappe permanente est présente pendant toute l'année, classant ce site dans la catégorie 3. On observe des températures de surface plus basses que la moyenne, ce qui, ajoutés aux caractéristiques signalées précédemment, nous conduisent à considérer ce site comme à faible probabilité

## A. DESCRIPTION DES SITES

---

de subir une contrainte hydrique.

- **Site 5** : la parcelle a une superficie de 81052 m<sup>2</sup>, très homogène mais de forme allongée. Bien que la parcelle soit entourée de parcelles similaires, une petite route la séparant de sa voisine peut constituer une source d'interférence du signal télédétection. L'exercice d'extraction du pixel était conditionné par la prise en compte de cette route. Ce site est situé dans une zone à faible pente (entre 5 et 10%) ce qui nous a amené à installer deux points de mesure. Le cépage est du Merlot, cépage relativement précoce, à faible tolérance au stress hydrique. Une caractéristique de ce site est l'âge des vignes. Il s'agit en effet de vignes âgées de 5 ans qui en 2006 viennent juste de commencer leur période de production. Ce site a cependant été retenu du fait de leur condition végétative bien développée. La parcelle a une structure de plantation de 2.5 m d'inter-rang et 1 m de distance entre pied. Un enherbement naturel est pratiqué 3 rangs sur 4 pendant toute l'année mais avec une présence significative de végétation seulement dans les périodes après précipitations, lorsque le sol peut fournir une humidité suffisante en surface. L'orientation des rangs de vigne est d'un angle géographique de 35°. Le site est situé sur un sol à texture argileuse qui a une capacité de stockage hydrique importante. Une nappe est présente pendant une grande partie de l'année avec une cinétique de remontée et de rabattement très rapide, ce site est donc classé dans la catégorie 2. Les températures capturés par les images d'archives étaient élevées, probablement à cause de la faible couverture végétale due au jeune âge des vignes à cette époque. Dans ce cas, seules les caractéristiques observées sur le terrain ont donc servi pour établir que ce site est à faible probabilité de contrainte hydrique.
- **Site 6** : il correspond à la dépression du bassin versant expérimental de Roujan (ORE OMERE). Ce site a été choisi comme site de référence puisqu'il possède un important nombre de dispositifs permanents. C'est le site ayant la surface la plus grande (145821 m<sup>2</sup>) ce qui implique que plusieurs parcelles sont comprise dans ce site. Plus de 70% de sa surface est plantée en vigne, le reste étant couvert par de la friche et du blé dur (qui est en sol nu pendant une période importante de l'année). Plusieurs cépages sont plantés dans l'ensemble de la dépression avec des parcelles

---

d'âges différents. Il existe deux types de sol selon leurs position topographique : un premier type de sol correspondant à un glaciis colluvial calcaire et un deuxième type de sol situé dans le fond de la dépression, d'origine calcaire aussi. Le premier sol est un limon argileux sableux peu calcaire reposant sur un sable limoneux parfois induré. Le deuxième sol est identique à celui retrouvé sur le site 4. Le sol a une profondeur croissante en fonction de la proximité de l'exutoire. Le signal télé-déecté sur ce site est fortement influencé par le choix du pixel considéré.

