



HAL
open science

Suivi de l'état hydrique de l'olivier par télédétection radar en bande C en zone semi-aride

Adnane Chakir

► **To cite this version:**

Adnane Chakir. Suivi de l'état hydrique de l'olivier par télédétection radar en bande C en zone semi-aride. Amélioration des plantes. Université Gustave Eiffel; Université Cadi Ayyad (Marrakech, Maroc), 2024. Français. NNT : 2024UEFL2028 . tel-04952404

HAL Id: tel-04952404

<https://theses.hal.science/tel-04952404v1>

Submitted on 17 Feb 2025

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.

Suivi de l'état hydrique de l'olivier par télédétection radar en bande C en zone semi-aride

Thèse de doctorat de l'Université Gustave Eiffel

École doctorale n°532 MSTIC - Mathématiques et Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

Spécialité de doctorat : Sciences et Technologies de l'Information Géographique

Unité de recherche : LASTIG

Thèse présentée et soutenue à la faculté des sciences Semlalia à Marrakech, le 27/09/2024, par

Adnane Chakir

Composition du Jury

ER-RAKI Salah

Professeur, PES, Faculté des Sciences et Techniques
Marrakech

Président

FERRO-FAMIL Laurent

Professeur, HDR, Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse

Rapporteur

CALVET Jean-Christophe

Directeur de recherche, HDR, Université de Toulouse, Météo-France,

Rapporteur

STEELE-DUNNE Susan

Professeure, Université de technologie de Delft

Examinatrice

LE TOAN Thuy

Ingénieure à GlobEO

Examinatrice

Pierre-Louis FRISON

Maitre de conférences, HDR, Université Gustave Eiffel, laboratoire LASTIG

Directeur de thèse

Encadrement de la thèse

KHABBA Saïd

Professeur, PES, Faculté des Sciences
Semlalia de Marrakech

Co-directeur de thèse

JARLAN Lionel

Directeur de recherche, IRD, UMR
CESBIO

Co-Encadrant

Fiche présentative de la thèse

Nom et Prénom de l'auteur : Chakir Adnane

Intitulé du Travail : Suivi de l'état hydrique de l'olivier par télédétection radar en bande C en zone semi-aride.

Directeurs de Thèse :

- Khabba Saïd, Professeur de l'Enseignement Supérieur
Laboratoire de Mécanique des Fluides et Energétique (LMFE), Département de Physique,
Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.
- Frison Pierre-Louis, Maître de Conférences
Laboratoire en Sciences et Technologies de l'Information Géographique (LaSTIG),
Université Gustave Eiffel, Paris, France.

Co-encadrant :

- Jarlan Lionel, Directeur de Recherche
Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO), Toulouse, Institut de Recherche
pour le Développement.
- Ezzahar Jamal, Maître de Conférences Habilité
Le laboratoire de recherche en Mathématiques, Informatiques et Systèmes de
Communication (MISCOM), École Nationale des Sciences Appliquées de Safi (ENSA)
Université Cadi Ayyad, Maroc.

Lieux de réalisation des travaux (laboratoires, institution) :

- Laboratoire de Mécanique des Fluides et Energétique (LMFE), Département de Physique,
Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.
- Laboratoire Mixte International « Télédétection et Ressources en Eau en Méditerranée
semi-Aride » (LMI-TREMA). Center Jaber, Faculté des Sciences Semlalia, Université
Cadi Ayyad, Marrakech. « lmi-trema.ma ».
- Le Laboratoire en Sciences et Technologies de l'Information Géographique (LaSTIG),
Université Gustave Eiffel, Paris, France.

Remerciements

Il y a déjà un certain temps depuis mon arrivée au LMI TREMA. Cette période a été extrêmement enrichissante pour moi, tant sur le plan scientifique et technique que personnel. J'ai eu la chance d'acquérir des compétences inestimables tout en évoluant dans un environnement agréable. Je tiens donc à exprimer ma profonde gratitude.

Tout d'abord, je souhaite adresser mes plus sincères remerciements à mes directeurs de thèse, Saïd Khabba et Pierre-Louis Frison. Merci pour la confiance absolue que vous avez placée en moi, pour toutes les connaissances scientifiques fondamentales que vous m'avez transmises, ainsi que la discipline nécessaire dans la recherche. Vos précieux conseils, votre patience et vos encouragements m'ont été d'une aide inestimable.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers le programme TOSCA du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) et le projet ERANET-MED CHAAMS pour leur soutien financier crucial qui a permis la mise en œuvre de cette expérience radar *in situ*. Je suis également reconnaissant envers l'Université Caddi Ayyad, le Centre d'études Spatiales de la Biosphère et l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée pour leur contribution précieuse à ce projet. Un grand merci également à Lionel Jarlan, dont la contribution a été immense, ce qui a rendu tout cela possible. Je souhaite également remercier Pascal Fanise et Ludovic Villard pour leurs contributions techniques dans la mise en œuvre de ce dispositif expérimental, ainsi que Valerie Le-dantec pour son expertise en écophysiologie.

Je souhaite ensuite exprimer toute ma gratitude à Salah Er-Raki, Ezzahar Jamal, Lahoucine Hanich, Younes Fakir, Mohamed Kasbani, Michel Le Page et Abdelghani Chehbouni pour leurs soutiens moraux et leurs encouragements, qui m'ont permis de traverser des moments très difficiles.

Je remercie également tous les doctorants et les membres du laboratoire LMI TREMA, avec lesquels j'ai eu l'occasion de travailler, ainsi que tous ceux avec qui j'ai partagé de bons moments. Je tiens aussi à remercier Dr Omar Rafi, propriétaire de la parcelle où ces travaux expérimentaux ont eu lieu, pour son soutien à nos activités scientifiques.

Enfin, je ne saurais jamais assez remercier les personnes pour lesquelles il ne suffit jamais de dire « Merci » et pour lesquelles je serai éternellement reconnaissant : feu mon père, ma mère, ma femme, mes frères, ainsi que Pierre-Louis Frison. Vous avez toujours été là pour me soutenir

et m'encourager. C'est en grande partie grâce à vous que j'ai pu réussir ce travail, surtout dans les moments très difficiles.

Un grand merci également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

« Je n'ai rien de particulier. Je suis un homme ordinaire, avec des pensées ordinaires et une vie ordinaire. Aucun monument ne m'est dédié, et mon nom sera vite oublié. Mais, d'un certain côté, j'ai aussi bien réussi que n'importe qui, et pour moi c'est plus que suffisant »

Ryan Gosling

A la Mémoire de Mon Père « Chakir Ahmed ».

Résumé

Face au réchauffement climatique et à la pression anthropique, l'eau est une ressource particulièrement menacée dans les régions semi-arides. Des efforts sont à faire pour mieux rationaliser l'utilisation de l'eau, notamment pour l'agriculture représentant 80% de sa consommation. Dans ce contexte, la télédétection spatiale, par son observation répétitives (quelques jours) à des échelles décamétriques s'avère être un outil particulièrement adapté pour le suivi des surfaces terrestres. Ces données peuvent être précieuses pour estimer notamment l'état hydrique de la végétation, et ses phases de stress. En particulier, les données radar en bande C présentent un potentiel pour le suivi de la végétation, notamment son humidité, dont des analyses restent à faire pour pouvoir estimer ses caractéristiques (biomasse, humidité) indépendamment de celles du sol sous-jacent (rugosité humidité) affectant également le signal radar. Cette thèse présente les analyses réalisées dans le cadre d'une expérience consistant à acquérir des données radar *in situ* en bande C avec un pas de temps de 15 min, sur une parcelle d'oliviers. Une analyse du signal radar et ses interactions avec les paramètres environnementaux et les mesures physiologiques, ainsi qu'une comparaison avec l'imagerie satellite Sentinel-1, a été menée.

Dans un premier temps, une analyse approfondie de l'état hydrique des oliviers a été réalisée pendant les périodes de croissance et de déficit hydrique (*TWD*) en examinant les mesures dendrométriques (ΔR), les flux de sève, et les données météorologiques collectées entre 2020 et 2022. Les résultats obtenus peuvent expliquer les différences significatives observées dans le comportement des données radar *in situ* entre les deux années 2020 et 2021. Concernant les effets des facteurs climatiques sur la croissance et le déficit hydrique des oliviers, les résultats montrent des corrélations positives entre la croissance et l'humidité de l'air et des corrélations significatives entre *TWD* et le déficit de pression de vapeur (*VPD*). Ce dernier semble être l'un des paramètres météorologiques les plus influents sur *TWD*.

Concernant les mesures radar, et spécialement la cohérence interférométrique (γ), les résultats confirment l'existence d'un cycle diurne, déjà observé sur des forêts tropicales. Ce cycle diurne est fortement corrélé à la vitesse du vent et également au démarrage de l'activité de la végétation (se traduisant par des flux d'eau interne) à l'aube avant le levé du vent. Les analyses ont révélé que la décroissance matinale de γ est corrélée au taux d'évapotranspiration (*ETR*), en particulier lorsque la vitesse du vent est inférieure à 2 m/s. Les cohérences γ calculées pour des lignes de bases temporelles de plusieurs jours a également montré que les cycles diurnes sont encore discriminables jusqu'à 18 jours. Cela illustre le potentiel de missions satellitaires telles que Sentinel-1 (avec des acquisitions faites vers 6h30 avec une répétitivité de 6 jours). Il faudrait néanmoins plusieurs acquisitions à l'aube (à la différence d'une seule pour Sentinel-1) afin d'estimer la chute matinale de la cohérence. De plus, un accord satisfaisant entre les cohérences *in-situ* et celles des satellites Sentinel-1 a été observé, malgré les différentes configurations d'acquisition des deux systèmes (par ex. angle d'incidence et azimut).

Les intensités radar *in situ* (I), proportionnelles aux coefficients radar de rétrodiffusion (σ^0), ont montré des corrélations significatives avec l'*ETR* et le flux de sève, soulignant leur grande sensibilité à l'état de l'eau du couvert végétal. Des cycles diurnes ont également été observés, avec une augmentation matinale des intensités corrélées avec l'*ETR*, tandis que la nuit, des valeurs minimales et stables sont observées pendant le repos de la végétation. De même que pour les cohérences, la comparaison des intensités *in situ* avec le coefficient de rétrodiffusion σ^0 de Sentinel-1 a montré un bon accord global

Ces résultats confirment la sensibilité de la cohérence radar à l'état hydrique de la végétation, surtout au-dessus d'une canopée d'oliviers, lors de mesures matinales dans des conditions calmes. Les valeurs de cohérence sont restées significatives sur une période de plusieurs jours, soulignant le potentiel des missions satellites pour cette application.

Mots clés : Irrigation ; Radar ; bande C ; Etat hydrique ; Sentinel-1 ; Coefficient de rétrodiffusion ; Cohérence interférométrique ; déficit hydrique ;

Abstract

In the face of global warming and anthropogenic pressure, water is a particularly threatened resource in semi-arid regions. Efforts are needed to better rationalize water use, particularly for agriculture, which accounts for 80% of its consumption. In this context, spatial remote sensing, through its repetitive observation (a few days) at decametric scales, proves to be a particularly suitable tool for the monitoring of terrestrial surfaces. This data can be valuable for estimating the water status of vegetation and its stress. In particular, C-band radar data have potential for vegetation monitoring, including vegetation moisture, which remains to be analyzed in order to estimate its characteristics (biomass, moisture) independently of those of the underlying soil (moisture roughness) also affecting the radar signal. This thesis presents the analyses carried out as part of an experiment consisting in acquiring radar data *in situ* in C band with a time step of 15 min, on olive orchard. An analysis of the radar signal and its interactions with environmental parameters and physiological measurements, as well as a comparison with Sentinel-1 satellite imagery, was conducted.

First, an in-depth analysis of the water status of olive trees was carried out during periods of growth and water deficit (*TWD*) by examining dendrometric (ΔR) measurements, sap flows, and meteorological data collected between 2020 and 2022. The results obtained can explain the significant differences observed in the behavior of *in situ* radar data between the two years 2020 and 2021. Regarding the effects of climatic factors on olive tree growth and water deficit, the results show positive correlations between growth and air humidity and significant correlations between *TWD* and vapor pressure deficit (*VPD*). The latter seems to be one of the most influential weather parameters on *TWD*.

Concerning radar measurements, and especially interferometric coherence (γ), the results confirm the existence of a diurnal cycle, already observed in tropical forests. This diurnal cycle is strongly correlated with wind speed and also with the start of vegetation activity (resulting in internal water flows) at dawn before the wind rises. The analyses revealed that the morning decrease of γ is correlated with the rate of evapotranspiration (*ETR*), especially when the wind speed is less than 2 m/s. The γ calculated for time baselines of several days also showed that diurnal cycles are still discriminable up to 18 days. This illustrates the potential of satellite missions such as Sentinel-1 (with acquisitions made around 6:30 am with a repeatability of 6 days). It would nevertheless take several scans at dawn (unlike only one for Sentinel-1) to estimate the morning fall in coherence. In addition, a satisfactory agreement between the in-situ coherences and those of the Sentinel-1 satellites was observed, despite the different acquisition configurations of the two systems (e.g. angle of incidence and azimuth).

Concerning *in situ* radar intensities (*I*), proportional to radar backscatter coefficients (σ^0), showed significant correlations with *ETR* and sap flow, highlighting their high sensitivity to the water state of the vegetation cover. Diurnal cycles were also observed, with an increase in the morning intensities correlated with *ETR*, while at night, minimum and stable values are observed during vegetation rest. As for

coherences, the comparison of *in situ* intensities with the Sentinel-1 σ^0 backscatter coefficient showed a good overall agreement

These results confirm the sensitivity of the radar coherence to the water state of the vegetation, especially above an olive canopy, during morning measurements in calm conditions. The consistency values remained significant over a period of several days, highlighting the potential of satellite missions for this application.

Keywords: Irrigation; Radar; C band; Water state; Sentinel-1; Backscatter coefficient; Interferometric coherence; water deficit;

ملخص الرسالة

في مواجهة التغير المناخي وضغط النشاط البشري، تعد المياه مورداً مهدداً بشكل خاص في المناطق شبه الجافة. يتعين بذل المزيد من الجهود لتحسين استخدام المياه، خاصة في الزراعة التي تمثل 80% من استهلاكها. في هذا السياق، يُظهر الاستشعار عن بعد الفضائي، من خلال رصده المتكرر (بعض الأيام) على مقاييس ديكامترية، أنه أداة مناسبة بشكل خاص لمراقبة السطوح البرية. يمكن أن تكون هذه البيانات قيمة لتقدير حالة الماء في النباتات، وفترات التوتر الناتجة عنها. على وجه الخصوص، تظهر بيانات الرادار في النطاق C إمكانات لمراقبة النباتات، بما في ذلك رطوبتها، والتي تبقى بعض التحليلات لتقدير خصائصها (الكتلة الحيوية، الرطوبة) مستقلةً عن تلك للتربة (الخشونة، الرطوبة) التي تؤثر أيضاً على إشارة الرادار. يقدم هذا البحث تحليلات تمت في إطار تجربة تتضمن اكتساب بيانات رادار *in situ* في النطاق C بفترة زمنية قدرها 15 دقيقة على بستان لأشجار الزيتون. تم إجراء تحليل لإشارة الرادار وتفاعله مع البيانات البيئية والقياسات الفسيولوجية، بالإضافة إلى مقارنته مع صور الأقمار الصناعية Sentinel-1.

أولاً، تم إجراء تحليل شامل لحالة المياه في أشجار الزيتون خلال فترات النمو ونقص المياه (*TWD*) من خلال دراسة القياسات الدندريمتريّة (*AR*) وتدفق المائي في الأشجار (*sapflow*) والبيانات الجوية التي تم جمعها بين 2020 و 2022. يمكن أن تفسر النتائج المحصلة الفروق الكبيرة الملاحظة في سلوك بيانات الرادار الموضوعية بين السنتين 2020 و 2021. بالنسبة لتأثير العوامل المناخية على النمو ونقص المياه لأشجار الزيتون، تظهر النتائج ترابطات إيجابية بين النمو ورطوبة الهواء وترابطات ملحوظة بين *TWD* ونقص ضغط البخار (*VPD*). يبدو أن هذا الأخير يكون واحداً من المعلمات الجوية الأكثر تأثيراً على *TWD*.

بالنسبة لقياسات الرادار، وبشكل خاص التماسك التداخلي (γ)، تؤكد النتائج وجود دورة يومية، وقد لوحظت بالفعل في الغابات الاستوائية. يرتبط هذا الدورة اليومية بشكل كبير بسرعة الرياح وأيضاً ببدء نشاط النبات (الذي يترجم بتدفق المياه الداخلي للأشجار) عند الفجر قبل ارتفاع الرياح. كشفت التحليلات أن الانخفاض الصباحي في γ مترابط مع معدل البخر (*ETR*)، خاصة عندما تكون سرعة الرياح أقل من 2 م/ث. أظهرت γ لخطوط القواعد الزمنية لعدة أيام أيضاً أن الدورات اليومية لا تزال مميزة حتى 18 يوماً. يوضح ذلك الإمكانيات التي تتمتع بها المهام الفضائية مثل Sentinel-1 (مع اكتسابات يتم إجراؤها حوالي الساعة 6:30 صباحاً مع تكرار كل 6 أيام). ومع ذلك، سيتطلب الأمر العديد من الاكتسابات في الفجر (بدلاً من اكتساب واحد لـ Sentinel-1) لتقدير الانخفاض الصباحي في التماسك. بالإضافة إلى ذلك، لوحظ وجود اتفاق مرضٍ بين γ وتلك الخاصة بالأقمار الصناعية Sentinel-1، على الرغم من اختلاف تكوينات اكتساب النظامين (مثل زاوية الانحدار والمغزل).

بالنسبة لشدة الرادار الموضوعية (*I*)، التي تتناسب مع معاملات إعادة الانعكاس الرادارية (σ^0)، أظهرت ترابطات ملحوظة مع *ETR* و *sapflow*، مما يؤكد حساسيتها الكبيرة لحالة مياه الغطاء النباتي. كما تم ملاحظة دورات يومية، مع زيادة صباحية في الشدات مترابطة مع *ETR*، بينما يتم ملاحظة قيم دنيا وثابتة خلال الليل خلال راحة النبات. وكما هو الحال مع γ ، أظهرت مقارنة الشدات الموضوعية مع معامل إعادة الانعكاس σ^0 لـ Sentinel-1 اتفاقاً جيداً عموماً

تؤكد هذه النتائج حساسية الرادار لحالة الماء في النباتات، خاصة فوق غطاء أشجار الزيتون، خلال قياسات الصباح في ظروف هادئة. بقيت قيم التماسك ذات دلالة على مدى عدة أيام، مما يؤكد على الإمكانيات التي تتمتع بها المهام الفضائية لهذا التطبيق.

كلمات مفتاحية: الري؛ الرادار؛ النطاق C؛ حالة الماء؛ سنتينيل-1؛ معامل إعادة الانعكاس؛ التماسك التداخلي؛ نقص الماء؛

Tables de matière

Fiche présentative de la thèse	I
Remerciements	II
Résumé	V
Abstract	VII
ملخص الرسالة	IX
Tables de matière	X
Liste des figures	XIV
Liste des tableaux	XX
Introduction générale.....	- 1 -

Chapitre I. Transfert des flux d'eau et d'énergie dans les milieux sol-plante-atmosphère et suivi de la végétation par télédétection radar

- 8 -

I. Introduction	- 9 -
II. Les échanges d'eau et d'énergie dans les milieux sol-plante-atmosphère	- 10 -
II.1. Bilan d'énergie	- 10 -
II.2. Bilan hydrique	- 11 -
III. Télédétection radar	- 13 -
III.1. Généralités	- 13 -
III.2. Principe des acquisitions radars à visée latérale	- 18 -
III.2.1 Résolution spatiale	- 19 -
III.2.2 La résolution en distance	- 20 -
III.2.3 La résolution en azimuth	- 21 -
III.2.4 Effet Doppler	- 22 -
III.3. Equation radar et coefficient de rétrodiffusion	- 24 -
III.4. Polarisation	- 26 -
III.5. Chatoiement	- 28 -
III.6. Phase et cohérence interférométrique	- 31 -
III.7. Interaction entre les milieux et les ondes radar	- 32 -
III.7.1 Cas des sols nus (diffusion de surface)	- 32 -
III.7.2 Cas des surfaces de végétation	- 34 -
Diffusion de volume	- 34 -
Les contributions sur une surface de végétation naturelle	- 34 -

III.8. Sensibilité du signal radar à l'état hydrique des couverts végétaux	- 37 -
III.8.1 Coefficient de rétrodiffusion.....	- 38 -
III.8.2 Cohérence interférométrique	- 41 -
IV. Conclusion	- 43 -

Chapitre II :Site d'étude, dispositifs expérimentaux et données *in situ* et satellitaires
..... - 45 -

I. Introduction	- 46 -
II. Présentation du site d'étude	- 46 -
II.1. Situation géographique et contexte climatique	- 46 -
Bassin versant du Tensift.....	- 46 -
La plaine du Haouz.....	- 47 -
II.2. Parcelles expérimentales.....	- 48 -
II.3. Irrigation des oliviers.....	- 50 -
III. Mesures météorologiques et physiologiques	- 50 -
III.1. Données météorologiques	- 50 -
III.2. Station de flux et système Eddy-Covariance (EC).....	- 50 -
III.3. Flux de sève.....	- 54 -
III.4. Dendromètres.....	- 59 -
III.5. Pression de vapeur d'eau.....	- 63 -
III.6. Humidité du sol	- 64 -
III.7. Stades phénologiques des oliviers	- 65 -
IV. Données radar <i>in situ</i>	- 67 -
IV.1. Généralités sur l'expérimentation	- 67 -
IV.1.1 Tour à échafaudage	- 67 -
IV.1.2 Analyseur de réseau vectoriel.....	- 68 -
IV.1.3 Antennes.....	- 69 -
IV.1.4 Duplexeur et Câbles de connexion	- 72 -
IV.1.5 Système de contrôle et d'acquisition.....	- 74 -
IV.2. Traitement et calibration des données radar <i>in situ</i>	- 76 -
IV.2.1 Description des acquisitions en bande C	- 76 -
IV.2.2 Calibration relative (amplitude et phase)	- 77 -
IV.2.3 Calcul du coefficient de rétrodiffusion et de la cohérence interférométrique	- 79 -
IV.2.4 Influence des polarisations sur la cohérence.....	- 80 -

IV.3. Données Sentinel-1	- 83 -
IV.3.1 Coefficient de rétrodiffusion.....	- 84 -
IV.3.2 Cohérence interférométrique	- 85 -
V. Conclusion	- 86 -

Chapitre III :Evaluation de la croissance et du déficit hydrique chez les oliviers
..... - 87 -

I. Introduction	- 88 -
II. Approche quantitative de distinction de la croissance et du déficit hydrique des oliviers : comportement a long terme	- 89 -
II.1. Déficit hydrique des oliviers	- 91 -
II.2. Croissance des oliviers	- 92 -
III. Analyse des profils saisonniers :	- 92 -
IV. Effets des facteurs climatiques sur le GRO et le TWD :	- 94 -
V. Comportement des variations résiduelles dendrométriques et des flux de sèves : ..	- 98 -
VI. Conclusion	- 103 -

Chapitre IV :Analyse des Séries Temporelles des données radar *in situ* et sentinel-1
..... - 105 -

I. Introduction	- 106 -
II. Analyse de la cohérence interférométrique	- 107 -
II.1 Ligne de base temporelle de 15 min.	- 107 -
II.1.1 Observations à l'échelle annuelle	- 107 -
II.1.2 Echelle diurne.....	- 109 -
Stade de repos végétatif (mi-décembre-janvier).....	- 115 -
Stade de la floraison (avril-mai)	- 115 -
Stade du durcissement du noyau (juillet-août)	- 117 -
Stade de la maturation des fruits (octobre -novembre).....	- 118 -
II.1.3 Analyse de la cohérence avec les mesures dendrométriques	- 118 -
II.1.4 Effets de la pluie sur la cohérence <i>in situ</i>	- 120 -
II.1.5 Effets de l'irrigation en goutte-à-goutte sur la cohérence	- 122 -
II.2. Lignes de base de plusieurs jours	- 124 -
II.2.1 L'évolution temporelle de la cohérence	- 124 -
II.2.2 Effet de la récolte des oliviers sur la cohérence	- 127 -
II.2.3 Analyse du cycle diurne pour des lignes de bases de plusieurs jours..	- 129 -
II.3. Comparaison des cohérences estimées : <i>in situ</i> et sentinel-1	- 133 -

III.	Analyse du coefficient de rétrodiffusion	- 136 -
III.1.	Observations à l'échelle annuelle	- 136 -
III.2.	Echelle diurne	- 139 -
	Stade de repos végétatif (mi-décembre-janvier).....	- 142 -
	Stade de la floraison (avril-mai)	- 142 -
	Stade du durcissement du noyau (juillet-août)	- 143 -
	Stade de la maturation des fruits (octobre -novembre).....	- 144 -
III.3.	Effets de la pluie	- 144 -
III.4.	Analyse du comportement des coefficients de rétrodiffusions entre les mesures <i>in situ</i> et sentinel-1	- 146 -
IV.	Conclusion	- 149 -
	Conclusion générale et perspective	- 152 -
	Références bibliographiques	- 159 -

Liste des figures

- Figure I. 1 : Schéma illustre des différentes Composantes du bilan hydrique. - 12 -
- Figure I. 2 : Schéma illustre de géométrie d'imagerie d'un radar à visée latérale embarqué à bord d'une sonde spatiale (ce schéma ne prend pas en compte la courbure de la terre). - 18 -
- Figure I. 3 : Schéma illustratif de la géométrie radar à visée latérale embarqué à bord d'une sonde spatiale et ses résolutions spatiales (ce schéma ne prend pas en compte la courbure de la terre). - 20 -
- Figure I. 4: Résolution azimutale d'un radar à synthèse d'ouverture, d'après Curlander & McDonough (1991), v_s est la vitesse du satellite ou de l'avion, Ba est la largeur angulaire du faisceau en azimut, φ est mesuré à partir d'une ligne perpendiculaire à la trajectoire au sol, R est la portée oblique, R_g est la portée au sol, x est la distance le long de la trajectoire mesurée à partir du point d'approche le plus proche, et dx est la résolution azimutale du SAR..... - 23 -
- Figure I. 5: a) Types de polarisation d'une onde électromagnétique (Garg et al., 2011), b) type de polarisations linéaires ondes : verticales, V, et horizontales, H (Özkan & Baykal, 2016).- 27 -
- Figure I. 6 : Illustration des mécanismes de formation du Speckle : a) constructives, b) destructives, ainsi que la représentation de chacune de ses ondes dans le plan complexe (Baraha & Sahoo, 2023; Mashaly & Mahmoud, 2021). - 29 -
- Figure I. 7 : Illustration de la diffusion et de la réflexion d'une ondes électromagnétiques sur différentes textures de surface : (a) surface lisse, (b) surface modérément rugueuse et (C) surface très rugueuse (Sandven et al., 2006) - 32 -
- Figure I. 8 : Illustration des divers mécanismes impliqués dans la rétrodiffusion de l'onde par l'environnement : (1) la diffusion par la surface du sol sans atténuation de la végétation, (2) la diffusion par la surface du sol avec atténuation de la végétation, (3) interaction sol-végétation, et (4) la diffusion de volume - 35 -
- Figure I. 9 : Les réponses du coefficient de rétrodiffusion, σ_0 , obtenues sur la culture de sorgho (Ulaby, 1975). a) en fonction de la fréquence, en polarisation VV, à 0° et 30° d'incidence, sous différentes conditions d'humidité du sol (faible à 8.2 % et élevée à 26.8%. b), c) et d) en fonction de l'angle d'incidence, pour trois polarisations (VV, HV et HH) pour une même humidité et à 3 différentes fréquences (Mandal et al., 2021). - 36 -
- Figure II. 1 : Localisation du verger d'oliviers dans la plaine du Haouz au Maroc (carte de gauche). L'emplacement de la tour radar (illustrée par les deux photos de la figure), la station de flux et la station météorologique sont également illustrées sur la carte de gauche..... - 49 -
- Figure II. 2: Photos illustrant la station de flux (la partie aérienne) installée sur la parcelle d'olivier étudié avec les différents capteurs..... - 52 -
- Figure II. 3 : Comparaison entre les valeurs demi-horaires/journalières de l'énergie disponible ($R_n - G$) et des flux turbulents ($H + LE$) mesurés par le système d'Eddy Covariance pour la parcelle d'olivier sur la période qui s'étale de juin 2019 à avril 2023 : a) les données demi-heure, b) données moyennées à l'échelle journalière..... - 53 -

Figure II. 4 : a) Schéma d'un capteur TDP-50, b) mise en place des aiguilles sur le tronc d'un olivier, c) état final du capteur et de l'isolant thermique.	- 55 -
Figure II. 5 : Dessin d'une coupe transversale d'un tronc d'arbre montrant les différents tissus ligneux entre l'écorce et la moelle (Grandi et al., 2023)	- 57 -
Figure II. 6 : Photos illustrant la mise de l'un des dendromètres sur le tronc d'un arbre d'olivier proximité d'une sonde TDP-50	- 60 -
Figure II. 7 : a) Séries temporelles des mesures ΔR pour la période d'avril 2020 à décembre 2022, Figure, b) zoom sur la période allant du 11 au 16 février 2022 avec les mesures ΔR et l'incrément du rayon, I ; c) variations résiduelles, ΔR_r , et amplitudes quotidiennes, A , estimées après normalisation des mesures ΔR par la courbe de lissage (vert)	- 61 -
Figure II. 9 : Photos de la mise en place des sondes TDR (capteurs blancs carrés) et des plaquettes de flux (capteurs rouges rondes) dans deux fosses situées près de la station d'Eddy-covariance. Photo à gauche montre la fosse se trouvant au pied d'un tronc d'arbre d'olivier se composant de deux sondes à 5 cm dont une à gauche et l'autre à droite du tronc, et les autres profondeurs 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm, 50 cm et 80 cm sous forme d'escalier. La photo à droite montre la fosse entre rang avec les sondes TDR de 10 cm, 20 cm et 30 cm, la sonde de 5 cm ne figure pas sur la photo.	- 64 -
Figure II. 10 : Les principaux stade phénologiques, de deux mois, et les mois qui leurs correspondent de l'année, choisies pour cette étude, ainsi que les principaux changements phénologiques que l'oliviers subissent. Reference image: (<i>Olive Phenological Phases and Their Nutrition Requirements - SQM Specialty Plant Nutrition</i> , n.d.)	- 66 -
Figure II. 11 : Photos prises lors de l'installation de la tour illustrant la structure des échafaudages qui construisent la tour, ainsi que les haubans de stabilisation	- 68 -
Figure II. 12 : Illustrations et photos des positions du réseau d'antennes au sommet de la tour. Les sept petites antennes du cadre supérieur sont celles qui fonctionnent dans la bande C. la notation « R » correspond à la réception tandis que « T » est à la transmission.....	- 70 -
Figure II. 13 : Photos des connexions des câbles d'antennes-coffret-duplexeurs : A) illustration en 3D de l'ensemble des liaisons entre VNA, duplexeurs et connecteurs coaxiaux du coffret. B) et C) photos des connecteurs coaxiaux et le câblage reliant les d'antennes aux duplexeurs. -	74 -
Figure II. 14 : Schéma illustratif de l'ensemble du système qui constitut le radar in situ ainsi que les différentes connexions (câblage) au sein du dispositif.	- 75 -
Figure II. 15 : Magnitude au carré d'une réponse radar rétrodiffusée en fonction du profil de portée, avec une illustration de la relation entre l'onde radar <i>in situ</i> et une tranche bidimensionnelle de la scène observée. La région avec la dynamique en rouge montre la plage de 25-40 m sur laquelle la réponse radar a été analysée sur les oliviers.	- 77 -
Figure II. 16 : Intensité des impulsions acquises le 1er Avril 2020 par le couple d'antennes R2-T1 (polarisation VV). a) réponse sur les 7 premières mètres, b) zoom sur la réponse du lobe principale de la tour. On distingue le pic du couplage à une distance d'environ 55 cm de l'antenne	- 78 -
Figure II. 17: Tracé du premier lobe d'intensité pour des impulsions exclues, pour les couples d'antennes : R3-T1 (polarisation HV), b) R4-T1 (polarisation HV), c) R1-T2 (polarisation VH).	

Les impulsions tracées correspondent aux données acquises à 13h00 (séquences A, B, et C) de chaque jour du 1er mars 2020 au 31 décembre 2021, sur une distance de 0 à 1,5 mètres. - 79 -

Figure II. 18 : Illustre les corrélations calculées entre : a) les cohérences en polarisations VV, VH, HH, b) les cohérences en polarisations VV, VH, HH et la cohérence calculée en mélangeant toutes les polarisations. Toutes les cohérences sont calculées à des intervalles de 15 minutes sur la période d'étude allant du 1er mars 2020 au 31 décembre 2021, avec la densité de points. - 81 -

Figure II. 19 : La cohérence calculée entre les quatre paires de configurations d'antennes : (R1_T1 / R2_T2) entre polarisations VV et VH, (R2_T2 / R3_T2) entre polarisations VH et HH, ainsi que deux paires antennes (R1_T1 / R3_T2 et R5_T1 / R4_T2) entre polarisations VV et HH sur la période du 1er mars 2020 au 31 décembre 2021. Les courbes en rouges dans les tracés correspondent à la tendance des cohérences utilisant une moyenne mobile pondérée gaussienne sur deux jours. - 82 -

Figure III. 1 : (a) : Mesures dendrométriques ΔR avec les courbes de croissance GRO cumulées pour les deux approches LG et ZG, (b) : Déficit hydrique de l'arbre LG et ZG, (C) : les taux de croissance journaliers (GRO rate) pour LG et ZG. Les arrière-plans verts, bleus et magentas correspondent aux stade phénologiques des oliviers, respectivement, pour 2020, 2021 et 2022 avec : S.I est le stade de repos de végétal. S.II est le stade de floraison. S.III est le stade du durcissement du noyau. S.IV est le stade de la maturation des fruits - 90 -

Figure III. 2 : a) : Les moyens journaliers des mesures ΔR pour chaque saison, avec la suppression des tendances annuelles cumulées d'une année à l'autre, en plus du début et de fin de chaque saison en arrière-plan vert et les écarts-types journaliers ΔR en arrière-plan gris. b) : les taux moyens journaliers du déficit hydrique de l'arbre TWD recalculés sur chacune de ces périodes, en utilisant l'approche de croissance nulle ZG. c) : les taux cumulés journalière de la croissance (GRO rate cumul) recalculés sur chacune de ces périodes, en utilisant l'approche de croissance nulle ZG. Avec : S.I est le stade de repos de végétal. S.II est le stade de floraison. S.III est le stade du durcissement du noyau. S.IV est le stade de la maturation des fruits - 93 -

Figure III. 3 : a) Les corrélations calculées à une échelle mensuelle entre le taux de croissance mensuel des du tronc (GRO) et b) le déficit hydrique des arbres (TWD), du début de 2020 jusqu'à novembre 2021, et les facteurs et indices climatiques : Hr (l'humidité de l'air), Rain (les précipitations), VPD (le déficit de pression de vapeur), Fs (les mesures de flux de sèves), Ttree (la température de brillance des arbres), PRI (l'indice de réflectance photochimique) et le NDVI (l'indice de végétation par différence normalisé)..... - 95 -

Figure III. 4 : Moyennes mensuelles sur une échelle journalière, des variations résiduelles dendrométriques ΔR_r en micromètres (axe des ordonnées à gauche), ainsi que les flux de sève (axe des ordonnées à droite) exprimés en millimètres, avec les périodes entre chaque maximum et minimum journalière des ΔR_r en arrière-plan rouge sur la période d'étudiée s'étendant de novembre 2020 à octobre 2021 - 99 -

Figure IV. 1 : Séries chronologiques des cohérences interférométriques γ (mixant toutes les polarisations) en bande C, en plus des paramètres environnementaux et mesures physiologiques pour la période 2020-2021. Du haut en bas : La courbe bleu représente les mesures des cohérences interférométriques. Les courbes en jaunes représentent les paramètres environnementaux et les mesures physiologiques : WS (Vitesse du vent), VPD (déficit de pression de vapeur), ETR (évapotranspiration réel), ΔR_r (variations résiduels dendrométriques des troncs d'arbres) avec courbes rouges expansions positifs et bleus contractions négatives des

troncs d'arbres, *Sapflow* (les flux de sèves), *VWC* (l'humidité du sol à 10cm) ainsi que les *Rain* (précipitations) en rouge. Les courbes en noirs dans les tracés correspondent à la tendance des mesures utilisant une moyenne mobile pondérée gaussienne sur deux jours..... - 108 -

Figure IV. 2 : Dynamique quotidienne sous forme de boîtes à moustaches sur les stades phénologiques de 2020 (les barres d'erreur sont min et max) de (de haut en bas) : cohérences sur 15 min, vitesse du vent, évapotranspiration (*ETR*), flux de sève et variation résiduelle de la des troncs d'oliviers (ΔRr). De gauche à droite : résultats pour quarts périodes de 2 mois de 2020 ramenés à une échelle de 24 h. Les bandes roses indiquent le début de la diminution diurne progressive de γ pour chaque stade phénologique étudiée, jusqu'à ce que la médiane des vitesses de vent enregistrées pour chaque stades phénologiques excède la médiane nocturne de 10 % (début de la bande bleu). Les bandes bleues indiquent le reste de la période jusqu'à ce que la cohérence retrouve ses valeurs nocturnes..... - 111 -

Figure IV. 3 : Dynamique quotidienne sous forme de boîtes à moustaches sur les stades phénologiques de 2021 (les barres d'erreur sont min et max) de (de haut en bas) : cohérences sur 15 min, vitesse du vent, évapotranspiration (*ETR*), flux de sève et variation résiduelle de la des troncs d'oliviers (ΔRr). De gauche à droite : résultats pour quarts périodes de 2 mois de 2021 ramenés à une échelle de 24 h. Les bandes roses indiquent le début de la diminution diurne progressive de γ pour chaque stade phénologique étudiée, jusqu'à ce que la médiane des vitesses de vent enregistrées pour chaque stades phénologiques excède la médiane nocturne de 10 % (début de la bande bleu). Les bandes bleues indiquent le reste de la période jusqu'à ce que la cohérence retrouve ses valeurs nocturnes..... - 112 -

Figure IV. 4 : Les coefficients de détermination (R^2) entre la cohérence temporelle et de l'*ETR* en nuage de points en fonction de la vitesse de vent inférieure à 2 m/s sur la bande rose pour : a) avril-mai, b) juillet-août et c) octobre-novembre 2020. - 116 -

Figure IV. 5 : La corrélation entre l'état hydrique des plantes a travers les variations quotidiennes de la circonférence du tronc et γ : a) Pente de cohérence temporelle du matin (c'est-à-dire 3 h après l'aube) et b) Amplitude journalière de ΔRr , montrant les données brutes et les données filtrées à l'aide d'un filtre Savitsky-Golay. Des bandes verticales grises et bleues alternées (le changement de couleur est pour la clarté) mettent en évidence plusieurs jours consécutifs d'augmentation de la circonférence du tronc. La série chronologique de septembre à décembre 2021 a été exclue en raison de données manquantes..... - 119 -

Figure IV. 6 : Mesures *in situ* de la période du 4 janvier au 9 mars 2021 : a) l'évolution de la cohérence avec un intervalle de temps de 15 minutes, b) la décorrélation temporelle de la cohérence avec $\Delta t = 15$ minutes, en fixant t_1 à 00:00, c) les mesures des précipitations, d) la vitesse du vent. Les périodes de pluie sont identifiés par les lettres A, B, C, D, E et F sur les graphes de la figure et sont colorées en arrière-plan bleu. - 121 -

Figure IV. 7 : Photo du verger d'olivier prise le 14 février 2021 à midi par la webcam installée en haut de la tour. - 122 -

Figure IV. 8 : Mesure de l'humidité superficielle à 5cm sous l'un des goutte-à-goutte avec les événements d'irrigation détectés à partir de ces données marquées par les barres bleues. .. - 123 -

Figure IV. 9 : Les cohérences *in situ* pour la période allant d'avril à mai 2021, avec des lignes de base de 2 jours, ramenées à une échelle de 24 h, pour les jours avec irrigation (boîte à moustache

en rouge) et les jours sans irrigation (boite a moustache en bleu) avec la médiane des deux cohérences (jours irrigués et non irrigués). - 124 -

Figure IV. 10 : Evolution de la cohérence pour les lignes de base $\Delta t = t_2 - t_1$ allant de 15 min. à 30 jours (avec un pas de temps de 15 min) : a) avril-mai 2020, b) juillet-août 2020, c) avril-mai 2021, b) juillet-août 2021. La variable t_1 a été fixée à 00h00 chaque jour des périodes correspondantes. - 125 -

Figure IV. 11 : Dynamique de cohérence, en multi-look, pour les lignes de base temporelles croissantes $\Delta t = t_2 - t_1$ de 0 à 30 jours (avec un pas de temps de 15 min) pour $t_1 = 00:00$ les 1er et 3 juillet 2020 (montrant une baisse soudaine à la fin des 2 et 5 juillet). - 126 -

Figure IV. 12 : Dynamique de la cohérence pour les lignes de base temporelles croissantes $\Delta t = t_2 - t_1$ de 0 min à 30 jours (du 1er Octobre au du 10 Novembre 2021 avec un pas de temps de 15 min) en multi-look avec les écart-type en violet du multi-look. La variable t_1 a été fixée à 00h00 chaque jour des périodes correspondantes - 128 -

Figure IV. 13 : Dynamique de cohérence pour les lignes de base temporelles croissantes $\Delta t = t_2 - t_1$ de 0 à 30 jours (avec un pas de temps de 15 min) pour $t_1 = 00:00$ le 25 octobre 2021 (montrant les effets de la récolte des olives (c'est-à-dire, 11 Novembre, ligne verticale). - 129 -

Figure IV. 14 : Cycle diurne de la cohérence médiane, en multi-look, estimée pour les lignes de base $\Delta t = 1, 3, 6, 9, 12$ et 18 j pour (a) Avril-Mai 2021, (b) Juillet-Août 2021 et (c) Octobre-Novembre 2021. Les zones bleu clair indiquent les écart types correspondant à $\Delta t = 6$ jours seulement. - 130 -

Figure IV. 15 : Dynamique de la cohérence médiane pour les lignes de base croissantes $\Delta t = t_2 - t_1$ de 0 à 30 jour (avec un pas de temps de 1 j) pour trois périodes de 2 mois (a) à 06h30 et (b) 18h30. Les zones bleu clair indiquent les écart types pour la période de Juillet-Aout seulement. - 132 -

Figure IV. 16 : Comparaison des cohérences en polarisation VV et VH issues des mesures in situ, (carrés noirs) et de Sentinel-1 (cercles rouges) pour a) l'orbite descendant (6h30, $\theta = 35.2^\circ$) et b) l'orbite ascendant (18h30, $\theta = 45.6^\circ$). Les cumuls journaliers de pluie mesures sont aussi présentés sous forme de barres bleus. - 134 -

Figure IV. 17 : Séries chronologiques des intensités I , en bande C, en plus des paramètres environnementaux et mesures physiologiques pour la période 2020-2021. Du haut en bas : Les courbes en verts représentent les mesures d'intensités, respectivement, en polarisation VV, VH et HH. Les courbes en jaunes représentent les paramètres environnementaux et les mesures physiologiques : WS (Vitesse du vent), VPD (déficit de pression de vapeur), ETR (évapotranspiration réel), ΔR_r (variations résiduels dendrométriques des troncs d'arbres) avec courbes rouges expansions positifs et rouges contractions négatives des troncs d'arbres, $Sapflow$ (les flux de sèves), VWC (l'humidité du sol a 10cm) ainsi que $Rain$ (les précipitations) en rouge. Les courbes en noirs dans les tracés correspondent à la tendance des mesures utilisant une moyenne mobile pondérée gaussienne sur deux jours. - 137 -

Figure IV. 18 : Dynamique quotidienne sous forme de boîtes à moustaches sur les stades phénologiques de 2020 (les barres d'erreur sont min et max) de (de haut en bas) : Les intensités (I) relative aux coefficients de rétrodiffusions en polarisation VV, VH et HH sur 15 min, les flux de sèves ($Sapflow$), l'évapotranspiration (ETR) et les variations résiduelles des troncs d'oliviers (ΔR_r). De gauche à droite : résultats pour quarts périodes de 2 mois de 2020 ramenés à une échelle

de 24 h. Les bandes roses indiquent le début de la diminution diurne progressive des I pour chaque stade phénologique étudiée, jusqu'à que la médiane des vitesses de vent enregistrées pour chaque stades phénologiques excède la médiane nocturne de 10 % (début de la bande bleu). Les bandes bleues indiquent le reste de la période jusqu'à ce que I retrouve ses valeurs nocturnes. ... - 140 -

Figure IV. 19 : Dynamique quotidienne sous forme de boîtes à moustaches sur les stades phénologiques de 2021 (les barres d'erreur sont min et max) de (de haut en bas) : Les intensités (I) relative aux coefficients de rétrodiffusions en polarisation VV, VH et HH sur 15 min, les flux de sèves (*Sapflow*), l'évapotranspiration (ETR) et les variations résiduelles des troncs d'oliviers (ΔR_r). De gauche à droite : résultats pour quarts périodes de 2 mois de 2020 ramenés à une échelle de 24 h. Les bandes roses indiquent le début de la diminution diurne progressive des I pour chaque stade phénologique étudiée, jusqu'à que la médiane des vitesses de vent enregistrées pour chaque stades phénologiques excède la médiane nocturne de 10 % (début de la bande bleu). Les bandes bleues indiquent le reste de la période jusqu'à ce que I retrouve ses valeurs nocturnes. ... - 141 -

Figure IV. 20 : Mesures *in situ* de la période du 4 janvier au 9 mars 2021 : a) l'évolution de la rétrodiffusion en polarisation VV, VH et HH, b) les mesures des précipitations. Les périodes de pluie sont identifiées par les lettres A, B, C, D, E et F sur les graphes de la figure et sont colorées en arrière-plan bleu..... - 145 -

Figure IV. 21 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus de Sentinel-1 pour les Orbites 52 (a) du matin ($\theta = 35^\circ$) et les Orbites 118 (b) le soir ($\theta = 45^\circ$) avec les mesures *in situ*. Pour chaque graphe, a) et b), (en haut) polarisations VV et (en bas) VH. Les rectangles noirs sont les acquisitions *in situ*. Les cercles rouges correspondent aux données Sentinel-1. Les étoiles vertes correspondent aux acquisitions du radar *in situ* glissantes sur une échelle de 24 heures (en haut : 06h30, en bas : 18h30). Le cumul journalier de pluie en bar bleus..... - 147 -

Liste des tableaux

- Tableau I. 1 : Plages de fréquence des bandes radar avec leurs longueurs d'onde (Mitchell et al., 1998)..... - 14 -
- Tableau I. 2 : Les principaux radars SAR embarqués sur des engins spatiaux civils, leurs durées de vies ainsi que les bandes de fréquences utilisées et les institutions les développants et leurs applications (Baraha & Sahoo, 2023; Flores-Anderson et al., 2019; Moreira et al., 2013; Ouchi, 2013)..... - 17 -
- Tableau II. 1 : Paramètres de l'antenne cornet utilisés pour les acquisitions en bande C (5,2-5,8 GHz)..... - 71 -
- Tableau II. 2 : Les différentes paires d'antennes qui forment chaque polarisation avec la notation « R » correspond à la réception tandis que « T » est à la transmission..... - 71 -
- Tableau II. 3 : Les valeurs médianes, d'écart-type et maximales de la cohérence, entre quatre paires de configurations d'antennes : (R1_T1 / R2_T2) entre polarisations VV et VH, (R2_T2 / R3_T2) entre polarisations VH et HH, ainsi que deux paires antennes (R1_T1 / R3_T2 et R5_T1 / R4_T2) entre polarisations VV et HH sur la période du 1er mars 2020 au 31 décembre 2021. - 83 -
- Tableau II. 4 : Caractéristiques des produits Sentinel-1 traités pour la parcelle d'olivier utilisées dans le cadre de cette thèse..... - 84 -
- Tableau III. 1 : Les heures et les valeurs auxquelles chaque point d'inflexion est atteint au cours de chaque journalière moyennes mensuelles, avec les taux cumulatifs par rapport aux cumul journalier des flux de sève, ainsi que les données relatives au rayonnement solaire correspondant à chaque point d'inflexion. - 101 -

Introduction générale

Contexte sociétal

L'eau recouvre environ 71% de la surface terrestre, jouant un rôle crucial dans la préservation des écosystèmes, qui fournissent notre alimentation et d'autres services indispensables. Toutefois, malgré cette abondance, 97% de cette eau est salée, laissant seulement environ 3% sous forme d'eau douce, dont 2% sont piégés dans les glaciers et les nappes souterraines profondes. Cette rare fraction, vitale pour nos activités quotidiennes, agricoles et environnementales, ne représente que 1% de la ressource totale (Mishra, 2023). Ainsi, l'eau, bien que largement présente, demeure une ressource rare et cruciale, suscitant des enjeux géopolitiques majeurs au 21ème siècle, au même titre que les énergies fossiles en terme de conflits potentiels (Jones & Brien, 2014; Selby, 2005).