- **Site 7** : ce site correspond à la plus grande parcelle de tous les sites sélectionnées, couvrant une surface de 132312 m<sup>2</sup>, ce qui est avéré très convenable pour l'étude. Il s'agit d'une zone plate (pente inférieure à 5%), plantée en vigne depuis au moins 15 ans. Le cépage est du Cabernet-Sauvignon, qui est un cépage de vin rouge à maturation plutôt tardive et qui a une tolérance au stress plus élevée que d'autres. La parcelle a une structure de plantation de 2.5 m d'inter rang pour 1 m de distance entre pieds. La hauteur du couvert est de 1.5 m en moyenne avec un rognage qui est pratiqué lorsque les sarments dépassent cette hauteur. Un enherbement naturel est pratiqué un rang sur deux uniquement pendant la période de repos hivernal de la vigne. L'orientationeq :Feddes1 des rangs de vigne est d'un angle géographique de 318°. La partie nord-est de la parcelle est équipée d'arrosage par goutte à goutte, uniquement utilisé lors de période de stress hydrique importantes, ce qui est très différent de l'irrigation pratiquée dans les pays du nouveau monde ou l'irrigation est un outil essentiel pour contrôler la qualité du raisin. Nous estimons que l'influence de ces rangs irrigués est minime dans le signal télédétection. En effet, la probabilité de coïncidence d'une irrigation avec le passage satellite est très faible, mais surtout, la grande surface de cette parcelle nous a permis d'isoler facilement des pixels éloigné de cette source d'interférence. Le sol de la parcelle est d'origine alluvions anciens de la Peyne à texture limono-argilo-sableuse à dominante argileuse avec un taux d'éléments grossiers faible en surface, mais qui en profondeur (à partir des 2.5 m) devient très important. L'ensemble des ces caractéristiques nous permettent de décrire ce site comme ayant un stock hydrique moyen. Une absence absolue de nappe dans les 4 premier mètres à été observée ce qui le classe dans la première catégorie. L'ensemble des caractéristiques analysés sur ce site, plus l'étude de la température de surface des

## A. DESCRIPTION DES SITES

---

images d'archives nous ont amené à cataloguer ce site comme ayant une haute probabilité de subir une contrainte hydrique.

## Annexe B

# Sonde à neutron

### B.1 Principes

Les sondes à neutrons mesurent l'humidité volumique du sol en utilisant la propriété qu'ont les neutrons rapides à être ralentis préférentiellement par les atomes d'hydrogène, qui dans le sol sont majoritairement inclus dans les molécules d'eau.

Si on place une source de neutrons rapides, ces derniers seront d'autant plus ralentis que le sol est humide. La mesure se fait au moyen d'un tube en alliage d'aluminium enfoncé verticalement dans le sol où il est laissé en permanence : un bon contact entre la terre et le tube est là encore une condition essentielle à la précision de la mesure. La source de neutrons rapides (Radium-Béryllium ou Américium-Béryllium) est amenée à la profondeur désirée, accompagnée du détecteur de neutrons lents.

Une fois émis par la source radioactive, les neutrons rapides entrent en collision avec les noyaux d'hydrogène qui ont une masse pratiquement identique à la leur et perdent ainsi progressivement leur énergie cinétique lors des chocs élastiques. Les neutrons ralentis se dispersent au hasard et forment un nuage autour de la source d'émission. Une certaine proportion d'entre eux retourne vers la sonde où se trouve le détecteur de neutrons lents. La cellule du détecteur est remplie de gaz  $^{10}\text{BF}_3$ . Quand un neutron thermique rencontre un neutron et est absorbé, une particule alpha (le noyau d'hélium) est émise ce qui crée une impulsion électrique sur un fil chargé ; cette impulsion est comptée. Le volume de sol exploré par la sonde à neutron est une sphère qui, dans un

## B. SONDE À NEUTRON

---

sol humide, varie de 15 à 20 cm de diamètre mais qui dans un sol sec atteint 50 cm de diamètre.

### B.2 Calibration

Pour l'étalonnage de la sonde à neutron des mesures de de la teneur en eau volumique ( $\theta_v$ ) ont été nécessaires pendant des périodes contrastées, une sèche et une humide. Pour ce faire le 30 aout 2007 a été choisie comme période sèche et pendant celle-ci des mesures gravimétriques de teneur en eau massique  $\theta_m$  ont été réalisées. En parallèle des mesures de densité apparente sèche ont été réalisées par une autre sonde de type gammamétrique (DR 502) pour pouvoir appliquer l'équation suivante :

$$\theta_v = \frac{\theta_m}{d_s ec} \quad (\text{B.1})$$

Cette opération a été répété le 15 mai 2008 en situation humide pour obtenir des valeurs de  $\theta_v$  qui complètent la gamme de variabilité en humidité volumique nécessaire pour pouvoir tracer une régression qui représente l'ensemble des situations possibles de rencontrer sur le terrain. Ces mesures ont été réalisée sur tout les sites étudié dans cette étude. Des droites d'étalonnage pour transformer les comptages de la sonde à neutron ont été réalisée pour chaque sol, du fait de la similitude entre-elles est aussi pour avoir une droite avec un nombre de points plus important, une droite d'étalonnage unique a été choisie pour obtenir les teneur en eau volumiques ( $\theta_v$ ) :

$$\theta_v = 0.25\left(\frac{I}{I_0}\right) - 0.08 \quad (\text{B.2})$$

où  $I_0$  correspond au comptage de la sonde neutronique dans l'air(moyenne des mesures standards) et  $I$  le comptage de la sonde. un coefficient de détermination ( $r^2$ ) de 0.77 a été obtenu. Finalement une comparaison entre les  $\theta_v$  obtenus grâce aux mesures gravimétriques et ceux déduits par la sonde a été réalisé pour quantifier l'erreur de la calibration. Les résultats sont visible sur la figure B.1 ou un  $RMSE$  de  $0.046 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  a été obtenu.

Pour les sites du bassin versant de Roujan (site 6) une calibration pour la même sonde avait déjà été faite dans le cadre de la thèse de Bsaibes (2007), l'équation pour ce site est la suivante :

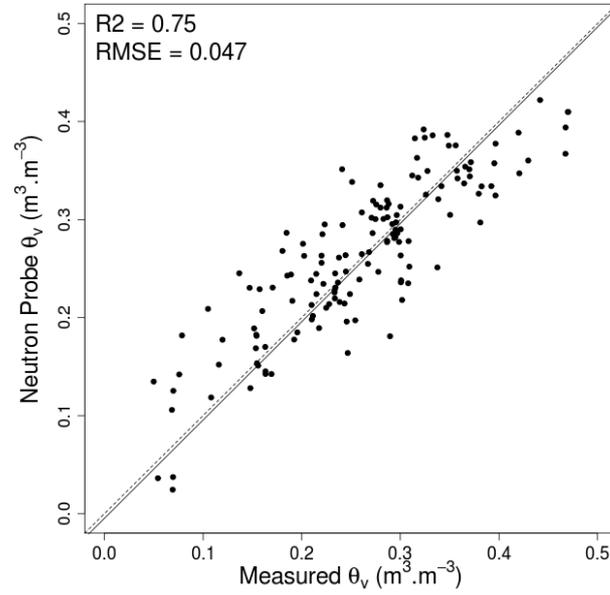


FIG. B.1: Comparaison des  $\theta_v$  mesuré avec ceux estimé par la sonde à neutron.

$$\theta_v = 0.764\left(\frac{I}{I_0}\right) - 0.099 \quad (\text{B.3})$$

avec  $I_0$  réalisé dans l'eau cette fois. Le  $RMSE$  obtenue pour cette calibration a été de  $0.039 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ .

## B. SONDE À NEUTRON

---

## Annexe C

# Resultats des calages du modèle HYDRUS-1D pour chaque site, évalués par le stock hydrique

Les resultats des calages sur chaque point de mesure pour l'ensemble des sites sont présentées ci-dessous :