Le changement climatique aggrave cette situation déjà précaire. Plusieurs études révèlent que les récentes années ont été parmi les plus chaudes jamais enregistrées (Dkhar, 2018; Jones et al., 1999; Tarbuck & Lutgens, 2002), accélérant l'évaporation de l'eau douce et impactant l'intensité et la distribution des précipitations. Cette évolution risque d'intensifier les périodes de sécheresse, surtout dans les zones déjà fragiles, et de perturber les systèmes agricoles, fortement tributaires de l'irrigation.

Avec environ 70-75% de la consommation mondiale d'eau douce attribuée à l'agriculture (Dasdemir et al., 2023), ce secteur se trouve au cœur d'une tension croissante, avec une projection de 15-20% d'augmentation de la demande en eau d'ici 2050 pour répondre aux besoins en irrigation créant une situation de pénurie (FAO, 2011; Rehana & Mujumdar, 2013).

La pénurie d'eau survient lorsque toutes les ressources disponibles sont utilisées, laissant peu de marge pour de futurs besoins ou pour la préservation de l'environnement (Chartres & Varma, 2010). Ce phénomène est devenu une réalité dans de nombreuses régions du globe, en particulier en Asie, au Moyen-Orient et dans le bassin méditerranéen (Bays et al., 2022; Behnassi Mohamed and Rahman, 2021; Shevah, 2017; Yang & Zehnder, 2002), accentuant les tensions dans ces zones, comme illustré par les projections de stress hydrique pour 2040 (Luo et al., 2015).

Water Stress by Country: 2040

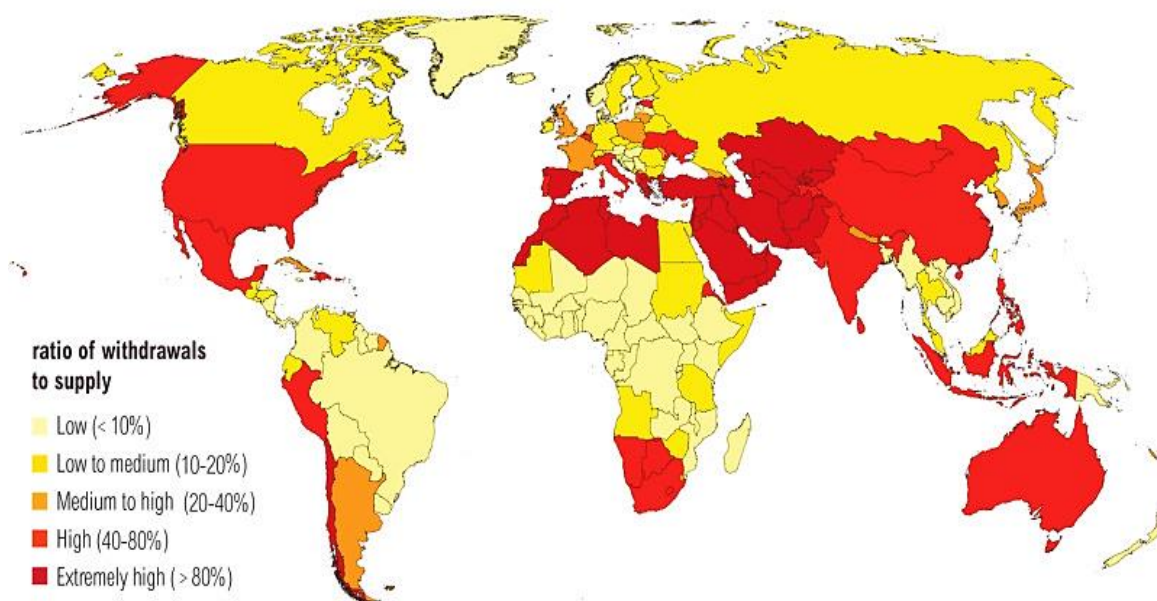


Figure 1 : Carte montrant les régions soumises à un stress hydrique projeté en 2040 (Luo et al., 2015)

Les pays de la région sud méditerranéenne sont parmi les plus touchés par cette rareté d'eau, en raison d'un réchauffement projeté de 20 % plus fort que la moyenne globale (Lionello & Scarascia, 2018; UNEP, 2009) : des hausses de température des pays de cette région méditerranéenne sont de 2 à 3°C d'ici 2050, et de 3 à 5°C d'ici 2100 (Ciais et al., 2013; Milano et al., 2010), conduisant à une augmentation et intensification de la sécheresse prolongée et de la désertification, ainsi qu' à un risque de diminution des précipitations de 10 à 30 % (MedECC, 2020). En outre, plus de 85 % des ressources en eau, dans cette région sont allouées exclusivement à l'agriculture (Jarlan et al., 2015a), avec une demande qui devrait augmenter de 4 à 18 % d'ici la fin du siècle (Cramer et al., 2018), affectant le cycle de l'eau et contribuant à l'épuisement des réserves souterraines.

Le Maroc, pays situé dans le bassin méditerranéen, illustre parfaitement ces défis malgré ses ressources en eau relativement importantes : avec un potentiel hydraulique mobilisable estimé à 22 milliards de mètres cubes (Boukhari et al., 2019, 2020). Cependant, son climat semi-aride à aride et la croissance continue de la demande en eau entraînent une insuffisance des ressources disponibles et des conflits d'utilisation en période de pénurie (Montginoul & Molle, 2019).

Le Maroc fait partie des pays les plus touchés par la pénurie d'eau dans le monde, et fait face à un stress hydrique accru en raison de la croissance démographique et des besoins économiques, avec une forte dépendance à l'agriculture irriguée. Les méthodes traditionnelles d'irrigation, peu

efficaces et gaspilleuses, combinées à une gestion inadéquate des ressources en eau, menacent non seulement la sécurité alimentaire mais aussi la stabilité sociale et économique. Ceci met en évidence les défis urgents de rééquilibrer l'utilisation de l'eau face à une demande croissante et des ressources de plus en plus limitées.

Dans ce contexte, l'adoption de stratégies de gestion durable de l'eau est cruciale, impliquant une révision des pratiques agricoles, l'adoption de technologies d'irrigation efficaces et une gestion intégrée des ressources en eau prenant en compte les besoins écologiques, économiques et sociaux. A cet égard, le gouvernement marocain a lancé en 2008 le « Plan Maroc Vert » et en 2020 le plan « Green Generation », visant à augmenter la productivité agricole tout en rationalisant l'utilisation de l'eau pour l'irrigation : Une approche consiste à piloter la demande d'eau en fonction des besoins réels des cultures et des conditions environnementales, afin d'économiser cette ressource précieuse (Karmaoui et al., 2022; Khoali et al., 2023; Youness & Abderrahim, 2024).

Contexte scientifique

Dans ce contexte, une compréhension approfondie des mécanismes et des processus impliqués dans le cycle de l'eau, en mettant particulièrement l'accent sur l'évapotranspiration (ET), revêt une importance capitale pour une gestion plus efficace des ressources en eau, étant donné que l'ET constitue le principal composant du bilan hydrique dans les régions semi-aride (Deus et al., 2013; Moorhead, 2019; Wilcox et al., 2003). Cependant, la mesure expérimentale de l'ET et de sa partition, que ce soit par des techniques micro-météorologiques *in situ* ou physiologiques, est une tâche complexe et lourde à mettre en œuvre, ainsi que peu représentative en raison de la grande variabilité et d'hétérogénéité observée dans les agrosystèmes méditerranéens (à titre d'exemple) que ce soit en terme de stade de développement ou d'état hydrique des cultures (Allen et al., 2011; Jensen et al., 1990).

C'est dans cette vision que la télédétection spatiale se présente comme un outil particulièrement adapté pour surveiller les zones agricoles, en raison de sa capacité à fournir des observations globales et répétitives. En général, l'observation de l'ET à partir de la télédétection spatiale se fait de manière indirecte en exploitant diverses variables régissant sa dynamique, déduites des signatures radiométriques des cultures (Buchroithner, 2001; Dontsova et al., 2020; Shelton, 2008) . Parmi ces variables, l'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et le LAI (Leaf Area Index), qui sont particulièrement pertinents, ayant été étroitement corrélés au coefficient cultural utilisé pour estimer l'évapotranspiration (Adamala et al., 2016;

Rathod & Manekar, 2017). Cette approche, lorsqu'elle est associée à la résolution du bilan hydrique au niveau de la zone racinaire, permet de suivre l'ET avec une précision satisfaisante, sous réserve de disposer de connaissances détaillées sur les apports en eau à l'échelle parcellaire (Kalma et al., 2008; Maselli et al., 2020). De plus, la température radiative de surface, dérivée de la télédétection infrarouge thermique, peut servir de marqueur indirect de l'état hydrique des couverts végétaux. Ces approches se sont avérées efficaces pour quantifier l'ET des cultures irriguées en région semi-aride, ainsi que pour détecter le stress hydrique, par comparaison à des méthodes basées sur un bilan hydrique de surface (Boulet et al., 2015; Diarra et al., 2017; Gan & Gao, 2015; Kustas et al., 2003; Ma et al., 2022).

Néanmoins, il convient de noter que les acquisitions optiques et thermiques, fournies par les capteurs satellites, rencontrent des limitations dépendantes des conditions météorologiques (les périodes nuageuses). En revanche, les acquisitions obtenues par les capteurs radar restent indépendants des conditions atmosphériques, ce qui en fait un outil précieux pour accéder à une grande variété d'informations (Dagar et al., 2021; Ndehedehe, 2022). Le potentiel des données micro-ondes dans ce contexte réside dans leur grande sensibilité aux variations des variables de surface, notamment l'humidité de surface du sol et de la rugosité de surface, et des variables caractérisant le couvert végétal (telles que la biomasse aérienne, sa constante diélectrique), en fonction de la longueur d'onde utilisée (Ulaby et al., 1982; Ulaby & Long, 2014). Ces informations cruciales peuvent être intégrées à la modélisation SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer) ou à la modélisation agronomique pour prédire à la fois l'évapotranspiration et les rendements agricoles (Oliosio et al., 2005; Toullos et al., 2020). Cela a ouvert de nouvelles perspectives de recherche pour surveiller l'état hydrique des plantes et détecter le stress hydrique qui constitue une information cruciale dans le domaine agricole : en cas de déficit hydrique, la transpiration diminue à mesure que le stress hydrique augmente, entraînant un déséquilibre du stock d'eau et une déshydratation des plantes. Ceci se roduite spécifiquement lors d'une forte demande atmosphérique en eau ou d'un déficit hydrique accru du sol (Van Emmerik et al., 2015, 2017, 2017).

Cependant, par le passé, les produits satellitaires radar n'offraient pas une résolution spatiotemporelle suffisamment élevée pour surveiller efficacement les parcelles des petits agriculteurs, souvent inférieures à 1 hectare. Cela posait un problème, notamment en raison de la grande variabilité des apports en eau d'irrigation entre les parcelles au fil du temps. Toutefois, l'arrivée de nombreux capteurs spatiaux de nouvelle génération, tels que Sentinel-1, lancé en 2015, offre pour la première fois un potentiel inégalé en terme de résolution spatiale de 10 m et

temporelle (6 à 12 jours) pour le suivi des cultures par télédétection radar (ESA, 2012, 2020). Cependant, malgré ces résolutions temporelles, la télédétection radar reste encore incapable de fournir des informations détaillées sur les cycles diurnes de la végétation (Friesen, 2008).

Les premières études visant à coupler les mesures radar à l'état hydrique de la végétation, en se basant sur leurs propriétés diélectriques reflétant leur teneur en eau, se sont principalement concentrées sur les forêts ou les savanes forestières (Dobson et al., 1991; Friesen et al., 2007; Froking et al., 2011; McDonald et al., 2002; Satake & Hanado, 2004; Ulaby, 1975). Cependant, notre compréhension reste limitée en ce qui concerne l'analyse et l'évaluation du comportement hydrique diurne et de l'effet du stress hydrique sur des cultures moins denses et de formes complexes, comme les cultures annuelles et arborées. Une partie de cette complexité découle du développement rapide de ces cultures et des différents mécanismes de croissance qui évoluent avec le temps, nécessitant des acquisitions radar à des résolutions spatio-temporel plus fines.

Objectif et démarche

Dans le cadre du projet MOCTAR, financé par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) de Toulouse, une expérimentation d'acquisition de mesures radar au sol à une fréquence intra-horaire a été réalisée. Cette étude est le fruit d'une collaboration entre l'Université Cadi Ayyad et le Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO) de Toulouse. Son objectif principal est d'évaluer la contribution des données radar en bande C au suivi du fonctionnement hydrique des arbres, avec un focus particulier sur la culture de l'olivier dans une région semi-aride, marquée par des variations climatiques significatives tout au long de l'année.

Notre objectif principal est d'analyser le comportement des réponses radar, de la cohérence interférométrique et du coefficient de rétrodiffusion, face aux variations diurnes de l'état hydrique des arbres d'olivier. Si le signal radar est sensible à l'humidité de la végétation, il l'est également à d'autres paramètres incluant la géométrie et la distribution des diffuseurs, ainsi que la rugosité et l'humidité du sol sous-jacent. La question est de savoir si les variations du contenu en eau du couvert d'oliviers peuvent être suffisamment discriminantes, et dans l'affirmative, peuvent être quantifiées à partir des données radar. Notre analyse reposera sur des observations radar *in situ* intra-horaires, comparées aux paramètres environnementaux, et aux acquisitions satellitaires radar de Sentinel-1. Pour cela, un radar *in situ* équipée d'antennes bande C a été installé sur un site expérimental d'olivier dont les caractéristiques biophysiques et le fonctionnement physiologique ont été suivis en parallèle. Ce dispositif radar *in situ* présente l'avantage

d'effectuer un suivi fin du cycle diurne avec un pas de temps intra-horaire contrairement à l'ensemble des travaux menés jusqu'à présent.

Ainsi, ce manuscrit est organisé en quatre chapitres :

Le chapitre I s'articule autour de deux parties : la première aborde, en bref, les mécanismes des échanges d'eau et d'énergie dans le continuum sol-plante-atmosphère. La deuxième partie, qui est le cœur de ce travail, se concentre sur les principes de la télédétection radar, en mettant particulièrement l'accent sur les radars à synthèse d'ouverture (SAR : Synthetic Aperture Radar) dont les données fournies par Sentinel-1 seront exploitées. De plus, une revue bibliographique de l'état de l'art sera présentée, mettant en lumière l'impact du cycle diurne et du stress hydrique des plantes sur la réponse radar.

Le chapitre II est consacré à la présentation détaillée de la parcelle expérimentale choisie pour ce travail, avec les aspects techniques de l'expérimentation menée dans le cadre de cette thèse : système d'acquisition radar *in situ* (le principe d'acquisition des données, les méthodes d'estimation de la cohérence interférométrique γ ainsi que le coefficient de rétrodiffusion σ^0), les différentes mesures météorologiques et physiologiques effectuées. Enfin, nous décrivons les données satellitaires provenant de Sentinel-1A et -1B qui ont été utilisées dans cette thèse.

Le chapitre III se basera sur l'analyse des mesures dendrométriques, de flux de sève et des mesures météorologiques, dont l'objectif est de mieux appréhender l'état hydrique des oliviers étudiés, tant pendant les périodes de croissance que lors de phases de déficit hydrique. Les approches d'analyse, dans ce chapitre, impliquera une séparation quantitative des mesures dendrométriques ainsi qu'une analyse des effets des facteurs climatiques sur ces mesures.

Le chapitre IV portera sur l'analyse du comportement des réponses radar, cohérence interférométrique γ et coefficient de rétrodiffusion σ^0 , face aux variations diurnes de l'état hydrique des oliviers étudié. Elles seront comparées aussi aux acquisitions satellitaires radar de Sentinel-1.

Chapitre I. Transfert des flux d'eau et d'énergie dans les milieux sol- plante-atmosphère et suivi de la végétation par télédétection radar

I. Introduction

La végétation joue un rôle essentiel dans les cycles complexes d'échange d'énergie et d'eau entre le sol et l'atmosphère (Evet, 2001), régulant ainsi le climat et les environnements locaux (D'Odorico et al., 2010; Huryňa & Pokorný, 2016). Les processus et l'indicateurs biophysiques au sein de la végétation tels que la photosynthèse, l'évapotranspiration ou son état hydrique sont des facteurs centraux qui influencent ces échanges au sein des écosystèmes (Wang et al., 2021) : La photosynthèse est le processus par lequel les plantes convertissent la lumière en énergie avec l'absorption d'eau et de dioxyde de carbone, influençant leur partition dans l'atmosphère (Li et al., 2023; Sherin et al., 2022). L'évapotranspiration, quant à elle, implique l'évaporation de l'eau des plantes et de la surface du sol, ce qui constitue un mécanisme majeur pour la circulation de l'eau terrestre (USGS, 2019).

Un suivi fin de la dynamique de la végétation peut améliorer notre compréhension des effets de ses variations, tant au niveau de la structure que de l'état hydrique, sur le cycle de l'eau et l'énergie. Dans ce contexte, l'apport de la télédétection, et notamment des données radar, sensibles à l'humidité des surfaces et des milieux (sols et plantes), présente un fort potentiel pour l'étude de ces interactions. La télédétection satellitaire radar fournit des données à large échelle, contrairement aux mesures *in situ*, onéreuses et lourdes à mettre en place et à maintenir, ne fournissant que des mesures à des échelles locales. De plus les mesures radar sont indépendantes des conditions météorologiques, et sont sensibles à l'humidité du sol et l'état hydrique des plantes paramètres ayant une influence majeure dans les bilans hydriques et radiatifs. Ce potentiel est particulièrement important pour l'agriculture, où une surveillance précise de l'humidité du sol et des conditions hydriques des cultures est fondamentale pour optimiser l'irrigation et améliorer la gestion des ressources en eau.

Dans ce chapitre, nous exposons dans une brève première partie les mécanismes des échanges d'eau et d'énergie dans les milieux sol-plante-atmosphère. La deuxième partie, introduit le cœur du sujet de cette thèse, à savoir l'apport de la télédétection radar pour le suivi de la végétation. Elle présente tout d'abord les principes de la télédétection radar, puis fait une synthèse des travaux publiés sur l'apport de ces données pour le suivi de la végétation, qui se conclura par un état de l'art sur le suivi de l'état hydrique de la végétation à l'aide des données radar. L'accent est mis sur les radars SAR dont les données acquises par les capteurs européens Sentinel-1 dans le cadre du programme Copernicus sont utilisées dans ces travaux.

II. Les échanges d'eau et d'énergie dans les milieux sol-plante-atmosphère

La connaissance des interactions entre la terre et l'atmosphère, notamment les échanges d'eau et d'énergie, est essentielle dans plusieurs domaines telque la météorologie, l'hydrologie ou l'agronomie (Browning & Gurney, 2001; Lalic et al., 2018). Ces échanges sont fortement influencés par le fonctionnement de la végétation et notamment le flux d'évapotranspiration qui en découle, car elle influence la régulation thermique et hydrique des plantes et joue un rôle vital dans leur productivité et les processus de photosynthèse et de gestion de l'eau dans les plantes. L'évapotranspiration (ET) est un flux d'eau majeur pour le bilan d'eau de surface mais elle est aussi au centre du bilan d'énergie de surface car c'est l'évapotranspiration qui permet de dissiper une grande partie de l'énergie solaire reçue et ainsi éviter les dommages aux plantes.

II.1. Bilan d'énergie

D'un point de vue de la physiologie végétale, la lumière solaire a un rôle important dans des processus tels que la synthèse de la chlorophylle, la régulation stomatique, la photosynthèse et, in fine, sur la croissance et la phénologie des plantes (Bauerle et al., 2003; Lalic et al., 2018; Rahman & Hasegawa, 2012). Les surfaces terrestres sont exposées à un spectre solaire composé d'environ 42 à 43 % de lumière visible (à courtes longueurs d'onde), de 52 à 55 % de lumière proche infrarouge (à longues longueurs d'onde), et d'environ 3 à 5 % d'ultraviolets (UV) (Wang & Yu, 2023).

Le bilan radiatif en surface, qui est une évaluation des échanges d'énergie radiative entre sol-végétation-atmosphère, comprend quatre composantes principales du rayonnement. Premièrement, le rayonnement solaire incident R_g^\downarrow , qui représente la principale source d'énergie pour la surface terrestre. Deuxièmement, le rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre vers l'espace $\alpha_s R_g^\uparrow$, ou α_s est l'albédo de la surface. Troisièmement, le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre R_a^\uparrow , résultant de l'absorption de l'énergie solaire et de sa réémission sous forme de chaleur. Enfin, le rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère R_a^\downarrow , résultant de la somme des émissions des différentes couches de l'atmosphère en infrarouge (principalement par les gaz à effet de serre tels que la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone). La quantité d'énergie radiative disponible pour alimenter les processus d'échange à l'interface sol-végétation-

atmosphère est désignée sous le terme de rayonnement net R_n , représenté par l'équation suivante :

$$R_n = R_g^\downarrow - \alpha_s R_g^\uparrow + R_a^\downarrow - R_a^\uparrow \quad (\text{I. 1})$$

Ce rayonnement net, R_n , est dissipé dans l'environnement par différents processus : Flux turbulents participant au réchauffement des couches d'air proches du sol, entraînant des échanges de chaleur sensible (H) et de chaleur latente (L_E) entre la surface terrestre et l'atmosphère ; flux conductifs (G) représentant l'énergie stockée dans le sol ; énergie mise en jeu par le processus de la photosynthèse des plantes (Ph) et l'énergie stockée par la végétation (dS), par l'équation ci-dessous :

$$R_n = G + H + L_e + Ph + dS \quad (\text{I. 2})$$

Pour des écosystèmes non forestiers, le bilan énergétique est dominé par quatre composantes majeures à savoir : R_n , G , H et L_e . Les termes liés à la photosynthèse (Ph) et à l'énergie stocké par la végétation (dS) sont souvent négligés dans cette équation. Cela est dû au fait que dS ne dépasse pas généralement les 20 w/m² (Massman et al., 1990), tandis que Ph ne représente que 2 à 3% du rayonnement net (Shuttleworth & Wallace, 1985 ; Thom, 1975).

La dynamique des composantes du bilan énergétique varie considérablement entre le jour et la nuit. L'énergie absorbée à la surface terrestre pendant la journée provient principalement du rayonnement net et les pertes d'énergie se produisent : flux chaleur latente (L_e), sous forme d'évapotranspiration ; flux de chaleur sensible (H), ainsi que G sous forme d'énergie transférée dans le sol par conduction. Pendant la nuit, les pertes de chaleur sont principalement dues aux émissions terrestres. Les gains d'énergie nocturnes comprennent : le flux de chaleur sensible (H) dans l'air (plus chaud que le sol), la chaleur latente L_e , et G qui sont opposé à celui observé le jour. Cette interaction complexe et changeante dans le temps et dans l'espace rend la modélisation de ces interactions entre la terre et l'atmosphère particulièrement délicate.

II.2. Bilan hydrique

Au sein des interactions complexes entre l'atmosphère et les surfaces terrestres, il est essentiel de comprendre les relations entre le climat, le sol et les facteurs biophysiques qui influencent le mouvement de l'eau des surfaces terrestres à travers la végétation jusqu'à l'atmosphère. Le bilan

hydrique, qui décrit ces dynamiques quantifie la différence entre l'approvisionnement en eau et la perte d'un écosystème. Cet équilibre implique divers processus tels que les précipitations, l'infiltration de l'eau dans les sols, l'interception des précipitations par la végétation, et l'évapotranspiration (la transpiration des plantes et l'évaporation du sol) qui est au cœur de ces interactions (Figure I.2).

L'équation qui décrit le bilan hydrique prend en compte ces différents éléments et peut être exprimée à travers l'évapotranspiration de la manière suivante (Zeke & Wade, 2012) :

$$ET = P + I_r + W - R_s - D \pm \Delta S_0 \quad (I. 3)$$

Où ET désigne l'évapotranspiration (l'équivalent du flux de chaleur latente dans le bilan énergétique (Moiwo & Tao, 2015; Richard Bugan et al., 2020; Wanniarachchi & Sarukkalige, 2022)), P les précipitations, I_r les quantités d'eau apporté au sol par irrigation, W la remontée capillaire, R_s le ruissellement de surface, D le drainage et ΔS_0 les variations du stock d'eau dans la zone racinaire qui peuvent être positifs ou négatifs.

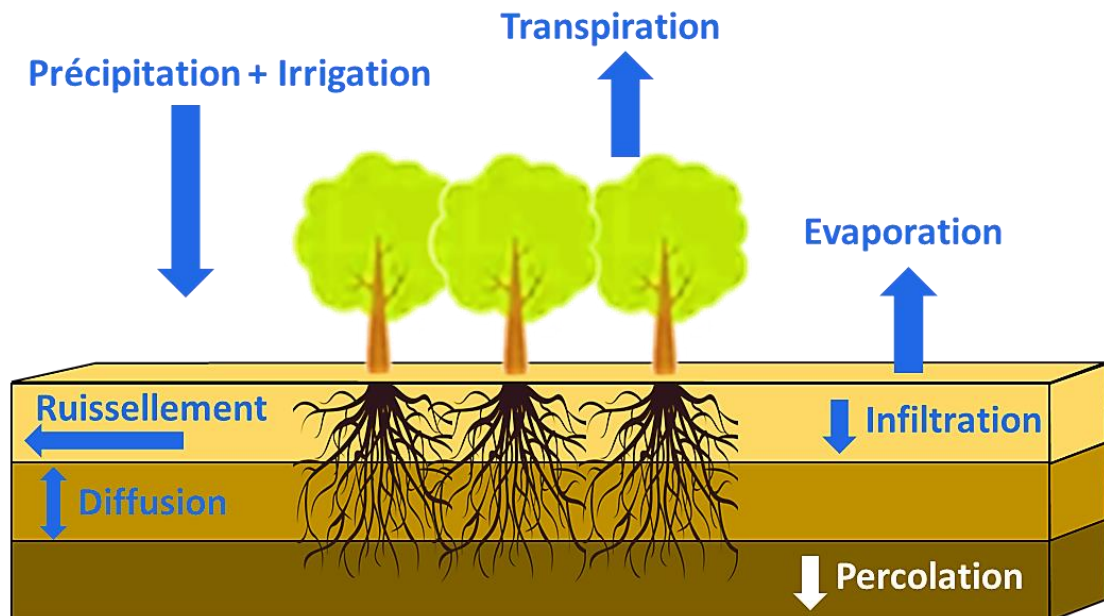


Figure I. 1 : Schéma illustrant les différentes composantes du bilan hydrique.

Les termes du bilan hydrique peuvent être simplifiés en fonction des caractéristiques environnementales et des conditions locales. Par exemple, dans les régions arides ou semi-arides avec de très faibles pentes, le ruissellement est souvent négligeable. De même, la remontée capillaire peut être négligée si le sol est mince ou si la nappe phréatique est très profonde (Holmes, 1984; Rana & Katerji, 2000).

Toujours dans les régions semi-arides, où la demande atmosphérique dépasse nettement les précipitations, l'agriculture se concentre principalement sur deux éléments qui représentent les termes les plus importants du bilan hydrique : l'irrigation et l'évapotranspiration. Ces facteurs jouent un rôle primordial dans la production agricole et la gestion des ressources en eau.

En conséquence, il est vital d'évaluer précisément l'état hydrique des plantes, soit l'équilibre entre l'eau absorbée et celle perdue par transpiration, pour analyser le bilan hydrique dans ces zones. La télédétection radar est une voie de recherche prometteuse pour surveiller l'état hydrique des plantes, particulièrement en agriculture, du fait que les ondes radar sont sensibles aux contenus en eau des plantes.

III. Télédétection radar

III.1. Généralités

Un radar est un système d'acquisition d'informations à distance qui exploite les ondes électromagnétiques opérant en micro-ondes (hyperfréquences), initialement conçu pour détecter des objets, en déterminant leur position ou leur vitesse. L'appellation radar est l'acronyme du RADio Detection and Ranging, terme initialement utilisé pour la première fois par la marine américaine dans les années 1940 (Merrill, 1963). Les ondes électromagnétiques utilisées par le radar couvrent une plage d'onde allant de 300 MHz à 30 GHz. Ces micro-ondes sont positionnées entre le spectre visible et l'infrarouge thermique, et sont classées par longueur d'onde λ ou par fréquence $\nu = c / \lambda$ sous l'appellation « bande » et identifiées par des lettres standardisées en fonction de la bande de fréquence utilisée, comme illustré sur le tableau I.1.

Tableau I. 1 : Plages de fréquence des bandes radar avec leurs longueurs d'onde (Mitchell et al., 1998)

Nom de bande	Plage de fréquences (GHz)	Longueurs d'onde (cm)
VHF	0.03-0.3	1000-100
UHF, P	0.3-1	100-30
L	1-2	30-15
S	2-4	15-7.5
C	4-8	7.5-3.75
X	8-12.5	3.75-2.4
Ku	12.5-18	2.4-1.7
Ka	18-40	1.7-0.75
V	50-75	0.60-0.40
W	75-111	0.40-0.27

L'utilisation de chacune des fréquences $\nu < 30$ GHz permet de réaliser des acquisitions en tout temps, indépendamment des conditions météorologiques, contrairement aux capteurs optiques et thermiques. A titre exemple, la charge en eau des nuages n'ont un impact significatif sur les ondes radar que pour des longueurs ondes inférieures à 2 cm ($\nu > 15$ GHz), tandis que la pluie n'a d'influence notable sur les ondes radar que pour des longueurs d'onde inférieures à 4 cm ($\nu > 7$ GHz) (Ulaby & Long, 2014). Ces propriétés rendent le radar particulièrement adapté à diverses applications telles que : la détection des navires et des avions, la cartographie de la déforestation, l'étude des glaciers et des océans, ainsi que le suivi des cultures agricoles à grande échelle.

Le fonctionnement d'un radar repose sur l'émission d'une onde électromagnétique par une antenne d'émission qui se propage dans l'espace et qui se réfléchit ou se diffuse lorsqu'elle rencontre des objets. En condition monostatique (*i.e.* lorsque l'antenne de réception est au même endroit que l'antenne d'émission, cas de figure le plus couramment rencontré jusqu'à présent) seule la partie rétrodiffusée est captée par l'antenne de réception, permettant l'analyse des caractéristiques des objets rencontrés (Skolnik, 2008a; Tait, 2006).

Les systèmes radar se répartissent en différentes catégories selon leurs modes de fonctionnement et leurs caractéristiques distinctes. Dans le contexte de la télédétection, on distingue deux grandes catégories majeures de radar :

- **Les radars non-imageurs** : sont des systèmes qui ne produisent pas d'images (Rajender, 2023). Ce groupe inclut les instruments tels que les altimètres, qui visent au nadir et qui permettent la mesure de l'altitude de la surface terrestre, fournissant des mesures topographiques des terrains et des océans (Quarty et al., 2021). Les radars météorologiques qui peuvent être aussi considéré comme des radars non-imageurs ; utilisés pour la détection les précipitations et l'évaluation de leurs trajectoires (Domonkos et al., 2023).
- **Les radars imageurs** : sont des systèmes qui réalisent des mesures bidimensionnelles (des images en 2D) de l'objet ou de la zone détectée (Yoon et al., 2021). Ces derniers regroupent les systèmes radar tels que les SLAR (Side-Looking Aperture Radar ou les radars à ouverture réelle), ou les SAR (Synthetic Aperture Radar ou les radars à synthèses d'ouverture). Chacun de ces derniers présentent des caractéristiques distinctes, influant sur la qualité et la nature des informations recueillies.

Depuis ses débuts au 19^{ème} siècle, le radar a connu une évolution remarquable, initialement utilisé pour la détection de navires et d'avions dès les années 1920 (Skolnik, 2008b), avec le premier radar à impulsions conçu par le Laboratoire de recherche naval des Etats-Unis opérationnel en 1936, et l'introduction des premiers radars aéroportés avant la seconde guerre mondiale, notamment des altimètres fonctionnant autour de 400 MHz (Matsuo, 1938; A. H. Taylor et al., 1934). Les avancées significatives ont débuté avec le Rad LaB (Radiation Laboratory Massachusetts Institute of Technology), entre 1948 et 1952, ainsi que d'autres laboratoires internationaux, qui ont joué un rôle primordial dans le développement des radars aéroportés à micro-ondes pour l'imagerie du sol, largement déployés dans les années 1946 dans les bandes S, X et Ka, respectivement dans des fréquences de 3, 10 et 24 GHz (Ulaby & Long, 2014).

Les années 50 ont été marquées par un développement important dans l'histoire du radar avec l'invention du radar aéroporté à visée latérale (SLAR), offrant une résolution plus élevée à des fréquences telles que 10 GHz, 16 GHz et 35 GHz (Xiao et al., 2008). Ces systèmes pouvaient produire des images détaillées sur de longues distances grâce à des antennes allant jusqu'à 15 mètres de longueur.

Parallèlement, le concept du radar à synthèse d'ouverture (SAR) a été introduit, durant la même décennie, à l'université de l'Illinois (Munson et al., 1983), révolutionnant la télédétection avec des images à hautes résolutions, indépendamment de la distance d'observation. Ce système

exploite le mouvement relatif de l'antenne radar, pour créer une antenne synthétique longue, permettant d'observer de vastes surfaces (Lee-Lueng Fu & Holt, 1982). L'application du radar imageur, pour les utilisations civiles, s'est d'abord concentrée sur la cartographie de la surface terrestre, comme le premier grand projet de cartographie qui a eu lieu au Panama en 1967 (Leberl, 1990), avant de s'étendre à divers domaines comme l'utilisation de la télédétection des ressources en eau et le suivi la végétation. Le développement des systèmes SAR à polarisations multiples a eu lieu dans les années 1970 par l'institut ERIM (Environmental Research Institute of Michigan) et le JPL (Jet Propulsion Laboratory) avec des longueurs d'onde d'environ 3 cm et 24 cm (à 9 GHz et 1,25 GHz) (Rawson & Smith, 1974; Schaber et al., 1980; Ulaby & Long, 2014).

La production d'images à polarisations et fréquences multiples a grandement contribué à l'amélioration de notre compréhension des capacités des radars imageurs en télédétection. Cela a conduit au développement de radars imageurs entièrement polarimétriques, notamment utilisés pour la génération de cartes topographiques mondiales depuis l'espace (Cloude & Poettier, 1996; Farr et al., 2007; Touzi et al., 2004; Ulaby & Long, 2014).

La technologie SAR a continué d'évoluer, avec des capteurs plus compacts et une résolution améliorée. En particulier, avec l'arrivée de nombreux capteurs, dites de nouvelle génération, comme Sentinel-1 et Kompsat-5 (Tableau I.2) atteignant, pour Sentinel-1, une résolution spatiale de 10 m et temporelle de 6 jours, principalement, en Europe et d'Afrique du nord, et de 12 jours dans le reste du monde (ESA, 2012). Aujourd'hui, de nombreuses missions spatiales sont en cours de développement comme Sentinel-1 C/D ou BIOMASS qui apporteront des améliorations significatives sur la surveillance spatiale de l'agriculture, la foresterie, l'océanographie et la surveillance environnementale (Bauer-Marschallinger et al., 2021; Quegan et al., 2019). Le Tableau I.2 présente les principaux radars SAR embarqués sur des engins spatiaux civils, leurs durées de vies, les bandes de fréquence utilisées, et leurs applications.

Tableau I. 2 : Les principaux radars SAR embarqués sur des engins spatiaux civils, leurs durées de vies ainsi que les bandes de fréquences utilisées et les institutions les développant et leurs applications (Baraha & Sahoo, 2023; Flores-Anderson et al., 2019; Moreira et al., 2013; Ouchi, 2013)

SAR Missions	Lancement/Statut	Bandes	Institution	Applications
Seasat	26 Jun - 10 Oct 1978	L	NASA, USA	Acquérir une compréhension approfondie des océans.
(ERS)-1/2	17 Jul 1991 - 10 Mar 2000 21 Avr 1995 - 5 Sep 2011	C	ESA, Europe	Mesures globales du vent marin et des vagues, études côtières et détection terrestre.
(JERS)-1	11 Fev 1992 - Oct 1998	L	JAXA, Japan	Étude des phénomènes géologiques et interférométrie SAR pour la détection des changements.
(SIR)-C/X-SAR	19 Avr - 11 Oct 1994	L, C & X	NASA, USA DLR, Allemagne ASI, Italie	Déforestation en Amazonie, désertification au sud du Sahara et rétention d'humidité des sols dans le Midwest.
RADARSAT-1 RADARSAT-2	4 Nov 1995 - 29 Mar 2013 14 Dec 2007- Encore actif	C	CSA, Canada	Surveillance de la répartition des glaces. Applications hydrologiques, géologiques, agricoles et forestières.
SRTM	Fev 2000	C & X	NASA, USA DLR, Allemagne ASI, Italie	Génération d'un modèle numérique d'élévation à l'aide du SAR interférométrique (InSAR).
ENVISAT/ ASAR	1 Mar 2002 - 9 Mai 2012	C	ESA, Europe	Acheminement des navires à travers la banquise, surveillance des risques océaniques/agricoles et naturels
ALOS/ PALSAR ALOS-2	24 Janv 2006- 22 Avr 2011 24 Mai 2014- Encore actif	L	JAXA Japan	Surveillance des marées, gestion des tremblements de terre et des activités volcaniques et exploration des ressources minérales, suivi agricole
TerraSAR-X TanDEM-X	15 Jun 2007 - Encore actif 21 Jun 2010 - Encore actif	X	DLR, Allemagne	La détection et la surveillance très précises des changements : la cartographie intelligente et sécurisée des DEM (Digital Elevation Model)
COSMO - 1/2/3/4	8 Jun 2007- Encore actif 9 Dec 2007- Encore actif 25 Oct 2008- Encore actif 6 Nov 2010- Encore actif	X	ASI, Italie	Applications militaires et civiles : risques sismiques, surveillance des catastrophes environnementales et cartographie agricole
RISAT-1	26 Avr 2012 - 26 Jul 2017	C	ISRO, Inde	Suivi de l'agriculture et de la gestion des catastrophes naturelles (inondations et cyclones)
KOMPSAT-5	22 Aout 2013-Encore actif	X	KARI, Corée	Prise d'images haute résolution SIG, gestion de la mer et des terres, surveillance des catastrophes et de l'environnement
Sentinel-1A/B	3 Avr 2014- Encore actif 26 Avr 2016- Encore actif	C	ESA, Espagne	Détection et surveillance des marées noires, l'agriculture, les inondations, surveillance maritime et cartographie des forêts
RCM-1/2/3	12 Jun 2019- Encore actif	C	CSA, Canada	Détection et surveillance des marées noires, surveillance maritime et cartographie des forêts
SAOCOM-1 A/B	7 Oct 2018- Encore actif 30 Aout 2020-Encore actif	L	CONAE, Argentine	L'hydrologie agricole : les inondations et gestion des cartes d'humidité du sol.
NISAR	Prévu pour début 2025	L & S	NASA, USA ISRO, Inde	Suivi de l'emplacement et de l'impact des risques sismiques, cartographie des risques marins et gestion des incendies

III.2. Principe des acquisitions radars à visée latérale

Les systèmes radar satellitaires ou aéroportés à visée latérale constituent un type de radar imageur dans lequel le faisceau radar est orienté perpendiculairement à la direction de vol. Cette configuration présente plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes d'acquisitions radars, tels qu'une résolution latérale élevée et une couverture étendue des zones avec une seule acquisition. Typiquement, ces radars sont embarqués à bord d'avion. Toutefois, des radars à visée latérale non-imageurs peuvent également être déployés au sol, comme c'est le cas dans notre expérience *in-situ*, qui sera abordée plus en détail dans le chapitre II.

Ces radars à visée latérale se déplacent le long d'une trajectoire avec une vitesse V et une altitude H_r , et l'émission des impulsions est caractérisée par une fréquence de répétition (*PRF* : pulse repetition frequency). Les impulsions sont émises à l'aide d'antennes avec un angle d'incidence θ , dans la direction perpendiculaire à la trajectoire de vol (cette dernière est aussi appelée direction azimutale), générant un faisceau large dans le plan vertical et étroit dans le plan horizontal, comme illustré dans la Figure I.2.

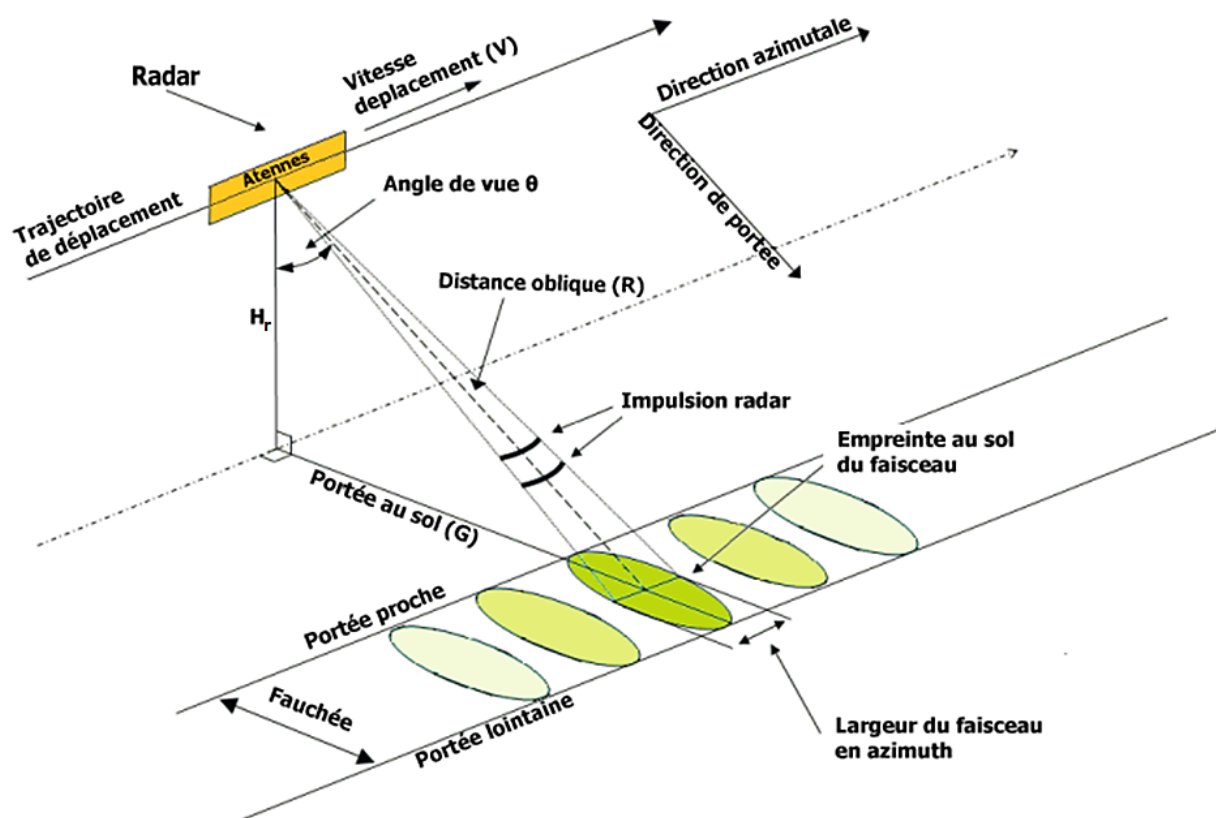


Figure I. 2 : Schéma illustrant de géométrie d'imagerie d'un radar à visée latérale embarqué à bord d'une sonde spatiale (ce schéma ne prend pas en compte la courbure de la Terre).

L'intensité et la phase de l'onde rétrodiffusée dépendent fortement des propriétés de la surface et des cibles observées, désignées sous le terme de « diffuseurs élémentaires ». Sur un sol nu, les facteurs clés déterminants sont la rugosité et l'humidité de la surface, cette dernière étant directement liée à la permittivité diélectrique. Ces deux paramètres sont interconnectés et peuvent être considérés comme étroitement associés.

La relation en distance entre le radar et un élément diffusant dans son champ de vision est déterminée par deux mesures clés ; la première, désignée comme la distance oblique R , qui représente la distance directe entre le radar et le diffuseur situé dans le plan de portée, et la seconde, nommée la portée au sol G , qui correspond à la distance entre le diffuseur et le point nadir directement sous le radar, comme illustré dans la Figure I.2.

À mesure que le radar se déplace le long de sa trajectoire, l'empreinte de son faisceau balaie une bande au sol qui se caractérise par des résolutions distinctes en distance (direction d'émission) et en azimut (direction d'avancée de l'antenne). Dans cette configuration, la portion de fauchée la plus proche du radar est appelée « portée proche », tandis que la plus éloignée est appelée « portée lointaine ».