### C. RESULTATS DES CALAGES DU MODÈLE HYDRUS-1D POUR CHAQUE SITE, ÉVALUÉS PAR LE STOCK HYDRIQUE

---

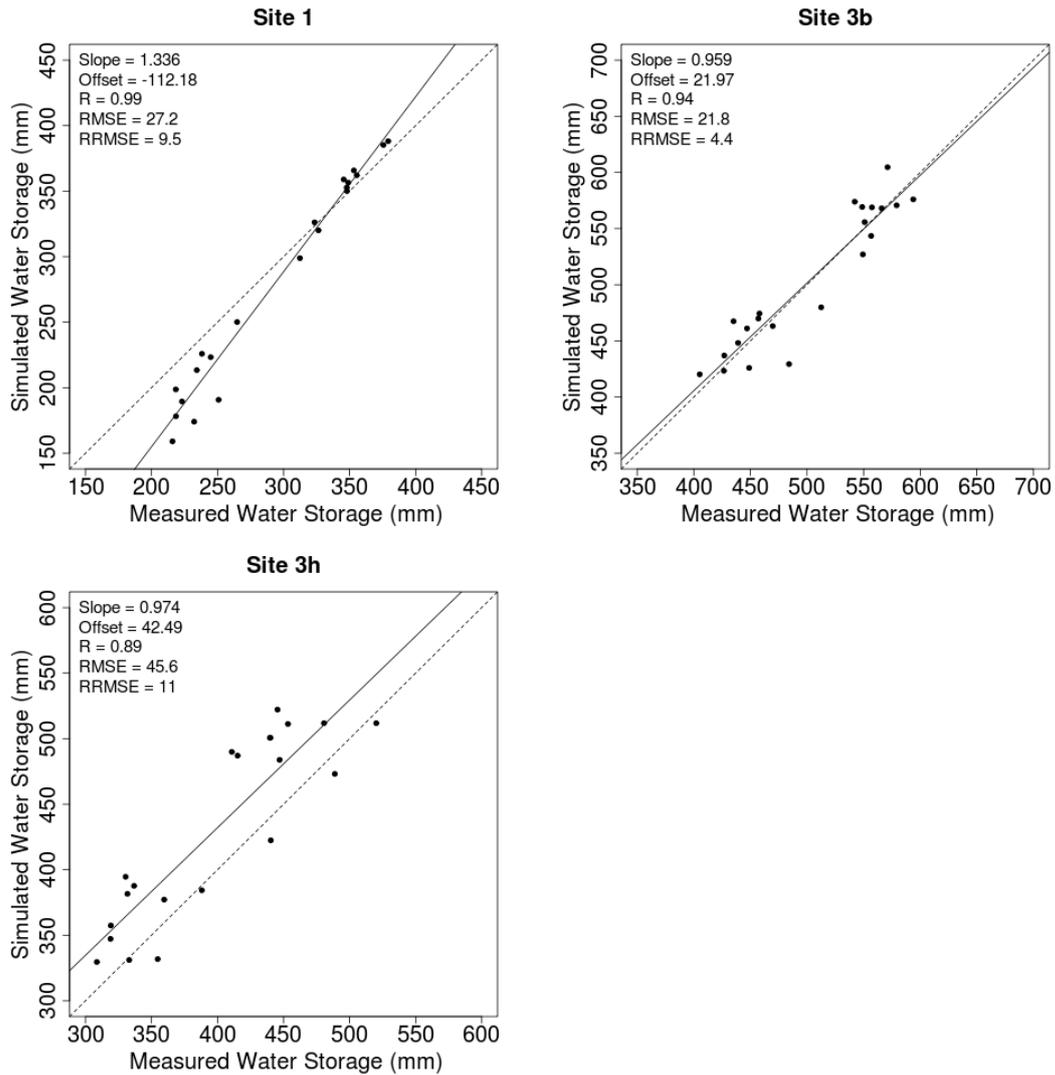


FIG. C.1: Calage du modèle HYDRUS-1D sur les sites 1 et 3 (sites sans nappe) : comparaison des stocks en eau mesurés (profils neutroniques) et simulés par HYDRUS.