III.2.1 Résolution spatiale

La résolution spatiale est définie comme étant la distance minimale permettant de distinguer deux objets avec des réponses d'intensités à peu près égales (Engdahl, 2013). Cette résolution s'exprime dans les deux dimensions perpendiculaires ; la résolution en azimut et en distance comme l'illustre la Figure I.3 ci-dessous.

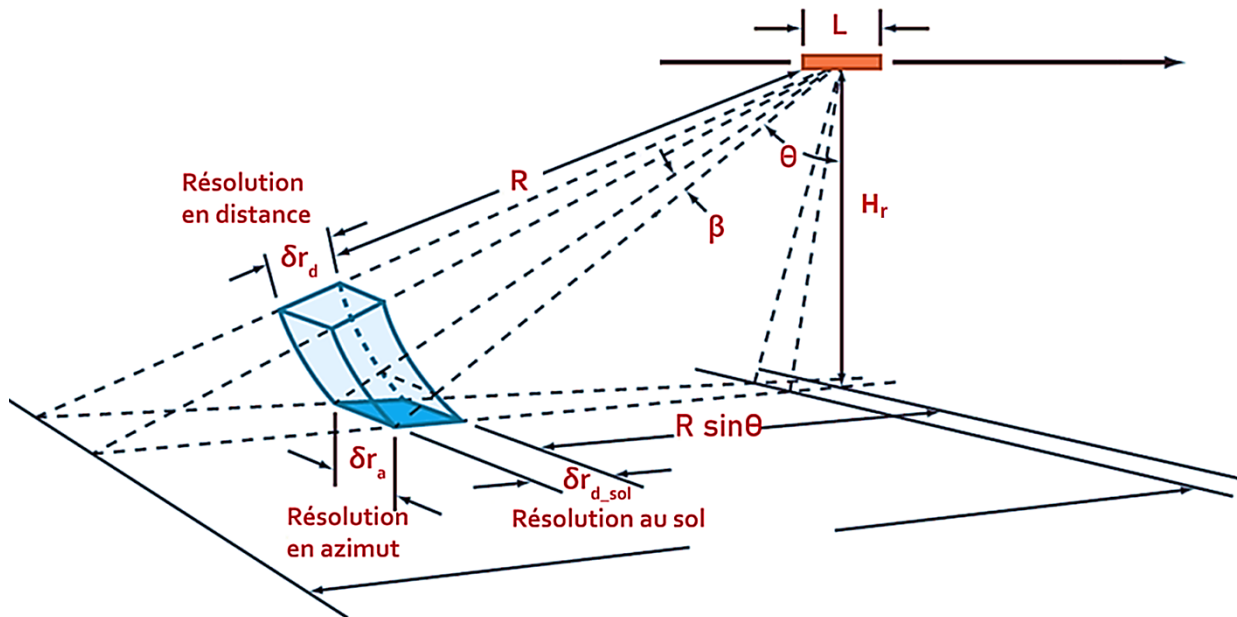


Figure I. 3 : Schéma illustratif de la géométrie radar à visée latérale embarqué à bord d'une sonde spatiale et ses résolutions spatiales (ce schéma ne prend pas en compte la courbure de la terre).

III.2.2 La résolution en distance

La résolution en distance δr_d , Figure I.3, est déterminée par la durée τ de l'impulsion émise par le radar. Pour une impulsion mono-fréquence, de largeur de bande $B = \frac{1}{\tau}$, δr_d a pour expression :

$$\delta r_d = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B} \quad (\text{I. 4})$$

Où « c » est la vitesse de la lumière, et le facteur 2 prenant en compte l'aller et le retour de l'impulsion depuis le radar vers les cibles.

Pour un sol plan horizontal, la résolution en distance au sol δr_{d-sol} , s'exprime ainsi par, Figure I.3 :

$$\delta r_{d-sol} = \frac{c\tau}{2 \sin(\theta)} \quad (\text{I. 5})$$

avec θ l'angle d'incidence.

Pour atteindre une haute résolution en distance, il est essentiel que le système radar émette des impulsions de courtes durées. Cependant, dans la pratique, il y a une limite à la réduction de la

durée des impulsions radar, puisque le fait de diminuer excessivement τ réduit l'énergie de l'impulsion, ce qui rend la détection de la cible plus difficile. De plus, une résolution accrue rend le système plus sensible au bruit. Pour remédier à ce problème, l'amélioration de la résolution en distance se fait en utilisant un signal modulé en fréquence ou « Chirp », caractérisé par une bande passante « B » bien supérieure à celle d'une impulsion mono-fréquence, accompagné d'une compression des impulsions (Cook & Bernfeld, 1967; Kim et al., 2022).

L'exemple des radars Envisat et Sentinel-1 illustre parfaitement comment la bande passante choisie affecte la résolution en distance : Pour Envisat, la largeur de bande est d'environ 16 MHz, ce qui se traduit par une résolution en distance de 9 mètres, tandis que pour Sentinel-1, la largeur de bande est d'environ 100 MHz, ce qui permet à Sentinel-1 de bénéficier « théoriquement » d'une résolution en distance plus précise de 1,5 mètre (Equation I.3).

III.2.3 La résolution en azimut

La résolution en azimut δr_a dépend de l'ouverture de l'antenne, vérifiant $\beta \approx \frac{\lambda}{L}$, où λ est la longueur d'onde et L la longueur de l'antenne. Cette ouverture correspond à la largeur angulaire du faisceau horizontal, comme illustré dans la Figure I.3. La résolution en azimut s'exprime comme ci-dessous :

$$\delta r_a = \beta \cdot R \tag{I. 6}$$

Avec $R = \frac{H_r}{\sin \theta}$ est la distance oblique entre la cible et l'antenne, et H_r l'altitude du radar.

En utilisant les caractéristiques spécifiques du satellite Sentinel-1, à savoir une altitude moyenne H_r de 712 km, une longueur d'onde λ de 5.5 cm, et une longueur d'antenne L de 12.3 m, avec un angle d'incidence θ de 46° , comme exemple, la résolution en azimut δr_a serait de 4.4 km. Une telle résolution en azimut (4.4 km) est inadaptée pour des suivis fins. Son amélioration est possible par un traitement dit de synthèse d'ouverture. Tout comme en distance, il tire parti de la bande passante, dans la direction azimutale en raison de l'effet doppler lié au déplacement du satellite.

III.2.4 Effet Doppler

Comme un système radar satellitaire ou aéroporté à visée latérale se déplace le long d'une trajectoire de vol, à une vitesse v_s relative à un point fixe au sol d'une distance R , il émet des impulsions micro-ondes depuis leur antenne, de largeur L , avec une fréquence porteuse notée f . Les échos rétrodiffusés d'un point seront reçus par l'antenne à une fréquence légèrement supérieure à la fréquence porteuse lorsque le radar s'en approche, et à une fréquence légèrement inférieure lorsqu'il s'en éloigne, selon les effets de décalage de fréquence Doppler, noté f_d tel que (Curlander & McDonough, 1991):

$$f_d = \frac{2 (v_s \sin \varphi)}{\lambda} \approx \frac{2 v_s}{\lambda R} x \quad (\text{I. 7})$$

Avec φ est l'angle défini sur le plan constitué par la direction du vol et le point au sol (Figure I.4) et x est la distance azimutale,

Ainsi, les échos de plusieurs cibles situées à la même distance et éclairées simultanément par les impulsions peuvent être discriminés sur la base de leurs décalages Doppler, par la résolution azimutale ($r_a \approx \partial x$) :

$$r_a = \left(\frac{\lambda R}{2 v_s} \right) \partial f_d = \frac{L}{2} \quad (\text{I. 8})$$

Avec ∂f_d qui est l'inverse de la durée $\Delta t = \frac{\lambda R}{L v_s}$

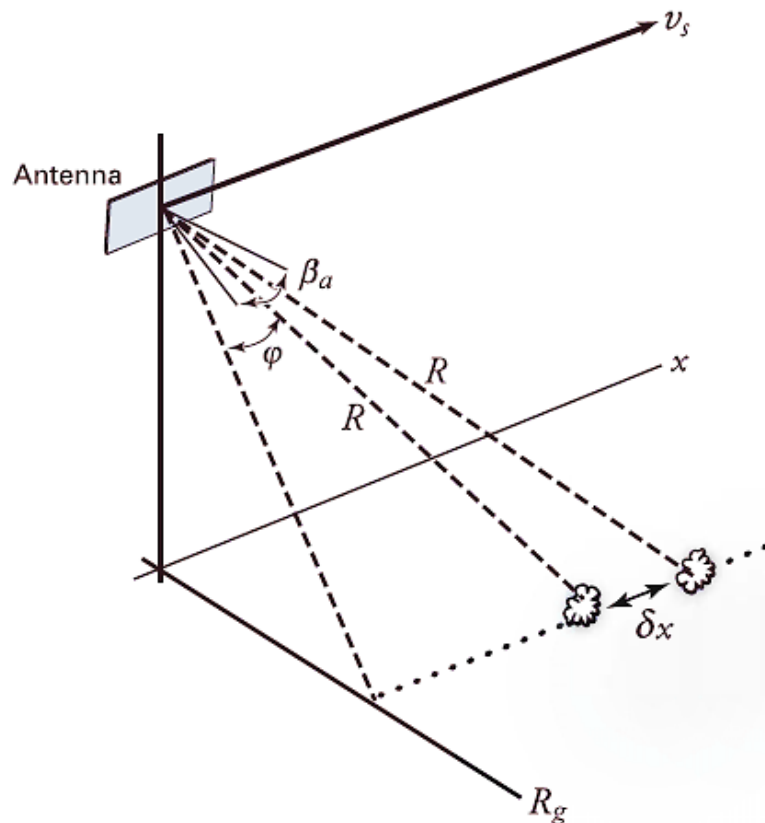


Figure I. 4: Résolution azimutale d'un radar à synthèse d'ouverture, d'après [Curlander & McDonough \(1991\)](#), v_s est la vitesse du satellite ou de l'avion, B_a est la largeur angulaire du faisceau en azimut, φ est mesuré à partir d'une ligne perpendiculaire à la trajectoire au sol, R est la portée oblique, R_g est la portée au sol, x est la distance le long de la trajectoire mesurée à partir du point d'approche le plus proche, et δx est la résolution azimutale du SAR.

Par conséquent, bien que la résolution azimutale de Sentinel-1 soit initialement de 4,8 km selon l'équation (I.6), elle peut, théoriquement, être affinée jusqu'à seulement 7 mètres (Equ I.8).

Ce résultat montre que la précision de l'azimut augmente avec la diminution de la taille de l'antenne. Une très petite antenne peut fournir une résolution azimutale remarquable, mais présente un rapport signal/bruit maximum ([Henderson & Lewis, 1998](#)). Cela est dû au fait que la même antenne doit remplir simultanément la fonction d'émetteur et de récepteur, de sorte qu'il est nécessaire de basculer entre le mode émission et le mode réception.

Le paramètre décisif est l'intervalle de répétition des impulsions (PRI : Pulse repetition interval), qui correspond à l'inverse de la fréquence de répétition des impulsions (PRF : Pulse Repetition Frequency). C'est très important car la différence de temps entre les échos de la portée proche et de la portée lointaine doit être inférieure au temps entre les impulsions. Cela signifie que l'antenne ne doit pas parcourir plus de la moitié de sa propre longueur ($L/2$) dans le temps entre les impulsions successives ($1/PRF$) sur sa trajectoire ([Curlander & McDonough, 1991](#)). Les antennes

plus petites nécessitent donc des fréquences de répétition d'impulsions plus élevées ce qui réduit la largeur de fauchée (Wright, 2000).

Ces relations imposent une limite inférieure à la taille des antennes SAR : la plupart des systèmes SAR conçus pour l'orbite terrestre utilisent des antennes de 1 à 4 mètres de large et de 10 à 15 mètres de long. Ils fonctionnent avec un angle de visée compris entre 10 et 60 degrés pour éclairer une empreinte de 50 à 150 km de portée sur 5 à 15 km en azimut, produisant une résolution au sol en un seul regard de 4 à 10 m en azimut et de 10 à 20 m en portée (Dzurisin & Lu, 2007).

III.3. Equation radar et coefficient de rétrodiffusion

L'équation radar décrit le bilan de puissance physique d'un signal émis par le radar à partir de l'émission de l'onde électromagnétique par l'antenne émettrice jusqu'à ce qu'il soit reçu par l'antenne réceptrice. Elle représente la puissance reçue par le radar P_r , en fonction de la puissance émise P_e , la distance R entre le radar et la cible ainsi que ses caractéristiques de réflexion. De manière simplifiée, considérons un radar bistatique, dont l'émetteur et le récepteur sont séparés, avec une source isotrope émettant une puissance P_e sur une cible à une distance R_t de l'émetteur et R_r du récepteur. La densité de puissance éclairant la cible S_e (W/m²) s'exprime ainsi par :

$$S_e = \frac{P_e}{4\pi R_t^2} G_t \quad (\text{I. 9})$$

Où G_t est le gain de l'antenne d'émission en direction de la cible

La densité de puissance rétrodiffusée par la cible, supposée isotrope, sur l'antenne de réception S_c , à une distance R_r , se définit ci-dessous (Henriksen, 1975) :

$$S_c = \frac{S_e \sigma}{4\pi R_r^2} = \frac{P_e G_t}{(4\pi R_t R_r)^2} \sigma \quad (\text{I. 10})$$

$S_e \sigma$ représente la puissance rétrodiffusée par la cible, σ (m²) désignant la surface équivalente radar de la cible (SER, en anglais RCS : radar cross section) qui représente la capacité d'une cible à rétrodiffuser un signal radar.

La puissance interceptée par l'antenne de réception du radar s'exprime alors comme (Ulaby & Long, 2014) :

$$P_r = \xi_r A_r S_c \quad (I. 11)$$

La surface effective de l'antenne de réception $A_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$, G_r étant son gain, et ξ_r son efficacité

La combinaison des équations (I.10), (I.11), (I.12) et (I.13) donnent donc l'équation radar pour un radar bistatique comme ci-dessous :

$$P_r = P_e \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} \sigma \quad (I. 12)$$

Pour les radars monostatiques, utilisant la même antenne pour les fonctions d'émission et de réception ($R_t = R_r = R$ et $G_t = G_r = G$), l'équation (I.12) devient :

$$P_r = P_e \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^2} \sigma \quad (I. 13)$$

Les formules présentées dans les équations du radar (Equ. I.12 et I.13) sont utilisées pour des cibles considérées comme ponctuelles. Leur SER vérifie (Skolnik, 1980) :

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} \quad (I. 14)$$

E_r et E_i désignant respectivement le champ électrique réfléchi et incident.

σ quantifie l'efficacité avec laquelle une cible spécifique rétrodiffuse l'énergie (Ulaby, 2018). Le coefficient de rétrodiffusion radar σ^0 est préféré à σ dans le cas de zones homogènes étendues correspondant à (Ulaby et al., 1981):

$$\sigma^0 = \frac{\langle \sigma_{cell} \rangle}{A_{cell}} \quad (I. 15)$$

Où σ_{cell} , est la SER moyennée sur l'ensemble des diffuseurs sur la cellule de résolution, $A_{cell} = \delta r_{d-sol} \cdot \delta r_a$ et $\langle \rangle$ indique une moyenne spatiale sur une multiplicité d'observations.

La combinaison des équations (I.5), (I.6), (I.13) et (I.15) pour une cellule de résolution nous permettent d'obtenir l'expression du coefficient de rétrodiffusion σ^0 à partir de l'équation radar comme exprimé ci-dessous :

$$\sigma^0 = \frac{2P_r}{P_e} \frac{(4\pi)^3 LR^3}{G^2 \lambda^3 c \tau} \sin(\Theta) \quad (\text{I. 16})$$

Le coefficient de rétrodiffusion, σ^0 , est une valeur sans dimension généralement exprimé en décibels :

$$\sigma^0(\text{dB}) = 10 \log_{10}(\sigma^0) \quad (\text{I. 17})$$

De nombreuses études ont mis en évidence l'utilité du coefficient de rétrodiffusion σ^0 pour la cartographie et le suivi des variations d'humidité du sol et de la végétation, ainsi que pour l'estimation de l'humidité absolue à l'aide de modèles inversés (Gianfranco & Elsa, 2021; Oh, 2004; Ouaadi et al., 2020; Paget et al., 2016; Susan Moran et al., 2000; Ulaby et al., 1996; Wever & Henkel, 1995). Cette utilité découle de la sensibilité du coefficient de rétrodiffusion σ^0 à deux paramètres principaux des cibles, à savoir : la géométrie des diffuseurs, c'est-à-dire leur forme, taille, densité et orientation (dans le cas de sols nus, la disposition des facettes constituant la surface et qui caractérisent la rugosité) et la constante diélectrique directement liée au taux d'humidité (Mandal et al., 2021).

À titre d'exemple, les coefficients de rétrodiffusion σ^0 estimés par le diffusomètre ESCAT sur l'ensemble des surfaces terrestres ont montré que les réponses les plus élevées sont observées sur les Groenland $\sigma^0 > 0 \text{ dB}$ et les plus faibles sur les surfaces désertiques, $\sigma^0 > -26 \text{ dB}$, tandis que les fortes rétrodiffusions $\sigma^0 \approx -7 \text{ dB}$ sont observées pour les surfaces couvertes de végétation dense comme les forêts tropicales des bassins de l'Amazonie et du Congo avec une rétrodiffusion -7 dB (Frison et al., 2016; Frison & Mougin, 1996).

III.4. Polarisation

La polarisation est l'un facteur crucial dans l'exploitation des données radar, puisque la polarisation d'une onde électromagnétique cohérente fait référence à la trajectoire de l'extrémité du champ électrique dans le plan d'onde (orthogonal à la direction de propagation). La polarisation la plus générale est la polarisation elliptique, caractérisée par son ellipticité (rapport du grand sur le petit axe) et sa direction (définie comme celle de son grand axe). Les deux polarisations extrêmes étant les polarisations circulaires ou linéaire (ellipticité = 1 ou 0 respectivement), Figure I.5 a).

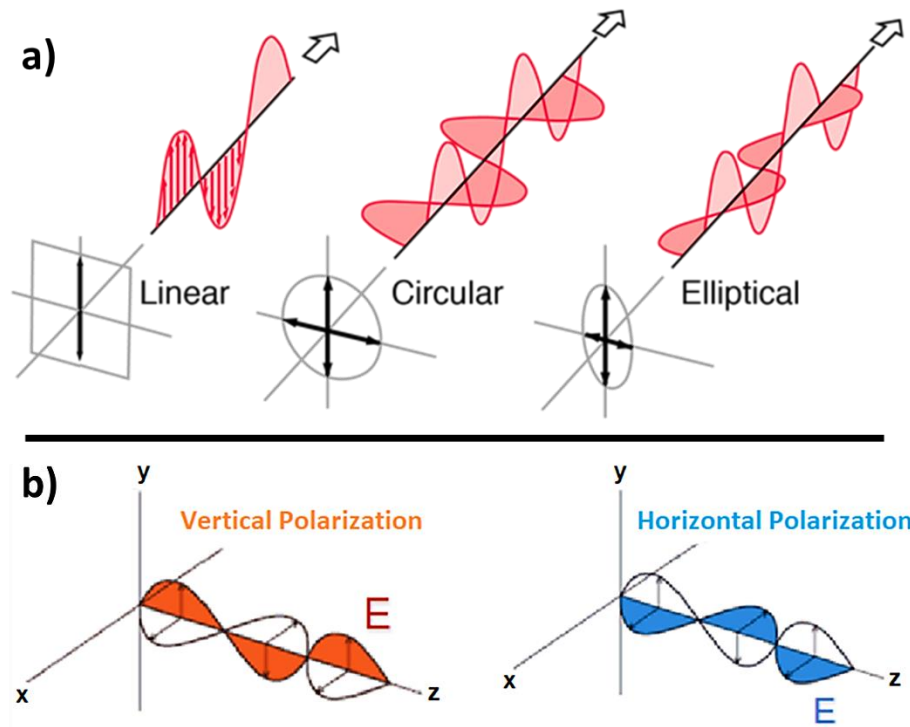


Figure I. 5: a) Types de polarisation d'une onde électromagnétique (Garg et al., 2011), b) type de polarisations linéaires ondes : verticales, V, et horizontales, H (Özkan & Baykal, 2016).

Les capteurs radar satellitaires utilisent jusqu'à présent des polarisations linéaires, et plus spécifiquement deux polarisations linéaires (qui sont orthogonales) : les polarisations verticales, V, et/ou horizontales, H, Figure I.5 b). Celles-ci font référence au plan d'incidence défini par la direction de propagation de l'onde émise et la normale à la surface observée. La polarisation est verticale lorsque le champ électrique E est contenu dans le plan d'incidence, et horizontale lorsqu'il lui est orthogonal. Un radar émettant une onde dans une polarisation donnée, et mesure la composante de l'onde rétrodiffusée selon la même ou la polarisation orthogonale. Une acquisition radar est caractérisée par deux lettres XY, où X représente la polarisation des ondes émises ($X = H$ ou V) et Y celle des ondes reçues à la réception (également H ou V) (Frison et al., 2019).

La rétrodiffusion de l'onde dépend des mécanismes de diffusion dominants et peut générer une onde rétrodiffusée avec une variété de polarisations : Une onde émise et reçue en polarisation verticale (VV) met en évidence une interaction simple comme avec les surfaces de sols nus ou de végétation peu dense, une onde émise et reçue en polarisation horizontale (HH) met en évidence une double réflexion de l'onde rétrodiffusé comme pour les zones urbaines ou de la végétation inondée, tandis qu'une onde émise horizontale et reçue en polarisation verticale (HV) met en évidence une interaction de l'onde rétrodiffusée avec un milieu hétérogène ; dépolarisant et diffusant l'onde incidente dans toutes les directions, comme pour les zones de végétation

dense. L'exploitation des données ou des images radar tire parti de ces mécanismes de diffusion pour une meilleure discrimination des surfaces observées.

Les premiers radars à synthèse d'ouverture (SAR) accessibles à la communauté scientifique sont apparus dans les années 1980 avec le satellite Seasat, dont la mission était d'étudier les océans. Cependant, cette mission a été de courte durée. Ce n'est que dans les années 90 que des satellites équipés de radars en configuration à polarisation unique (mono-polarisation) ont vu le jour, comme ERS-1 et JERS-1, fonctionnant respectivement en polarisation VV (bande C) et HH (bande L) (Baghdadi & Zribi, 2016; Frison et al., 2019).

Les radars SAR à double polarisation, à utilisation civile, ont été mis en orbite à partir de 2002 avec le satellite ENVISAT. Dans ce cas la même scène est acquise simultanément selon 2 configurations de polarisations. ENVISAT offrait trois types de configurations de Polarisation duale, HH-HV, VV-VH ou HH-VV (Lee & Pottier, 2009). Cependant, ENVISAT se limitait à fournir uniquement les intensités mesurées dans chacune des deux polarisations, sans inclure les données de la différence de phase entre les deux canaux de polarisations (Frison et al., 2019). Le premier radar à synthèse d'ouverture (SAR) entièrement polarimétrique, offrant les configurations HH, HV, VH et VV, fut ALOS-2, lancé en 2014 et opérant en bande L (Shokr & Sinha, 2023), et il a été suivi par GF-3, lancé en 2016 qui opère en bande C.

III.5. Chatoiement

Le chatoiement, ou en anglais « Speckle », désigne un bruit sous forme de fluctuations granulaire ou de variations aléatoires de l'intensité du signal rétrodiffusé au sein des cellules de résolutions (ou des pixels) des images radar, spécialement présent sur les images radar à synthèse d'ouverture (SAR), dégradant ainsi leurs qualités radiométriques (Elachi et al., 1982; Porcello et al., 1976) en entraînant souvent des difficultés d'interprétation des acquisitions (Askne, 1996; Rocca et al., 1989).

Cet effet est causé par des interférences, aussi bien constructives que destructives provenant des ondes diffusées par chacun des N diffuseurs élémentaires présents dans la cellule de résolution (Askne, 1996; Rocca et al., 1989).

La Figure I.6 ci-dessous illustre les mécanismes de formation du Speckle : a) interférences constructives, b) destructives, ainsi que la représentation de chacune de ses ondes dans le plan complexe.

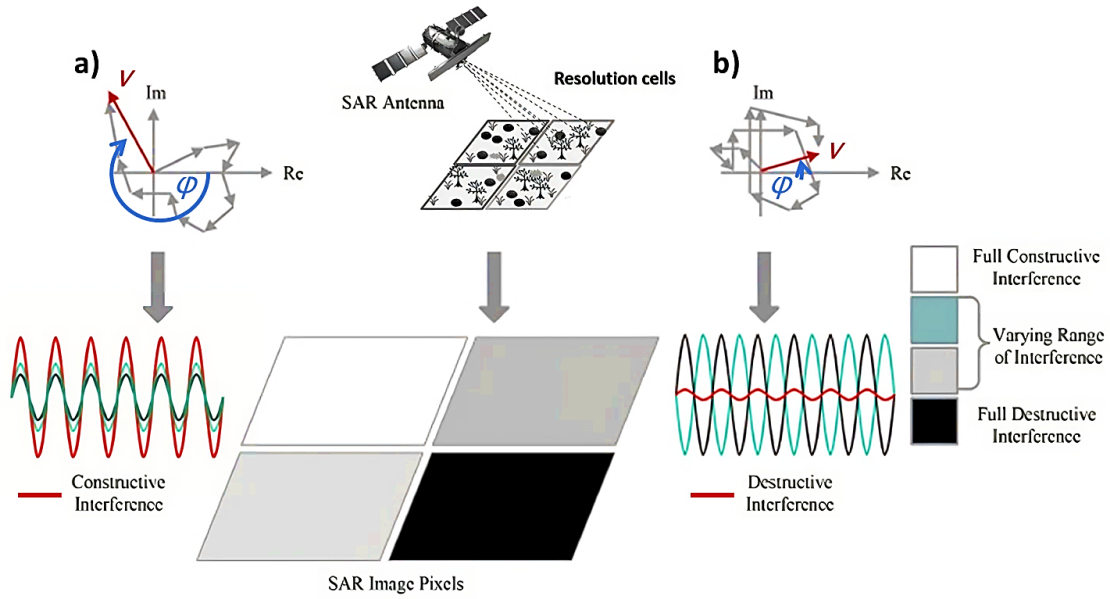


Figure I. 6 : Illustration des mécanismes de formation du Speckle : a) constructives, b) destructives, ainsi que la représentation de chacune de ses ondes dans le plan complexe (Baraha & Sahoo, 2023; Mashaly & Mahmoud, 2021).

En raison de la disposition aléatoire des diffuseurs, comme illustré sur la Figure I.6, il en résulte des variations de l'intensité et de la phase d'un pixel à l'autre. Ainsi, la représentation du champ total V dans le plan complexe, Figure I.6 a) et b), se formule comme la somme des N vecteurs représentant les N contributions élémentaires et peut s'exprimer comme :

$$V = i + jq = Ae^{j\varphi} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N v_k e^{j\varphi_k} \quad (\text{I. 18})$$

Où i et q représentent, respectivement, les parties réelle et imaginaire du champ total V , A et φ sont l'amplitude et la phase de V , tandis que φ_k représente l'amplitude et la phase de la contribution un diffuseur k .

Même sur des zones considérées comme homogènes, où les propriétés physiques restent constantes spatialement, le chatoiment est observable sur les images radar. Alors, pour définir les lois régissant la distribution de l'intensité et de l'amplitude pour des surfaces homogènes, Goodman (Goodman, 1976; Goodman & Narducci, 1986) a introduit une approche pour décrire ces variables, menant aux hypothèses associées au speckle pleinement développé :

- Le nombre N de diffuseurs élémentaires par cellule de résolution est suffisamment grand ; la résolution spatiale étant bien supérieure à la longueur d'onde du radar.

- L'amplitude (V_k) et la phase (φ_k) d'un diffuseur k sont indépendantes des caractéristiques des autres diffuseurs (les interactions entre les diffuseurs sont considérées comme négligeables).
- Pour chaque diffuseur k , l'amplitude (V_k) et la phase (φ_k) sont indépendantes l'une de l'autre (milieu diffusant à une structure aléatoire).
- Les phases (φ_k) sont uniformément réparties sur l'intervalle $[-\pi, \pi]$; suggère la surface milieu diffusant est rugueuse par rapport à la longueur d'onde λ du radar.

Dans le cas où ces hypothèses sont vérifiées, la réponse totale s'exprime comme étant la somme vectorielle de chacune des N réponses individuelles :

Si ces hypothèses sont vérifiées, la réponse totale (V) se présente comme la somme vectorielle de toutes les réponses individuelles des N de diffuseurs :

$$V = i + jq = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N V_k e^{j\varphi_k}$$

(I. 19)

Avec i et q désignent respectivement les parties réelle et imaginaire, V_k représentant l'amplitude de l'onde diffusée par le diffuseur k , et φ_k son déphasage.

Ainsi, le coefficient de variation de l'intensité du speckle, considéré comme le rapport signal/bruit, peut être exprimé comme ci-dessous :

$$\gamma = \frac{\langle I \rangle^2 - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}$$

(I. 20)

Avec « I » l'intensité du signal ($I = V^2$), et $\langle \rangle$ représentant la moyenne de l'intensité sur une région donnée. Sur une zone homogène on montre qu'il est directement proportionnel à σ^0 .

Afin de réduire le bruit et d'améliorer la clarté des images radars, il faut diminuer la variance sans changer la moyenne. Différentes méthodes de filtrage du speckle ont été développées dans différentes études antérieures, chacune exploitant des principes distincts, citant parmi lesquelles : « Le filtrage par la technique de croissance de région » (Vasile et al., 2006) : impliquant l'identification et la combinaison des pixels présentant des propriétés statistiques similaires, « Le filtrage par Modèle de Diffusion » (Sen Lee et al., 2006) : approche de filtrage basé sur la sélection des pixels voisins en se basant sur un modèle de diffusion, « Le filtre de Lee »

spécialement adapté pour les images radar à double polarisation, comme celles obtenues par le capteur ASAR du satellite ENVISAT (Bouchemakh et al., 2012).

Toutefois, dans la pratique, il n'y a pas un filtre universel qui soit optimal pour toutes les situations. L'efficacité d'un filtre dépend largement de l'image spécifique à laquelle il est appliqué. Néanmoins, pour traiter le chatoiement dans les acquisitions radar à synthèse d'ouverture (SAR), l'une des approches couramment adoptées est le « Filtrage par moyennage spatial » : cette technique consiste à effectuer une moyenne sur le voisinage local du pixel traité (Ulaby et al., 1982; Ulaby & Long, 2014). Le résultat est une image avec un bruit réduit au détriment de la résolution spatiale réduite également.

III.6. Phase et cohérence interférométrique

En radar, la phase désigne la position spécifique d'un point sur le cycle modulant d'une onde électromagnétique reçue, reflétant l'état de l'oscillation de cette onde au moment de la réception. Cette phase est une caractéristique fondamentale de l'onde et elle est indépendante de son amplitude. Toutefois, elle est liée à la distance parcourue par l'onde et par la longueur d'onde du signal radar émis.

La phase est composée de deux parties : la première représente la phase de propagation qui dépend des caractéristiques des diffuseurs au sein de chaque cellule de résolution, et la seconde dépend du processus de diffusion de l'onde électromagnétique (Imperatore & Pepe, 2016).

La similarité de la phase entre deux acquisitions radar (S_1 et S_2 , acquises respectivement aux temps t_1 et t_2) de la même scène est estimée à partir de la cohérence interférométrique, corrélation complexe. Elle est notée γ et est définie suivant :

$$\gamma_{pq} = \frac{\sum_{n=1}^k S_{t_1}^{(n)} \cdot S_{t_2}^{(n)*}}{\sqrt{\sum_{n=1}^K |S_{t_1}^{(n)}|^2 \cdot \sum_{n=1}^K |S_{t_2}^{(n)}|^2}} \quad (\text{I. 21})$$

Où, $S_1^{(n)}$ and $S_2^{(n)}$ représentent les réponses radar complexes des n cellules de résolutions (ou pixels) et $*$ désigne l'opérateur conjugué complexe.

La cohérence varie de 0 à 1, avec des valeurs proches ou égal à 0 qui correspondent à des zones de décorrélation élevée représentant un signal de phase entièrement aléatoire, considéré comme

du bruit. Tandis qu'une cohérence proche ou égale à 1 correspond à un signal de phase stable, souvent associé à des diffuseurs dont les propriétés (en termes de constante diélectrique et géométrie) n'ont pas changé entre les deux acquisitions successives.

L'exploitation de la cohérence a été appliquée pour le suivi des déformations du sol, la topographie, la détection des changements forestiers et le suivi de la végétation (Asiyabi et al., 2023; Bai et al., 2020; Häusler, 1998; Ishikawa et al., 2023; Villarroya-Carpio et al., 2022).

III.7. Interaction entre les milieux et les ondes radar

III.7.1 Cas des sols nus (diffusion de surface)

Lors de l'interaction d'une onde électromagnétique avec un sol nu, ce sont les caractéristiques de la surface, sa rugosité (caractérisant la géométrie) et sa constante diélectrique (qui dépend de la texture du sol et de son humidité), qui influencent grandement sa rétrodiffusion.

La rugosité de la surface du sol est définie comme étant les variations de l'élévation d'une surface, s'étendant à des échelles centimétriques (Bullard et al., 2018). On la caractérise par l'écart-type des hauteurs σ_h relativement au niveau moyen, ainsi que la fonction d'autocorrélation ρ_h (Sista & Vemaganti, 2014). Elle est relative à la longueur d'onde : un sol avec $\sigma_h = 4$ cm sera rugueux en bande C ($\lambda = 6$ cm) mais très lisse en bande P ($\lambda = 70$ cm).

La Figure I.7 ci-dessous illustre le cas de différents types de rugosité de surface : (a) surface lisse, (b) surface modérément rugueuse et (C) surface très rugueuse.

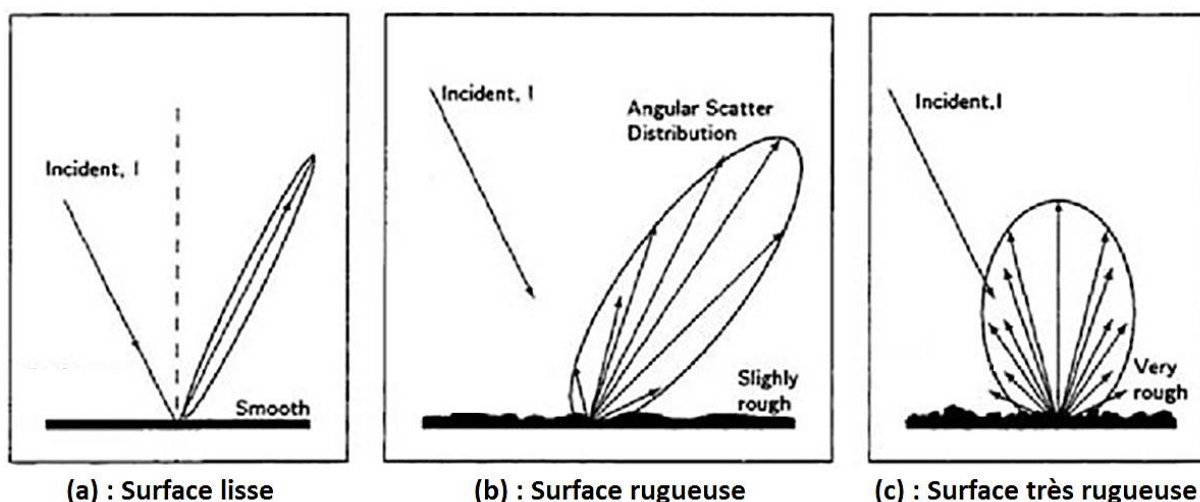


Figure I. 7 : Illustration de la diffusion et de la réflexion d'une onde électromagnétique sur différentes rugosités de surface : (a) surface lisse, (b) surface modérément rugueuse et (C) surface très rugueuse (Sandven et al., 2006)

Dans le cas d'une surface plane idéale, la diffusion de l'onde incidente est uniquement spéculaire, la rétrodiffusion est nulle, Figure I.7 (a). En conséquence, une surface lisse apparaît souvent comme l'ensemble des pixels sombres sur les images SAR puisque le signal rétrodiffusé ne parvient pas à l'antenne réceptrice.

À l'inverse, une surface très fortement rugueuse favorise la diffusion du signal dans toutes les directions, donnant lieu à une composante dite diffuse, également appelée « composante incohérente », Figure I.7 (b). Dans ce cas, la surface apparaît claire sur une image radar, d'autant plus qu'elle est humide. Les rugosités moyennes sont un mixte entre ces 2 cas de figure, avec une composante spéculaire toujours présente mais moins marquée que pour une surface lisse, et une composante diffuse présente également mais moindre que pour une surface très rugueuse (Figure I.7 (c)).

La constante diélectrique d'un sol, est une grandeur complexe $\varepsilon = \varepsilon' + j \varepsilon''$ qui influence également l'intensité du signal réfléchi par ce dernier, car elle représente à la fois sa capacité à retenir une charge et également sa capacité à se polariser sous l'effet d'un champ électrique (Kumjian, 2018). La partie réelle ε' de la constante diélectrique décrit la propagation de l'onde dans le sol et sa partie imaginaire ε'' représente le facteur d'absorption.

En règle générale, plus ε' est grande, plus l'intensité du signal réfléchi est forte. La présence d'eau dans le sol, en particulier dans les couches superficielles sur quelques centimètres, comme c'est le cas pour un sol agricole observé en bandes C et X, augmente significativement la constante diélectrique du sol. Cela s'explique par le fait que l'eau possède une constante diélectrique environ dix fois supérieure à celle d'un sol sec.

En conséquence, l'augmentation de la teneur en eau augmente la constante diélectrique du sol et réduit la pénétration de l'onde radar qui dépend de la fréquence de l'onde utilisée (Ulaby et al., 1986).

III.7.2 Cas des surfaces de végétation

Diffusion de volume

La diffusion de volume a lieu lorsque l'onde radar interagit avec les diffuseurs se trouvant dans le volume végétal, Figure I.8 (4), où a lieu la rétrodiffusion à partir des multiples diffuseurs au sein de sa structure interne tels que : les feuilles, les tiges, les branches ou les troncs (Mandal et al., 2021).

Les inhomogénéités de ces diffuseurs au sein d'un couvert végétal, qu'elles soient liées à leurs géométries et/ou à leurs propriétés diélectriques, rendent complexes la compréhension et la modélisation du signal rétrodiffusé. Cela s'explique par le fait que le signal rétrodiffusé, capturé par le radar, se constitue de la somme complexe des réflexions individuelles du signal sur ces diffuseurs, lesquelles dépendent de divers facteurs tels que : l'angle d'incidence, la bande de fréquence qui détermine la profondeur de pénétration, ainsi que les propriétés diélectriques des diffuseurs qui jouent un rôle déterminant en influençant à la fois l'intensité et la phase du retour polarisé du signal rétrodiffusé.

Les contributions sur une surface de végétation naturelle

La rétrodiffusion radar dépend de divers facteurs tel que les caractéristiques spécifiques à l'acquisition radar ; sa fréquence, sa polarisation et son angle d'incidence, ainsi que les caractéristiques diélectriques et géométriques des diffuseurs au sein de chaque cellule de résolution (Oliver & Quegan, 2004; Ulaby et al., 1981). Pour le cas des surfaces naturelles de végétation, ce sont les caractéristiques sol-végétation qui affectent principalement le signal radar rétrodiffusé. Une onde radar interagit avec des éléments, appelés diffuseurs élémentaires, ayant une taille de l'ordre de ou supérieure à la longueur d'onde. La bande C ($\lambda = 6$ cm) interagit donc avec les feuilles et brindilles d'une forêt. L'onde s'atténuera rapidement lors de l'interaction avec ces multiples diffuseurs et ne pourra pénétrer profondément un couvert végétal dense. La bande P ($\lambda = 70$ cm) n'interagira pas avec les diffuseurs précédents, trop petits, mais avec les branches principales et les troncs. Elle pénètre donc profondément dans les couverts végétaux et est spécialement adaptée à l'estimation de la biomasse des forêts tropicales denses (cas de figure de la mission BIOMASS mise en orbite dans les prochains mois par l'ESA).

Les paramètres fondamentaux caractéristiques de la végétation sont la forme, la taille, l'orientation, et la densité des diffuseurs élémentaires (feuilles, brindilles, branches, troncs selon

la fréquence utilisée) ainsi que leur constante diélectrique qui dépend essentiellement de leur taux d'humidité. Les sols nus, sont caractérisés par leurs rugosités (décrivant la distribution 3D de la surface) ainsi que leurs constantes diélectriques, dépendant là encore de leur humidité ainsi que de leur texture (Chakraborty et al., 2020 ; Nicholson, 2011).

L'impact des caractéristiques du sol-végétation sur le signal radar est également conditionné par l'influence des divers mécanismes impliqués dans la rétrodiffusion de l'onde. On en dénombre 3 principaux : la diffusion par la surface du sol (atténuée par la végétation), la diffusion de volume dans la couche supérieure de la végétation, et l'interaction sol-végétation, comme illustré dans la Figure I.8.

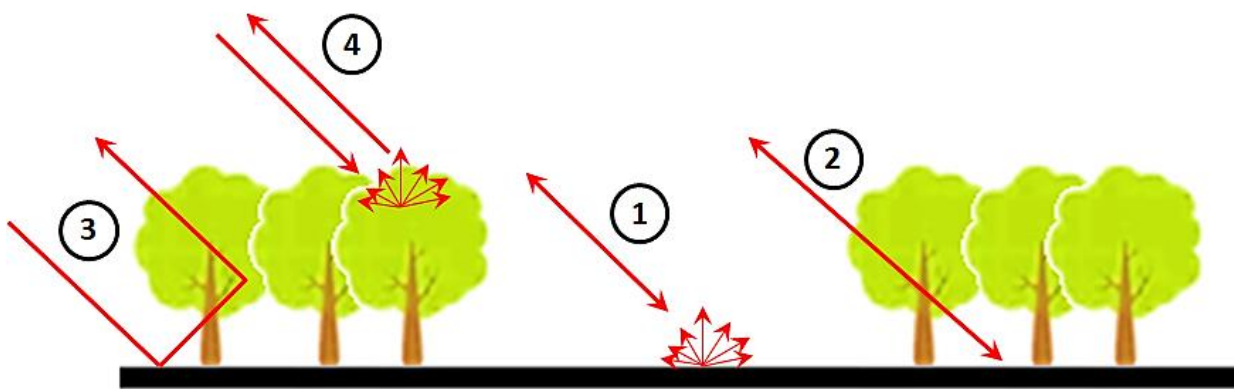


Figure I. 8 : Illustration des divers mécanismes impliqués dans la rétrodiffusion de l'onde par l'environnement : (1) la diffusion par la surface du sol sans atténuation de la végétation, (2) la diffusion par la surface du sol avec atténuation de la végétation, (3) interaction sol-végétation, et (4) la diffusion de volume

En guise d'illustration, si nous considérons un signal radar en bande C, la diffusion de volume prédomine largement sur des zones de végétation dense, comme les forêts tropicales. À l'inverse, dans des zones où la végétation est plus clairsemée, comme les zones arides ou semi-arides, c'est la diffusion de surface qui prédomine. Le double rebond sera prédominant sur des zones de végétation peu denses (il faut que l'onde puisse atteindre le sol sous la végétation) pour un sol réfléchissant comme de l'eau dans le cas de végétation inondée, et sera particulièrement émise en évidence en polarisation HH. En règle générale, la rétrodiffusion est le résultat d'une combinaison de ces trois mécanismes. Cette interaction entre les divers mécanismes de rétrodiffusion du milieu permet de déduire les propriétés géophysiques et biophysiques du sol ou du couvert végétal, et a un intérêt majeur surtout pour la cartographie de la végétation.

Afin d'appréhender l'influence des différents paramètres qui affectent la réponse radar, nous présentons dans la Figure I.9 ci-dessous les réponses du coefficient de rétrodiffusion, σ^0 ,

obtenues sur une culture de sorgho [Ulaby et al. \(1975\)](#) à l'aide d'un spectromètre radar monté au sommet d'un bras de 20 m sur un camion ([Ulaby, 1975](#)). Ces mesures ont été effectuées à différentes : fréquences, humidité du sol, angles d'incidence et polarisation. Dans le champ étudié, les plants de sorgho avaient une hauteur d'environ 1,0 mètre, avec une densité d'implantation élevée et un espacement des rangs de 90 cm.

La Figure I.9 a) présente les réponses de σ^0 en polarisation VV avec deux différents angles d'incidence (0° et 30°) sous différentes conditions d'humidité du sol (faible à 8.2 % et élevée à 26.8%) sur des fréquences allant de 4 à 8 GHz. Les Figures I.9 b), c) et d) illustrent les réponses de σ^0 en polarisation VV, HV et HH en fonction de l'angle d'incidence, pour 3 fréquences différentes : 4.7 GHz (Figures I.9 b)), 5.9 GHz (Figures I.9 c) et 7.1 GHz (Figures I.9 d)), à faible humidité du sol (8.2 %).

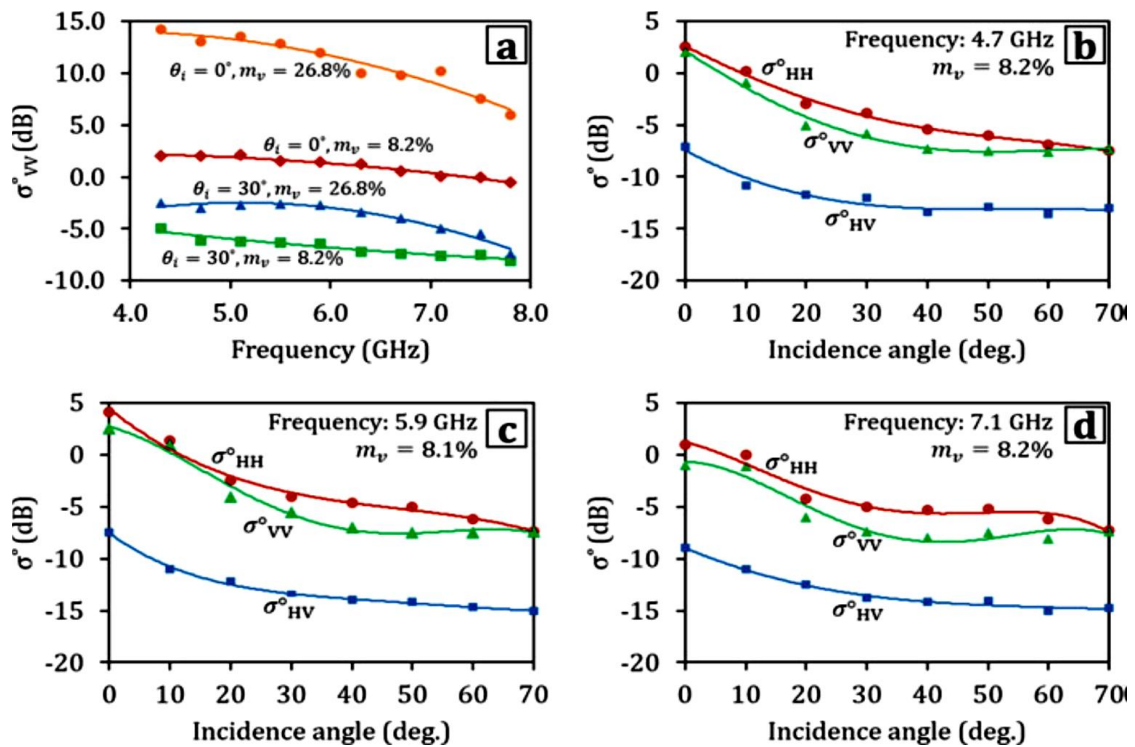


Figure I. 9 : Les réponses du coefficient de rétrodiffusion, σ^0 , obtenues sur la culture de sorgho ([Ulaby, 1975](#)). a) en fonction de la fréquence, en polarisation VV, à 0° et 30° d'incidence, sous différentes conditions d'humidité du sol (faible à 8.2 % et élevée à 26.8%. b), c) et d) en fonction de l'angle d'incidence, pour trois polarisations (VV, HV et HH) pour une même humidité et à 3 différentes fréquences ([Mandal et al., 2021](#)).