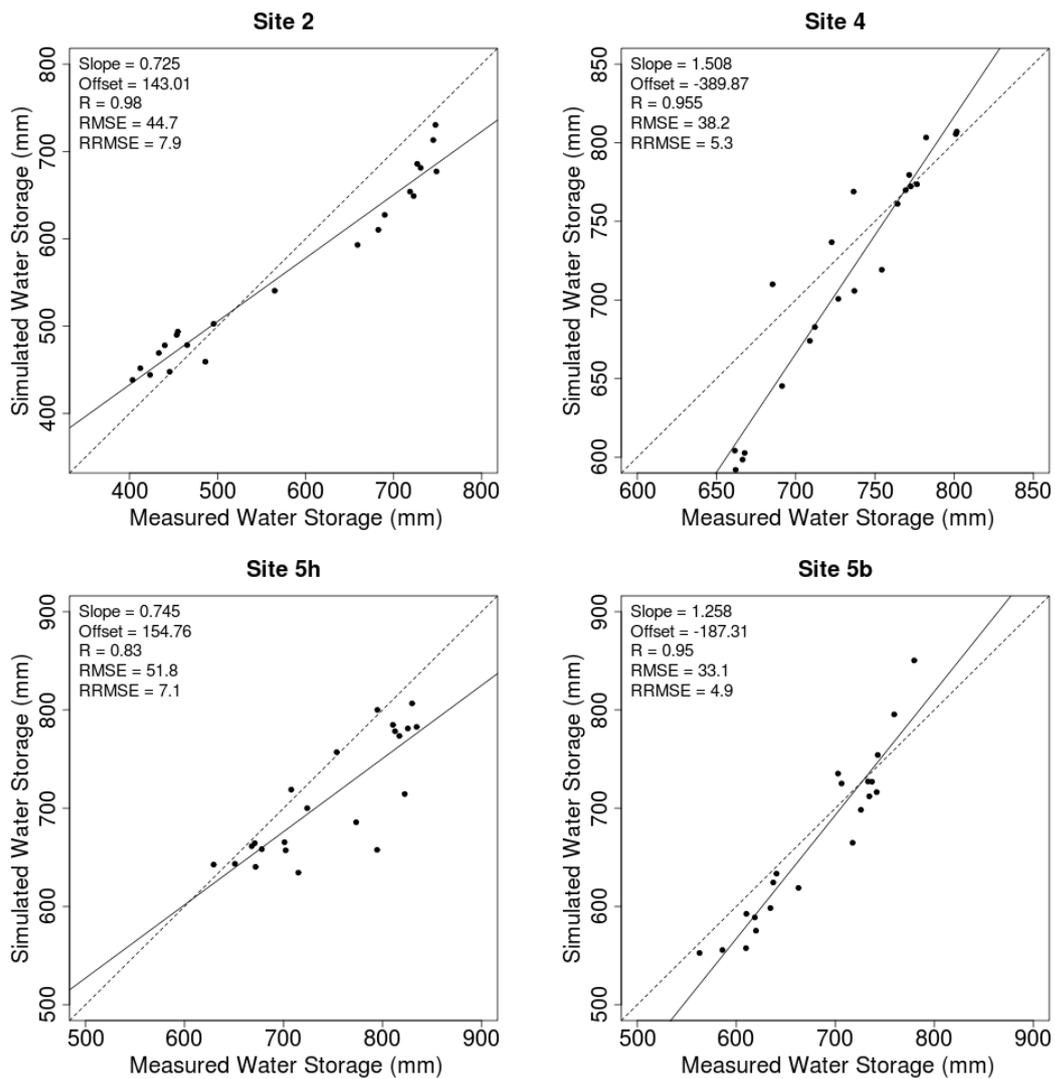


FIG. C.2: Calage du modèle HYDRUS-1D sur les sites 2, 4 et 3 (sites à nappe) : comparaison des stocks en eau mesurés (profils neutroniques) et simulés par HDYRUS.

## C. RESULTATS DES CALAGES DU MODÈLE HYDRUS-1D POUR CHAQUE SITE, ÉVALUÉS PAR LE STOCK HYDRIQUE

---

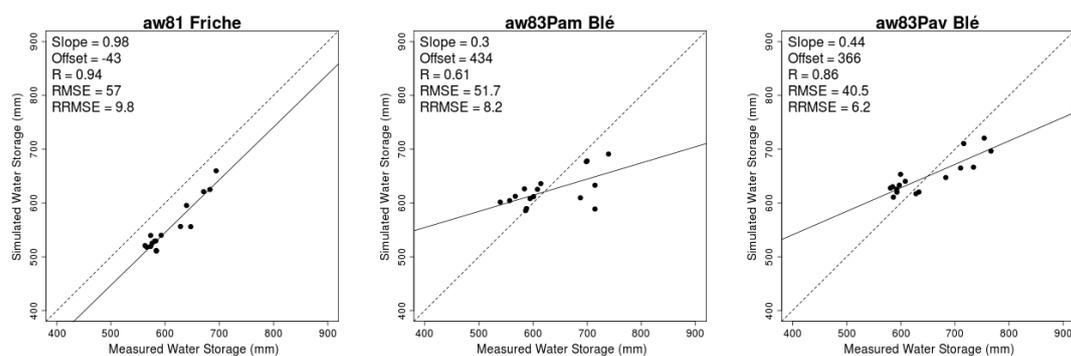


FIG. C.3: Calage du modèle HYDRUS-1D sur le site 6 (points de mesure non vigne) : comparaison des stocks en eau mesurés (profils neutroniques) et simulés par HYDRUS.