Les résultats montrent qu'à faible incidence (0°), le signal est sensible à la contribution du sol, avec une réponse plus élevée pour des niveaux d'humidité plus importants (écarts supérieurs à 5 dB, atteignant jusqu'à 12 dB à 4 GHz). Cela s'explique par le fait qu'à ces conditions, combinées à une forte densité d'implantation de sorgho, la quantité d'énergie réfléchiée vers l'antenne est

maximisée. Par conséquent, les échos multiples provenant du sol et des feuilles contribuent à une augmentation de σ^0 , se traduisant par des valeurs positives.

Cependant, avec un angle d'incidence élevé (30°), il a été observé que la contribution du sol est moindre puisque des écarts inférieurs à 5 dB sont observés entre sols secs et humides à 6 GHz. Cela met en évidence l'impact de pénétration des ondes radar à travers le couvert végétal et ses effets sur les intensités du signal rétrodiffusé.

Les résultats présentés dans la Figure I.9 b-d) illustrent de manière générale la sensibilité des différentes polarisations à différents angles d'incidence. σ^0 en polarisations VV, HV et HH était sensible à l'humidité du sol à de faibles angles d'incidence et à faibles fréquences avec une sensibilité accrue pour HH, avec une plus grande sensibilité à la diffusion volumique en HV. De plus, l'emploi d'une fréquence élevée favorise une rétrodiffusion principalement issue de la diffusion de volume, contrairement à une fréquence plus basse qui permet à l'onde radar de pénétrer plus profondes dans le couvert.

Cependant, la séparation des effets respectifs du sol et de la végétation demeure un défi. Cette difficulté vient du fait que les changements temporels dans la morphologie des plantes influencent considérablement leur contenu en eau, et leur géométrie, couplés aux changements d'humidité du sol. Cela rend l'interprétation de la réponse radar sur les surfaces naturelles difficile. De plus, ces variations se manifestent généralement, sur des échelles diurnes et saisonnières et peuvent varier en fonction du stress hydrique, ce qui nécessite des acquisitions à des échelles temporelles très courtes.

III.8. Sensibilité du signal radar à l'état hydrique des couverts végétaux

La télédétection radar permet un suivi des surfaces naturelles, complémentaire aux observations dans les autres longueurs d'onde, du fait de la sensibilité des micro-ondes aux changements de l'état hydrique des sols et de la végétation en particulier. Ceci ouvre des perspectives pour le suivi de l'état hydrique des plantes et par suite pour la détection du stress hydrique, information importante surtout dans le domaine agricole.

Au sein des plantes, l'eau représente généralement entre 70 à 95 % de la biomasse des tissus non ligneux tels que les feuilles et les racines (Lambers & Oliveira, 2019). La relation entre les plantes et l'eau est un processus complexe et en constante évolution qui comprend l'absorption de l'eau du sol, surtout la nuit pour recharger leurs stocks en eau, sa répartition au sein de la structure de

la plante ainsi que sa perte par transpiration dans l'atmosphère qui représente 90% de l'eau absorbée, est conditionnée par les conditions météorologiques (Alam et al., 2014; Chavarria & dos Santos, 2012).

En conséquence, l'état hydrique des plantes peut être défini comme étant l'équilibre entre la quantité d'eau absorbée dans le sol, la quantité d'eau stocké dans les plantes et la quantité perdue par transpiration. Le maintien d'un tel équilibre est essentiel à l'hydratation cellulaire, qui contrôle la croissance et la productivité (Bernd & Stephen, 1985). En cas de déficit hydrique, la transpiration diminue à mesure que le stress hydrique augmente, ce qui se traduit par un déséquilibre du stock d'eau et une déshydratation des plantes, surtout en cas de demande accrue de l'eau atmosphérique, soit à un déficit hydrique accru du sol (Van Emmerik et al., 2015, 2017, 2017). Ceci peut se traduire par une différence diurne de la dynamique du contenu en eau des plantes. La question est de savoir si ces variations hydriques de la végétation peuvent être suivies et quantifiées par les observations radar, que ce soit à partir du coefficient de rétrodiffusion ou de la cohérence interférométrique.

III.8.1 Coefficient de rétrodiffusion

Les premières observations suggérant que les variations diurnes de la dynamique du contenu en eau des plantes, entre matin et soir, ont un impact sur σ^0 ont été observées à travers des mesures *in situ*, sur une culture de sorgho (Ulaby & Batlivala, 1976). Les résultats obtenus sur les deux bandes L et C ont montré une variation de σ^0 allant jusqu'à 2 à 5 dB entre la rétrodiffusion du matin et celle du soir, et ont été attribuées à la perte d'humidité de la canopée pendant la journée en raison de la transpiration. Des observations similaires sur du blé, effectuées en bande C, L et Ku avec un système *in situ* ont montré également l'existence de ce cycle diurne de σ^0 (Brisco et al., 1990).

La première fois où ce cycle diurne a été observé à travers un satellite été en 1978 durant les acquisitions du diffusionmètre Seasat-1 (SASS) visant à calibrer ce dernier sur la forêt amazonienne (Sweet & Berthold, 1982). Au cours de ses 99 jours de mission, un léger effet diurne a été détecté sur les mesures σ^0 au lever du soleil de l'ordre de 0,5 à 1 dB plus élevés que celui du soir. Ces résultats ont été observés encore avec les mesures des diffusionmètres en bande Ku (QuikScat, SeaWinds) et en bande C (ERS) sur les régions amazoniennes (Frison & Mougín, 1996; Kunz & Long, 2005; Long & Skouson, 1996; Steele-Dunne et al., 2012). À l'époque, ces études sur la forêt amazonienne laissaient supposer que la rosée sur les feuilles des arbres qui

était à l'origine de ces variations diurnes observées sur la rétrodiffusion compte tenu du climat de la région, ainsi que du manque de données climatiques *in situ* ou de données sur l'état hydrique de la végétation. Toutefois, en se basant sur un modèle simple de rosée et grâce à des données *in situ* de température et d'humidité de l'air, [Satake & Hanado \(2004\)](#) ont pu démontrer que ces variations diurnes de rétrodiffusion sur la forêt amazonienne ne s'accordent pas avec l'effet de la rosée sur le signal rétrodiffusé. Les variations diurnes de l'humidité absolue enregistrées ont permis d'estimer un équivalent en eau de rosée de l'ordre de 58 g/m². À partir de cette valeur, ils ont estimé que l'atténuation zénithale totale sur σ^0 est moins de 0,1 dB en bande Ku, ce qui ne justifie pas les variations diurnes de la rétrodiffusion de l'ordre de 0.5 dB entre le matin et le soir (6-7 heures et 18-19 heures) obtenus à travers les données du satellite TRMM (Tropical Rainfall Monitoring Mission) sur cette région.

Une étude menée en 1995 par [McDonald et al. \(2002\)](#), basée sur des mesures diélectriques de l'épicéa, a exploré le rapport entre les variations de la constante diélectrique, qui reflètent leurs teneurs en eau, et la rétrodiffusion radar. Ils ont constaté que le niveau le plus élevé de cette constante diélectrique se produit entre 6 et 9 heures du matin, tandis que le niveau le plus bas est observé entre 15h et 18h. Cette variation influe sur σ^0 en bande P, mettant en évidence la sensibilité des mesures radar aux variations hydriques au sein de la végétation. Des études antérieures ont rapporté aussi une variation diurne de 2 à 3 dB dans les bandes L, C et X au cours de la journée en réponse aux fluctuations périodiques des propriétés diélectriques de la canopée ([Dobson et al., 1991](#)). Lors d'une autre étude menée par [Friesen et al. \(2007\)](#) sur les zones centrales et de savane forestière en Afrique, des différences diurnes faibles mais constantes ont aussi été observées sur σ^0 entre des passages ascendants et descendants. Ces différences ont été observées sur les acquisitions du diffusiomètre ERS opérant en bande C et étaient de l'ordre de 1 dB, voire un peu plus. Ces observations suggéraient un changement de l'état hydrique qui affecte la teneur en eau de la couverture forestière, entraînant une rétrodiffusion plus faible en fin de journée par rapport aux observations matinales. Cette tendance était particulièrement notable car durant la saison des pluies, de juillet à octobre, les observations entre les passages du matin et du soir étaient quasiment identiques.

La sensibilité de la rétrodiffusion à la dynamique du couvert forestier et à la dynamique de la végétation, surtout durant la saison de croissance, a été étudiée par [Frolking et al. \(2006\)](#). Dans cette étude les auteurs ont examiné la relation entre la rétrodiffusion en bande Ku du diffusiomètre SeaWinds et l'indice de surface foliaire (*LAI*) dérivé du produit de données MODIS sur 27 sites en Amérique du Nord au cours de la saison de croissance de 2000 à 2002. Les résultats

ont montré une corrélation significative entre σ^0 et le LAI sur la plupart des sites avec un $R^2 > 0,5$. Le début de la croissance du couvert végétal a également été observé de façon plus précoce au printemps que par les mesures LAI basées sur l'optique et proche infrarouge de MODIS. Grâce à leur analyse, ils ont pu renforcer l'hypothèse que les mesures de rétrodiffusion étaient influencées par la dynamique hydrique du couvert forestier.

Ces constatations ont été renforcées dans une autre étude menée par [Frolking et al. \(2011\)](#) sur le bassin amazonien. Les auteurs de cette étude ont analysé et comparé 10 ans de données de rétrodiffusion issues du SeaWinds en bande Ku (1999 - 2009) aux anomalies saisonnières de déficit hydrique générées à travers les données de précipitations de TRMM ainsi qu'avec la demande d'évapotranspiration comme seuil de déficit hydrique. Les résultats obtenus ont montré une variabilité interannuelle significative de σ^0 durant les saisons sèches plus accentuée sur les données des passages ascendants les matins (06h00) qu'aux passages descendants les soirs (18h00). Durant la grave sécheresse qui s'est produite au cours de la saison sèche en 2005, de fortes diminutions des σ^0 acquises le matin (vers 06h00) par rapport à celles de l'après-midi (environ 18h00) sont apparues. Ces diminutions étaient le signe qu'au fur et à mesure que la sécheresse persistait pendant plusieurs mois, le couvert forestier était de plus en plus incapable de récupérer la totalité de l'humidité des feuilles pendant la nuit, ce qui entraînait une rétrodiffusion anormalement faible en début de journée résultant des effets de la sécheresse sur la physiologie des arbres.

D'autres travaux plus récents ont confirmé aussi la sensibilité de la rétrodiffusion radar au stress hydrique de la végétation sur des forêts tropicales, avec des diminutions notablement remarquées sur σ^0 en réponse à l'état hydrique des arbres durant les périodes de stress, avec des différences entre les acquisitions ascendantes et descendantes presque nulles en cas de stress hydrique persistant ([Konings et al., 2017](#); [Panisset et al., 2018](#); [Saatchi et al., 2013](#); [Steele-Dunne et al., 2012](#); [Van Emmerik et al., 2017](#)).

La majorité des études citées précédemment étaient axées sur les forêts. Cependant, notre compréhension reste relativement limitée en ce qui concerne l'analyse et l'évaluation du comportement hydrique diurne et l'effet du stress hydrique sur des cultures moins denses et de formes complexes à travers la réponse radar tel que les cultures annuelles. Une partie de cette complexité est due au développement rapide de ces cultures et aux différents mécanismes de croissance qui évoluent au fil du temps, ce qui nécessite des acquisitions radar fines tant en termes spatiaux que temporels.

A notre connaissance, très peu d'études ont mis en évidence la sensibilité de la rétrodiffusion au stress hydrique des cultures. Parmi ces études nous évoquons l'étude pionnière effectuée par [Ulaby et al. \(1975\)](#) pour surveiller la croissance du maïs sur une période de 4 mois à l'aide un diffusiomètre au sol utilisant la gamme de fréquences de 8 à 18 GHz. Les résultats de cette étude ont montré de bonnes corrélations entre la teneur en eau normalisée des plantes (le rapport masse d'eau dans la plante et la hauteur de la plante) et le coefficient de rétrodiffusion radar à des angles d'incidence de 40° ou plus. Une autre étude a révélé que des changements diurnes en contenu en eau sur le maïs pendant le stress hydrique, allant jusqu'à 40 % sur une base diurne, peuvent avoir un effet significatif sur σ^0 avec des différences diurnes simulées allant jusqu'à 4 dB dans les bandes X à Ku (8,6-35 GHz) ([Van Emmerik et al., 2015](#)).

[Vermunt et al \(2020, 2022\)](#) ont constaté des variations diurnes sur σ^0 en bande L sur un champ de maïs, avec une forte sensibilité en polarisation VV au stockage interne de l'eau de la végétation. Ils ont trouvé qu'une réduction de la teneur en humidité du sol de 0,02 m³/m³ diminue la rétrodiffusion en VV et HH, respectivement, de -0,5, -0,8 dB, tandis qu'une perte significative de la teneur en eau interne du maïs peut entraîner une diminution de près de 4 dB sur σ^0 et cela dans toutes les polarisations. Dans une étude récente menée par [Shorachi et al. \(2022\)](#), l'impact de deux étés consécutifs de sécheresse en Europe, survenus en 2018 et 2019, a été examiné sur des cultures de maïs et d'oignons aux Pays-Bas en utilisant des données de Sentinel-1. Les résultats de cette étude ont révélé que pendant la sécheresse de 2018, les valeurs de rétrodiffusion en polarisations VV et VH étaient inférieures de 1 à 2 dB pour les deux cultures par rapport aux valeurs enregistrées en 2017 (période sans sécheresse). De plus, il a été constaté que la saison de croissance pendant l'année de sécheresse était plus courte. Cette réduction de la durée de la saison de croissance a eu des répercussions notables sur les rendements avec une baisse significative du rendement de 9,1 % en 2018 et 5,9 % en 2019 par rapport à 2017 pour le maïs et de 6,8 % en 2018 par rapport à 2017 pour les oignons.

III.8.2 Cohérence interférométrique

Les recherches portant sur l'influence de l'état hydrique de la végétation sur la cohérence interférométrique radar (γ) demeurent relativement peu nombreuses en comparaison avec celles axées sur le coefficient de rétrodiffusion. Cela est principalement dû à la stabilité temporelle de γ à la fois aux changements des propriétés géométriques et diélectriques des plantes. Cependant, le développement de satellites à haute résolution temporelle et spatiale, comme Sentinel-1, et

l'utilisation des radars *in situ* montés sur des tours ont permis de progresser dans cette voie de recherche.

Un exemple de ces études est la campagne TropiSCAT menée sur la forêt tropicale avec un radar installé sur une tour de 55 mètres et des acquisitions toutes les 15 minutes. Les résultats obtenus ont montré la présence un cycle diurne sur γ en réponse à la forêt tropicale en bandes P, L et C (El Idrissi Essebtey et al., 2020, 2022; Essebtey et al., 2020; Hamadi et al., 2014). Les valeurs observées de γ étaient proches de 1 pendant la nuit où le vent est faible, avec des chutes pendant la journée corrélée aux vents supérieurs à 2.5 m/s. L'influence des variations du contenu en eau des plantes sur le cycle diurne de γ a été observé en bande C particulièrement à l'aube, période où les vents sont généralement faibles. Il a été constaté que la baisse de γ était principalement due au début du processus de transpiration (Essebtey et al., 2020), et qu'elle était beaucoup plus élevée en saison sèche qu'en saison des pluies ($\gamma > 0,8$) (Hamadi et al., 2015). L'existence de ce cycle diurne de γ en réponse à la végétation a été confirmée par autres études menées sur la forêt boréale à travers un diffusiomètre basé sur une tour en bandes P, L et C (Monteith & Ulander, 2018, 2022a)

Dans le domaine agricole, une étude menée sur un champ de blé, sur une région semi-aride, a montré que la cohérence interférométrique issue du Sentinel-1 suit un cycle saisonnier en relation avec le cycle de croissance (Ouaadi et al., 2020). Une autre étude sur le blé a mis en évidence une forte corrélation entre la cohérence et le coefficient de stress hydrique avec $R = 0,88$ (Barbouchi et al., 2022).

Nasirzadehdizaji et al. (2021) ont analysé la relation entre la cohérence et la croissance de trois cultures différentes : le maïs, le tournesol et le blé. Pour l'ensemble des 3 cultures, les résultats ont montré que la cohérence diminue au fur et à mesure de la croissance des plantes, et que la cohérence interférométrique a présenté une forte corrélation avec les différents stades phénologiques des cultures. De même, Pandit et al. (2022) ont étudié l'identification des stades phénologiques du pois chiche et de la tomate, en utilisant la cohérence issue de Sentinel-1 et des séries temporelles *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) obtenues à partir de Sentinel-2 sur 12 jours. Les résultats ont montré que les valeurs les plus basses de la cohérence (0,29) ont été enregistrées durant le pic de la croissance de la végétation.

Ces résultats démontrent la sensibilité du coefficient de rétrodiffusion et de la cohérence interférométrique à l'égard des changements du contenu en eau des plantes, et elles mettent en

lumière l'importance significative de ces mesures dans le cadre de la surveillance du stress hydrique des couvertures végétales surtout dans le domaine agricole.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art des mesures radar pour le suivi des états hydrique des couverts végétaux. Nous avons également examiné les mécanismes variés qui influencent les transferts des flux d'eau et d'énergie sol-plante-atmosphère.

La première partie de ce chapitre s'est focalisée sur une définition fondamentale des échanges d'eau-énergie entre la surface terrestre et l'atmosphère. Notre objectif était de comprendre ces interactions, à travers la dynamique des composantes du bilan énergétique et hydrique, afin d'appréhender plus efficacement, par la suite, l'état hydrique des cultures à travers les données radar. Ces échanges complexes d'eau-énergie entre l'atmosphère et les surfaces terrestres, combinés aux facteurs météorologiques, influencent le stock d'eau contenu par la végétation (tant pour son approvisionnement que pour ses pertes). Au cœur de ces processus, l'évapotranspiration joue un rôle essentiel dans la régulation thermique et hydrique des plantes, ainsi que dans les mécanismes de photosynthèse et de contrôle biologique du cycle de l'eau.

La deuxième partie de ce chapitre s'est concentrée sur les bases du fonctionnement et des acquisitions de la télédétection radar. Cet outil particulièrement adapté pour surveiller les surfaces terrestres et à l'évolution de l'état hydrique de la végétation, se reposant sur sa sensibilité aux variations d'humidité au sein de la végétation. Cependant, une analyse distincte de la réponse radar aux couverts végétaux est nécessaire pour une compréhension approfondie. Cette analyse doit mettre en lumière les interactions et les contributions des différents éléments de la végétation, tels que son contenu en eau, sans considérer les contributions du sol sous-jacent, car ces derniers influencent également le signal radar.

Une synthèse bibliographique des différents travaux antérieurs sur la sensibilité du signal radar à l'état hydrique des couverts végétaux, cohérence interférométrique et coefficient de rétrodiffusion, ont été également présentées dans ce chapitre. Cependant, la majorité des études étaient axées sur des forêts. Cette limitation découle du fait que notre compréhension demeure relativement restreinte en ce qui concerne l'analyse et l'évaluation du comportement hydrique diurnes, ainsi que l'effet du stress hydrique sur des cultures moins denses et de formes complexes, à travers la réponse radar. Ce constat est plus particulièrement valable dans le domaine agricole,

notamment pour les cultures annuelles. Une partie de cette complexité provient du développement rapide de ces cultures et aux différents mécanismes de croissance qui évoluent au fil du temps. Par conséquent, des acquisitions radar fines, tant sur le plan spatial que temporel, sont nécessaires. A cet égard, nous proposons d'effectuer une analyse approfondie, avec une haute résolution temporelle et spatiale, du comportement des réponses radar, de la cohérence interférométrique et du coefficient de rétrodiffusion, face aux variations diurnes de l'état hydrique des arbres d'oliviers dans un environnement semi-aride. Notre approche consistera à comparer les observations radar *in situ* intra-horaires avec les paramètres environnementaux, ainsi qu'avec les acquisitions satellitaires radar de Sentinel-1. Cette étude permettra d'élargir notre compréhension des interactions entre les arbres d'oliviers et les signaux radar, tout en tenant compte de leurs évolutions phénologiques au fil du temps, et leurs réactions aux conditions météorologiques.

Le chapitre suivant présentera le contexte climatique et géographique de la région dans laquelle se situe la parcelle d'oliviers étudiée. Nous aborderons également en détail les différentes mesures météorologiques et physiologiques *in situ* que nous avons réalisées. Une attention particulière sera accordée à la description détaillée de l'expérience radar *in situ* que nous avons développée, installée et maintenue, couvrant les différentes approches de traitement des données et les procédures calibration appliquées. De plus, nous présenterons les différents types d'acquisition et de traitement des données radar satellitaires de Sentinel-1 qui ont été utilisés dans cette étude. Cela constituera également une base solide pour les chapitres de résultats, qui contiendront les analyses résultant de l'ensemble des mesures et acquisitions effectuées.

Chapitre II : Site d'étude, dispositifs expérimentaux et données *in situ* et satellitaires

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous introduisons le site d'étude, sa localisation géographique ainsi que le contexte climatique de la région, en mettant en évidence l'importance hydrologique de la zone. De plus, nous présentons en détail la parcelle expérimentale choisie pour ce travail. Nous explorons les aspects techniques de l'expérimentation menée dans le cadre de cette thèse.

Une description détaillée du système d'acquisition radar *in situ* est faite. Nous détaillons également le protocole des mesures qui sont effectuées pour mieux comprendre le fonctionnement de la parcelle étudiée (système Eddy-covariance, mesures de flux de sève et dendromètres, mesures d'humidité du sol, ...) ainsi que la méthode d'irrigation des oliviers.

Nous exposons également le principe d'acquisition des données radar ainsi que celui de leur calibration relative en amplitude et en phase. Nous présentons aussi les méthodes d'estimation de la cohérence interférométrique γ ainsi que le coefficient de rétrodiffusion σ^0 . Enfin, Nous décrivons les données satellitaires provenant des capteurs SAR à bord de Sentinel-1A et -1B qui ont été utilisées dans cette thèse.

Les opérations d'installation, de maintenance et de traitement des données des différents dispositifs *in situ* (radar et météorologiques), très chronophages en termes de veille sur le terrain et traitement et contrôle des données, ont été entièrement réalisées par mes soins. Ces mesures acquises sur une période de 3 années de manière continue, en font un jeu unique et précieux pour l'analyse du potentiel des données radar pour le suivi de cultures arborées.

II. Présentation du site d'étude

II.1. Situation géographique et contexte climatique

Bassin versant du Tensift

Se situant dans la région Marrakech-Safi au centre Ouest du Maroc, le bassin versant du Tensift est l'un des bassins versants les plus vastes du Maroc avec une superficie d'environ 20 450 km², avec un relief varié, Figure II.1. Le climat de cette région est un climat méditerranéen sec, marqué par des étés chauds et secs, et des hivers doux et pluvieux. La pluviométrie dans le bassin est faible, avec un cumul annuel d'environ 250 millimètres par an (Er-Raki et al., 2010; Jarlan et al., 2015a), concentrées principalement pendant la période hivernale, et caractérisée par une grande

variabilité spatiale et temporelle. Cette faible pluviométrie combinée à une évaporation élevée (1600 mm/an) crée des défis en matière de ressources en eau dans la région (Abourida et al., 2009; Jarlan et al., 2015b). La principale source d'eau du bassin versant du Tensift est l'oued Tensift, qui prend sa naissance dans les montagnes de l'Atlas et traverse la région (d'est en ouest) jusqu'à rejoindre l'océan atlantique à son exutoire « Souira Kédima » sur une distance de 260 km (Chaponnière, 2005).

Le bassin du Tensift se caractérise par une forte utilisation agricole, principalement de petite et moyenne agriculture, qui utilise environ 80% de l'utilisation de l'eau. Il contient trois grands barrages à savoir : Takerkoust (70 Mm³), Wirgane (72 Mm³) et Tasekourt (24 Mm³), qui jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement en eau pour divers usages tels que l'irrigation, l'approvisionnement urbain et la production d'énergie hydroélectrique. Par ailleurs, des petits barrages, des forages et des sources d'eau contribuent également à l'approvisionnement en eau pour l'irrigation (Boudhar et al., 2007). Cependant, les ressources en eau souterraine du bassin du Tensift sont surexploitées, ce qui se traduit par un déficit annuel. Ce déficit est défini comme la différence entre les prélèvements nets d'eau souterraine et la recharge naturelle estimée. Selon les études antérieures, ce déficit est estimé à environ 100-150 millions de m³ par an (Meliho et al., 2020; Montginoul & Molle, 2019).

Le relief du bassin versant est caractérisé par des montagnes escarpées, des plateaux et des vallées étroites. Les altitudes varient entre 0 (dans les plaines côtières) à plus de 4000 mètres dans les montagnes de l'Atlas. Ce relief accidenté influence le régime hydrologique du bassin, en créant des rivières tumultueuses et des zones de captation des eaux de pluie.

La plaine du Haouz

La plaine du Haouz, couvrant une superficie de 6000 km², est la plaine la plus importante du bassin du Tensift (Le-Page et al., 2012). Elle se caractérise par une vaste étendue de terres irriguées, qui représentent près de 33% de sa surface totale, soit environ 2000 km² (Ouaadi et al., 2021).

Le climat de cette région est de type méditerranéen semi-aride, caractérisé sur l'année par deux saisons principales : une saison humide s'étendant principalement entre octobre et avril, représentant environ 85% des précipitations annuelles, tandis que la saison sèche s'étend entre mai à septembre. Le profil annuel de la température de l'air atteint son maximum en été, surtout en juillet-août, avec des valeurs diurnes moyennes avoisinant les 35 °C, tandis que les

températures minimales sont enregistrées autour de janvier, avoisinant les 5 °C (Abourida et al., 2009).

En ce qui concerne la demande climatique, l'évapotranspiration de référence (*ET0*) est estimée à environ 1600 mm/an, dépassant largement les précipitations annuelles qui souvent ne dépassent pas 250m (Jarlan et al., 2015b) m. Cette disparité souligne l'importance vitale de l'irrigation pour l'activité agricole dans la plaine du Haouz.

Du point de vue de la production alimentaire agricole, la plaine se divise en zones irriguées, 33%, et non irriguées, 67%, chacune ayant ses propres cultures qui les caractérisent : Parmi les zones irriguées de la plaine 51 % sont destinés à la céréaliculture, 38 % à l'arboriculture (dont les oliviers représentent 78 %), 9 % à la production de fourrage (luzerne et bersim) et 2 % au maraîchage (Abourida et al., 2009). Les zones non irriguées se caractérisent par des cultures dites pluviales, comme le blé, qui dépend principalement des précipitations.

Cette description climatique et agricole de la plaine du Haouz souligne l'importance cruciale de l'irrigation pour soutenir la production agricole dans cette région. Cependant, cette dépendance excessive à l'irrigation a entraîné une surexploitation de la nappe phréatique de cette plaine. À cet égard, plusieurs études ont été menées pour étudier les eaux souterraines du bassin du Haouz, toutes concluant à un déficit annuel des ressources en eau (Tanouti & Molle, 2013).

II.2. Parcelles expérimentales

Le site d'étude (31°25'36.4"N, 8°39'05.9"O) est localisé dans la région de Chichaoua, au cœur de la plaine du Haouz. Il se situe à environ 70 km à l'ouest de la ville de Marrakech, Figure II.1. Ce site est une ferme privée qui accueille les expérimentations et les mesures réalisées depuis 2013 par le LMI TREMA (Laboratoire Mixte International Télédétection et Ressources en Eau en Méditerranée semi-Aride). Ces travaux portent sur le suivi des cultures arborées, telles que l'olivier, et des cultures annuelles (blé, petits pois, maïs, ...etc.), en utilisant des techniques de télédétection ainsi que des mesures *in situ*.

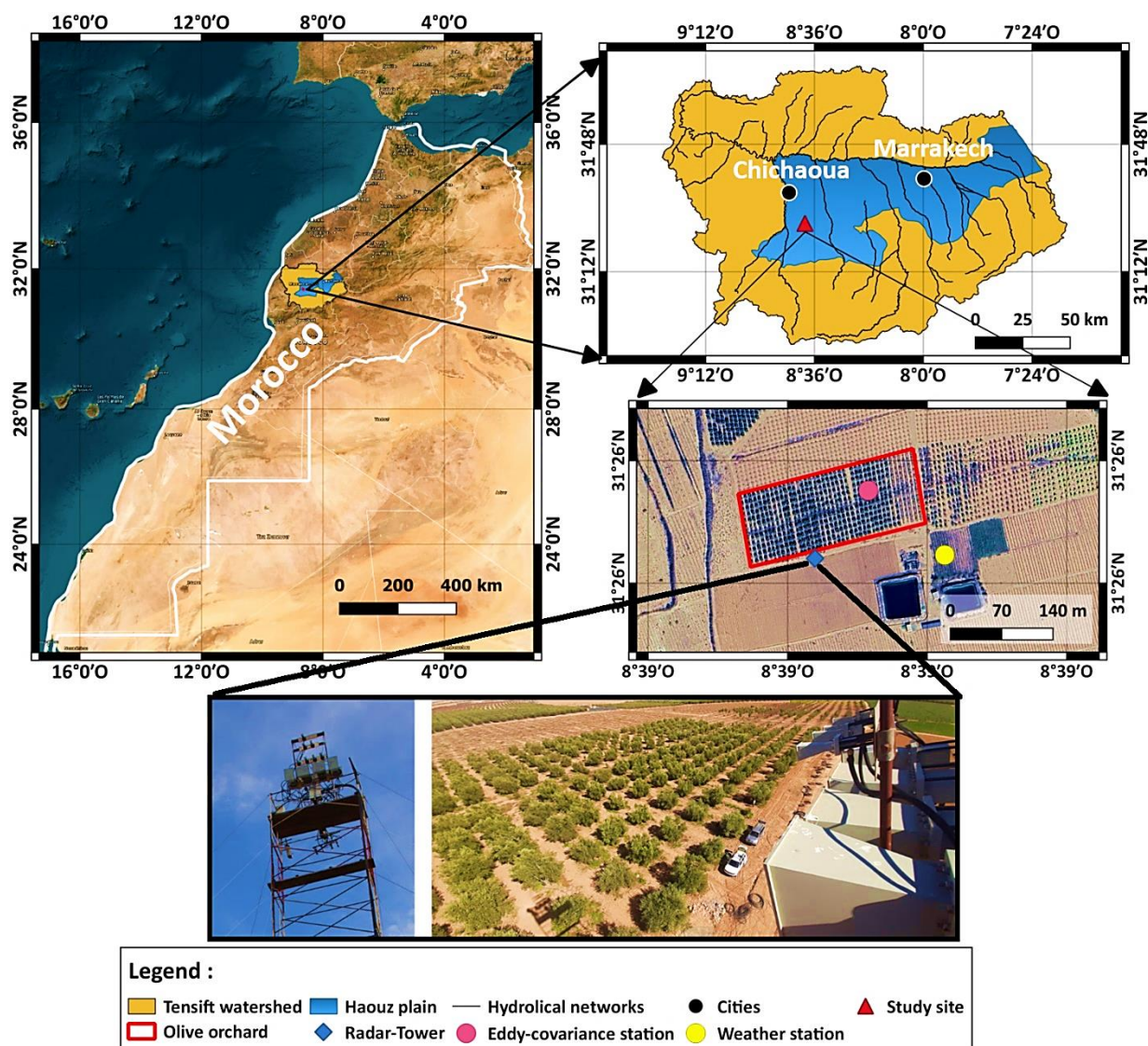


Figure II. 1 : Localisation du verger d'oliviers dans la plaine du Haouz au Maroc (carte de gauche). L'emplacement de la tour radar (illustrée par les deux photos de la figure), la station de flux et la station météorologique sont également illustrées sur la carte de gauche.

Les travaux présentés dans ce manuscrit portent sur une expérience menée sur un verger d'oliviers irrigué par un système de goutte-à-goutte. Cette parcelle, qui se caractérise par une texture du sol pour laquelle le sable présente 32.5% et l'argile 37.5% (Ouaadi et al., 2020; Rafi et al., 2019), s'étend sur une superficie d'environ 2,40 hectares. Les oliviers, âgés d'environ vingt ans, ont une hauteur moyenne d'environ 3 m et sont plantés avec une densité d'environ $8 \times 6 \text{ m}^2$, répartis-en 40 rangs de 11 arbres chacun, soit un total de 440 oliviers.

II.3. Irrigation des oliviers

La gestion de l'irrigation (goutte-à-goutte) de la parcelle d'oliviers est effectuée par l'agriculteur utilisant une méthode basée sur l'estimation de l'évapotranspiration de la culture (ET_c) à l'aide de la méthodologie FAO-56 (Allen et al., 1998). Il combine ces estimations avec les mesures *in situ* des précipitations pour évaluer les besoins hebdomadaires en eau d'irrigation de l'olivier. En règle générale, les irrigations sont coordonnées avec celles des parcelles voisines et sont souvent de nature déficitaire.

L'eau est distribuée par un système de goutte-à-goutte comprenant une paire de tuyaux le long de chaque rangée d'arbres. Ces tuyaux, qui intègrent des goutteurs espacés de 40 cm, sont placés de chaque côté, à une distance de 80 cm du tronc principal.

III. Mesures météorologiques et physiologiques

III.1. Données météorologiques

Pour cette étude, une station météorologique automatique a été installée, à 60 mètres de la parcelle d'olivier étudiée, sur une parcelle de luzerne. Cette station effectue des mesures automatiques à intervalles réguliers de 30 minutes, avec un stockage de données interne sur la centrale d'acquisition, ainsi qu'une transmission de données en temps réel au serveur LMI TREMA (hébergé à la faculté des sciences Semlalia) afin qu'elles puissent être traitées et analysées.

Les principales variables mesurées sont : la pluviométrie en utilisant un pluviomètre de type « SBS500 », la température et l'humidité relative de l'air à travers une sonde de type « CS215 », le rayonnement solaire qui est mesuré à travers un pyranomètre de type « SKP215 », et la vitesse et la direction du vent qui sont mesurés en utilisant un anémomètre de type « windsonic4 ».

III.2. Station de flux et système Eddy-Covariance (EC)

La compréhension du bilan d'énergie de la parcelle d'olivier étudiée est essentielle pour notre étude. A cet égard, nous avons installé une station de flux dont l'objectif est de mesurer les échanges sol-végétation-atmosphère et de déterminer l'évapotranspiration de la culture. Cette

station a été positionnée, dans la parcelle d'olivier étudiée, de manière à éviter toute interférence avec les acquisitions radar, Figure II.1.

La station de flux comprend divers capteurs permettant d'effectuer les mesures suivantes :

- Humidité et température du sol à différentes profondeurs à travers des sondes basées sur la réflectométrie dans le domaine temporel « TDR » de types «CS655 ».
- Flux de chaleur stocké dans le sol par conduction via des plaquettes de flux de type « HFP01 »
- Température de surface du sol ainsi que celle des oliviers en utilisant des radiothermomètres infrarouges sans contact de type « IR120 »
- L'indice de réflectance photochimique (*PRI* : Photochemical Reflectance Index), et l'indice de végétation par différence normalisée (*NDVI* : Normalized Difference Vegetation Index), qui proviennent des capteurs « SKR 1860 »
- Les flux de sèves sont également mesurés à travers des sondes de type « TDP-50 », ainsi que les variations dendrométriques des troncs des oliviers par des sondes de type « DR3 »
- Les mesures des 4 composantes du rayonnement (rayonnement solaire, rayonnement réfléchi, rayonnement atmosphérique et rayonnement terrestre) ont été aussi mesurés à travers un radiomètre (CNR4 de Kipp&Zonen)

En parallèle de ces mesures, la station de flux, Figure II.2, était équipée par un système d'Eddy-Covariance (EC) installé à une hauteur de 10 mètres par rapport au sol. Cette configuration visait à mesurer de manière précise les échanges turbulents dans l'atmosphère en utilisant la méthode EC, reconnue pour sa grande efficacité pour mesurer les interactions entre la surface terrestre et l'atmosphère (Baldocchi, 2008; Friend et al., 2007). L'avantage majeur de cette méthode de mesure des flux à l'échelle de la parcelle réside dans son caractère non destructif, c'est-à-dire qu'elle ne perturbe pas ou n'alterne pas l'environnement, tout en offrant une représentation la plus complète du site d'étude (Eder et al., 2015).

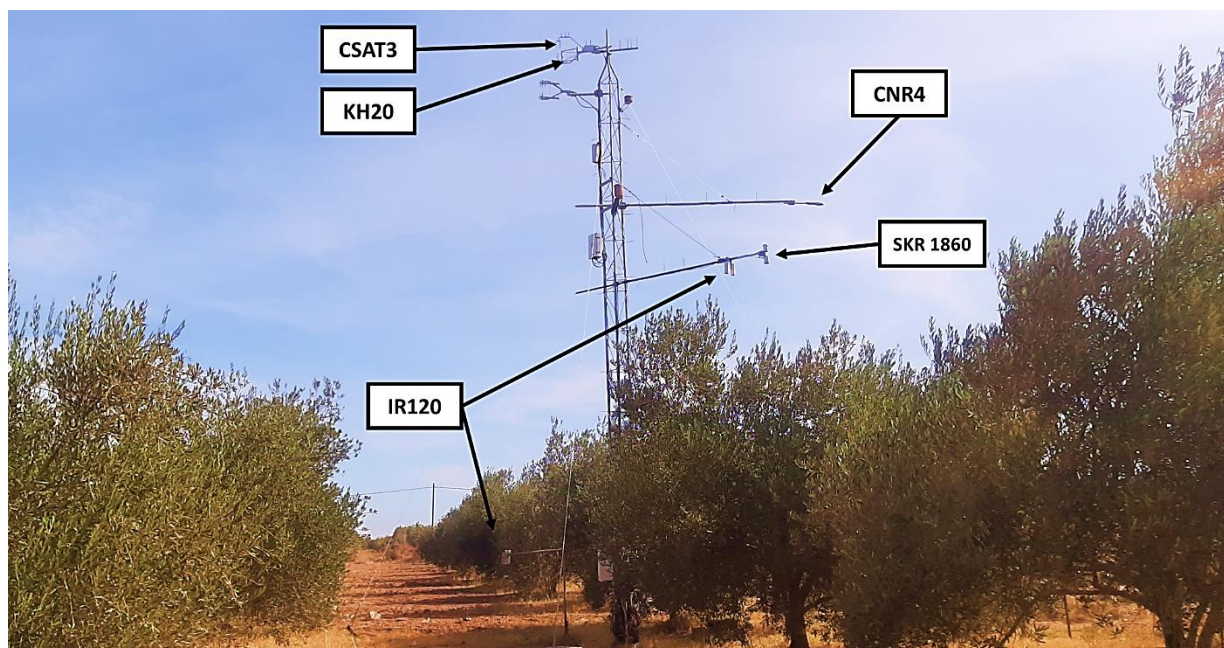


Figure II. 2: Photos illustrant la station de flux (la partie aérienne) installée sur la parcelle d'olivier étudié avec les différents capteurs.

Ce système EC se compose d'un hygromètre à krypton (KH20 de Campbell Scientific Ltd.) mesurant la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère et un anémomètre sonique 3D (CSAT3 de Campbell Scientific Ltd.) qui mesure les fluctuations du vent dans les trois dimensions de l'espace U_x , U_y et U_z), Figure II.2. Les mesures EC sont échantillonnées à une fréquence de 20 Hz pour calculer par la suite le flux de chaleur latente (H) et de chaleur sensible (L_e) sur un intervalle de temps de 30min (Er-Raki, 2007; Ezzahar, 2007). Le traitement de ces données à 20 Hz a été assuré par le logiciel « ECPack » développé par l'université de Wageningen (Dijk et al., 2004).

Afin d'étudier le bilan d'énergie à l'échelle de la parcelle d'olivier étudiée, nous avons appliqué, dans un premier temps, un filtrage sur les données traitées afin de ne conserver que celles recueillies entre 9h et 17h, en excluant également les données recueillies durant les périodes pluvieuses. Ce processus de filtrage nous a permis de ne nous concentrer que sur des périodes diurnes où les flux jouent un rôle prépondérant. Puis, dans un second temps, nous avons procédé à un contrôle de la précision de ces mesures afin qu'elles respectent le bilan d'énergie. En effet, le bilan d'énergie se définit comme étant l'énergie disponible à la surface ($R_n - G$), qui se dissipe par les flux turbulents ($H + L_e$), en négligeant bien évidemment le terme de stockage d'énergie dans le couvert végétal à l'échelle journalière (Baldochi et al., 2004; Testi et al., 2004).

En règle générale, lorsqu'on utilise le système Eddy-Covariance il est fréquent de constater que la fermeture du bilan d'énergie n'est pas vérifiée. Ce phénomène résulte de diverses contraintes théoriques et techniques, parmi lesquelles figurent d'une part une hypothèse d'homogénéité non vérifiée des turbulences mesurées nécessitant des lignes d'écoulement quasiment horizontales en permanence, et d'autre part la difficulté d'effectuer des mesures (à l'aide du radiomètre et des plaques de flux thermiques) représentatives des flux radiatifs et thermiques dans le sol (Allen et al., 2011; Mauder et al., 2007). En d'autres termes, il est attendu un écart de 10 à 30% entre les termes de droite et de gauche du bilan énergétique exprimé comme suit (Allen et al., 2011; Twine et al., 2000) :

$$R_n - G = L_e + H \quad (\text{II. 1})$$

Dans le cadre de cette étude, nous avons évalué la corrélation entre $(R_n - G)$ et $(H + L_e)$ en utilisant le coefficient de la pente de la droite de régression a et le coefficient de détermination « R^2 ». La Figure II.3 montre les résultats obtenus pour des mesures effectuées sur une période de trois ans allant de juin 2019 à avril 2023. Nous constatons que la corrélation entre l'énergie disponible observée $(R_n - G)$ et la somme des flux turbulents $(H + L_e)$ présente une signification élevée, avec $R^2 = 0,8$ à l'échelle demi-horaire et 0.92 pour la moyenne journalière, ainsi qu'un coefficient a de l'ordre de 0,65 et 0.72 respectivement pour les deux échelles demi-horaire et journalière.

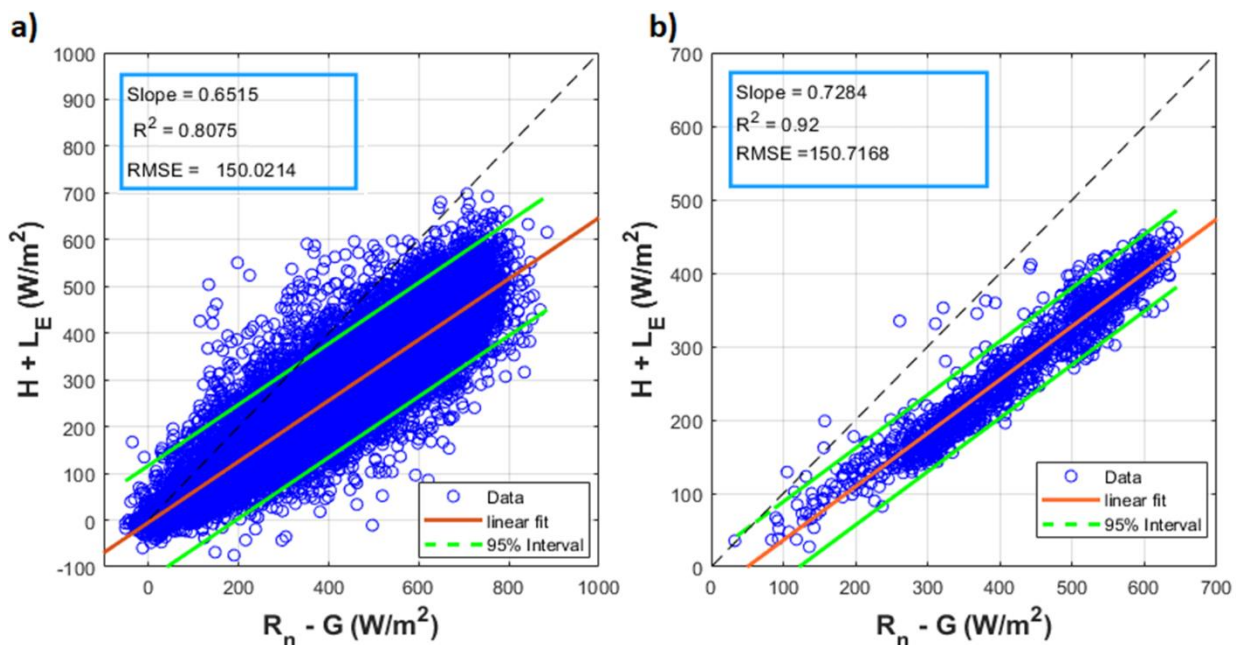


Figure II. 3 : Comparaison entre les valeurs demi-horaires/journalières de l'énergie disponible ($R_n - G$) et des flux turbulents ($H + LE$) mesurés par le système d'Eddy Covariance pour la

parcelle d'olivier sur la période qui s'étale de juin 2019 à avril 2023 : a) les données demi-horaire, b) données moyennées à l'échelle journalière

Cependant, il convient de noter qu'il existe une sous-estimation des flux turbulents issus du bilan énergétique, Figure II.3, qui peut être expliquée par plusieurs facteurs. Tout d'abord, la différence entre les échelles spatiales des mesures : i) la chaleur dans le sol qui est de quelques cm^2 , ii) du rayonnement net qui est de quelque m^2 , et iii) des flux convectifs, qui peuvent représenter une empreinte allant de 100 m^2 à quelques hectares, en fonction de la direction et de l'intensité du vent (Duchemin et al., 2006). Enfin, le stockage de chaleur au-dessus des plaques de flux thermique du sol n'a pas été pris en compte dans nos calculs

Pour remédier à cette sous-estimation des flux turbulents, une correction a été appliquée sur les flux de chaleurs sensibles (H) et latentes (L_e) en utilisant le rapport de Bowen $\beta = \frac{H}{L_e}$ (Twine et al., 2000). Cette méthode consiste à combiner β avec le bilan d'énergie pour obtenir des flux de chaleur latentes ($L_{e\beta}$) et sensibles (H_β) corrigés, tels que :

$$H_\beta = (R_n - G) * \left(\frac{\beta}{1 + \beta} \right) \quad (\text{II. 2})$$

$$L_{e\beta} = \frac{(R_n - G)}{(1 + \beta)} \quad (\text{II. 3})$$

Par la suite, l'évapotranspiration réelle (ETR) a été calculée comme étant le produit du flux de chaleur latente mesuré par le système EC et la chaleur latente de vaporisation de l'eau (Stannard et al., 2013), tel que cette dernière est une variable en fonction de la température de l'air calculer chaque 30 minutes.