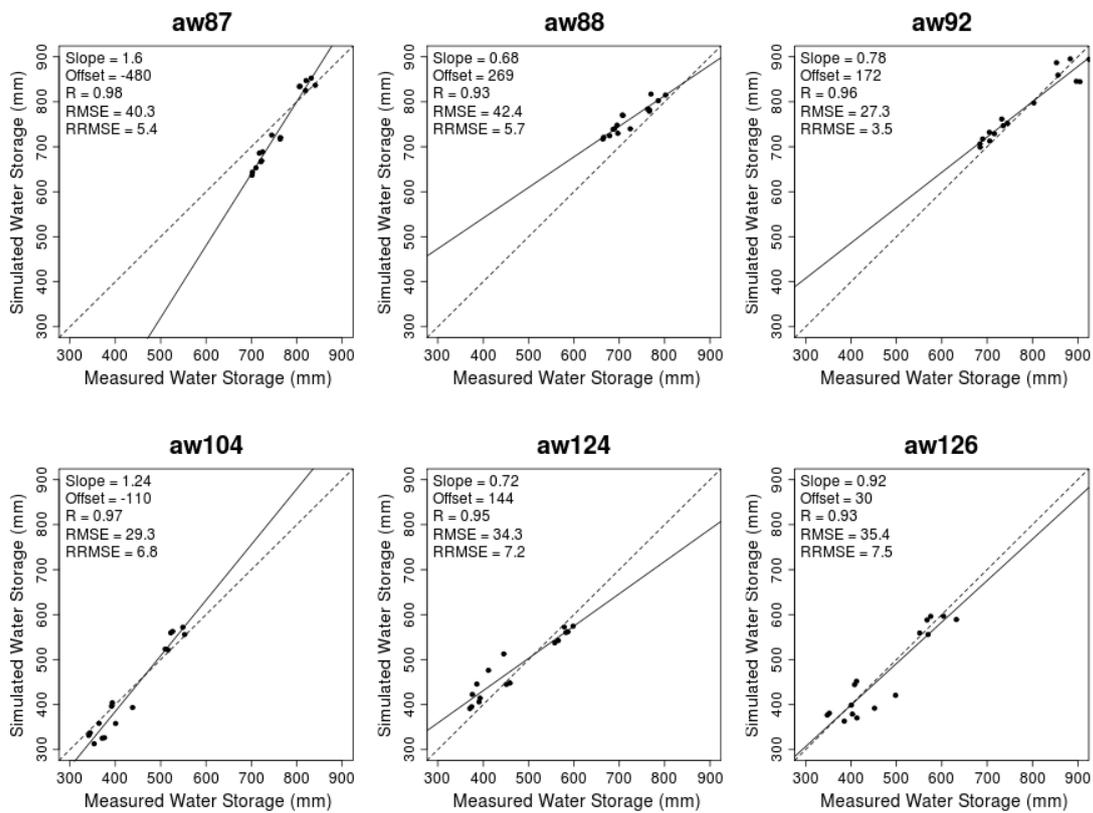


FIG. C.4: Calage du modèle HYDRUS-1D sur le site 6 (points de mesure vigne) : comparaison des stocks en eau mesurés (profils neutroniques) et simulés par HYDRUS.