III.3. Flux de sève

En plus d'avoir quantifié l'ETR à travers les mesures d'EC, nous avons installé fin juillet 2019 un dispositif de mesure visant à évaluer le débit du flux de sève, via les xylèmes, le long des troncs des arbres d'oliviers (Figure II.4). Pour cela, sept sondes de dissipation de chaleur de type « TDP-50 » ont été installées sur quatre arbres situés à proximité de la station EC, avec un pas de mesures d'une demi-heure.

Afin de tenir compte des variations d'orientation azimutale du tronc et d'éviter toute erreur de mesure, nous avons placé deux sondes sur chacun des quatre oliviers sur les troncs principaux, à une hauteur d'environ 38 à 59 cm au-dessus du niveau du sol.

Les mesures de flux de sève à partir des capteurs « TDP-50 » reposent sur la méthode [Granier \(1985\)](#), qui consiste à mesurer la différence de température entre les deux aiguilles de chaque sonde insérée à une profondeur de 5 cm selon un axe radial dans le tronc de l'arbre. Une aiguille est chauffée à puissance constante, tandis que l'autre reste non chauffée.

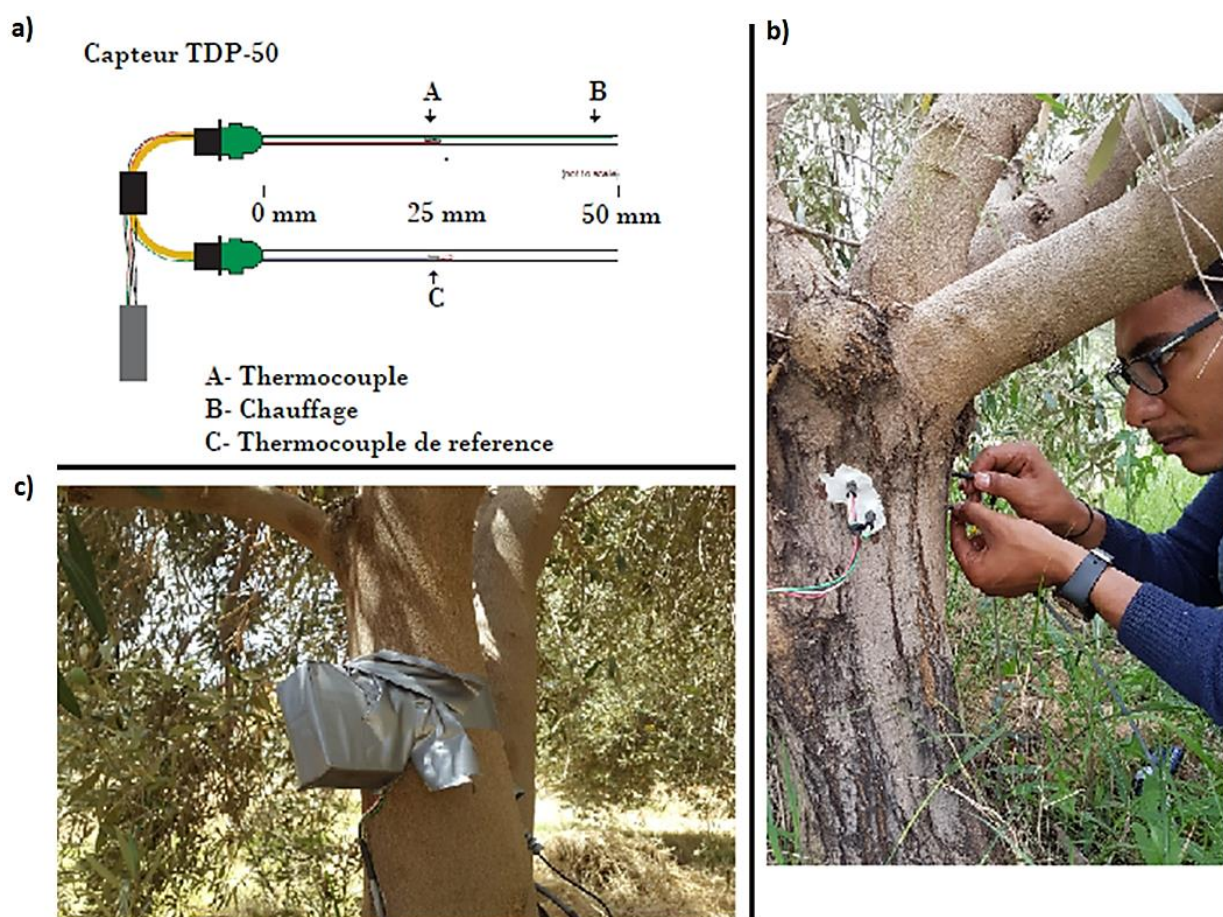


Figure II. 4 : a) Schéma d'un capteur TDP-50, b) mise en place des aiguilles sur le tronc d'un olivier, c) état final du capteur et de l'isolant thermique.

En mesurant ces différences de température, nous obtenons un paramètre adimensionnel d'écoulement de sève K , obtenue avec la méthode de Granier, ([Granier, 1985](#)), tel que :

$$K = \frac{\Delta T_M - \Delta T}{\Delta T_M} \quad (\text{II. 4})$$

$\Delta T_M = T_M - T_\infty$ représente la différence de température (en °C) entre les sondes chauffées (T_M) et non chauffées (T_∞) en absence de flux (autrement dit : la différence de température maximale à l'échelle diurne, qui est liée au débit de sève minimal ou nul pour chaque jour)

$\Delta T = T - T_\infty$ est la différence de température entre les deux sondes en présence d'un flux.

La vitesse moyenne d'écoulement de la sève u (cm/s) est calculée en utilisant la relation suivante (Granier, 1987; Granier, 1985; Lu et al., 2004) :

$$u = 0.0119 \cdot K^{1.231} \quad (\text{II. 5})$$

Le flux de sève total F_s (cm³/30min) est déterminé comme le produit de la vitesse moyenne d'écoulement de la sève u (cm/s) et de la surface transversale du conducteur de l'aubier, *i.e.* l'aire de la section conductrice du xylème, (SWA : Sap Wood Area cm^2). Pour une valeur de $\Delta t = 30 \text{ min}$ représentant l'intervalle de temps entre les mesures, F_s s'exprime selon :

$$F_s = u * SWA * \Delta t \quad (\text{II. 6})$$

Dans la méthode de Garnier, il est crucial d'évaluer avec précision la section conductrice du xylème SWA , puisque des erreurs significatives peuvent survenir si cette estimation est erronée. Cette section conductrice, (SWA : SapWood Area), se constitue de cellules aux parois épaisses qui transporte l'eau et les minéraux des racines aux feuilles Figure II. 5 (Sunal & Sunal, 1991). À mesure que l'arbre vieillit, les anneaux de SWA , les plus anciens se transforment progressivement en moelle (heartwood) qui ne contient ni cellules vivantes ni substances de réserve (A. M. Taylor et al., 2002).

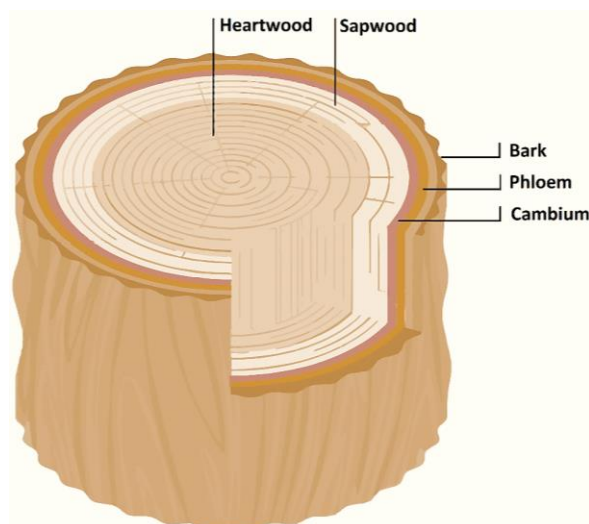


Figure II. 5 : Dessin d'une coupe transversale d'un tronc d'arbre montrant les différents tissus ligneux entre l'écorce et la moelle (Grandi et al., 2023)

Pour chaque emplacement des sept capteurs de flux de sève sur les troncs d'oliviers, l'aire de la section conductrice SWA a été estimée en utilisant une approche basée sur la formule empirique développée par Charfi Masmoudi et al. (2011) selon l'équation suivante :

$$SWA = 0.789 S_t + 0.135 \quad (\text{II. 7})$$

Avec S_t (cm^2) la section pour chaque emplacement des sept capteurs de flux de sève.

Cette méthode basée sur les sondes TDP présente un inconvénient majeur : elle suppose que la distribution radiale de la température mesurée est uniforme, sans tenir compte des gradients de température externes naturels qui peuvent être significatifs (Hölttä et al., 2015). Pour corriger ce biais, nous avons apporté deux corrections, en particulier dans cette région semi-aride, où notre étude se déroule, qui se caractérise par des amplitudes diurnes de température élevées. Tout d'abord, nous avons entouré chaque sonde TDP d'un isolant thermique, Figure II.4 b). D'autre part, nous avons effectué des mesures cycliques dans le temps de marche/arrêt des sondes TDP sur une période de 24 heures chaque 48 heures (Do & Rocheteau, 2002) :

- Le premier jour, appelé « ON » : les aiguilles chauffantes de chaque capteur sont alimentées en courant afin de mesurer les différences de température et calculer le flux de sève.
- Le deuxième jour, appelé « OFF » : aucune chaleur n'est générée par les aiguilles chauffantes (absence d'alimentation en courant).

En utilisant les données acquises lors du jour « OFF », nous avons pu évaluer les influences des gradients de température externes naturels sur les sondes TDP, ce qui nous a permis de corriger

les valeurs mesurées lors du jour « ON ». Pour effectuer cette correction, nous avons calculé la somme des variations de température de l'air observées pendant les jours « j-1 » et « j+1 » qui encadrent le jour « j » « ON », en utilisant un seuil $\Delta_{ref} = 100$ comme référence :

$$\Delta_0 = \sum T_{air_{j-1}} - T_{air_j} \quad (II. 8)$$

$$\Delta_1 = \sum T_{air_{j+1}} - T_{air_j} \quad (II. 9)$$

Δ_0 Représente la somme des différences de température de l'air entre le jour « j-1 » et le jour « j », tandis que Δ_1 représente la somme des différences de température de l'air entre le jour « j+1 » et le jour « j ». Le seuil de référence Δ_{ref} a été fixé à 100 après plusieurs tests effectués sur les données en se basant sur différentes conditions météorologiques.

Les corrections ont été appliquées en utilisant trois méthodes basées sur les principes suivants :

1. Si Δ_0 et Δ_1 sont tous les 2 inférieurs au seuil de référence Δ_{ref} , cela signifie que les jours « j-1 » et « j+1 » « OFF » présentent des conditions météorologiques similaires à celles du jour "j" « ON », et les données corrigées du jour « ON » sont donc équivalentes à :

$$\Delta T_{corr} = \Delta T_{ONj} + \frac{\Delta T_{OFFj-1} - \Delta T_{OFFj+1}}{2} \quad (II. 10)$$

2. Si seulement Δ_0 ou Δ_1 est inférieure au seuil de référence Δ_{ref} , cela signifie que l'un des deux jour « j-1 » et « j+1 » « OFF » présentent des conditions météorologiques non similaires à celles du jour « j » « ON ». Les données corrigées du jour « ON » sont donc équivalentes à :

$$\Delta T_{corr} = \Delta T_{ONj} - \Delta T_{OFF} \quad (II. 11)$$

3. Si Δ_0 et Δ_1 sont tous les 2 supérieurs au seuil de référence Δ_{ref} , cela signifie que les jours "j-1" et "j+1" « OFF » ne présentent pas de conditions météorologiques similaires à celles du jour "j" « ON ». Dans ce cas, nous nous sommes référés aux valeurs du jour « OFF » le plus proche qui présentent des conditions météorologiques similaires jour « ON ».

Le choix de la température de l'air comme paramètre de correction a été basé sur le fait que la température de l'air se révèle être l'un des principaux moteurs du flux de sève chez les oliviers (Amani et al., 2013), avec des coefficients de corrélation très élevés entre le flux de sève et la température de l'air chez l'olivier (Orgaz et al., 2007; Rousseaux et al., 2009).

Les mesures des flux de sèves F_s des sept sondes, une fois traitées et corrigées, nous ont conduit à chercher une moyenne afin de passer ces mesures, individuelle par sonde, à l'échelle de la parcelle. Pour cela nous avons admis que le flux de sève F_s d'un arbre est la moyenne des deux densités de F_s mesurées sur les 2 troncs principaux. Les mesures des circonférences de 13 arbres ayant donné des résultats identiques (une moyenne de 59 cm avec un écart-type de 3.3 cm sur en hauteur moyenne de mesure sur les troncs par rapport au sol de 42.5 cm), le flux de sève F_s caractérisant la parcelle a été estimé comme la moyenne des flux de chacun des 4 arbres. Le taux de transpiration des oliviers à l'échelle de la parcelle a été estimé comme égal au flux de sève de la parcelle en raison du lien étroit entre ces 2 paramètres (Gerdes et al., 1994). Cela permet d'examiner le fonctionnement hydraulique des arbres afin d'explorer certains diagnostics sur le stress hydrique (Fernández et al., 2001).

Il est essentiel de souligner que les diffuseurs principaux dans les mesures radar en bande C ne sont pas les troncs d'arbres. Par conséquent, les mesures du flux de sève dans le tronc peuvent être considérées comme des indicateurs des processus hydriques se déroulant dans les feuilles, les branches et les tiges, bien qu'il existe un décalage temporel dans cette relation. De plus, même si les mesures de la constante diélectrique des branches, des tiges et des feuilles sont généralement plus pertinentes que celles des flux de sève dans le tronc pour les mesures radar en bande C, il n'a pas été possible de les réaliser dans le cadre de cette expérience.

III.4. Dendromètres

Pour assurer un suivi continu de l'état hydrique des oliviers, nous avons mis en place, depuis avril 2020, quatre dendromètres de type « DR3 », un par arbre, sur les mêmes arbres équipés par les TDP-50, à proximité de ceux-ci, afin de faciliter la comparaison des 2 paramètres mesurés (Figure II.6).



Figure II. 6 : Photos illustrant la mise de l'un des dendromètres sur le tronc d'un arbre d'olivier proximité d'une sonde TDP-50

Ces dendromètres utilisent une technique de jauge de contrainte pour mesurer les petites variations micrométriques du rayon du tronc, notées ΔR . Cette approche de mesure a été employée dans diverses études surtout sur des forêts (Duchesne et al., 2012; Herrmann et al., 2016; Obojes et al., 2022; Van der Maaten et al., 2013). Ces mesures, sont complémentaires car très liées à celles de flux de sève dans le xylème (De Schepper et al., 2012; Ehrenberger et al., 2012; Pfautsch et al., 2015; Zweifel et al., 2014).

Ces mesures dendrométriques ont été acquises à l'aide d'un enregistreur de données automatique de type « DL18 » toutes les 5 minutes avec une résolution de mesure de l'ordre de $0.2 \mu\text{m}$ (<https://ecomatik.de/en/products/data-capture-and-measurement-systems/mini-systems-dl18/>).

Par la suite, ces mesures ont été moyennées pour les quatre arbres, pour obtenir des mesures que nous qualifieront représentatives de la parcelle. Nous avons réalisé une moyenne de ces mesures sur un intervalle de temps de 30 minutes, afin d'harmoniser les pas de temps avec ceux de flux de sève.

Le traitement des données de variations dendrométriques du tronc des arbres à l'échelle de la parcelle (ΔR en μm) repose sur un lissage temporel effectué par une moyenne mobile glissante sur une période 2 jours. L'analyse des données dendrométriques se base sur différents paramètres illustrés Figure II.7. Ces paramètres sont :

- l'incrément du rayon, I (μm), c'est-à-dire l'évolution de ΔR après filtrage des données par la moyenne glissante, appelée courbe de tendance.
- la variation résiduelle ΔR_r (μm) pour laquelle la tendance de croissance cumulative a été supprimée.
- l'amplitude journalière, $A = \Delta R_{r_max} - \Delta R_{r_min}$ (μm) les valeur max et min étant prise sur la journée.

Les variations résiduelles ΔR_r ont été calculées en faisant la différence entre la courbe de tendance et ΔR (Herrmann et al., 2016). Les séries temporelles des mesures ΔR pour la période d'avril 2020 à décembre 2022 sont présentée sur la Figure II.7 avec un zoom sur la période allant du 11 au 16 février 2022.

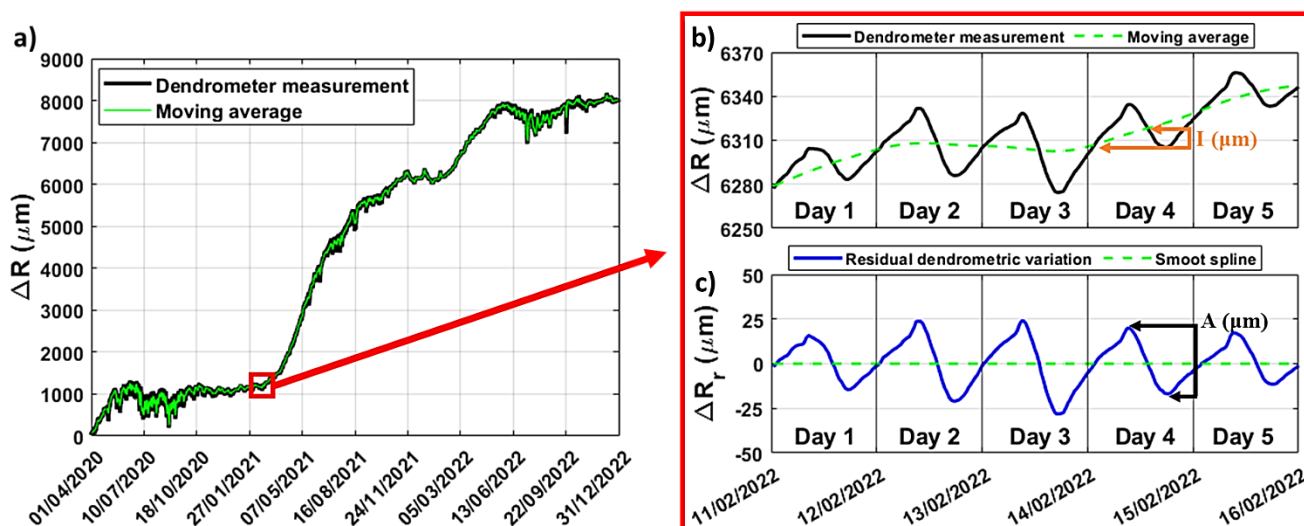


Figure II. 7 : a) Série temporelles des mesures ΔR pour la période d'avril 2020 à décembre 2022, Figure, b) zoom sur la période allant du 11 au 16 février 2022 avec les mesures ΔR et l'incrément du rayon, I ; c) variations résiduelles, ΔR_r , et amplitudes quotidiennes, A , estimées après normalisation des mesures ΔR par la courbe de lissage (vert)

Par la suite, les mesures de ΔR ont été analysées selon des cycles de phases. En effet, les variations quotidiennes du rayon des tronc des arbres résultent d'un rétrécissement, d'un gonflement réversible et d'une expansions radiale irréversible, tous influencés par l'état hydrique (Deslauriers et al., 2007). Ces analyses nous ont permis d'estimer la croissance induite par les phases d'expansions irréversibles (noté GRO : Growth) (Giovannelli et al., 2021), ainsi que les cycles du déficit hydrique chez les arbres observés à travers les rétrécissements temporaires réversibles (désigné TWD : Tree Water Deficit) (Drew et al., 2011; Zweifel et al., 2000, 2005). L'estimation de ces différentes phases est expliquée ci-dessous, et illustrée Figure II.8.

Deux méthodes distinctes sont utilisées pour estimer les expansions irréversibles : la méthode de croissance nulle, ZG, et celle de croissance linéaire, LG. Elles sont définies comme suit :

$$GRO_{ZG}(t) = \max (\Delta R(t')) \text{ pour } t' \leq t \quad (\text{II. 12})$$

$$GRO_{LG}(t) = \frac{GRO_{ZG}(t + \Delta t) - GRO_{ZG}(t)}{t_2 - t_1} (t - t_1) + GRO_{ZG}(t_1) \quad (\text{II. 13})$$

Où t_1 et t_2 sont les jours tel que $GRO_{ZG}(t) = \Delta R(t_1)$ et $GRO_{ZG}(t + \Delta t) = \Delta R(t_2)$

La différence entre $GRO_{ZG}(t)$ et $GRO_{LG}(t)$ est que, entre 2 maximums de ΔR consécutifs, la 1^{ère} maintient ses valeurs constantes (fonction en escalier) alors que la 2^{ème} fait une interpolation linéaire (Drew et al., 2011; Vieira et al., 2013; Zweifel et al., 2005). Le choix de Δt est fixé arbitrairement *a priori*. Dans notre cas nous l'avons fixé à 40 jours afin d'optimiser l'estimation des périodes de stress hydriques (Xue et al., 2022). Celles-ci sont estimées par le paramètre de déficit hydrique (Tree Water Deficit) $TWD(t)$ défini selon :

$$TWD(t) = |GRO(t) - \Delta R(t)| \quad (\text{II. 14})$$

GRO correspondant à GRO_{ZG} ou GRO_{LG} selon la méthode choisie. Dans le cas de l'interpolation linéaire (GRO_{LG}), réduire, ou augmenter, la valeur de la fenêtre temporelle Δt accroît le risque de la non-détection, ou la sur-détection (Zweifel et al., 2005).

La croissance (GRO) des approches LG ou ZG sont évidemment identiques à l'échelle de la saison de croissance. Or les taux de croissance, entre deux acquisitions à 30min, Figure II.8 c), diffèrent entre les deux approches : des phases de décroissance constant et linéaire peuvent être observées pour la méthode LG, même sur les périodes TWD , alors que la méthode ZG impose des valeurs positives ou nulles uniquement. Cela est dû au fait que l'approche LG suppose un taux de croissance entre deux pics de variation du rayon (ΔR) constant et linéaire, ce qui conduit à des taux plus faibles, par rapport à l'approche ZG, induisant à une sous-estimation la croissance et surestimation le déficit hydrique (Zweifel et al., 2016). A cet égard, Nous avons donc préféré adopter la méthode ZG.

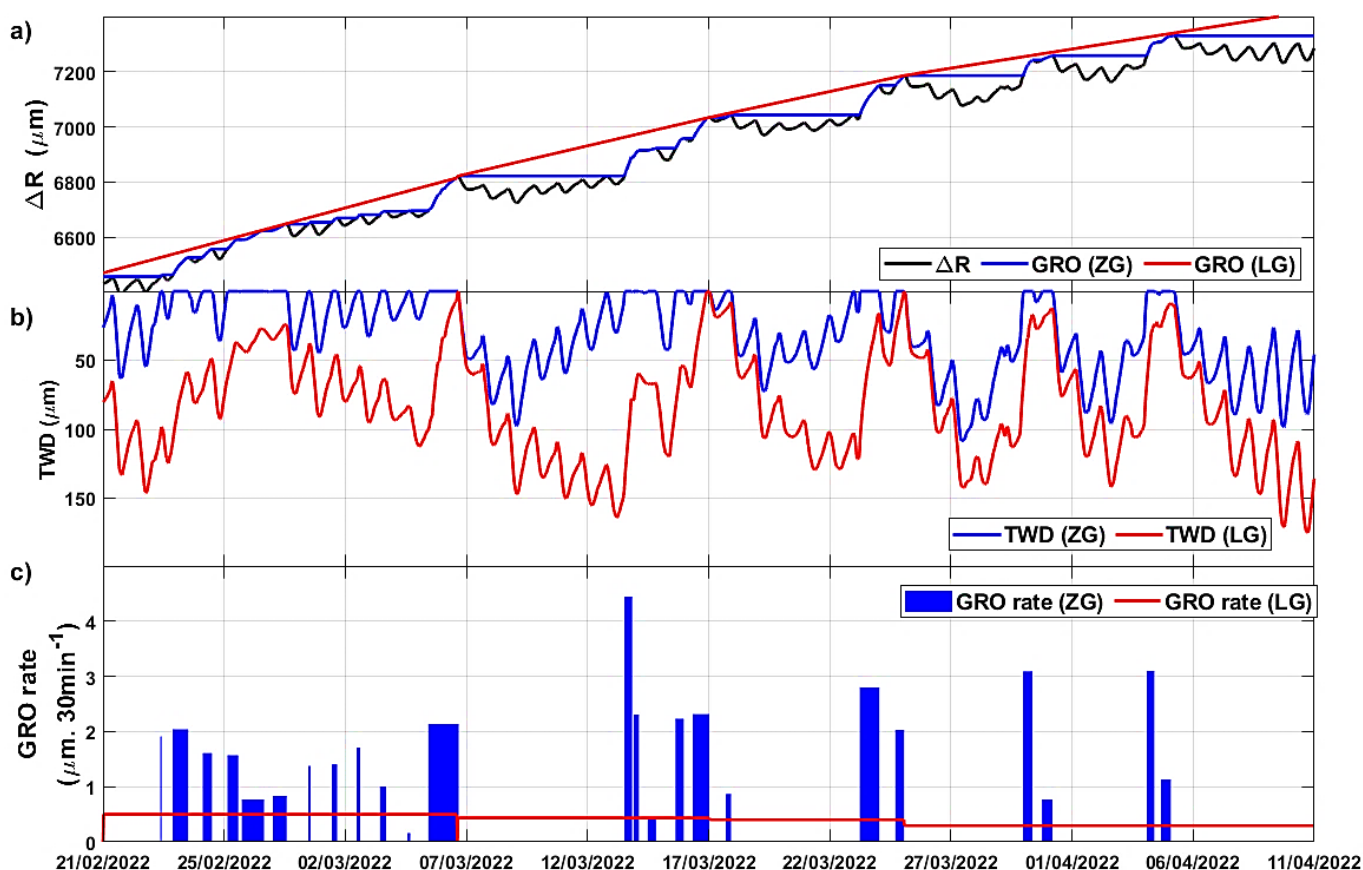


Figure II. 8 : Les séries temporelles des mesures ΔR divisés en rétrécissement induit par le déficit hydrique (TWD) et en expansion irréversible induite par la croissance (GRO) en utilisant les deux approches LG (en rouge) et ZG (en bleu) pour la période du 21 février au 11 avril 2022. Figure II.8 a) : Mesures de ΔR ainsi que le cumul de GRO pour ZG et LG. Figure II.8 b) : le TWD issues des ΔR pour ZG et LG. Figure II.8 d) : les taux de croissance du tronc des arbres en 30min pour ZG et LG.

III.5. Pression de vapeur d'eau

Le contenu en eau au sein de la canopée est influencé par une interconnexion complexe entre les processus biologiques internes des arbres, leurs réactions aux conditions météorologiques et leur activité métabolique qui évoluent dans le temps. Plus précisément, la quantité d'eau contenue dans les arbres est directement impactée par les déficits de pression de vapeur (VPD). Cette dernière désigne la différence entre la pression de vapeur dans les stomates et celle présente dans l'air environnant, en supposant que l'air à l'intérieur des stomates est saturé (Monteith, 2020). Le VPD représente donc, en zone semi-aride, une mesure du pouvoir de dessèchement et joue un rôle essentiel dans le processus de régulation de la transpiration des plantes (Monteith, 2020; Vurro et al., 2019). Cette transpiration est elle-même affectée par les flux de sève du xylème (Čermák et al., 2007), qui suivent le parcours de l'eau depuis les racines, à travers le tronc, jusqu'aux feuilles (Pfausch et al., 2015; Zweifel et al., 2016)

Ainsi, nous avons estimé le déficit de pression de vapeur (VPD , kPa), sur la parcelle d'olivier étudiée toutes les 30 minutes, avec l'approche proposé par Allen et al. (1994), selon :

$$VPD = \left(1 - \frac{H_r}{100}\right) 0.6108 e^{\left(\frac{17.27 T_{air}}{T_{air}+237.3}\right)} \quad (\text{II. 15})$$

Tel que : T_{air} et H_r représentent respectivement la température et l'humidité de l'air obtenues dans notre cas par des mesures *in situ*.

III.6. Humidité du sol

L'humidité de surface du sol est mesurée automatiquement toutes les demi-heures dans deux fosses situées près de la station d'Eddy-covariance, Figure II.9. La première fosse est positionnée entre deux rangs d'oliviers, et dispose de mesures à des profondeurs de : 5 cm, 10 cm, 20 cm et 30 cm, (photo de droite Figure. II.9). La deuxième fosse se trouve à 40 cm du pied d'un tronc principal d'un olivier, et possède des sondes placées à des profondeurs de : 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm, 50 cm et 80 cm sous forme d'escalier, Figure II.9 à gauche.



Figure II. 9 : Photos de la mise en place des sondes TDR (capteurs blancs carrés) et des plaquettes de flux (capteurs rouges ronds) dans deux fosses situées près de la station d'Eddy-covariance. Photo à gauche montre la fosse se trouvant au pied d'un tronc d'arbre d'olivier se composant de deux sondes à 5 cm dont une à gauche et l'autre à droite du tronc, et les autres profondeurs 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm, 50 cm et 80 cm sous forme d'escalier. La photo à droite montre la fosse entre rang avec les sondes TDR de 10 cm, 20 cm et 30 cm, la sonde de 5 cm ne figure pas sur la photo.

Ces mesures sont effectuées à l'aide de capteurs de type « CS655 » capables de mesurer non seulement l'humidité du sol, mais aussi sa température, sa permittivité et sa conductivité électrique. Les capteurs « CS655 » utilisent une technologie appelée TDR (Time Domain Reflectometry), qui consiste à envoyer des impulsions électromagnétiques dans le sol (à 100

kHz) et mesurent le temps de retour des échos, ainsi que le rapport de puissance émis/reçus. Ces paramètres sont directement liés à la permittivité et à la conductivité diélectrique du sol, qui à l'humidité du sol (Kargas & Soulis, 2019).

La relation entre la permittivité diélectrique et la teneur en eau volumétrique, pour un sol homogène, a été établie empiriquement par Topp et al. (1980) à l'aide d'un polynôme du troisième degré :

$$\theta_v = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} K_a - 5.5 \cdot 10^{-4} K_a^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} K_a^3 \quad (\text{II. 16})$$

Avec θ_v représentant la teneur en eau volumétrique et K_a correspondant à la permittivité diélectrique apparente du sol (mesurée à 100 kHz, comme précédemment mentionné). Cette relation peut varier en fonction du type de sol.

III.7. Stades phénologiques des oliviers

Dans un environnement semi-aride, comme celui de Chichaoua, les cycles de croissance et de fructification des oliviers présentent une variabilité en raison des fluctuations des conditions environnementales (Masmoudi-Charfi & Ben Mechlia, 2007). Cette variabilité peut être perceptible sur les mesures radar *in situ* étant donné que la géométrie des oliviers évolue, à l'échelle intra-annuelle, en fonction du cycle de croissance (Sanz-Cortés et al., 2002), ce qui influe sur le signal radar rétrodiffusé par la canopée des oliviers.

Dans cette étude, le calendrier des principales phases phénologiques a été ajusté en se basant sur des observations terrains ainsi que sur les recherches menées par Sanz-Cortés et al. (2002), et M. Torres et al. (2017) concernant la culture de l'olivier en Méditerranée. La Figure II.10 présente les principaux stades phénologiques avec leurs correspondances calendaires, ainsi que les principaux changements auxquels les oliviers sont soumis tout au long.

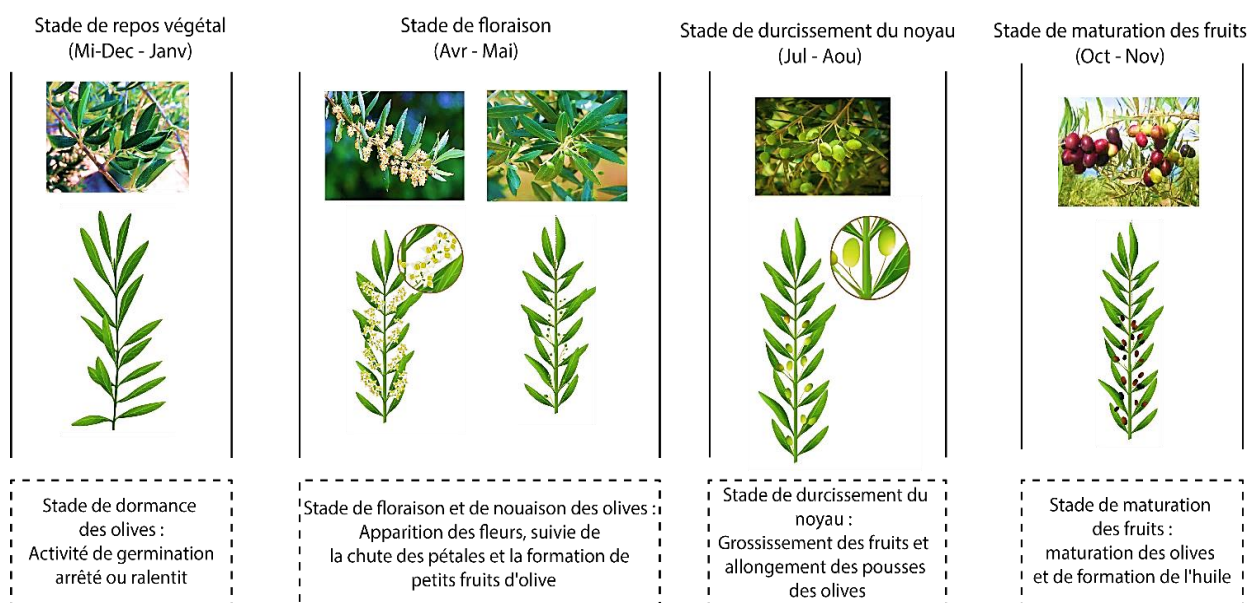


Figure II. 10 : Les principaux stade phénologiques, de deux mois, et les mois qui leurs correspondent de l'année, choisies pour cette étude, ainsi que les principaux changements phénologiques que l'oliviers subissent. Reference image: (*Olive Phenological Phases and Their Nutrition Requirements - SQM Specialty Plant Nutrition, n.d.*)

Entre mi-décembre et fin janvier, les oliviers sont en phase de dormance au cours de laquelle ils réduisent ou ralentissent considérablement leurs activités de développement et de germination, permettant aux arbres de survivre aux basses températures hivernale (Ramos et al., 2018). Après cette période de repos végétatif, les oliviers subissent d'importantes changements à la fois au niveau de leurs activités physiologiques et de leurs structures géométriques pendant le stade de floraison, qui s'étend sur les mois d'avril et mai. À ce stade, les bourgeons issus de la saison de croissance précédente sortent de leur dormance et subissent des transformations anatomiques favorisées par des températures plus chaudes, propices à leur épanouissement (Ramos et al., 2018; M. Torres et al., 2017). De nombreuses petites fleurs font alors leur apparition, durant ce stade, dont environ seulement 2 % se développent en petits fruits (Lavee et al., 1996). Après la formation des petites olives, ces dernières poursuivent leur croissance rapide jusqu'au le troisième stade, celui du durcissement du noyau (Chiraz, 2013), qui s'étend de juillet à fin août. Durant ce stade, la majeure partie de la biomasse produite par les oliviers est dédiée à la croissance des fruits en plein développement et à l'allongement des pousses, nécessitant d'importantes quantités d'eau et de nutriments pour soutenir cette croissance (Abdel-Rahman & El-Sharkawi, 1974; Fernández & Moreno, 1999; Rallo et al., 1994). Ces besoins doivent également répondre aux exigences climatiques rigoureuses de cette période estivale, généralement caractérisée par des températures et un *VPD* élevées. Enfin, le quatrième stade correspond au stade de la maturation

des fruits, qui se déroule d'octobre à novembre, jusqu'à la période de récolte des olives. À ce moment-là, les olives sont en cours de maturité des fruits (El Qarnifa et al., 2019).

Il est à noter que la détermination exacte et précise du début et de la fin de chaque étape phénologique des oliviers reste complexe car cela peut varier selon : les régions, les modes d'irrigation et les conditions climatiques.

IV. Données radar *in situ*

Dans cette partie, nous décrivons en détail le système d'acquisitions radar *in situ* permettant d'acquérir des coefficients de rétrodiffusions et des cohérences interférométriques sur les oliviers. Ce dispositif a été développé par les collègues de CESBIO et moi-même (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère) dans le cadre du projet MOCTAR financé par le programme TOSCA/CNES. L'ensemble du système radar *in situ* se compose : d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA pour Vector Network Analyzer), 7 antennes opérant en bande C, des duplexeurs et de câbles, le tout installé sur une tour de 20 mètres de hauteurs et piloté par un ordinateur.

IV.1. Généralités sur l'expérimentation

IV.1.1 Tour à échafaudage

La tour utilisée dans cette expérience est un échafaudage de base 2 x 1 mètres, et d'une hauteur de 20 mètres (Figure II.11). Les tubes qui la composent ont un diamètre de 4 cm avec une épaisseur de 2 mm, assemblés en les emboîtant les uns dans les autres.

Pour garantir la stabilité de la structure, les pieds de la tour ont été plantés dans une dalle de béton pendant l'installation. Cette dalle est constituée d'un lit de gros cailloux mesurant 3 mètres sur 3 mètres, enfoncé dans le sol à une profondeur de 80 cm. Une couche de ciment d'une épaisseur de 20 cm a été coulée par-dessus afin d'assurer la stabilité. En outre, pour renforcer davantage la stabilité de la tour et minimiser les vibrations causées par le vent, celle-ci est équipée d'un ensemble de haubans fixés de chaque côté espacé de 4 mètres sur toute la longueur de la tour, Figure II.11.

La tour est positionnée au bord de l'oliveraie, parallèlement aux rangées d'arbres, à une distance d'environ 10 mètres, Figure II.11 et Figure II.15.



Figure II. 11 : Photos prises lors de l'installation de la tour illustrant la structure des échafaudages qui construisent la tour, ainsi que les haubans de stabilisation

IV.1.2 Analyseur de réseau vectoriel

Au cœur du système radar *in situ* se trouve un analyseur de réseau vectoriel ou VNA (Vector Network Analyzer) de type « S5065 » à 2 ports, qui est le composant central (<https://coppermountaintech.com/vna/s5065-2-port-6-5-ghz-analyzer/>). Un VNA est un instrument de mesure utilisé dans le domaine de l'électronique et de télécommunication pour caractériser les circuits et les dispositifs électriques. Il est principalement utilisé pour mesurer les paramètres de transmission et de réflexion des signaux haute fréquence tels que : les ondes radio, les micro-ondes et les signaux Radio Fréquences (Kondawar & Modak, 2020).

Le VNA utilisé se compose d'un analyseur qui permet de déterminer les paramètres S, réponse impulsionnelle de puissance émise et de puissance reçue, et d'un logiciel de contrôle du module (l'analyseur) qui s'exécute sur un ordinateur, à travers une connexion USB. Ce contrôleur du module reçoit et post-traite les données brutes qui sont reçues.

Le VNA permet de couvrir une large gamme de fréquences (de 9 KHz à 6.5 GHz), avec un temps de 70 μ s séparant deux mesures. Les ondes incidentes et réfléchies des coupleurs directionnels passent dans les mélangeurs, qui convertissent les signaux d'entrées en fréquence FI (fréquence intermédiaire), où elles sont converties tout d'abord à 0,4 MHz et sont ensuite transmises à un récepteur à 4 canaux. Le récepteur à 4 canaux code le signal et le fournit numériquement pour un

post-traitement des données brutes constitué de différentes étapes filtrages, estimation de la différence de phase, mesure de l'amplitude...etc.

Les deux ports du VNA sont permutable en eux, c'est-à-dire l'un ou l'autre peut être émetteur (Tx) ou récepteur (Rx) du signal. Si le port 1 est une source, le port 2 sera un récepteur (plus de détails sur <https://coppermountaintech.com/vna/s5065-2-port-6-5-ghz-analyzer/>).

IV.1.3 Antennes

Les sept antennes utilisées sont des antennes « cornet » opérant en bande C. Ces antennes sont réparties en deux émetteurs, émettant en polarisations verticales (V) et horizontales (H), et cinq récepteurs deux en polarisation V et trois en polarisation H.

Ces antennes ont été soigneusement installées au sommet de la tour de 20 mètres de hauteur en juin 2019. Elles étaient positionnées sur une structure métallique à trois hauteurs espacées de 32 cm entre chacune et dirigées vers le verger avec un angle d'inclinaison de $\theta \approx 35^\circ$ par rapport à la verticale, correspondant à un angle d'incidence de 55° , comme le montre la Figure. II.12.

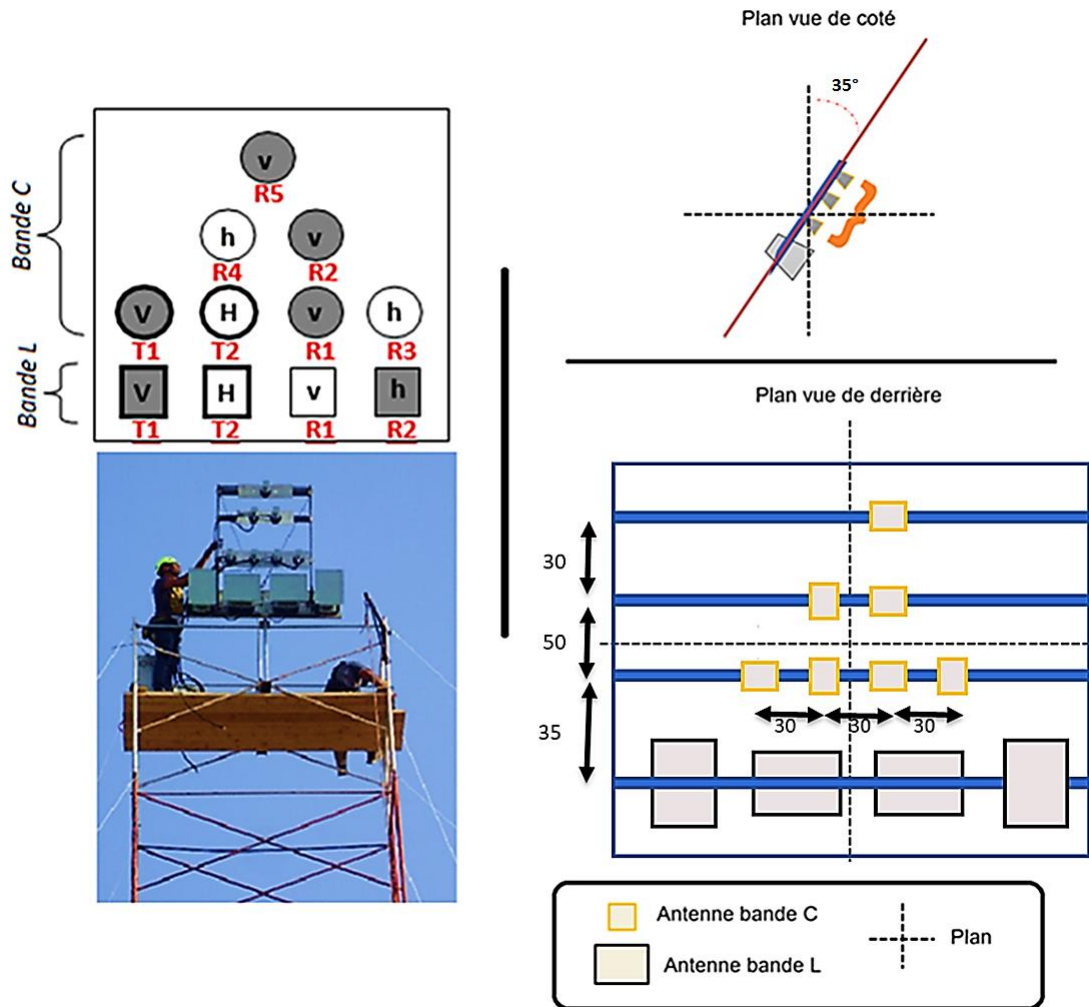


Figure II. 12 : Illustrations et photos des positions du réseau d'antennes au sommet de la tour. Les sept petites antennes du cadre supérieur sont celles qui fonctionnent dans la bande C. la notation « R » correspond à la réception tandis que « T » est à la transmission.

Les antennes utilisées sont des modèles « LB-159-10-C-NF » qui fonctionnent dans une plage de fréquences allant de 4.90 – 7.05GHz (couvrant la plage de fréquences de 5.2 à 5.8 GHz exploité dans ces travaux). Les caractéristiques telles que les gains maximaux et les largeurs de faisceau correspondantes sont présentées dans le Tableau II.1 ci-dessous :

Tableau II. 1 : Paramètres de l'antenne cornet utilisés pour les acquisitions en bande C (5,2-5,8 GHz)

Fréquence (GHz)	Gain (dB)	Facteur d'antenne (dB/m)	Isolation de polarisation croisée (dB)	Largeurs du faisceau des plans V et H 3 dB
5.0	10.51	33.68	-32	56.77° & 55.16°
5.5	10.95	34.07	-40	54.45° & 49.93°
6.0	11.63	34.14	-44	50.57° & 46.56°

Nous tenons à rappeler les définitions de bases suivantes :

- Gain : il représente le rapport entre l'énergie émise par l'antenne dans une direction donnée (θ) et l'énergie totale émise dans toutes les directions.
- Facteur d'antenne : il représente le rapport entre le champ électromagnétique incident et la tension de sortie du connecteur aux bornes de l'antenne.
- L'isolation de polarisation croisée : elle se mesure comme le rapport entre la composante du signal à polarisation croisée émise dans une polarisation donnée et la composante de signal émise dans la polarisation orthogonale correspondante.
- Largeur du faisceau : elle correspond à l'angle de séparation auquel l'amplitude du modèle de directivité diminue d'une certaine valeur, généralement à 3dB, par rapport au pic du faisceau principal.

La disposition résultant de la configuration des paires d'antennes a permis d'avoir : 3 paires d'antennes formant la polarisation VV et VH, et 2 paires d'antennes composant la polarisation HV et HH. Le tableau II.2 ci-dessous répertorie les divers couples d'antennes qui composent chaque polarisation, avec la notation « R » pour réception et « T » pour transmission.

Tableau II. 2 : Les différentes paires d'antennes qui forment chaque polarisation avec la notation « R » correspond à la réception tandis que « T » est à la transmission

Polarisation	Paires d'antennes		
VV	R1_T1	R2_T1	R5_T1
VH	R1_T2	R2_T2	R5_T2
HV	R3_T1	R4_T1	-
HH	R3_T2	R4_T2	-

IV.1.4 Duplexeur et Câbles de connexion

Il est nécessaire d'introduire des duplexeurs entre le VNA à deux ports et les sept antennes afin de permettre une commutation des signaux entre le port de transmission (Tx) et le port de réception (Rx) du VNA. Nous avons utilisé trois duplexeurs électromécaniques du type « SP12T / DC12V / DC-15 GHz ». Chaque duplexeur possède 12 ports d'une durée de vie pouvant atteindre 1 000 000 de cycles, et d'une perte de signal inférieur à 0.2 dB. Dans ce contexte, la commutation est réalisée en fonction des différentes combinaisons de polarisation de pair d'antennes (Tableau II.2). Les duplexeurs électromécaniques, également appelés commutateurs duplexeurs, facilitent la commutation entre les modes de transmission et de réception.

Lorsque le VNA est en mode d'émission, le duplexeur dirige l'onde générée du port de transmission (Tx) pour qu'il soit transmis à travers l'antenne appropriée. De manière similaire, lors du passage en mode de réception, le duplexeur bascule pour diriger l'onde rétrodiffusée reçue à travers l'antenne de réception appropriée vers le port de réception (Rx). Les trois duplexeurs sont connectés à un système de contrôle et d'acquisition, un Mini-PC, via des câbles USB. Ce Mini-PC exécute un script Python qui commande la commutation des duplexeurs d'une antenne à l'autre lors des acquisitions.

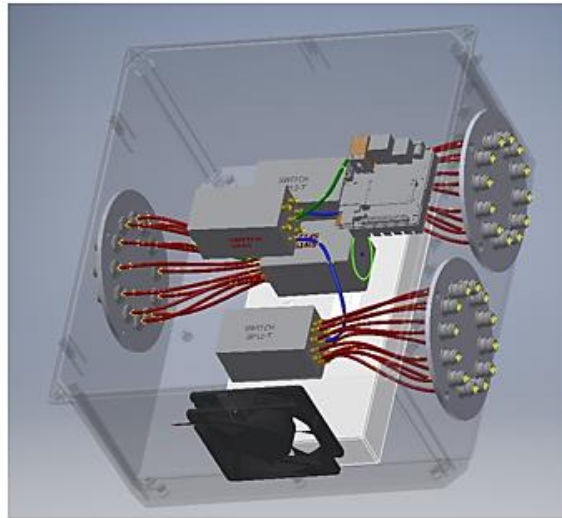
Afin d'assurer les connexions entre le VNA, les duplexeurs et les antennes, nous avons utilisé deux types de câbles étant donné que les antennes ne sont pas directement connectées aux duplexeurs, mais plutôt à des connecteurs coaxiaux fixés sur un coffret. Ce dernier assure l'étanchéité de l'ensemble du système électronique (VNA, duplexeurs, Mini-pc, etc.), situé en haut de la tour de 20 mètres. Les câbles utilisés pour relier les antennes aux connecteurs coaxiaux du coffret sont des câbles flexibles du type « FSJ4-50B coax Câble Jumper N. Mâle à N. Mâle FSJ1RN-50BFSJ1RN-50B ». Ces câbles offrent une excellente stabilité de phase face aux variations de température et à la flexion. Ils ont une impédance de 50 Ω , prenant en charge des fréquences qui peuvent aller jusqu'à 20 GHz. Leur revêtement en polyéthylène les rend résistants aux intempéries, adaptés à une utilisation dans des conditions climatiques extrêmes. De plus, ces câbles, d'après le fabricant, sont conçus pour éliminer la génération d'intermodulations, assurant une transmission de signal de haute qualité. Les connecteurs utilisés garantissent une pression de contact élevée entre les connecteurs du coffret et les câbles, minimisant ainsi les problèmes d'intermodulation ou de faux contacts.

Par ailleurs, pour les liaisons entre les connecteurs coaxiaux internes du coffret et les duplexeurs, ainsi qu'entre les duplexeurs et le VNA, nous utilisons des câbles coaxiaux flexibles du type

« 141-14 SM+ ». Ces câbles sont spécialement conçus pour l'interconnexion de composants coaxiaux ou de sous-systèmes. Ils sont fabriqués avec un conducteur central en acier revêtu de cuivre plaqué argent, qui conserve sa forme même après avoir été plié. Le blindage externe est constitué d'une tresse de cuivre trempée dans de l'étain, ce qui réduit les fuites de signal et offre une grande flexibilité pour faciliter le pliage en cas de besoin. Ces câbles présentent des faibles pertes de retour tout en minimisant les perturbations dues aux câbles et aux connecteurs couplés.

La Figure II.13 ci-dessous montre un aperçu des connexions entre les câbles d'antennes-coffret-duplexeurs.

A)



B)



C)

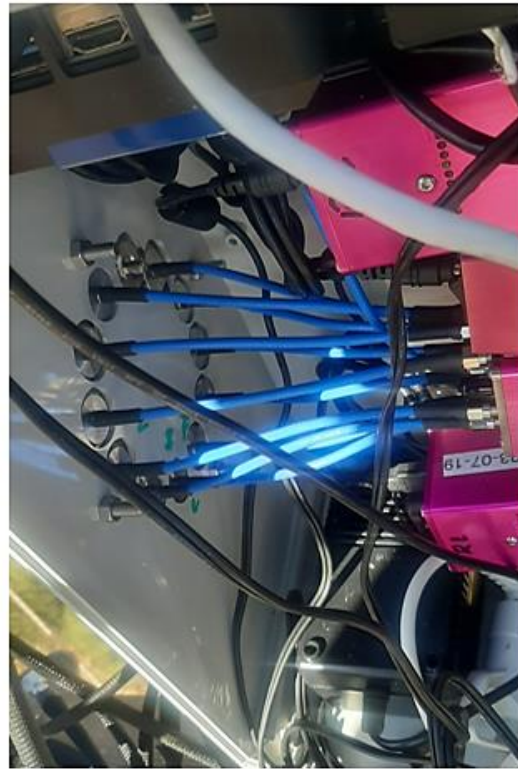


Figure II. 13 : Photos des connexions des câbles d'antennes-coffret-duplexeurs : A) illustration en 3D de l'ensemble des liaisons entre VNA, duplexeurs et connecteurs coaxiaux du coffret. B) et C) photos des connecteurs coaxiaux et le câblage reliant les d'antennes aux duplexeurs.

IV.1.5 Système de contrôle et d'acquisition

Le système de contrôle et d'acquisition se fait à partir d'un programme en langage Python sur un Mini-pc situé en haut de la tour et fonctionnant sous système d'exploitation « Windows 10 ». Ce système de contrôle assume la responsabilité de lancer et superviser les acquisitions de données

et contrôler l'ensemble des équipements : antennes, duplexeurs, et VNA. Le programme commande automatiquement les cycles d'acquisitions de données toutes les 15 minutes, qui sont ensuite stockées sur un disque dur externe d'une capacité de 2 To.

Au début de chaque cycle de mesures de 15 minutes, juste avant que les duplexeurs n'effectuent la commutation entre les antennes et le VNA pour réaliser les mesures, une pré-calibration automatique est mise en œuvre. Son objectif est de permettre au VNA de déterminer les pertes de signal à travers l'ensemble du dispositif, comprenant les câbles de connexion et les duplexeurs. Les pertes de signal au niveau des antennes sont supposées négligées, étant donné que la conception des antennes cornets minimise efficacement la dissipation d'énergie sur les bords du réflecteur (Kildal & Lier, 1988). La pré-calibration consiste à mesurer les pertes de signal en reliant les duplexeurs (émission/réception) directement au générateur d'onde à travers deux câbles de connexion de 3 mètres (sans passer par une paire d'antennes). Ces pertes dues aux câbles et duplexeurs sont prises en compte automatiquement pour la correction des mesures faites par le VNA.

La Figure II.14 présente un schéma illustrant l'ensemble du système constitué par le radar *in situ* ainsi que les différentes connexions (câblage) au sein du dispositif.

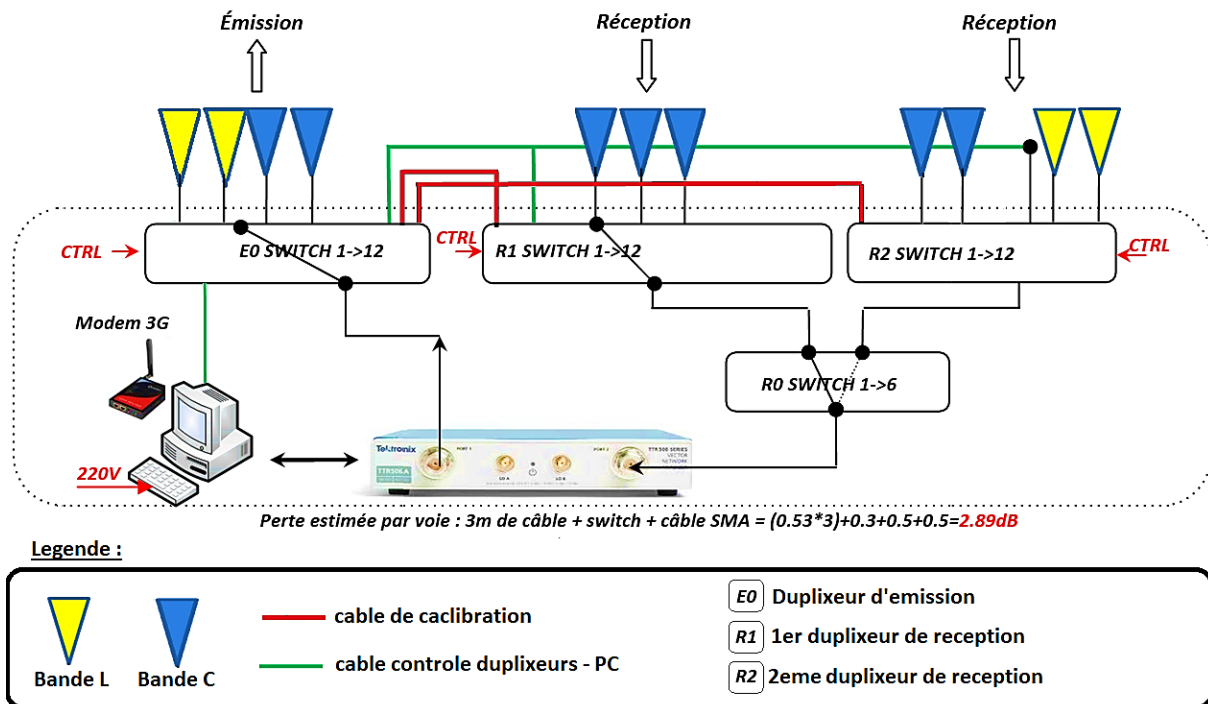


Figure II. 14 : Schéma illustratif de l'ensemble du système qui constitue le radar *in situ* ainsi que les différentes connexions (câblage) au sein du dispositif.

IV.2. Traitement et calibration des données radar *in situ*

IV.2.1 Description des acquisitions en bande C

Comme nous l'avons mentionné précédemment, une paire d'antennes forme un couple émission-réception connecté au VNA. Le système permet de réaliser des acquisitions dans le domaine fréquentiel de manière séquentielle. L'acquisition des mesures s'est déroulée sur une bande de fréquence allant de 5,2 à 5,8 GHz. Chaque réponse impulsionnelle $S(f)$ était composée de $N_f = 1601$ échantillon de mesures complexes (parties réelles et imaginaires) acquises à une fréquence d'échantillonnage $F_s = 1\text{kHz}$, avec un pas de fréquence $\delta f = \frac{B}{N_f-1} = 375\text{kHz}$, (correspondant à une ambiguïté distance $\Delta r = \frac{c}{2\delta f} = 400\text{m}$), correspondant à la durée totale d'une acquisition $T = \frac{N_f}{F_s} = 1.6\text{s}$. Pour chaque acquisition, une transformation de Fourier inverse a été réalisée sur $N_s = 2^{11} = 8192$ points permettant d'obtenir le signal radar rétrodiffusé dans le domaine temporel, avec une taille de pixel en distance $\delta p_r = \frac{\Delta r}{N_s} \approx 5\text{cm}$.

Nous nous sommes limités à une zone d'acquisition qui couvre les 4 rangées d'oliviers se situant dans une plage de distances oblique par rapport au radar, allant de $r_{min} = 25$ à $r_{max} = 40$ mètres (Figure II.15). Ces distances correspondent à des angles d'incidence compris entre $\theta_{min} \approx 40^\circ$ et $\theta_{max} \approx 60^\circ$ induisant, en géométrie sol, une taille de pixel $\delta p_g = \frac{\delta p_r}{\sin \theta}$ entre 5,6 à 7,6 cm, et une résolution spatiale $\delta r_g = \frac{\delta p_r}{\sin \theta}$ entre 50 à 70 cm. L'application d'une fenêtre de Hamming lors de la transformée de Fourier inverse, induit une résolution spatiale finale de $\delta r_r \approx 45\text{cm}$ en géométrie radar, et donc une résolution au sol $\delta r_g = \frac{\delta r_r}{\sin \theta}$ comprise 50 et 70 cm.

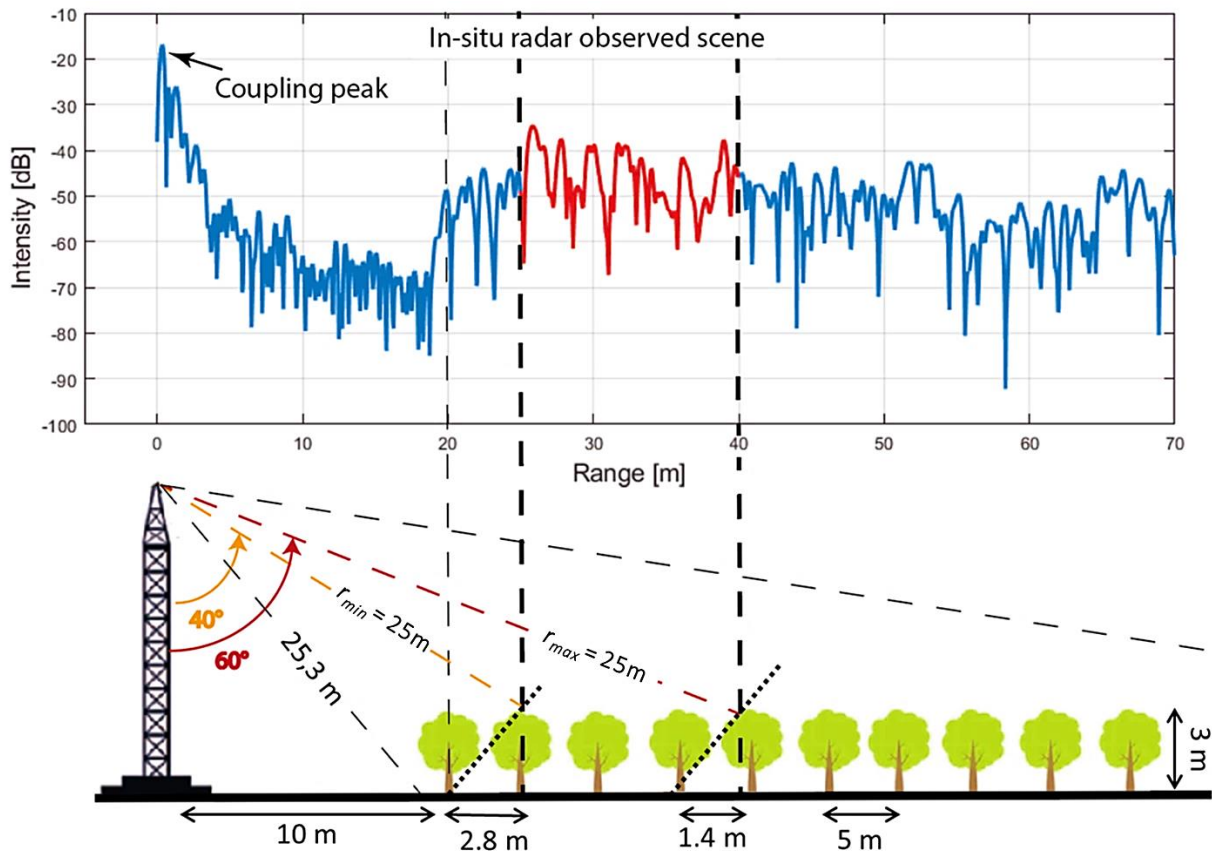


Figure II. 15 : Magnitude au carré d'une réponse radar rétrodiffusée en fonction du profil de portée, avec une illustration de la relation entre l'onde radar *in situ* et une tranche bidimensionnelle de la scène observée. La région avec la dynamique en rouge montre la plage de 25-40 m sur laquelle la réponse radar a été analysée sur les oliviers.

Pour chaque paire d'antennes donnée, trois acquisitions successives (séquence A, B et C) ont été réalisées afin d'augmenter la précision des résultats. Cette opération a été réalisée en un peu plus d'une minute. Les cycles d'acquisition complets (3 séquences pour 10 couples d'antennes émission-réception) sont réalisés à intervalles de 15 minutes.

Dans la direction azimutale, l'ouverture à 3 dB du lobe d'antenne étant de $\beta_{3dB} = 55^\circ$, l'empreinte au sol $\delta r_{az} = r \cdot \beta_{3dB}$ varie entre 24 et 38 m pour la plage $r_{min} - r_{max}$ (Figure II.15).

IV.2.2 Calibration relative (amplitude et phase)

Afin de compenser les fluctuations temporelles indésirables, il est impératif de disposer d'une référence stable dans le temps. Dans notre cas, nous avons observé, que pour chaque couple d'antenne, une forte réponse proche de la tour correspondant à l'interaction de l'onde avec la structure fixes hébergeant le système d'acquisition, appelé « premier lobe », (Figure II.16 a).

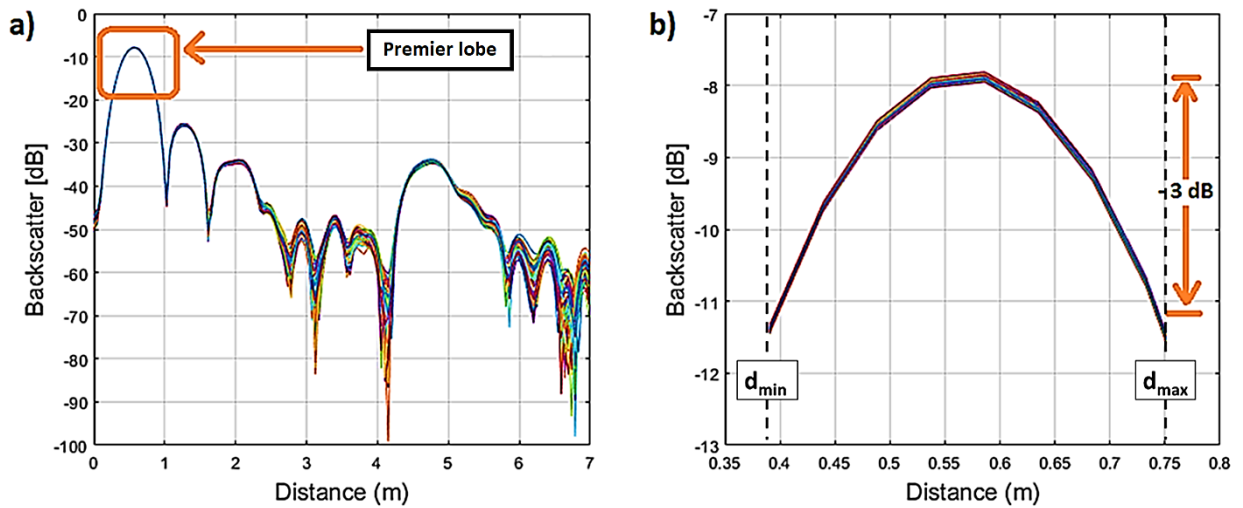


Figure II. 16 : Intensité des impulsions acquises le 1er Avril 2020 par le couple d'antennes R2-T1 (polarisation VV). a) réponse sur les 7 premières mètres, b) zoom sur la réponse du lobe principale de la tour. On distingue le pic du couplage à une distance d'environ 55 cm de l'antenne

Théoriquement, on s'attendrait à ce que la réponse du premier lobe demeure constante au fil du temps. Néanmoins, des fluctuations temporelles ont été observées, sur cette réponse, particulièrement lors de périodes de précipitations. En se fondant sur cette hypothèse de stabilité temporelle, et en utilisant une impulsion arbitrairement choisie (ici, l'impulsion de la séquence A du 1^{er} mai 2020) comme référence, nous avons effectué une calibration relative en phase et en amplitude pour l'ensemble des impulsions acquises pendant la période expérimentale (mars 2020 à décembre 2021) :

- **Normalisation en phase :** Pour ajuster la phase de chaque acquisition à celle de référence, nous avons déroulé les phases de chaque acquisition dans une plage de $-\pi$ à $+\pi$, ensuite les chutes de phase ont été corrigées sur chaque lobe principal, entre les distances d_{min} et d_{max} .

En conséquence, la phase de chaque acquisition est ajustée à sa phase de référence, ce qui permet d'obtenir des premiers lobes recalés en distance et de déterminer les valeurs de correction, redressement, de phase notée $Ph_{red}(i, j)$.

- **Normalisation en amplitude :** le recalage en amplitude a permis de normaliser toutes les impulsions de manière à ce que la réponse du premier lobe soit identique à celle de l'impulsion de référence. Le coefficient de normalisation $C_{i,j}(d) =$

$$\frac{\sum_{d_{min}}^{d_{max}} |S_{ref, i,j}(d)|^2}{\sum_{d_{min}}^{d_{max}} |s_{i,j}(d)|^2} C_{i,j}(d), \text{ où } S_{ref, i,j}(d) \text{ désigne l'impulsion de référence, } C_{i,j}(d) \text{ est}$$

l'impulsion traitée sur le premier lobe correspondant aux distances comprise entre d_{min} et d_{max} , Figure II.16.

L'estimation et l'application des coefficients de $Ph_{red}(i,j)$ et $C_{i,j}(d)$ à chacune des impulsions a permis de fournir un jeu de données calibrées de manière relative :

$$S_{Norm\ i,j}(d) = s_{i,j}(d) \sqrt{C_{(i,j)}(d)} * \exp(-j * Ph_{red}(i,j)) \quad (II. 17)$$

Tel que $S_{Norm\ i,j}(d)$ représente la réponse impulsionnelle normalisée, « i » et « j », représentant l'antenne d'émission et de réception.

Il est important de noter que lors des étapes de normalisation et d'analyse des données, nous avons exclu les acquisitions des deux couples d'antennes R3_T1 et R4_T1 (polarisation HV) et R1_T2 (polarisation VH) en raison de la non stabilité temporelle de leurs premiers lobes, rendant leurs normalisations impossibles, Figure II.17. Au final, nous avons exploité les impulsions acquises par sept paires d'antennes : trois en polarisation VV (R1_T1, R2_T1 et R5_T1), deux en polarisation HH (R3_T2 et R4_T2) et deux en polarisation VH (R2_T2 et R5_T2).

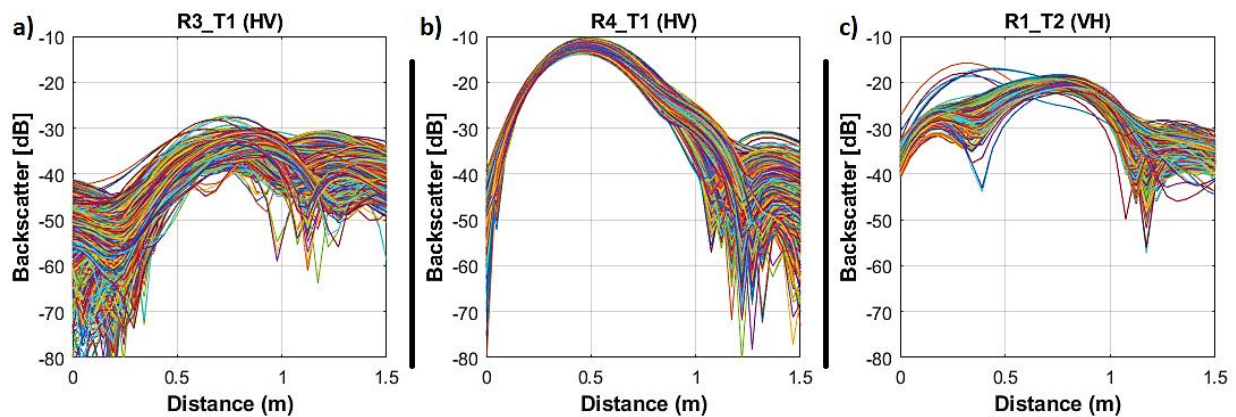


Figure II. 17: Tracé du premier lobe d'intensité pour des impulsions exclues, pour les couples d'antennes : R3-T1 (polarisation HV), b) R4-T1 (polarisation HV), c) R1-T2 (polarisation VH). Les impulsions tracées correspondent aux données acquises à 13h00 (séquences A, B, et C) de chaque jour du 1er mars 2020 au 31 décembre 2021, sur une distance de 0 à 1,5 mètres.

IV.2.3 Calcul du coefficient de rétrodiffusion et de la cohérence interférométrique

Une fois que les acquisitions ont été normalisées en phase et en amplitude, la cohérence interférométrique γ ainsi que les intensités I (directement proportionnelle au coefficient radar de rétrodiffusion σ^0), pour les trois polarisations (VV, VH et HH) ont été calculés selon les deux formules suivantes :

$$I_{pq}^0 = 10 * \log_{10} \left(\sum_{k=1}^K \sum_{seq}^{\{A,B,C\}} \sum_{d_{min}}^{d_{max}} |S_{seq,t1}^k(d)|^2 \right) \quad (II. 18)$$

$$\gamma_{pq} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{seq}^{\{A,B,C\}} \sum_{d_{min}}^{d_{max}} S_{seq,t1}^k(d) \cdot S_{seq,t2}^k(d)^*}{\sqrt{\sum_{k=1}^K \sum_{seq}^{\{A,B,C\}} \sum_{d_{min}}^{d_{max}} |S_{seq,t1}^k(d)|^2 \sum_{k=1}^K \sum_{seq}^{\{A,B,C\}} \sum_{d_{min}}^{d_{max}} |S_{seq,t2}^k(d)|^2}} \quad (II. 19)$$

Où, $S_{seq,t1}^k$ and $S_{seq,t2}^k$ représentent les réponses complexes normalisées entre deux observations successives « t_1 » et « t_2 », espacées de 15 minutes, avec $d_{min} = 25 m$ et $d_{max} = 40 m$. L'indice « k » désigne la paire d'antennes considérée, tandis que « seq » désigne la séquence d'acquisition (A, B et C).

Le coefficient de rétrodiffusion, σ^0 , peut être estimé à l'aide des intensités I , qui représentent respectivement les puissances reçues et émises par les antennes à travers le VNA, en utilisant l'équation radar (I.15 et I.16), avec une calibration en absolu. Cependant, étant donné que la calibration absolue n'a pas encore été réalisée, nous considérons, dans cette étude, ces intensités I (proportionnelle aux σ^0) comme des coefficients radar de rétrodiffusions, σ^0 , calibré uniquement en relatif.

IV.2.4 Influence des polarisations sur la cohérence

Afin de mieux comprendre l'impact saisonnier et météorologique sur les variations temporelles de cohérence chez les oliviers, la cohérence (γ) a été calculée sur les trois polarisations séparées (VV, VH et HH) ainsi qu'en mélangeant les trois polarisations (γ_{All}). La Figure II.18 illustre les corrélations calculées entre les cohérences en polarisations VV, VH, HH ainsi que lorsque les 3 polarisations sont combinées (notée All). Ces corrélations ont été calculées en pas de temps de 15 minutes sur la période d'étude (du 1er mars 2020 au 31 décembre 2021) avec la densité des points.

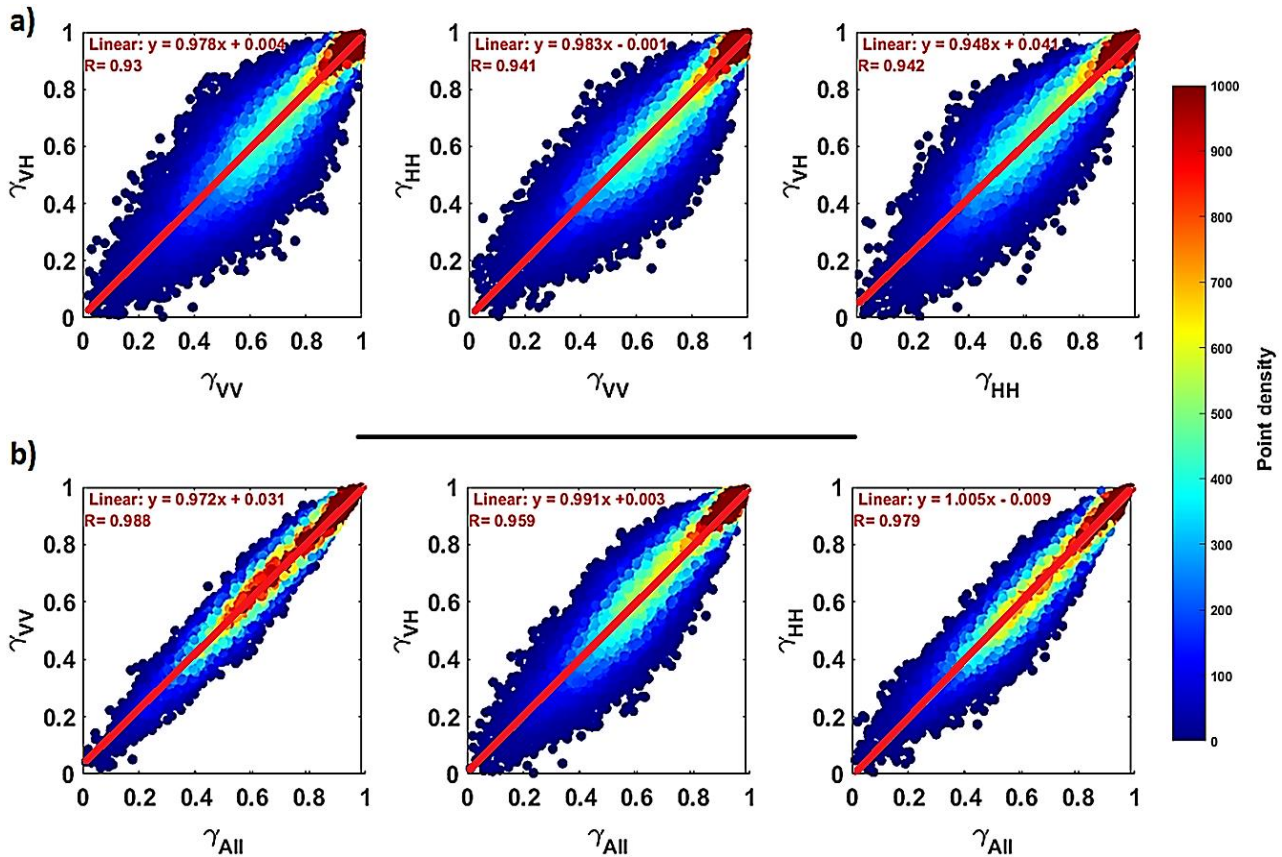


Figure II. 18 : Illustre les corrélations calculées entre : a) les cohérences en polarisations VV, VH, HH, b) les cohérences en polarisations VV, VH, HH et la cohérence calculée en mélangeant toutes les polarisations. Toutes les cohérences sont calculées à des intervalles de 15 minutes sur la période d'étude allant du 1er mars 2020 au 31 décembre 2021, avec la densité de points.

Les coefficients de corrélation (R) entre les cohérences en polarisations VV, VH et HH étaient élevés ($\geq 0,93$). De plus, la cohérence calculée en mélangeant les trois polarisations était encore plus corrélée aux trois cohérences individuelles (Figure. II.18 b).

En conséquence, seule la cohérence calculée en mélangeant les trois polarisations, γ_{All} , a été prise en compte notée γ , et appelée dans la suite de ce manuscrit « cohérence ». Cela nous permet d'obtenir une meilleure estimation de la cohérence (plus d'échantillons et donc réduction du bruit).

En revanche, il convient de noter des effets de diaphonie sur les acquisitions *in situ*, lesquels n'ont pas pu être entièrement éliminés. À titre d'exemple, nous avons examiné, sur la période s'étalant du 1er mars 2020 au 31 décembre 2021, la cohérence entre quatre paires de configurations d'antennes : (R1_T1 / R2_T2) entre polarisations VV et VH, (R2_T2 / R3_T2) entre polarisations VH et HH, ainsi que deux paires antennes (R1_T1 / R3_T2 et R5_T1 / R4_T2) entre polarisations VV et HH. Les résultats issus sont présentés dans la Figure II.19, ci-dessous,

avec le tracé en rouge les moyennes mobiles glissantes, pondérée gaussienne, sur deux jours pour chaque paire d'antennes.

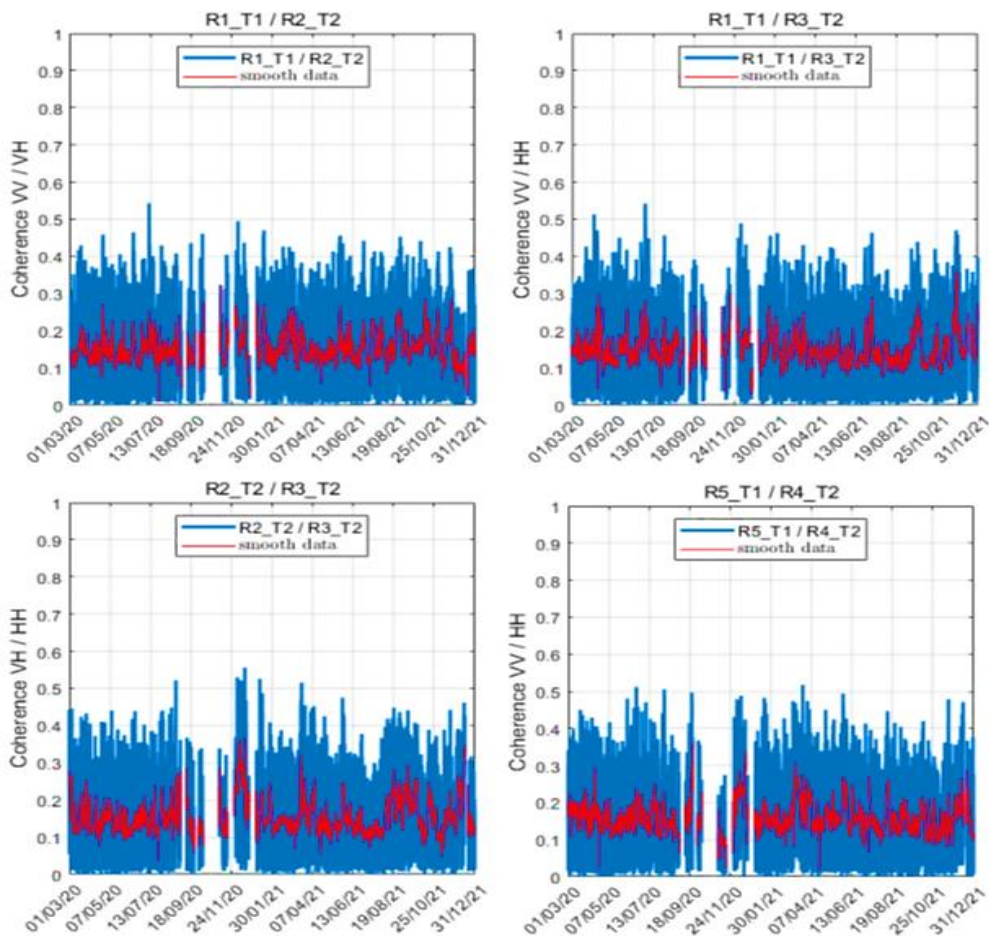


Figure II. 19 : La cohérence calculée entre les quatre paires de configurations d'antennes : ($R1_T1 / R2_T2$) entre polarisations VV et VH, ($R2_T2 / R3_T2$) entre polarisations VH et HH, ainsi que deux paires antennes ($R1_T1 / R3_T2$ et $R5_T1 / R4_T2$) entre polarisations VV et HH sur la période du 1er mars 2020 au 31 décembre 2021. Les courbes en rouges dans les tracés correspondent à la tendance des cohérences utilisant une moyenne mobile pondérée gaussienne sur deux jours.

Bien que la cohérence entre chaque paire d'antennes, Figure II.19, puisse dépasser 0.4, il est observé, qu'en moyenne, elle oscille autour de 0.14 (Figure II.19, courbes rouges). Les valeurs médianes et les écarts-types de la cohérence entre les configurations différentes d'antennes sur l'ensemble de la période étudiée présentent significatifs avec des variations minimales. À titre d'aperçu global, le Tableau III.3 ci-dessous récapitule les valeurs maximales, médianes, minimales ainsi que les écarts-types de cohérence calculés entre les paires d'antennes sur la période allant du 1er mars 2020 au 31 décembre 2021.

Tableau II. 3 : Les valeurs médianes, d'écart-type et maximales de la cohérence, entre quatre paires de configurations d'antennes : (R1_T1 / R2_T2) entre polarisations VV et VH, (R2_T2 / R3_T2) entre polarisations VH et HH, ainsi que deux paires d'antennes (R1_T1 / R3_T2 et R5_T1 / R4_T2) entre polarisations VV et HH sur la période du 1er mars 2020 au 31 décembre 2021.

Polarisations	Paires antennes	Maximum	Médiane	Minimum	Ecart-type
VV / VH	R1_T1 / R2_T2	0,5433	0,1450	0,0005	0,0789
VH / HH	R2_T2 / R3_T2	0,5558	0,1434	0,0007	0,0836
VV / HH	R1_T1 / R3_T2	0,5420	0,1387	0,0007	0,0793
VV / HH	R5_T1 / R4_T2	0,5177	0,1493	0,0009	0,0815

IV.3. Données Sentinel-1

Dans ce travail, nous avons utilisé les données issues des capteurs radar à synthèse d'ouverture (RSO, en anglais SAR, pour Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1 afin de les comparer aux acquisitions radar *in situ*.

Sentinel-1 est une mission de l'Agence spatiale européenne (ESA), développée dans le cadre du programme européen Copernicus. Cette mission utilise des micro-ondes radar en bande C, avec une fréquence de 5.4 GHz, pour observer la Terre. Elle est constituée de deux satellites identiques, Sentinel-1A et Sentinel-1B, qui sont placés en orbite héliosynchrone, respectivement depuis avril 2014 et avril 2016, à une altitude d'environ 700 km. Chacun des 2 satellites permet une couverture quasi-globale avec un déphasage de 180 degrés ce qui permet en les combinant de réduire la période de revisite (ESA, 2012).

Cette configuration a permis une couverture globale de la surface terrestre tous les 6 jours, principalement, en Europe et au nord de l'Afrique, et de 12 jours dans le reste du monde (ESA, 2020), grâce à ses 175 orbites, avec une continuité des mesures garantie jusqu'en 2030 (Schwerdt et al., 2016; R. Torres et al., 2012; Veloso et al., 2017). La mission Sentinel-1 offre une surveillance régulière et continue des régions d'intérêt, ce qui en fait un outil précieux pour de nombreuses applications telles que : la surveillance des océans, la gestion des catastrophes, le suivi de l'agriculture ou des zones forestières, et bien d'autres. Son mode d'acquisition principal sur les surfaces terrestres est le mode Wide-swath (IW) qui permet des acquisitions simultanées en polarisations VV et VH. Les images obtenues ont un fauchée de 250 km (se composant en

trois sous-fauchées), correspondant à une plage d'angles d'incidence allant de 31° à 46°, (Balzter et al., 2015; Vachon et al., 2012).

Les produits SAR de Sentinel-1 sont disponibles librement sur le site Web Sentinel-1 Data Hub (Copernicus Data Space Ecosystem). Seuls les produits Single Look Complex (SLC) et Ground Range Detected (GRD) de niveau 1 ont été traités dans cette étude, avec pour caractéristiques :

- SLC : Images dont chaque pixel est un nombre complexe permettant de calculer l'amplitude et phase, caractérisées par une résolution spatiale de 5 m en distance et 20 m en azimut en géométrie radar.
- GRD : Données contenant les intensités de chaque pixel, d'une taille de 10 x 10 m², associés à une résolution spatiale d'environ 20 m x 20 m.

Pour notre étude, nous avons utilisé des produits GRD (pour l'estimation de σ^0) et SLC (pour l'estimation de γ) provenant de 2 orbites différentes (52 et 118) sur une période allant de Mars 2019 à décembre 2021. Le Tableau II.4 ci-dessous illustre les caractéristiques des 3 orbites utilisés, dans le cadre de cette thèse, tel que les angles d'incidence, les heures de passage ainsi que le nombres des images utilisés.

Tableau II. 4 : Caractéristiques des produits Sentinel-1 traités pour la parcelle d'olivier utilisées dans le cadre de cette thèse.

Numéro d'orbite relatif	Angle d'incidence	Orbite relative	Heure d'acquisition	Nombre d'images
52	35.2°	Descendant	06:30	168
118	45.6°	Ascendant	18:30	168

Les coefficients de rétrodiffusion et la cohérence interférométrique, ont été estimés à partir de Orfeo Toolbox (OTB) et SNAP. Les bibliothèques de logiciels OTB et SNAP sont « open sources » pour le traitement des images des satellites (McInerney & Kempeneers, 2015), et sont téléchargeables depuis (<https://www.orfeo-toolbox.org/packages/> ; <https://step.esa.int/main/download/>).

IV.3.1 Coefficient de rétrodiffusion

Le coefficient de rétrodiffusion σ^0 a été extrait à partir des pixels des produits GRD à l'aide des bibliothèques du logiciel OTB, sous QGIS, développé par Frison & Lardeux (2018), permettant

le traitement par lot de toutes les acquisitions de la même orbite relative sur un site donné (<https://gitlab.com/sentinel4all>). Ces traitements comportent les étapes suivantes :

Suppression du bruit thermique : La première étape du traitement des images Sentinel-1 consiste à corriger le signal rétrodiffusé des perturbations du bruit, particulièrement présentes en polarisation croisée (Park et al., 2018). Cette correction réduit les effets du bruit entre les sous-faisceaux des acquisitions, et normalise également le signal rétrodiffusé sur l'ensemble de l'emprise de la scène, minimisant les discontinuités dans le signal dans les modes d'acquisitions IW (Kumar, 2021; Marzuki et al., 2021).

Étalonnage : Après la suppression du bruit, les pixels des images GRD sont calibrés afin de convertir leurs comptes numériques en coefficient de rétrodiffusion σ^0 , variable interprétable sur le plan physique. Les produits GRD comprennent un vecteur de calibration contenant les informations nécessaires pour effectuer cette conversion.

Projection géographique : Les données GRD étant en géométrie image, leur projection géographique est nécessaire. Celle-ci se fait par corrélation entre l'image Sentinel-1 et celle simulée à partir d'un MNT (en général dérivé de la mission SRTM, Shuttle Radar Topographic Mission) pour un capteur à la même position que celle de l'acquisition Sentinel-1. Ceci permet de corriger les distorsions géométriques (contraction des pentes faces au radar, étirement de celles dos au radar) et intégrer les images dans des systèmes d'Information Géographiques (SIG) tels que QGIS.

IV.3.2 Cohérence interférométrique

La cohérence interférométrique γ a été obtenue, à partir des produits SLC, à partir de deux acquisitions consécutives sur la même orbite relative. Cela permet d'obtenir l'amplitude de la corrélation complexe, qui décrit la stabilité temporelle du signal acquis, tant du point de vue géométrique qu'électromagnétique (Strozzi et al., 2000).

Pour réaliser le calcul de la cohérence interférométrique à partir des produits SLC, une automatisation des étapes de traitement a été faite en utilisant l'outil « GPT » (Graph Processing Tool) du logiciel SNAP, conformément aux recommandations de l'ESA (European Space Agency) (Veci, 2015). Cette automatisation nous a permis d'optimiser les temps de traitement et d'exécuter les différentes opérations en mode « Batch », c'est-à-dire sans utiliser d'interface graphique. Ainsi, nous avons pu obtenir efficacement les résultats souhaités pour nos analyses.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni une description approfondie du contexte climatique et géographique de la région où se situe la parcelle d'oliviers étudiée. Nous avons, également, présenté en détail les différentes mesures météorologiques et physiologiques réalisées, ainsi que les différentes méthodes et approches de traitement appliqué à ces données. De plus, nous avons exposé en détail l'expérience radar *in situ* installée sur la tour de 20 mètres menée sur ce vergé d'oliviers, abordant à la fois les aspects techniques des différents composants et leur mode de fonctionnement. Nous avons pareillement détaillé les différentes approches de traitement de ces données radar *in situ* et les processus de calibration appliqués. Nous avons aussi présenté les différents modes d'acquisition et de traitement des données radars satellitaires de Sentinel-1 qui ont été utilisés dans cette étude.

Les deux chapitres suivants seront consacrés à la présentation des résultats issus de l'ensemble de ces mesures et acquisitions. Ces résultats permettent d'approfondir notre compréhension sur les réponses radar aux changements de l'état hydrique des oliviers, offrant ainsi des perspectives enrichissantes pour l'interprétation des phénomènes observés.

Chapitre III : Evaluation de la croissance et du déficit hydrique chez les oliviers

I. Introduction

Les régions arides et semi-arides se caractérisent par des ressources en eau limitées. De ce fait, il est essentiel d'employer des méthodes d'irrigations précises, basées sur l'évaluation de l'état hydrique des plantes et de leurs besoins en eau à travers divers indicateurs de stress hydrique. La connaissance complète de ces indicateurs et de leur évolution dans le temps, tels que la teneur en eau, le débit de la sève et les variations de diamètre des troncs d'arbres, parmi d'autres, revêt une importance cruciale dans la mesure de l'hydratation des plantes. Par exemple, le flux de sève et la transpiration sont des marqueurs déterminants qui reflètent l'état hydrique des arbres, jouant un rôle essentiel dans la détection du stress hydrique chez les plantes (Báreková et al., 2020). Des études antérieures ont établi une corrélation étroite entre le flux de sève, circulant dans le xylème des arbres, et les taux de transpiration (Čermák et al., 2007). De plus, dans des conditions hydriques non limitantes du sol, la transpiration des arbres peut être assimilée au flux de sève (Cienciala et al., 2000; Tognetti et al., 2004).