**C. RESULTATS DES CALAGES DU MODÈLE HYDRUS-1D POUR  
CHAQUE SITE, ÉVALUÉS PAR LE STOCK HYDRIQUE**

---



## RESUME

Le statut hydrique de la vigne est reconnu comme étant un facteur essentiel dans la production viticole. A l'échelle de la parcelle agricole, les travaux de recherche ont permis de mettre au point différentes méthodes de caractérisation du statut hydrique. Cependant, du fait de leur lourdeur de mise en oeuvre, ces méthodes sont difficilement utilisables à l'échelle de la petite région, alors qu'il existe un fort besoin d'informations sur le statut hydrique à cette échelle. L'objectif principal de ce travail est l'obtention d'un statut hydrique spatialisé en milieu viticole méditerranéen, à l'échelle de la petite région. Le site d'étude est la basse vallée de la Payne, zone de production viticole de 65 km<sup>2</sup>, représentative du vignoble méditerranéen. La démarche générale consiste à spatialiser l'évapotranspiration réelle (ETR), choisie comme indicateur du statut hydrique, par l'intermédiaire de deux modèles spatialisés (S-SEBI, Roerink *et al.*, 2000 et WDI, Moran *et al.*, 1994) issus d'images de télédétection dans l'infrarouge thermique (capteur ASTER). Les résultats de ces modèles sont validés par comparaison avec des mesures et des simulations locales de l'ETR. Ces simulations, réalisées en utilisant un modèle de transfert hydriques (HYDRUS-1D, Simunek *et al.*, 1998), représentent une solution de validation originale pour obtenir une ETR locale sur un grand nombre de sites, à un coût expérimental réduit. Une étude de sensibilité permet d'apprécier la robustesse de ces modèles spatialisés vis à vis des conditions expérimentales. Après avoir vérifié que les simulations locales réalisées avec HYDRUS-1D pouvaient effectivement servir de données de validation, nous montrons que les modèles spatialisés testés permettent d'estimer l'ETR à l'échelle journalière avec une précision satisfaisante, le modèle S-SEBI, pourtant plus empirique, donnant de meilleurs résultats que le modèle WDI (RMSE de 0.8 mm.j<sup>-1</sup> et 1.1 mm.j<sup>-1</sup> respectivement). Nous montrons que ces approches de spatialisation sont sensibles aux conditions expérimentales considérées (champs d'étude spatial pour le S-SEBI, vitesse du vent pour le WDI). Enfin, les résultats de spatialisation mettent en évidence d'importantes variabilités spatio-temporelles de l'ETR sur la zone d'étude. Les structures spatiales de statut hydrique observées à partir des deux modélisations réalisées sont très similaires et semblent être fortement liées aux caractéristiques pédo-paysagères de la zone d'étude.

**Mots-clés** : spatialisation, évapotranspiration, télédétection, bassin versant méditerranéen, vigne, IR thermique.

## ABSTRACT

Vineyard hydric status is recognized as an essential factor for wine-producing. At the field scale, research work allowed to develop different methods for hydric status characterization. However, because of tedious implementation, these methods are useless at the watershed scale, whereas hydric status information at this scale is strongly needed. The main objective of this study is to spatialize vineyard hydric status over a Mediterranean watershed. The study site is located in the basse vallée de la Payne, a 65 km<sup>2</sup> wine-producing area, that is representative of the Mediterranean vineyards. The general procedure to achieve this objective was to spatialize actual evapotranspiration (ET), choose as an hydric status indicator, using two spatialized models (S-SEBI Roerink *et al.*, 2000 and WDI, Moran *et al.*, 1994) that were derived from thermal infrared remote sensing imagery (ASTER sensor). The results of these models were validated by comparison with local ET measurements and simulations. These simulations performed by a water transfer model HYDRUS-1D, (Simunek *et al.*, 1998), represents an original validation method to obtain local ET over an important number of sites, at a minimal experimental cost. A sensibility study allowed to identify the robustness of these spatialized models to the experimental conditions. After checking that local ET simulations obtained by the HYDRUS-1D approach were correctly simulated, we showed that S-SEBI and WDI spatialized models allowed to estimate ET with satisfactory accuracies. The more empiric S-SEBI model produced better results than the WDI model (RMSE about 0.8 mm.d<sup>-1</sup> and 1.1 mm.d<sup>-1</sup> respectively). Further, the sensibility study showed that these spatialisation approaches were sensitive to experimental conditions, (spatial extent for S-SEBI and wind speed for WDI). Finally, these spatialisation results depicted for important ET spatio-temporal variability over the Payne watershed. The spatial patterns retrieved by the two models are similar and seems to be strongly related to pedological and landscape characteristics within the study site.

**Key-words** : spatialisation, evapotranspiration, remote sensing, Mediterranean watershed, vineyard, thermal infrared.