Par ailleurs, d'autres recherches ont combiné ces mesures de flux de sève avec d'autres indicateurs de stress hydrique, tels que l'état hydrique du sol ou le rapport du débit de sève entre les parties internes et externes du xylème, pour déterminer, de façon optimale, les pratiques d'irrigation (Fernández, 2017). Ces approches ont été appliquées avec succès sur des cultures telles que : les pommiers, les vignes et les citronniers (Escalona et al., 2002; Nadezhdina, 1999; Ortuño et al., 2006). De plus, il a été démontré que le flux de sève et la disponibilité en eau dans le sol sont étroitement liés aux variations du diamètre du tronc des arbres (De Schepper et al., 2012; Ehrenberger et al., 2012; Pfautsch et al., 2015; Zweifel et al., 2014), car ces variations du diamètre sont corrélées au potentiel hydrique du cambium, et par conséquent, à l'état hydrique des arbres (Downes et al., 2009; Drew et al., 2010, 2011; Drew & Downes, 2009).

Ces mécanismes sous-jacents, complexes, opérant au niveau des arbres, peuvent être mieux appréhendés à des échelles diurnes : En effet, au cours de la journée, c'est la pression générée par la transpiration dans le xylème, créant ainsi un potentiel hydrique négatif, qui agit comme moteur dans le déplacement ascendant de l'eau à travers l'arbre, entraînant la déshydratation des tissus vivants (Dixon & Joly, 1895; Zweifel et al., 2001). Autrement dit, durant les heures ensoleillées, la transpiration engendre une diminution significative des potentiels hydriques, provoquant la perte d'eau dans les tissus élastiques tels que l'écorce et le cambium (Lockhart, 1965; Rossi et al., 2008). Cette perte est directement proportionnelle à la contraction ou à la réduction du diamètre du tronc (Drew et al., 2011; Zweifel et al., 2000, 2005). En revanche, le réapprovisionnement en

eau au sein des réserves internes de l'arbre, ou bien le rétablissement de l'état hydrique des arbres, s'effectue généralement pendant la nuit (Perämäki et al., 2001).

Dans ce contexte, le présent chapitre se basera sur l'analyse des mesures dendrométriques, de flux de sève et des mesures météorologiques. L'objectif est de mieux appréhender l'état hydrique des oliviers étudiés, tant pendant les périodes de croissance que lors de phases de déficit hydrique. Ceci afin de mieux comprendre leur impact sur la réponse radar, qui sera analysée dans le chapitre IV, et de comprendre les disparités observées sur cohérence interférométrique et le coefficient de rétrodiffusion entre les deux années étudiées (2020 et 2021). Notons que les mesures radar *in situ* et Sentinel-1 ne seront pas discutées ici, car elles font l'objet du Chapitre IV.

Les approches d'analyse, dans ce chapitre, impliquera une séparation quantitative des mesures dendrométriques ainsi qu'une analyse des effets des facteurs climatiques sur ces mesures. En outre, une attention particulière sera portée sur l'étude des variations diurnes, à des échelles mensuelles, des mesures dendrométriques et ceux de flux de sève afin de mieux appréhender les relations complexes entre ces indicateurs.

II. Approche quantitative de distinction de la croissance et du déficit hydrique des oliviers : comportement a long terme

Les troncs des arbres subissent, à des échelles diurnes, un rétrécissement lié à la perte d'eau par transpiration et un gonflement qui pourra être soit réversible en raison de l'absorption d'eau par les racines, ou irréversible lorsqu'induite par la croissance de l'arbre (Aryal et al., 2020; Van der Maaten et al., 2016).

De ce fait, nous avons estimé, sur toute la période s'étendant d'avril 2020 à décembre 2022, le déficit hydrique chez les arbres (*TWD* : Tree Water Deficit) (Drew et al., 2011; Zweifel et al., 2000, 2005), ainsi que les expansions irréversibles du tronc induite par la croissance (*GRO* : Growth) (Giovannelli et al., 2021), issus des mesures dendrométriques ΔR à travers l'approche de croissance linéaire LG. Ces résultats sont montrés Figure IV.1 (l'approche LG sur la Figure III.1 est à titre illustratif et ne sera pas analysée : Voir Section III.4 Chapitre II).

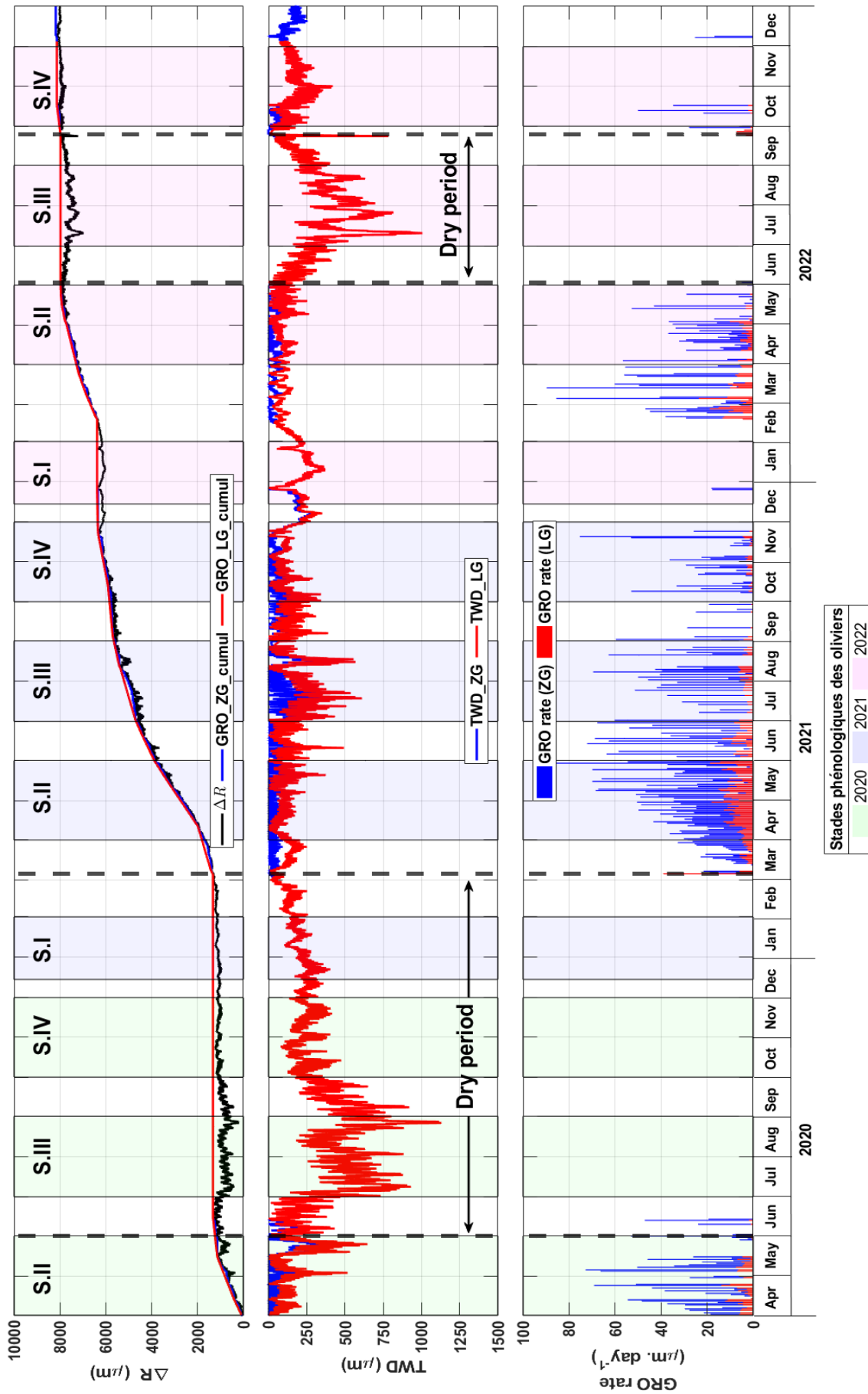


Figure III. 1 : (a) : Mesures dendrométriques ΔR avec les courbes de croissance GRO cumulées pour les deux approches LG et ZG, (b) : Déficit hydrique de l'arbre LG et ZG, (c) : les taux de croissance journaliers (GRO rate) pour LG et ZG. Les arrière-plans verts, bleus et magentas correspondent aux stade phénologiques des oliviers, respectivement, pour 2020, 2021 et 2022 avec : S.I est le stade de repos de végétal. S.II est le stade de floraison. S.III est le stade du durcissement du noyau. S.IV est le stade de la maturation des fruits

Pour l'ensemble de la période (2020-2022), on peut noter que les mesures dendrométriques ΔR suivent une tendance en forme de courbe « S », laquelle présente des variations d'une année à l'autre. En général, cette tendance débute par une phase de croissance au début de chaque saison, après le stade de repos végétatif (S.I Figure III.1), vers la fin février, pour atteindre un plateau en fin de saison, après le stade maturation des olives (S.IV Figure III.1), aux environs du début du mois de décembre. Ensuite, elle recommence au début de la saison suivante, comme illustré dans la Figure III.1, a). La croissance annuelle, mesurée entre le début et la fin de la saison, apparaît plus marquée en 2021 (6.34mm - 1.32mm = 5.02 mm) qu'en 2022 (6.38mm - 1.32mm = 5.06 mm).

En 2021, la variation annuelle de ΔR se caractérise par une croissance rapide au printemps, suivie d'une augmentation progressive en été, d'un plateau fluctuant en automne et d'une légère diminution en d'hiver. En revanche, pour l'année 2022, cette évolution annuelle de ΔR présente une croissance rapide au printemps, une baisse en été, suivie d'une légère diminution en automne et d'une stabilité en hiver de ΔR . Les données de l'années 2020 ne sont pas discutées du fait que la saison de croissance n'est pas entièrement mesurée, puisque les dendromètres ont été installés en avril 2020, (Section II.4 Chapitre II).

II.1. Déficit hydrique des oliviers

Les données mettent en évidence plusieurs phases prolongées de déficit hydrique, identifiables à travers les valeurs de *TWD*, indiquant des périodes de déficit hydrique persistant sur plusieurs jours, et qui varient en fonction de l'approche utilisée (LG et ZG). Parmi celles-ci, deux périodes se démarquent de manière particulièrement s'étalant sur plusieurs mois, Figure III.1, b) : la première, s'étalant sur 9 mois de fin mars 2020 à début mars 2021, a atteint un pic de *TWD* d'environ 1125 μm . La seconde a eu lieu de juin à fin septembre 2022, avec un maximum de *TWD* d'environ 1000 μm . Au cours de ces deux périodes, les arbres ont maintenu un niveau de *TWD* élevé, au-delà de 24 heures consécutives, critère définissant la période de sécheresse en fonction du *TWD* (Zweifel et al., 2016). Cela signifie que les arbres n'ont pas pu rétablir leur état hydrique durant la nuit, au cours de ces deux périodes, en raison d'une déshydratation partielle des tissus, étant donné que la pression de l'eau à l'intérieur des arbres (associée à de fortes valeurs de *TWD*) ne revient pas à zéro d'un jour à l'autre (Martínez-Sancho et al., 2022).

II.2. Croissance des oliviers

En ce qui concerne la croissance, les données mettent en évidence une notable disparité entre les saisons 2021 et 2022, indépendamment de l'approche adoptée (LG et ZG), avec une période de croissance rapide durant le stade phénologique de la floraison (S.II) de chaque année, Figure III.1, c) :

En 2021, les phases actives de croissance s'étendent de mars à novembre, avec des périodes d'arrêt plus ou moins marquées, se traduisant par la présence du *TWD*. La croissance annuelle totale s'élevait à environ 5056 μm , se concentrant principalement lors du stade phénologique de la floraison (S.II), avec une valeur maximale quotidienne enregistrée de l'ordre de 92 $\mu\text{m}/\text{jour}$ le 30 mai 2021, Figure III.1, c). De plus, Ce stade représente respectivement plus de 43% de la croissance annuelle totale en 2021

En revanche, pour l'année 2022, la croissance était moins marquée par rapport à celle de 2021, totalisant environ 1700 μm , et se concentrait principalement sur la période de mi-février à fin mai, avec plus de 38% de la croissance annuelle totale enregistrée durant le stade phénologique de la floraison cette année-là.

III. Analyse des profils saisonniers :

La Figure III.2, ci-dessous, illustre les profils temporels dendrométriques pour les années 2020, 2021 et 2022, en prenant le 1er janvier comme point de référence annuel.

Pour chaque année, les saisons de croissance, mises en évidence par des arrière-plans vert sur la Figure III.2, ont été définies en fonction de l'accumulation de croissance comprise entre 10% et 90% de la croissance annuelle (Oberhuber et al., 2014). En 2021, elles s'étendent du 29 mars (jour julien 88) au 10 octobre (jour julien 283), englobant les stades phénologiques de la floraison (S.II), du durcissement du noyau (S.III), ainsi que quelques jours de maturation des fruits (S.IV). En ce qui concerne l'année 2022, la saison de croissance va du 19 février (jour julien 50) au 02 juin (jour julien 153), incluant uniquement le stade phénologique de la floraison (S.II) pour cette année, Figure III.2.

Dans le cadre de cette analyse, les taux moyens journaliers du déficit hydrique, *TWD*, ainsi que la croissance de l'arbre, *GRO*, ont été recalculés sur chacune de ces périodes, séparément, avec la suppression des tendances cumulées d'une année à l'autre, afin d'obtenir des mesures annuelles en absolues. Les arrière-plans gris, Figure III.2, illustrent les écarts-types journaliers

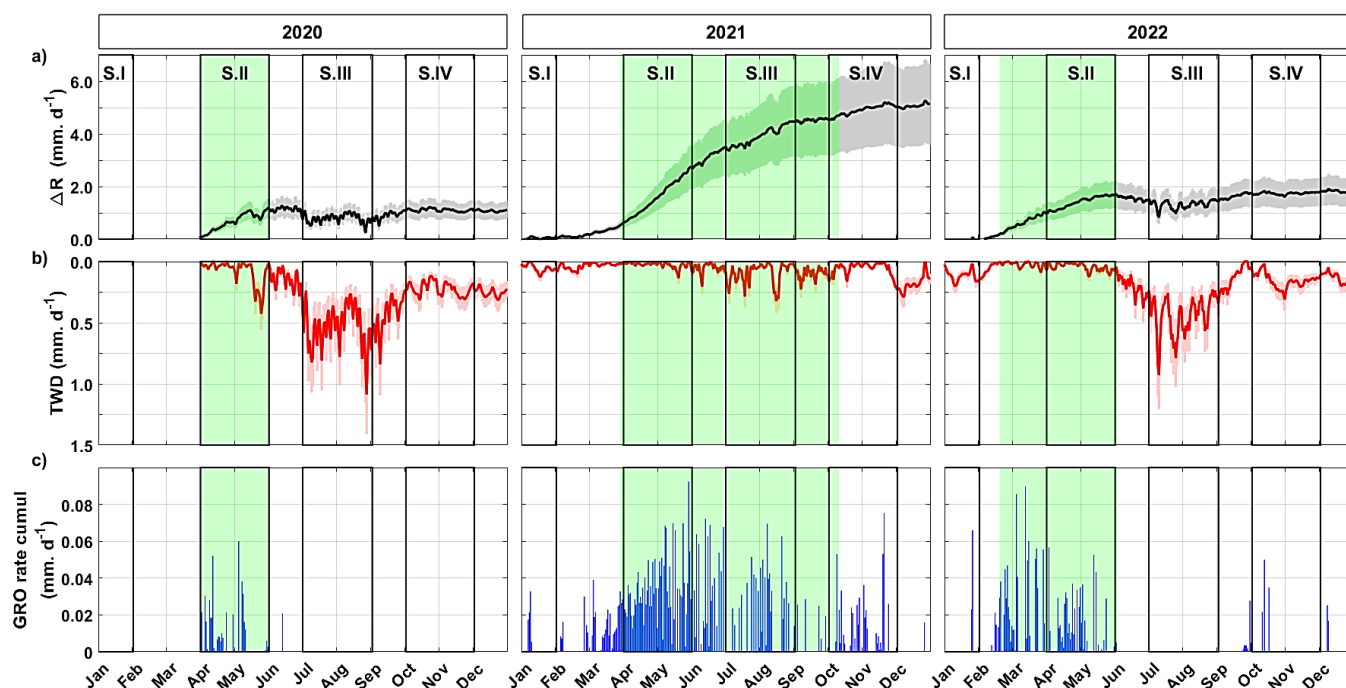


Figure III. 2 : a) : Les moyens journaliers des mesures ΔR pour chaque saison, avec la suppression des tendances annuelles cumulées d'une année à l'autre, en plus du début et de fin de chaque saison en arrière-plan vert et les écarts-types journaliers ΔR en arrière-plan gris. b) : les taux moyens journaliers du déficit hydrique de l'arbre TWD recalculés sur chacune de ces périodes, en utilisant l'approche de croissance nulle ZG . c) : les taux cumulés journalière de la croissance (GRO rate cumul) recalculés sur chacune de ces périodes, en utilisant l'approche de croissance nulle ZG . Avec : S.I est le stade de repos de végétal. S.II est le stade de floraison. S.III est le stade du durcissement du noyau. S.IV est le stade de la maturation des fruits

Nous constatons, là encore, la forte variation du rythme saisonnier de ΔR en 2021, se différenciant nettement des autres années prises en compte dans cette étude. Cette variation a débuté, au stade de floraison avec une valeur initiale de 0,53 mm au début de la période de croissance, pour ensuite augmenter de manière significative jusqu'à atteindre 4,7 mm à la fin de cette même période de croissance, arrière-plan vert sur la Figure III.2, qui s'est étendue sur une durée de 296 jours. On constate aussi que les fluctuations observées au cours de la saison de croissance en 2022, qui s'étend sur une période de 104 jours, sont restées dans une fourchette de variation allant de 0,18 mm à 1,7 mm entre le début et la fin de cette période. Cependant, la croissance enregistrée au cours de l'année 2022 est considérablement inférieure à celle de l'année de 2021, totalisant 2,67 fois celle de 2022. De plus, la saison de croissance en 2022 était principalement concentrée entre début février et début juin 2022, représentant plus de 80 % de la croissance totale observée.

En ce qui concerne les déficits hydriques, TWD , sur une base annuelle pour les arbres, l'année 2020 a enregistré les amplitudes les plus élevés, dépassant de 2,8 fois ceux observés en 2021, et surpassant de 1,3 fois ceux enregistrés en 2022, la Figure III.2 b).

Il convient de noter que les arbres ont maintenus des niveaux élevés de *TWD* dès le début de juin 2020 et ce jusqu'à la fin de décembre de la même année, ce qui qualifie cette période de sécheresse prolongée (Zweifel et al., 2016). Seules les deux journées du 10 et 13 juin 2020 ont connu une remontée très rapide de *GRO*, avec des valeurs respectivement de l'ordre de 0,02 et 0,06 mm par jour. Cette observation suggère qu'au cours de cette période, sauf pour les deux jours en question, les arbres n'ont pas réussi à rétablir leur statut hydrique pendant les nuits, et ce phénomène a duré pendant plus de 213 jours consécutifs. Cependant, l'année 2022 a manifesté un schéma globalement similaire à celui de 2020 avec une diminution de *TWD* dès début de juin. Par contre, les arbres ont réussi à rétablir leur niveau hydrique à partir du 25 septembre, soit après environ trois mois sans croissance. Cette observation pourrait nous conduire à émettre l'hypothèse que les deux années, 2020 et 2022, étaient influencées, à l'échelle intra-annuelle, par des facteurs climatiques presque identiques, ce qui pourra expliquer la similitude dans le comportement saisonnier de ΔR entre 2020 et 2022, avec une légère augmentation pendant l'été et l'automne de 2022 par rapport à 2020.

L'année 2021 a enregistré les niveaux les plus bas, de *TWD* et les plus élevés de *GRO*. Les valeurs de *TWD* n'ont atteint qu'un maximum d'environ 0,42 mm, contrairement à 2020 et 2022 où le maximum journalier était respectivement d'environ 1,41 mm, 1,2 mm. La période la plus longue pendant laquelle les arbres ont maintenu un niveau élevé de *TWD* en 2021 s'est étendue du 17 juin au 7 août, soit 38 jours seulement. Par conséquent, *GRO* montre des valeurs plus uniformément réparties sur toute 2021 que pour les autres années.

IV. Effets des facteurs climatiques sur le *GRO* et le *TWD* :

Les facteurs climatiques ont une influence importante de limitants majeurs sur les ΔR du tronc des arbres dans les régions semi-arides (Sánchez-Costa et al., 2015). A ce fait, Nous avons entrepris une analyse statistique, pour les années 2020, 2021 et 2022, des déficits hydriques *TWD*, et des croissances *GRO*, en relation avec divers facteurs climatiques, sur un intervalle de 30 minute. Ces facteurs et indices incluent : l'humidité de l'air, H_r , les précipitations, *Rain*, le déficit de pression de vapeur, *VPD*, la température de brillance des arbres, T_{tree} , *PRI*, l'indice de réflectance photochimique, *NDVI*, l'indice de végétation par différence normalisée, ainsi que les mesures de flux de sèves (*Sapflow*), noté *F_s*. Le *PRI* et *NDVI* proviennent des capteurs « SKR 1860 » installés sur la station Eddy-Covariance située dans la parcelle d'oliviers, (Section II.2 Chapitre II). Il est important de préciser que nous n'avons pas pu analyser l'impact des variations

du cycle diurne de l'humidité du sol, ni celui des irrigations, sur le GRO et le TWD, en raison de problèmes techniques liés aux mesures. Ces problèmes seront soulignés plus en détail dans la section II.1.5 du chapitre IV.

Cette analyse a été menée en calculant, par période mensuelle, les corrélations entre les *TWD*, les *GRO* et ces différents facteurs évoqués précédemment. Pour cela, Nous avons employé la méthode de calcul des corrélations de « Spearman » (Vieira et al., 2022). Les résultats sont présentés dans la Figure III.3 a) pour les *GRO* et Figure III.3 b) pour les *TWD*.

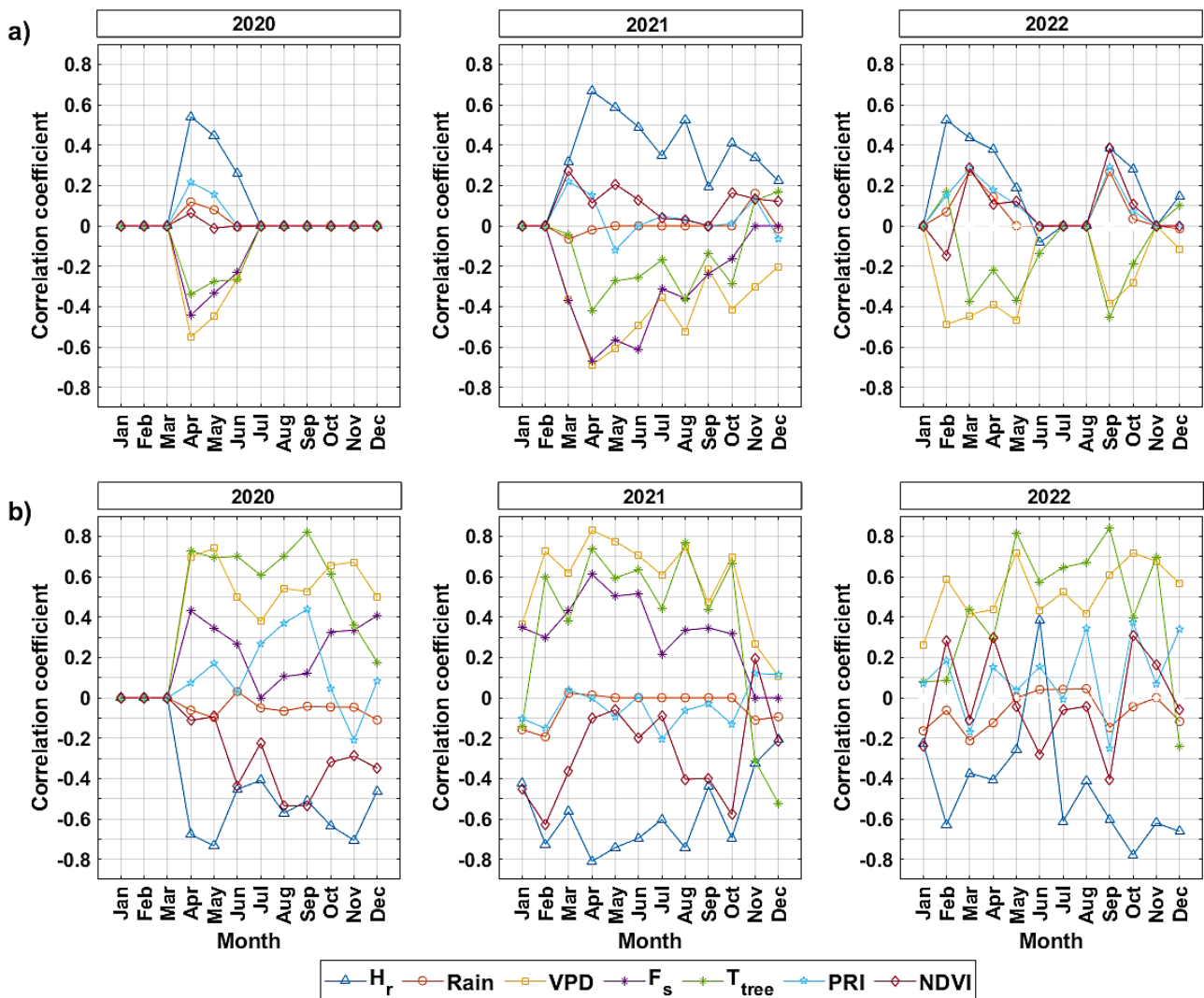


Figure III. 3 : a) Les corrélations calculées à une échelle mensuelle entre le taux de croissance mensuel des du tronc (*GRO*) et b) le déficit hydrique des arbres (*TWD*), du début de 2020 jusqu'à novembre 2021, et les facteurs et indices climatiques : Hr (l'humidité de l'air), Rain (les précipitations), VPD (le déficit de pression de vapeur), Fs (les mesures de flux de sèves), T_{tree} (la température de brillance des arbres), PRI (l'indice de réflectance photochimique) et le NDVI (l'indice de végétation par différence normalisé).

Les résultats obtenus, mettent en évidence des corrélations (R) positives entre la croissance et le H_r , avec des valeurs atteignant 0.67 pour avril 2022, 0.52 pour février 2022, et un pic remarquable de l'ordre de 0.79 enregistré en mai 2021, confirmant une tendance déjà observée dans plusieurs études antérieures portant sur différents types d'arbres (Fan et al., 2019; E. S. Kim et al., 2019; Meng et al., 2021; Tian et al., 2018; Tumajer et al., 2022; Xueyu. Wang & Zhang, 2023; Zweifel et al., 2021). Des relations similaires ont également été observées avec les précipitations, montrant des corrélations solides pendant les évènements pluvieux.

En revanche, des corrélations notables et inverses ont été aussi observées entre la croissance et le F_S , qui semble particulièrement marquant sur la croissance au printemps 2021, en les comparant avec les deux années 2020 et 2022, avec une croissance annuelle totale d'environ 5056 μm en 2021 par rapport à 1700 μm en 2022. Les coefficients de corrélations (R) observés ont été de l'ordre de -0.67 et -0.57 respectivement pour avril et mai 2021. Cette corrélation inverse entre les F_S et les GRO peut s'expliquer par le comportement inversement proportionnel diurne entre le F_S et la croissance (Section V Chapitre IV), ainsi que par la prédominance de la croissance des arbres pendant les heures nocturnes, lorsque les F_S atteignent leur niveau minimum. Par exemple, durant la période s'étendant sur avril et mai 2021, environ 88 % de la croissance s'est produite entre minuit et sept heures du matin tandis que les F_S ne représentent que 2 % du cumul diurne sur cette période. Suite à des soucis techniques sur les mesures de flux de sèves, pas de données sur 2022.

Malgré une corrélation généralement très faible entre les indices spectraux tels que le $NDVI$ ou le PRI et les paramètres dendrométriques (Razali et al., 2019), nous avons trouvé une tendance entre le $NDVI$, le PRI et les taux de croissance, de faible distribution, qui s'est principalement manifestée pendant les périodes printanières sur les trois années, avec une accentuation particulière en 2021 par rapport aux deux autres années étudiées.

En ce qui concerne le déficit hydrique, des corrélations significatives ont été observées entre le TWD , le VPD . Ce dernier semble être l'un des paramètres météorologiques les plus influents sur le TWD , comme l'illustrent les coefficients de corrélations (R) dans la Figure III.3 b). Sur les trois années étudiées (2020, 2021 et 2022), les tendances les plus prononcées ont été particulièrement observées pendant le stade de floraison. Les coefficients de corrélation (R) étaient respectivement de 0.74, 0.83 et 0.72 pour mai 2020, avril 2021 et avril 2022. Cela est fortement attribué à la forte demande en eau des oliviers ainsi qu'à l'augmentation, progressive, de la demande climatique sous des niveaux accrus de VPD (Grossiord et al., 2020; Morino et al., 2021). En d'autres termes, cela pourra conduire à une augmentation de la transpiration, ou bien à un mécanisme de contrôle

d'arrêt de la transpiration par la fermeture stomatique en réponse à la déshydratation des tissus (Benlloch-González et al., 2008; Tognetti et al., 2004) pour minimiser la perte d'eau au niveau des feuilles, limitant ainsi les activités photosynthétiques des arbres (Monteith, 1995). Ce phénomène se manifeste particulièrement lorsque les arbres sont soumis à un assèchement progressif du sol et ne peuvent pas remplir leurs tissus interne de stock en eau pendant la nuit et, par conséquent, un rétrécissement radial du tronc (Dietrich & Kahmen, 2019), ce qui a un impact les F_s (Zweifel et al., 2016), surtout lorsque la transpiration dépasse l'absorption d'eau disponible dans le sol (Biondi et al., 2005). Ce comportement a été observé, à titre d'exemple, pendant la période estivale sèche du 5 au 7 juillet 2020, période durant laquelle les valeurs maximales diurnes de VPD ont dépassé 5 KPa pour atteindre un maximum de 8.5 KPa le 7 juillet, avant de retrouver ces valeurs précédentes. En comparant les taux journaliers de F_s , 24 heures avant et après cette période, on constate une diminution d'environ 35% du F_s , ce qui nous amène à conclure que les arbres sont plus vulnérables aux fortes variations de VPD .

Des corrélations significatives sont également identifiées entre la température de brillance des arbres (T_{tree}) et le TWD , avec des corrélations (R) supérieures à 0.6 d'avril à octobre sur les trois années étudiées (2020, 2021 et 2022). Or, en septembre, pour les années 2020 et 2022, les corrélations (R_{max}) sont $>$ à 0.8, tandis qu'un maximum d'environ 0.77 observé en août 2021. Ces corrélations renforcent l'hypothèse que les ΔR des deux années, 2020 et 2022, ont été influencées de manière similaire par les mêmes facteurs climatiques tout au long de l'année, expliquant en grande partie les similarités saisonniers observées sur les ΔR entre ces deux années.

Bien que d'autres facteurs puissent également influencer le TWD , tels que la croissance des arbres, la charge en fruits, la taille des arbres, les variations saisonnières et la concentration atmosphérique en CO_2 (Dawes et al., 2014; De Swaef et al., 2009; Fernández & Cuevas, 2010), des liens plus ou moins significatifs ont été observés entre le TWD , le PRI , et le $NDVI$ selon les années, comme illustré dans la Figure III.3 b).

En résumant, ces résultats soulignent des interactions complexes entre les cycles de croissance des arbres, les périodes du déficit hydrique, et les paramètres météorologiques, mettant en évidence l'influence marquée de l'humidité de l'air sur le GRO et de la pression de vapeur d'eau (VPD) sur le TWD , comme les a surligné plusieurs études antérieurs sur d'autres type d'arbres (Camargo & Marenco, 2023; Devine & Harrington, 2011; Fan et al., 2019; Leštianska et al., 2023; Meng et al., 2021), ainsi qu'au flux de sève des arbres (F_s) dans le processus de croissance radiale du tronc.

V. Comportement des variations résiduelles dendrométriques et des flux de sèves :

Les flux de sève ont un impact significatif sur les mesures de *TWD* et *GRO*, tel que mentionné dans la précédente section. Dans cette optique, nous avons entrepris une analyse du comportement des flux de sève par rapport à celles dendrométriques du tronc sur une échelle moyennes mensuelles diurne. L'objectif de cette partie est d'examiner la tendance des variations des flux de sève par rapport aux variations résiduelles dendrométriques sur toute une année, dans le but de déterminer les éventuels liens émergents entre ces deux paramètres afin d'avoir un suivi plus précis de l'état hydrique des oliviers. La période d'étudiée s'étend de novembre 2020 à octobre 2021, soit une année complète.

Une analyse préliminaire de sensibilité a été réalisée sur les données de F_S en relation avec le rayonnement global. Ceci découle de l'impact prédominant du rayonnement en tant que moteur principal du processus de la transpiration des arbres, et par conséquent, du flux de sève (Zeppel et al., 2004). Pour chaque mois, nous avons calculé un coefficient de variation du rayonnement solaire, issue de la station météorologique (Section III.1 Chapitre II), entre 11h à 13h, période correspondant au midi solaire vrai, lorsque l'irradiation solaire atteint son maximum. Ceci afin de sélectionner uniquement les journées sans nuages, présentant un coefficient de variation inférieur à 0.15.

La Figure III.4, ci-dessous, illustre l'évolution journalier de la moyenne mensuelle des variations résiduelles dendrométriques, ΔR_r , (Section III.4 Chapitre II) ainsi que des flux de sève, F_S . Les périodes délimitées par les valeurs ΔR_r maximums et minimums sont mises en arrière-plan rouge.

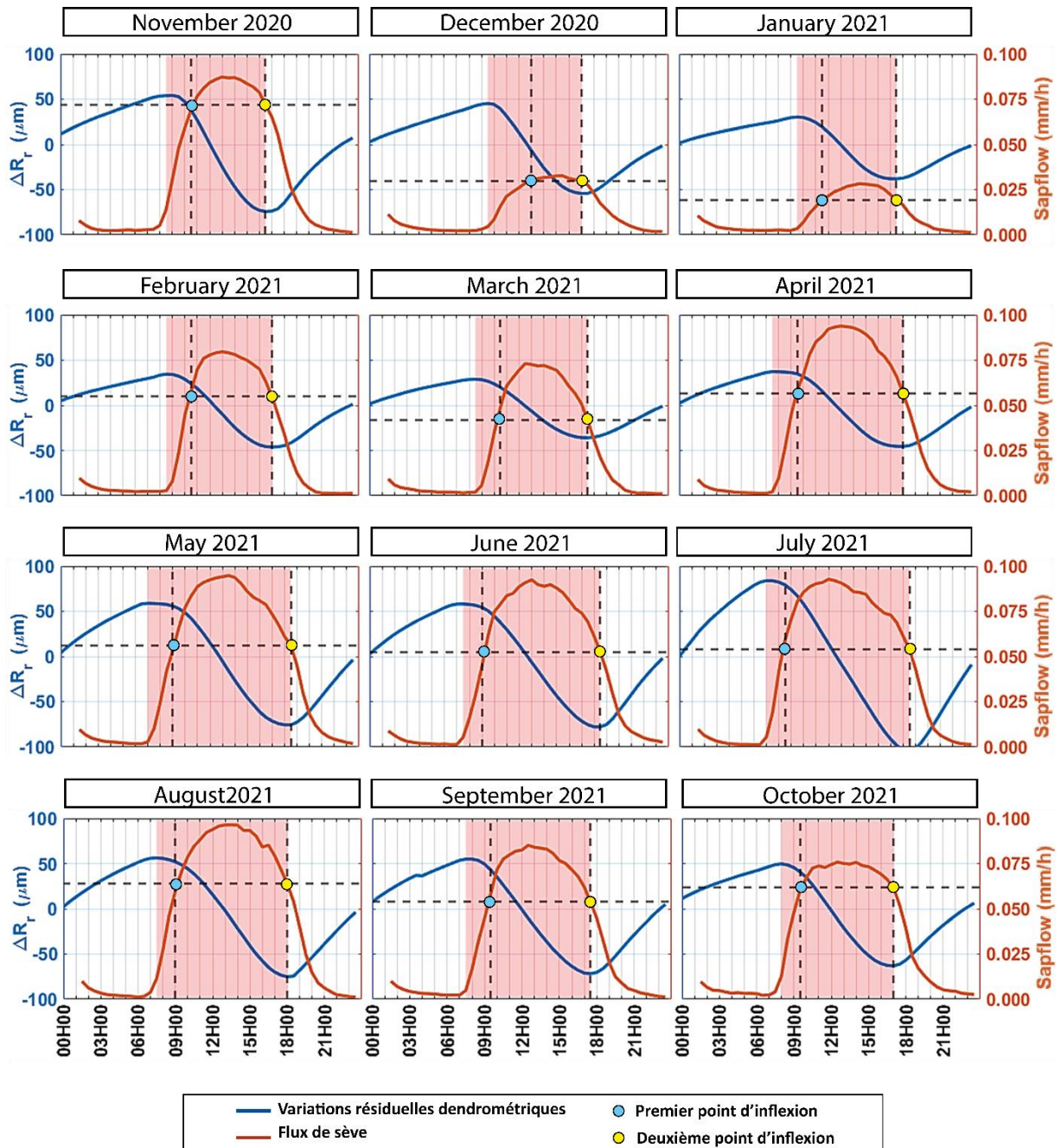


Figure III. 4 : Moyennes mensuelles sur une échelle journalière, des variations résiduelles dendrométriques ΔR_r en micromètres (axe des ordonnées à gauche), ainsi que les flux de sève (axe des ordonnées à droite) exprimés en millimètres, avec les périodes entre chaque maximum et minimum journalière des ΔR_r en arrière-plan rouge sur la période d'étudiée s'étendant de novembre 2020 à octobre 2021

Les résultats illustrent, de manière générale, un cycle diurne distinct et uniforme, indépendamment du mois pris en considération, que ce soit pour ΔR_r ou pour les F_s . Toutefois, l'amplitude et la durée de ces cycles évoluent au fil des mois. Il est particulièrement notable que le cycle diurne de F_s est très faible en décembre et janvier, indiquant la période de dormance de la végétation.

Durant les périodes nocturnes, il est observé que les F_S se stabilisent à des niveaux presque nuls, tandis que les ΔR_r augmentent progressivement, indiquant un renouvellement de la réserve hydrique du xylème des arbres pendant la nuit (Dünisch & Morais, 2002; Leštianska et al., 2023; Perämäki et al., 2001). Cette augmentation se poursuit jusqu'aux premières heures du matin (Biondi & Rossi, 2015; Ehrenberger et al., 2012). À ce moment, les mesures ΔR_r atteignent un maximum stable pendant de courtes périodes (un plateau à environ $\Delta R_r = 52$ mm de 7h à 9h en mai 2021 par exemple). Après avoir atteint leur apogée, les ΔR_r commencent à diminuer continuellement jusqu'à atteindre des valeurs minimales en fin de journée (autour de 17h – 18h selon la période de l'année), avant d'amorcer une nouvelle augmentation. En revanche, les flux de sève, F_S , démarrent juste après l'aube pour atteindre leur pic autour de midi, avec un plateau dont la durée évolue au cours de l'année (de 12h à 16h, soit 2 h en août, et de 14h-15h, soit 1h en janvier 2021) pour ensuite décroître et retrouver des valeurs nulles en fin de journée (de 20h en hiver à 22h en été).

Les périodes entre lesquelles les valeurs de ΔR_r atteignent leurs pics et leurs creux varient tout au long de l'année. En automne, ces plages s'établissent autour de 10h00 et 16h30, en novembre 2020, tandis qu'en été, elles s'étendent entre 8h30 et 18h00, en août 2021, respectivement pour les valeurs maximales et minimales de ΔR_r . Par ailleurs, la période de circulation F_S connaît également des variations saisonnières. Pendant l'automne, elles durent environ 12h30, pour s'étendre à 14h30 en été. Ces oscillations dans les durées des phases ΔR_r et des F_S sont des éléments clés à prendre en compte lors de l'analyse des processus saisonniers, soulignent l'influence des saisons sur les rythmes biologiques et physiologiques des arbres étudiés.

Pour chaque mois, sur les moyennes mensuelles à échelle journalière, nous avons identifié le moment de l'après-midi t_{DR_min} où les des variations résiduelles $\Delta R_r(t_{DR_min})$ atteint son minimum (deuxième point d'inflexion dans la Figure III.4), ainsi que la valeur de $F_S(t_{DR_min})$ qui lui correspond. Les courbes de F_S étant en cloche, nous avons relevé, l'autre instant (le matin, t_{DR_max}) ou $F_S = F_S(t_{DR_max})$, et identifié le $\Delta R_r = \Delta R_r(t_{DR_max})$ qui lui correspond (premier point d'inflexion dans la Figure III.1).

Les valeurs ΔR_r des moments $t_{DR_max_am}$ et t_{DR_min} ainsi que la durée de la période associée, $\Delta P = t_{DR_max} - t_{DR_min}$, au cours de l'année sont données au Tableau III.1. Les valeurs de F_S instantanées et relatives au cumul journalier (en %), F_{S_cumul} , ainsi que le rayonnement globale R_g sont également donnés.

Tableau III. 1 : Les heures et les valeurs auxquelles chaque point d'inflexion est atteint au cours de chaque journalière moyennes mensuelles, avec les taux cumulatifs par rapport aux cumul journalier des flux de sève, ainsi que les données relatives au rayonnement solaire correspondant à chaque point d'inflexion.

Mois	Heure		F_S (mm.10 ⁻² /h)		F_S cumul [%]		R_g [w/m ²]		Durée de la période
	t_{DR_max}	t_{DR_min}	t_{DR_max}	t_{DR_min}	t_{DR_max}	t_{DR_min}	t_{DR_max}	t_{DR_min}	ΔP
Nov-20	10h30	16h30	6.61	6.59	19	83	534	199	06h00
Déc-20	12h30	17h00	2.78	2.81	32	79	630	127	04h30
Janv-21	12h30	17h00	2.19	2.21	33	81	617	106	04h30
Févr-21	10h30	17h30	4.14	3.88	14	92	579	273	07h00
Mars-21	10h30	17h30	4.08	3.95	13	91	693	248	07h00
Avr-21	09h30	18h00	5.62	5.57	10	91	572	213	08h30
Mai-21	09h30	18h00	5.99	6.03	13	90	506	156	08h30
Juin – 21	09h30	18h30	5.82	5.38	11	92	534	208	09h00
Juil-21	08h30	18h30	5.92	5.37	8	94	402	184	10h00
Aout -21	09h30	18h00	6.92	6.36	13	92	439	245	08h30
Sept-21	09h30	17h30	5.51	5.30	13	91	536	228	08h00
Oct-21	10h30	17h00	6.31	6.07	22	87	466	210	06h30

Nous observons à partir des données présentées dans le Tableau III.1 que la période associée aux variations ΔP présente une fluctuation tout au long de l'année. En décembre 2020 et janvier 2021, période caractérisée par une activité végétative très faible (Section III.7 Chapitre II), cette période est de 4 heures et 30 minutes, tandis qu'en juillet 2021, elle s'étend à 10 heures. En excluant le stade phénologique de dormances (les mois de décembre 2020 et janvier 2021), il apparaît que les valeurs moyennes annuelles diurnes de F_S cumul associées aux moments t_{DR_max} et t_{DR_min} représentent des F_S cumul (t_{DR_max}) = 13% et F_S cumul (t_{DR_min}) = 90%, tandis que les $\Delta R_r(t_{DR_max})$ correspond à plus de 80% de la valeur maximum enregistrée. Les valeurs de rayonnements solaire quant à elle sont d'environ $R_g(t_{DR_max}) = 526W/m^2$ et $R_g(t_{DR_min}) = 217W/m^2$.

L'hypothèse la plus probable pour élucider le comportement des deux points d'inflexion observés (t_{DR_max} et t_{DR_min}), ainsi que leur similitude générale à travers chaque mois, réside dans la proposition que ces deux points sont étroitement liés à l'état hydrique des arbres, marquant des transitions spécifiques. Plus précisément, le premier point d'inflexion (t_{DR_max}) semble correspondre à un point de transition entre le comportement biologiques des arbres à un comportement influencé/conduit par les conditions météorologiques, tandis que le second point (t_{DR_min}) marque le pont de transition inverse.

Selon cette hypothèse, au cours de la première moitié de la journée, lorsque les niveaux de flux de sèves parviennent au premier point de transition, il semble coïncider avec le moment où le comportement biologique de l'arbre, au point de vue de la transpiration, évolue vers un comportement davantage influencé par les conditions météorologiques. Cette transition vise à répondre aux exigences climatiques induites par les gradients de potentiel hydrique négatif générés à l'intérieur de l'arbre, en conjonction avec l'accroissement de l'intensité du rayonnement solaire. Ce stade est en relation avec les premières réductions de diamètre du tronc, à l'exception de décembre 2020 et janvier 2021, période de dormance végétale caractérisée par une diminution de l'activité métabolique et la contraction des tissus végétaux, durant laquelle, toute activité de croissance est limitée ou ralentie, (Section III.7 Chapitre II). Tel que mentionné précédemment, ce premier point de transition représente en moyenne entre 12 % et 26,5 % du cumul total de F_s sur une base journalière mensuelle moyenne, variant en fonction de chaque mois.

De même, l'après-midi, lorsque les niveaux de F_s parviennent au deuxième point de transition, lorsque les ΔR_r atteignent leurs valeurs minimales en fin de journée, il semble coïncider avec le moment où le comportement de l'arbre, au point de vue de la transpiration, évolue vers un comportement davantage correspond au retour au comportement biologique que comportement météorologique avec le début de l'augmentation progressivement du rayon du tronc, signe du début de remplissage des tissus de stockage de l'arbre.

Les mesures ont montré que ces deux points de changement correspondent quasiment au même flux de sève selon chaque mois, Tableau III.1, ce qui pourra renforcer cette hypothèse proposée.

Nous concluons que cette hypothèse, combinant les flux de sève et les variations dendrométriques des troncs d'olivier, permet de mettre en évidence le lien complexe entre les processus biologiques internes des arbres, leur réponse aux conditions météorologiques et leur activité métabolique. Les variations, moyennes mensuelles sur une échelle journalière, dans la proportion de flux de sève associées à ces points de transitions soulignent l'adaptation dynamique des arbres aux facteurs environnementaux changeants. De plus, l'observation d'une exception durant la période de dormance, renforce l'hypothèse, tout en mettant évidence les mécanismes de régulation internes qui ajustent l'activité végétative en fonction des conditions saisonnières.

Cette hypothèse ouvre des perspectives prometteuses pour approfondir notre compréhension des interactions entre les arbres et leur environnement, avec des implications potentielles pour la gestion de l'état hydrique dans le domaine agricole (contrôle de l'irrigation par exemple).

Néanmoins, des travaux supplémentaires doivent être menés pour valider cette hypothèse, ainsi qu'anticiper les conditions du déficit hydrique et les quantités exactes de demande en eau, sur des échelles temporelles plus court, que mensuelle, allant de quelques semaines à l'échelle diurne.

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une analyse détaillée des mesures dendrométriques, des flux de sève, et des données météorologiques recueillies au cours des années 2020-2022, dans le but de mieux comprendre l'état hydrique des oliviers étudiés pendant les périodes de croissance et de déficit hydrique. Nous avons adopté des approches analytiques visant à séparer quantitativement les mesures de croissance des oliviers du déficit hydrique, ainsi qu'à évaluer les effets des facteurs climatiques sur ces mesures.

Les résultats dendrométriques obtenus sur les troncs des arbres d'oliviers ont révélé que la saison de croissance débute après le stade de repos végétatif, vers la fin février, et se termine après le stade de maturation des olives, début de décembre. La croissance annuelle la plus marquée a été enregistré sur l'année 2021 (5,02 mm). L'analyse des variations annuelles de ΔR (variation de la circonférence des troncs) ont montrés des cycles distincts en 2021, avec une croissance rapide au printemps, une augmentation progressive en été, un plateau fluctuant en automne, et une légère diminution en hiver.

Les données ont révélé plusieurs périodes du déficit hydrique prolongées, indiquant des périodes de sécheresse persistant sur plusieurs jours : Deux périodes se sont particulièrement démarquées, s'étendant sur 9 mois ; de fin mars 2020 à début mars 2021, avec un pic de déficit d'environ 1125 μm , et de juin à fin septembre 2022, avec un déficit maximum d'environ 1000 μm .

L'analyse des variations dendrométriques résiduelles (ΔR_r) sur des profils temporels annuels a mis en évidence des variations importantes du rythme saisonnier de ΔR_r en 2021, se distinguant nettement des autres années étudiées : L'année 2021 a été caractérisée par des taux de croissance élevés, tandis que l'année 2020 a enregistré les taux de déficit hydrique les plus élevés, dépassant de 2,8 fois ceux de 2021, et surpassant de 1,3 fois ceux de 2022.

Concernant les effets des facteurs climatiques sur la croissance et le déficit hydrique des arbres d'oliviers, les résultats ont révélé des corrélations positives entre la croissance et l'humidité de l'air, avec des valeurs atteignant 0,67 pour avril 2022, 0,52 pour février 2022, et un pic notable

de 0,79 en mai 2021. Des corrélations inverses significatives ont été aussi observées entre la croissance et le flux de sève, notamment au printemps 2021, par rapport aux années 2020 et 2022.

En ce qui concerne le déficit hydrique (TWD) et les facteurs climatiques, des corrélations significatives ont été observées entre le TWD et la pression de vapeur déficitaire (VPD), qui semble être l'un des paramètres météorologiques les plus influents. Les coefficients de corrélation étaient respectivement de 0,74, 0,83 et 0,72 pour mai 2020, avril 2021 et avril 2022. Cela est attribuable à la forte demande en eau des oliviers du au pic de l'activités végétative pendant ce stade phénologique, ainsi qu'à l'augmentation progressive de la demande climatique. Des corrélations significatives ont également été observées entre la température de brillance des arbres (T_{tree}) et le déficit hydrique, avec des coefficients supérieurs à 0,6 d'avril à octobre au cours des trois années étudiées (2020, 2021 et 2022).

En outre, le comportement du ΔR_r et des flux de sève a été analysé. Les résultats ont illustré un cycle diurne distinct et uniforme, indépendamment du mois considéré, à la fois pour ΔR_r et les flux de sève, avec un décalage temporel de phase entre ces deux variables. Les amplitudes et les durées de ces cycles ont évolué au fil des mois.

Enfin, une hypothèse a été formulée en se basant sur les mesures combinées des flux de sève et des variations dendrométriques des troncs d'olivier. Cette hypothèse met en évidence les mécanismes de régulation des réponses des arbres aux conditions météorologiques, et leur activité métabolique en relation avec le mouvement des flux de sève et les variations dendrométriques des troncs d'arbres.

Deux points d'inflexion ont été proposées dans cette hypothèse, soulignant l'adaptation dynamique des arbres aux facteurs environnementaux changeants. Une exception du comportement proposé par cette hypothèse a été observée pendant le stade phénologique de dormance ce qui renforce d'avantage cette hypothèse, qui reste à vérifier dans de futures recherches pour une compréhension approfondie des mécanismes physiologiques des arbres d'olivier en réponse aux conditions environnementales changeantes.

Par ailleurs, nous avons initialement prévu de comparer ces mesures dendrométriques, ainsi que les données relatives à la croissance et aux déficits hydriques des arbres, avec les données radar en bande L, sensibles aux variations des troncs plutôt qu'à la canopée. Cependant, les mesures en bande L ont été temporairement exclues de cette étude en raison de la nécessité de traitements supplémentaires. Néanmoins, une analyse préliminaire entre les données radar *in-situ* en bande C et les variations de ΔR sera présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre IV : Analyse des Séries Temporelles des données radar *in situ* et sentinel-1

I. Introduction

Les changements diurnes de l'état hydrique des couverts génèrent des variations qui ont été observées sur les réponses radar, principalement sur des forêts tropicales. Ils résultent de la sensibilité particulière des ondes radar aux changements des propriétés diélectriques des couverts. Ces changements d'état hydrique se manifestent par le mouvement interne de l'eau au sein des plantes, induit par des processus tels que : la transpiration, le flux de sève et le renouvellement du stock d'eau des arbres à travers les variations dendrométriques de leurs troncs.

Notre objectif principal est d'analyser le comportement des réponses radar face aux variations diurnes de l'état hydrique sur un vergé d'oliviers situé dans un environnement semi-aride soumis à d'importantes variations climatiques tout au long de l'année. Si le signal radar est sensible à l'humidité de la végétation, à travers sa constante diélectrique ce qui modifie la manière dont les ondes radar sont réfléchies et diffusées, il l'est également à d'autres paramètres incluant la géométrie et la distribution des diffuseurs, ainsi que la rugosité et l'humidité du sol sous-jacent. La question est de savoir si les variations du contenu en eau du couvert d'oliviers peuvent être suffisamment discriminantes, et dans l'affirmatives, peuvent être quantifiées à partir des données radar. Notre analyse reposera sur des observations radar *in situ* intra-journalières, comparées aux paramètres environnementaux. Ces données seront également comparées aux acquisitions radar satellitaires de Sentinel-1 afin d'évaluer leur évolution temporelle et la fiabilité des mesures *in situ*. Des résultats prometteurs ont déjà été observés, notamment sur des forêts tropicales, à partir d'expériences dont celle-ci s'est directement inspirée. Les résultats présentés dans ce chapitre sont les premiers sur une culture arborée, ici des oliviers, sur une aussi longue période avec une résolution temporelle aussi fine (15 min).

Il est important de souligner que jusqu'à présent, il n'a pas été possible d'effectuer les calibrations absolues des mesures d'intensités *in situ*, relatives à σ^0 , qui ne sont calibrées que relativement à l'acquisition du 1^{er} mai 2020 (Section IV.2.2 du Chapitre II). De plus, la possible présence d'effets de diaphonie (*i.e.* une partie du signal d'une antenne étant captée par une autre) n'a pas pu être entièrement examinée et éliminée (section IV.4 du chapitre II). Dans ce contexte, nous nous sommes concentrés sur la cohérence interférométrique calculée en combinant toutes les polarisations, notée γ (Section IV.2.4 Chapitre II). Les analyses des intensités seront examinées dans ce chapitre en tant que résultats préliminaires.

II. Analyse de la cohérence interférométrique

II.1 Ligne de base temporelle de 15 min.

II.1.1 Observations à l'échelle annuelle

L'évolution temporelle de la cohérence interférométrique γ a été analysée en comparaison avec celle des paramètres environnementaux et mesures physiologiques tel que : la vitesse du vent (WS), le déficit de pression de vapeur (VPD), l'évapotranspiration réel (ETR), les variations résiduelles dendrométriques des troncs des d'arbres (ΔR_r), les flux de sèves ($Sapflow$), les précipitations ($Rain$) ainsi que l'humidité du sol (VWC). Les résultats sont montrés pour la période s'étendant du 1er mars 2020 au 31 décembre 2021, avec une cohérence γ calculée pour une ligne de base temporelle de 15 min, Figure IV.1. Les courbes en noir représentent la tendance des mesures calculée à l'aide d'une moyenne mobile gaussienne sur deux jours, et notée $\langle . \rangle$ ci-après.

Nous rappelons que la cohérence provienne de mesures *in situ*, en bande C sur des intervalles de 15 minutes, couvrant les quatre rangées d'oliviers à des distances allant de $r_{min} = 25$ à $r_{max} = 40$ mètres, correspondant à des angles d'incidence compris entre $\theta_{min} \approx 40^\circ$ à $\theta_{max} \approx 60^\circ$.

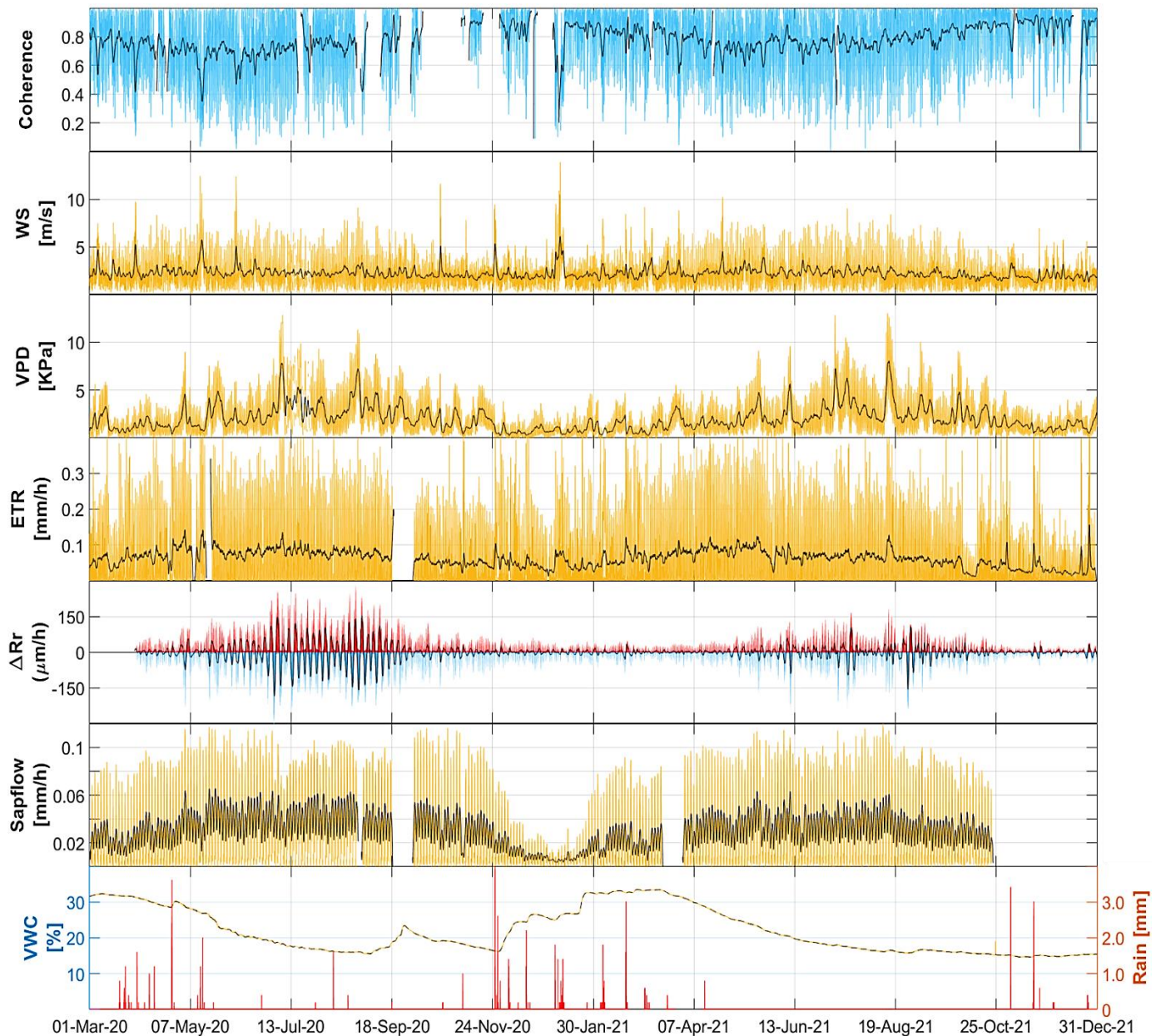


Figure IV. 1 : Séries chronologiques des cohérences interférométriques γ (mixant toutes les polarisations) en bande C, en plus des paramètres environnementaux et mesures physiologiques pour la période 2020-2021. Du haut en bas : La courbe bleu représente les mesures des cohérences interférométriques. Les courbes en jaunes représentent les paramètres environnementaux et les mesures physiologiques : *WS* (Vitesse du vent), *VPD* (déficit de pression de vapeur), *ETR* (évapotranspiration réel), ΔRr (variations résiduels dendrométriques des troncs d'arbres) avec courbes rouges expansions positifs et bleus contractions négatives des troncs d'arbres, *Sapflow* (les flux de sèves), *VWC* (l'humidité du sol a 10cm) ainsi que les *Rain* (précipitations) en rouge. Les courbes en noirs dans les tracés correspondent à la tendance des mesures utilisant une moyenne mobile pondérée gaussienne sur deux jours.

Les résultats obtenus, Figure IV.1, montrent des valeurs de γ relativement élevées, avec, pour les valeurs moyennes sur 2 jours, $\langle \gamma \rangle$ (courbe noires), des valeurs ponctuelles comprises entre 0.4 et 0.9. On peut également distinguer des variations saisonnières marquées. En 2021, à titre

d'exemple, on observe qu'après une période de stabilité relative en janvier, avec des valeurs élevées ($\langle \gamma \rangle \approx 0,85$), $\langle \gamma \rangle$ subit une baisse progressive de février à juillet, pour atteindre environ 0,75. Ensuite, elle augmente progressivement jusqu'à la fin de l'automne, pour retrouver ses valeurs hivernales initiales d'environ 0,85. De telles variations saisonnières ne sont pas observées pour les moyennes sur 2 jours de vitesse du vent $\langle WS \rangle$ qui restent globalement faibles et constantes avec des valeurs autour de 2 m/s. On peut toutefois noter que les événements de vents forts ($\langle WS \rangle > 5$ m/s du 14 au 17 mai 2020, ou du 05 au 11 Janvier 2021) coïncident avec les plus fortes chutes de cohérence ($\langle \gamma \rangle < 0.2$), confirmant la grande sensibilité de la cohérence aux déplacements des diffuseurs. Les mêmes observations sont faites pour les valeurs non moyennées (entre WS et γ) : une forte corrélation (0.6) est observée entre γ et WS pour toute l'année 2021, lorsqu'un tri est effectué ne sélectionnant que les données correspondant à $WS > 2$ m/s. À cet égard, il est possible de considérer, dans le cadre de cette étude, que le seuil de WS au-delà duquel la cohérence n'est plus utilisable pour évaluer l'état de la végétation est de 2 m/s.

En revanche, des comportements semblables (et symétriques) sont observés entre la cohérence d'une part et VPD , ETR , ΔRr et $Sapflow$, que ce soit pour les données brutes ou moyennées sur 2 jours. A l'échelle saisonnière, $\langle \gamma \rangle$ est globalement en phase avec $\langle ETR \rangle$, $\langle Sapflow \rangle$, $\langle \Delta Rr \rangle$, et $\langle VPD \rangle$, atteignant leur maximum en été et leur minimum en hiver. On peut toutefois noter un retard de plusieurs semaines au printemps, que ce soit pour la croissance du $\langle VPD \rangle$ et du $\langle \Delta Rr \rangle$ par rapport à la décroissance de $\langle \gamma \rangle$ qui démarre en février, Figure IV.1. A l'échelle diurne, on observe que les fortes amplitudes journalières de ces différents paramètres coïncident. Ces observations traduisent une sensibilité de la cohérence à l'activité de la végétation, qui s'accompagne de variations de contenu hydrique dans les plantes.

On observe également une sensibilité marquée de la cohérence aux événements de précipitations avec les plus fortes chutes de cohérence ($\langle \gamma \rangle < 0.2$ en Janvier, février 2021), aspect qui sera discuter en approfondie dans la section II.1.4 de ce chapitre.

II.1.2 Echelle diurne

Pour chaque stade physiologique des oliviers (Section III.7 Chapitre II), les évolutions moyennes diurnes de γ ont été comparés à celles de WS , ETR , $Sapflow$ et ΔRr . Les résultats obtenus sont présentés Figure IV.2 et IV.3 respectivement pour les années 2020 et 2021. Elles représentent le comportement diurne des différents paramètres sous forme de boîtes à moustache obtenues à partir de toutes les mesures réalisées durant la période considérée. Le pas de temps correspond à

celui des acquisitions concernées (15 min pour les paramètres radar, 30 min pour les autres mesures). Chaque boîte à moustache, Figure IV.2 et IV.3, représente la médiane, 1^{er} et 3^{ème} quartile, ainsi que les minimum et maximum. Les mesures sont présentées sur une échelle diurne pour chaque stade physiologique (correspondant à des périodes de deux mois). Les bandes roses indiquent le début de la diminution diurne progressive de γ , par rapport aux mesures nocturnes (de minuit à 6 heures du matin), jusqu'à ce que la médiane de *WS* excède la médiane des valeurs nocturne de 10 %. Les bandes bleues débutent à la fin de la période marquée en rose, jusqu'à ce que la cohérence retrouve ses valeurs nocturnes. La période diurne correspondant donc aux bandes roses et bleues.

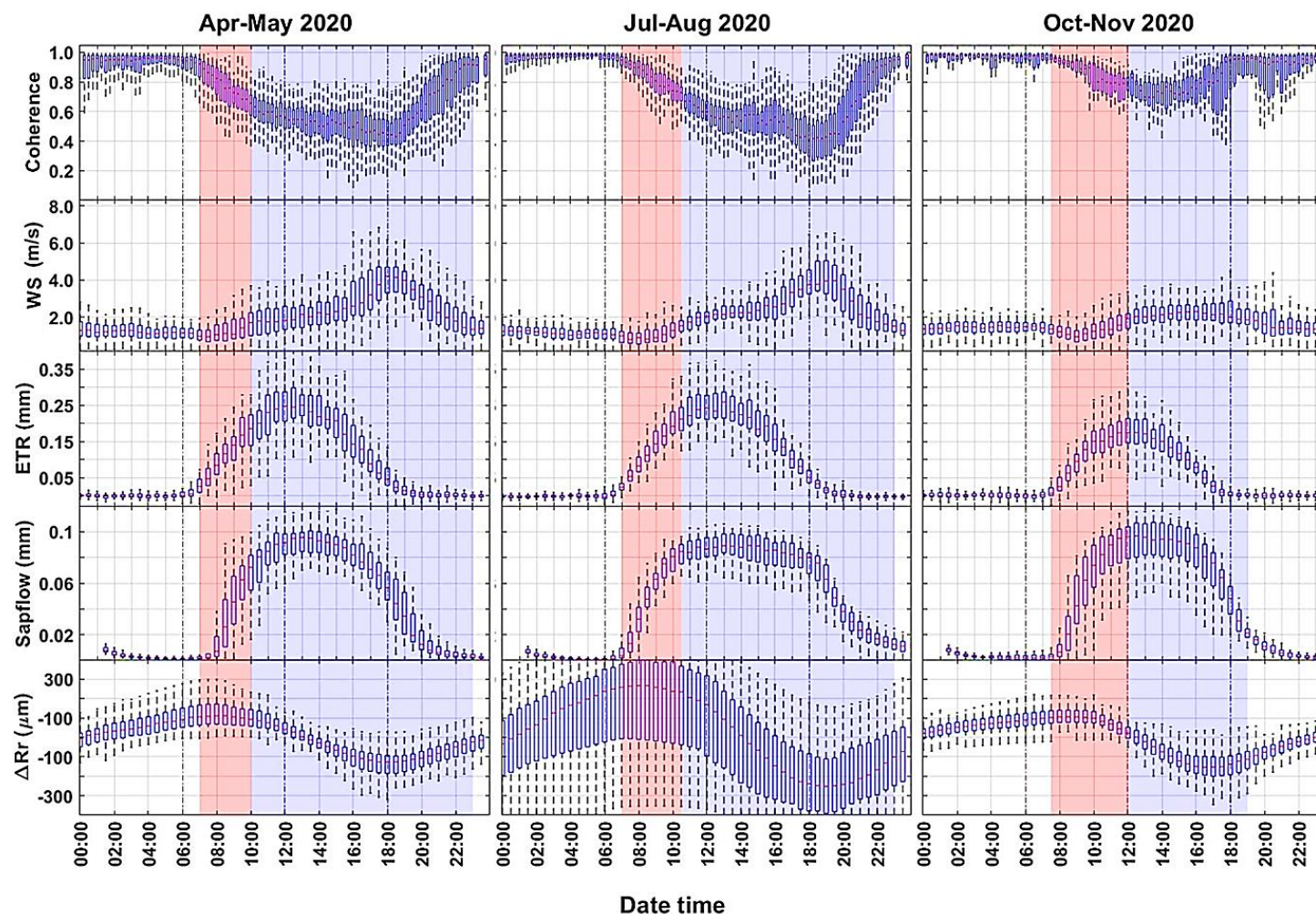


Figure IV. 2 : Dynamique quotidienne sous forme de boîtes à moustaches sur les stades phénologiques de 2020 (les barres d'erreur sont min et max) de (de haut en bas) : cohérences sur 15 min, vitesse du vent, évapotranspiration (ETR), flux de sève et variation résiduelle de la des troncs d'oliviers (ΔRr). De gauche à droite : résultats pour quarts périodes de 2 mois de 2020 ramenés à une échelle de 24 h. Les bandes roses indiquent le début de la diminution diurne progressive de γ pour chaque stade phénologique étudiée, jusqu'à que la médiane des vitesses de vent enregistrées pour chaque stades phénologiques excède la médiane nocturne de 10 % (début de la bande bleu). Les bandes bleues indiquent le reste de la période jusqu'à ce que la cohérence retrouve ses valeurs nocturnes.

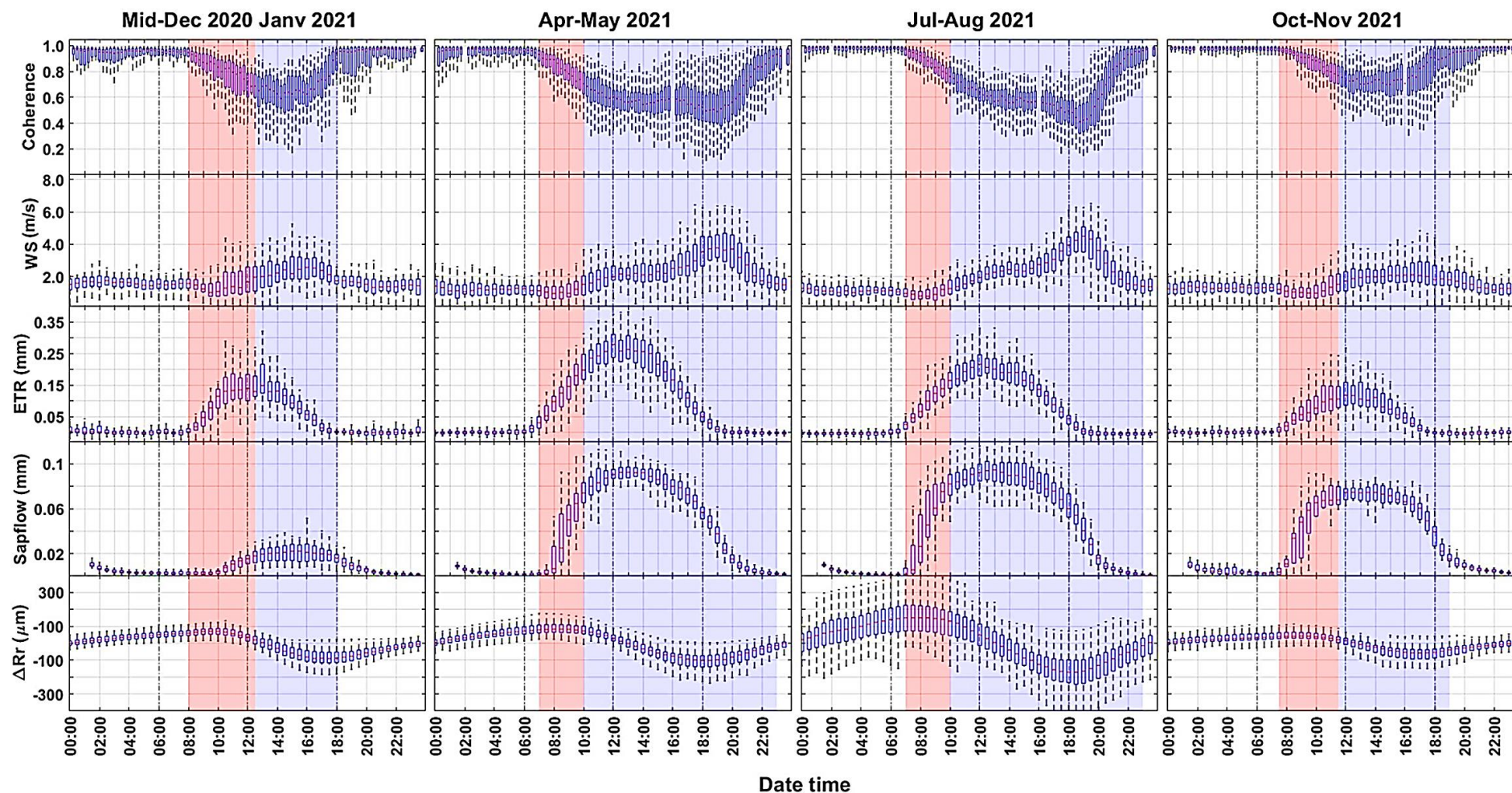


Figure IV. 3 : Dynamique quotidienne sous forme de boîtes à moustaches sur les stades phénologiques de 2021 (les barres d'erreur sont min et max) de (de haut en bas) : cohérences sur 15 min, vitesse du vent, évapotranspiration (ETR), flux de sève et variation résiduelle de la des troncs d'oliviers (ΔRr). De gauche à droite : résultats pour quarts périodes de 2 mois de 2021 ramenés à une échelle de 24 h. Les bandes roses indiquent le début de la diminution diurne progressive de γ pour chaque stade phénologique étudiée, jusqu'à ce que la médiane des vitesses de vent enregistrées pour chaque stades phénologiques excède la médiane nocturne de 10 % (début de la bande bleu). Les bandes bleues indiquent le reste de la période jusqu'à ce que la cohérence retrouve ses valeurs nocturnes.

Globalement, un cycle diurne marqué est observé pour l'ensemble des paramètres, avec un comportement similaire pour 2020 et 2021. La cohérence a des valeurs élevées (> 0.9) durant la nuit, caractérisée par une absence de vent et une végétation à l'état de repos. Elle décroît à l'aube pour atteindre son minimum dans l'après-midi ($0.4 < \gamma < 0.6$ selon la période de l'année), avant d'augmenter pour atteindre son maximum nocturne entre 18h et minuit, selon la période de l'année. L'*ETR* et le *Sapflow* ont des comportements symétriques à γ : leur minimum, quasi-nul est observé la nuit, puis elles augmentent au début du jour pour atteindre leur maximum autour de midi. Elles décroissent ensuite pour retrouver leurs valeurs minimales en fin de journée. Concernant l'évolution annuelle, on peut noter que l'amplitude et la durée de la période diurne est maximale pendant le printemps et l'été, par contraste avec l'automne et l'hiver. Le comportement γ au cours des stades phénologiques étudiée a été, dans l'ensemble, similaire en 2020 et 2021. Les résultats mettent en évidence des cycles diurnes qui varient durant l'année, avec une amplitude et une durée plus marquée en printemps et été, qu'en hiver avec les baisses les plus prononcées en automne.

Pour L'*ETR*, les valeurs moyennes maximales en avril-mai étaient d'environ 0,25 mm/30min et 0,2 mm/30 min en avril-mai de 2020 et 2021 respectivement, Figures IV.2 et IV.3. En revanche, cette amplitude est plus faible en octobre-novembre d'environ 0,17 mm/30 min et de 0,12 mm/30 minutes respectivement pour 2020 et 2021.

En parallèle, le flux de sève montre une dynamique similaire en phase à l'*ETR* pour la période octobre-novembre, avec un décalage temporel observé de 2 heures en avril-mai et d'une heure en juillet-août, durant les mêmes périodes phénologiques pour 2020 et 2021, Figures IV.2 et IV.3. En ce qui concerne les variations résiduelles dendrométriques des troncs des arbres, les données montrent un cycle diurne clair avec une amplitude plus élevée en 2020 qu'en 2021. Cette observation suggère une incapacité des arbres à rétablir leur état hydrique nocturne pendant les stades phénologique étudiée en 2020 par rapport à 2021, suggérant ainsi un déficit hydrique prolongé sur cette année-là. Ceci fera l'objet d'une discussion plus approfondie dans le Chapitre IV.

Concernant l'influence de la vitesse du vent sur la cohérence, les coefficients de détermination (R^2) pour les valeurs diurnes entre γ et *WS* sont significatifs pour l'ensemble de l'année 2021 : 0.74, 0.58, 0.43 et 0.54 respectivement pour les périodes mi-décembre-janvier, Avril-mai, juillet-août et octobre-novembre. Cette forte sensibilité de la cohérence aux mouvements des diffuseurs limite grandement l'analyse de sensibilité de γ à l'activité hydrique des plantes, ainsi les faibles

coefficients de corrélation entre les couples (γ , *ETR*) et (γ , *Sapflow*) pour toute la période diurne (respectivement 0,10 et 0,22 pour l'ensemble de l'année 2021). Cependant, en ne sélectionnant que les jours avec une *WS* < 2 m/s pendant plus de la moitié de la journée, on obtient des coefficients de détermination de 0,40 et 0,47 respectivement entre (γ , *ETR*) et (γ , *Sapflow*). Ces plus fortes valeurs observées pour des vents faibles mettent en évidence la sensibilité de γ aux mécanismes physiologiques des plantes.

Les cycles diurnes de γ , au cours des stades phénologiques étudiées, ont été caractérisées par un comportement nocturne stable avec des valeurs moyennes élevées, avoisinant 0,9, en l'absence d'activité végétale, sous des vitesses de vent moyenne généralement inférieures à 2 m/s jusqu'à l'aube où on observe le début d'une diminution progressive de la cohérence sur la bande rose tracée sur les Figures IV.2 et IV.3. Elle se termine lorsque la médiane de *WS* excède la moyenne nocturne de 10 %. La durée de cette bande varie selon les stades phénologiques entre 2020 et 2021 Elle est de l'ordre de 3 heures en printemps et en été (7h – 10h), et de 4 heures en automne (7h30-10h30). Cette chute de cohérence observée en début de journée, quand le vent ne s'est pas encore levé, est donc causée par le début de l'activité de la végétation, et très vraisemblablement pas des variations hydriques des oliviers, puisqu'elle a été observée sur tous les autres stades phénologique étudiées. Cette réduction matinale de la cohérence a déjà été aussi observé dans des études antérieures sur les forêts tropicales et boréals (voir section III.8 Chapitre I).

La cohérence continue de diminuer progressivement sur la bande rose, en parallèle avec l'activité physiologique des oliviers, qui ne cesse de répondre à la demande croissante en eau, qui se manifeste par une augmentation parallèle de l'*ETR* et du *Sapflow* avec une amplitude qui varie selon chaque stades phénologiques. Après que l'*ETR* et *Sapflow* atteignent leurs apogées à midi, une phase de stabilité relative a été observé sur les données de γ , coïncidant avec des vents quasi constants d'une moyenne de l'ordre de 2,5 m/s. Cette période s'étale de midi à 16h pour le printemps et l'été et de midi à 14h pour l'automne. Sur cette période, l'*ETR* et le flux de sève commencent à diminuer progressivement, après avoir éteindre leur apogée, et les arbres, à partir des mesures dendrométriques, subissent une sorte de contraction sur leurs troncs principales indiquant l'épuisement du stock d'eau dans les arbres, stock renouvelé pendant la période nocturne pour répondre aux besoins climatiques, avec une amplitude plus élevée en 2020 qu'en 2021.

Après, cette phase de stable relative, γ connaît une nouvelle baisse, atteignant sa valeur moyenne minimale quotidienne, en raison de l'augmentation graduelle de la vitesse du vent. On observe

une valeur moyenne minimale de γ autour de 0.4 dans des conditions de vent variant entre 4 et 4.5 m/s vers 19h au printemps et en été, tandis qu'en automne, γ se situe aux alentours de 0.7 à 15h, avec des vitesses de vent avoisinant les 2.5 m/s, pour les années 2020 et 2021 respectivement. Suite à cette baisse, γ commence à augmenter progressivement, retrouvant ses niveaux nocturnes avec un vent qui s'apaise progressivement, fin de la bande bleue. Pendant cette période, les arbres commencent à reconstituer leur stock d'eau, en l'absence d'activité végétale, ce qui se traduit par un gonflement progressif de leurs troncs.

Stade de repos végétatif (mi-décembre-janvier)

De mi-décembre à janvier, la géométrie des arbres d'oliviers ne subisse presque aucun changement puisqu'elles rentrent dans un stade phénologique de dormance au cours de lequel toute activités liée à la croissance, la germination et à la contraction des tissus végétaux est réduit ou ralenti, permettant aux arbres de survivre aux basses températures hivernales (Gucci & Cantini, 2019; Ramos et al., 2018). Cela est nettement visible à travers les faibles moyennes maximales diurnes enregistrées au cours de ce stade phonologique par rapport au reste de l'année : $Sapflow = 0.02$ mm/30min, $ETR = 0.015$ mm/30min, ainsi que de faibles amplitudes de variations résiduelles du tronc ΔR_r . Malgré cette faible activité du métabolisme des oliviers sur cette période, nous avons observé une baisse notable et continue de manière régulière de la cohérence, spécifiquement entre 8h00 et 10h00 malgré une diminution du vent de 0,6 m/s, Figure IV.3. Plusieurs explications peuvent être avancées pour ce résultat surprenant, la plus plausible étant les variations hydriques des oliviers, répondant au le démarrage de l'évapotranspiration et du Sapflow. Il est important de souligner que, bien que ces deux paramètres soient étroitement liés au contenu en eau de la plante, qui est le facteur principal influençant la réponse radar, ni l'ETR ni le flux de sève ne permettent de mesurer directement ce contenu hydrique. En effet, ces méthodes servent d'outils d'estimation indirecte de l'état hydrique des plantes, reposant sur des mesures physiologiques liées à l'eau. Toutefois, il est important de souligner que d'autres facteurs peuvent influencer les résultats, étant donné que la mesure directe du contenu hydrique demeure complexe et ardue.

Stade de la floraison (avril-mai)

À ce stade, la végétation sort de sa dormance en raison des températures plus chaudes, propices à leur épanouissement (Ramos et al., 2018; M. Torres et al., 2017). Ces modifications survenant

à ce stade induisent des changements dans la structure des oliviers et des ajustements dans la répartition de l'eau au sein de l'arbre. En conséquence, une augmentation significative de l'activité physiologique des oliviers est observée comme observés par les valeurs de *Sapflow*, multipliés par cinq, et l'*ETR*, multipliées par deux par rapport aux valeurs du stade de dormance, Figures IV.2 et IV.3.

Au cours de ce stade phénologique, les observations révèlent une corrélation notable de γ avec *ETR* à l'aube (bande rose), avec un coefficient de détermination $R^2=0.55$, lorsque la vitesse du vent est inférieure à 2 m/s, bien meilleur qu'aux autres stades : 0,43 pour la phase de durcissement du noyau, et le plus bas étant de 0,31 pour la phase de maturation des fruits respectivement pour l'année de 2020 a titre d'exemple, comme l'illustre la Figure IV.4 ci-dessous.

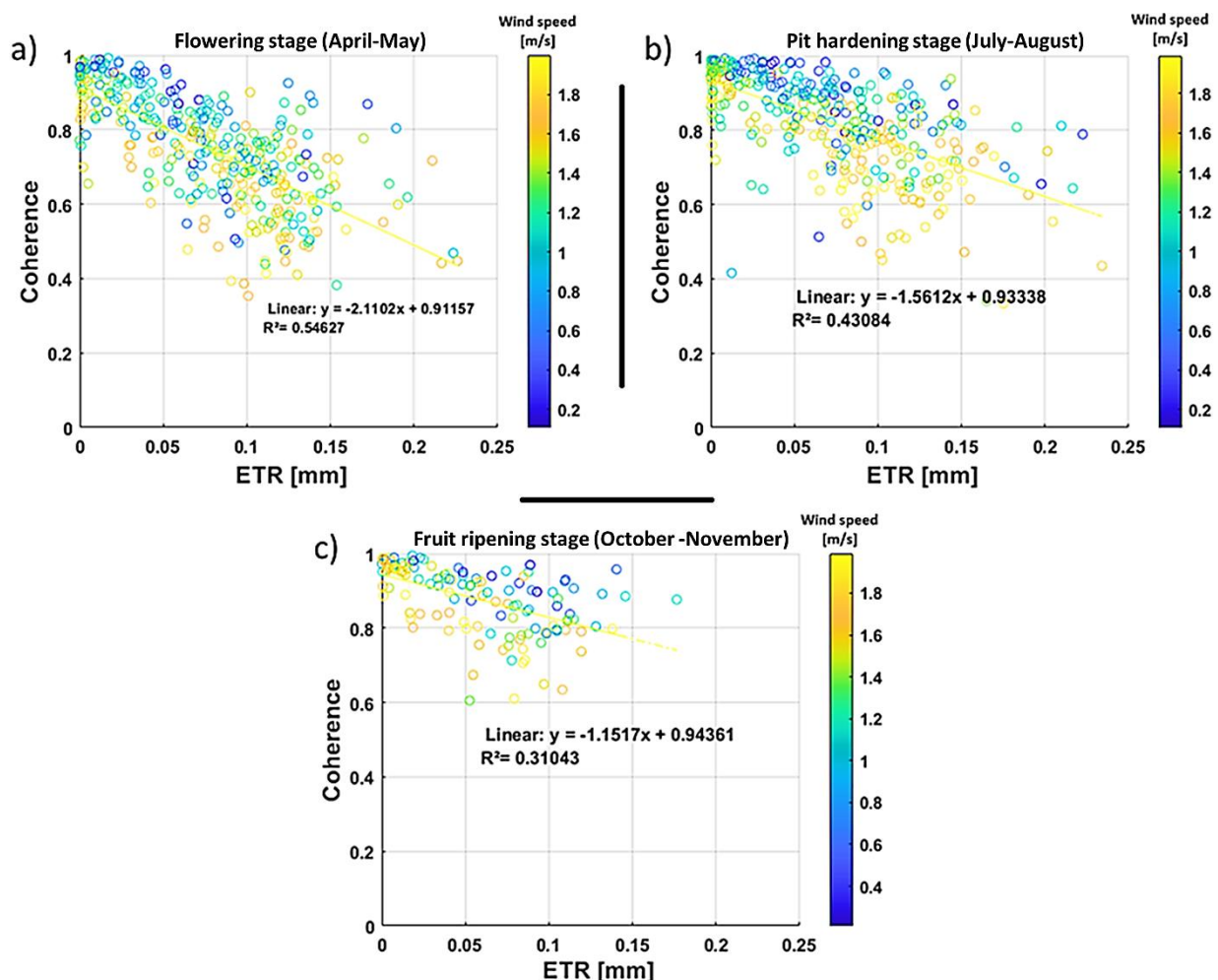


Figure IV. 4 : Les coefficients de détermination (R^2) entre la cohérence temporelle et de l'*ETR* en nuage de points en fonction de la vitesse de vent inférieure à 2 m/s sur la bande rose pour : a) avril-mai, b) juillet-aout et c) octobre-novembre 2020.

Ces résultats confirment les observations déjà réalisées sur des forêts tropicales (El Idrissi Essebtey et al., 2020) : l'évapotranspiration jouent un rôle prépondérant dans la décroissance matinale de la cohérence, observée ici sur une culture d'oliviers dans un environnement semi-aride

Stade du durcissement du noyau (juillet-août)

Pendant ce stade de développement, une grande partie de la biomasse produite par les oliviers est consacrée à la croissance des fruits en plein développement et à l'allongement des pousses, avec d'importantes quantités d'eau et de nutriments qui sont requises pour soutenir cette croissance (Abdel-Rahman & El-Sharkawi, 1974; Fernández & Moreno, 1999; Rallo et al., 1994). Ces besoins doivent également répondre aux exigences climatiques rigoureuses de cette saison estivale, généralement marquée par des températures élevées et un $VPD > 5$ KPa (Figure IV.1). Cette phase de croissance exerce une influence considérable sur les propriétés géométriques et physiques des oliviers, ce qui impacte également la cohérence interférométrique.

Durant cette période, l'amplitude diurne de la cohérence, $\Delta\gamma$, atteint son maximum, en raison des valeurs moyennes observées en fin de journées ($\gamma_{min} = 0.4$, soit $\Delta\gamma = 0.6$ comparée à $\gamma_{min} = 0.45$, soit $\Delta\gamma = 0.55$ lors de la phase de floraison au printemps, malgré des vitesses de vent à peu près similaires entre les 2 périodes). De plus, on observe, au cours de l'été 2021, Figures IV.3, une plus grande concentration des variations de la cohérence, à l'échelle diurne, autour de leurs valeurs médianes par rapport au printemps de la même année : Plus précisément, lorsqu'on examine l'amplitude des variations entre les valeurs maximales et minimales enregistrées sur les deux périodes à 19h, moment correspondant à la valeur diurne la plus basse enregistrées, nous obtiendrons une différence de l'ordre de 0.66 en juillet-août contre une différence de l'ordre de 0.76 en avril-mai respectivement sur l'année 2021. Cette différence n'était pas assez significative entre le printemps et l'été de 2020 avec des valeurs respectives de l'ordre de 0.73 et 0.71.

En outre, on peut noter que la décroissance matinale de γ est cette fois-ci en phase avec la croissance de *Sapflow* et de *ETR*. Ces observations laissent supposer une importante perte hydrique chez les arbres tout au long de la journée, avec des fluctuations plus prononcées des troncs d'oliviers durant la saison estivale par rapport à d'autres phases phénologiques de l'année comme l'illustre les mesures dendrométriques, Figures IV.2 et IV.3.

Stade de la maturation des fruits (octobre -novembre)

Enfin, la période de maturation des fruits, qui se déroule généralement d'octobre à novembre et se termine lors de la récolte des olives, soit le 11 novembre 2021. Pour l'année de 2020 la récolte des oliviers a été effectuée le 17 décembre. Cependant, en raison de problèmes techniques et de l'interruption des acquisitions radar *in situ*, nous avons dû nous limiter à évaluer le stade de maturation jusqu'au 30 novembre de cette année-là. Les effets de cette récolte sur la cohérence interférométrique seront abordés, plus en détails, dans la section II.9.

L'amplitude diurne moyenne observée $\Delta\gamma = 0.3$ (*i.e.* $\gamma_{min} = 0.7$) est la plus faible par rapport aux autres périodes. Cette tendance est principalement influencée par des vents > 2 m/s, corroboré par une valeur $R^2 = 0,42$ entre ces 2 paramètres.

Durant ce stade, une certaine stabilité de la cohérence a été observée en raison de la géométrie spécifique des oliviers, où les branches, inclinées vers le bas sous le poids des olives, (ce qui les rend aussi plus stable par rapport au vent), comme constaté sur le terrain. De plus, le profil des vents observé durant ce stade ne présente que des variations minimales, avec des moyennes oscillantes entre 1,6 et 2,6 m/s. Cette particularité a un impact significatif sur le signal radar rétrodiffusé lors de son passage à travers la canopée, conduisant ainsi à une cohérence moins faible et plus stable par rapport à d'autres stades phénologiques des oliviers.

Au cours de cette étape, *Sapflow* et *ETR* ont montré une diminution notable. Les cumuls journaliers moyens mesurés sur cette période (*Sapflow* = 0.8 mm/jour, *ETR* = 1.2 mm/jour) étaient respectivement environ 1.25 et 1.6 fois moindres que celles relevées durant la période de juillet-août (*Sapflow* = 1 mm/jour, *ETR* = 2 mm/jour) sur la même année 2020, avec un cycle diurne moyen des variations dendrométriques plus faibles en amplitude.

II.1.3 Analyse de la cohérence avec les mesures dendrométriques

Les amplitudes journalières de la circonférence des troncs ΔRr contribuent à mieux comprendre l'état hydrique quotidien des plantes par rapport à l'*ETR* ou au flux de sève, puisque ces deux derniers sont majoritairement influencés par les conditions climatiques en l'absence de stress hydrique (Fernández & Cuevas, 2010). Toutefois, ces mesures dendrométriques des troncs d'arbres, tout comme *ETR* et *Sapflow*, ne sont pas des mesures quantitatives directes de l'état hydrique de la végétation, fournissent plutôt des estimations indirectes : les variations de la circonférence du tronc est principalement due aux changements de teneur en eau du bois, et que

d'autres facteurs peuvent influencer la circonférence, comme la croissance du cambium, les variations de température.

D'après les données présentées dans les Figures IV.2 et IV.3, il est possible de discerner un cycle diurne spécifique de ΔRr : Les valeurs sont maximales à l'aube, à la fin de la phase de réhydratation du tronc et des branches durant la nuit (Sheil, 2003; Steppe et al., 2015), puis décroît continuent pour atteindre son minimum en fin d'après-midi, vers 16h-18h selon la saison, soit un décalage de cinq heures par rapport au pic du flux de sève. Ce comportement a déjà été observé dans des études antérieures (Herrmann et al., 2016; Herzog et al., 1995; Sheil, 2003).

Pour mieux comprendre l'impact de l'état hydrique des plantes, à travers les mesures dendrométriques, sur la cohérence interférométrique, et en particulier sur la chute matinale observée de γ , nous avons comparé la série chronologique des taux de chute temporelle de γ pendant les 3 heures après l'aube, p_{γ} , (bandes roses Figure IV.2 & 3) avec l'amplitude diurne de ΔRr . Les résultats sont donnés Figure IV.5 ci-dessous.

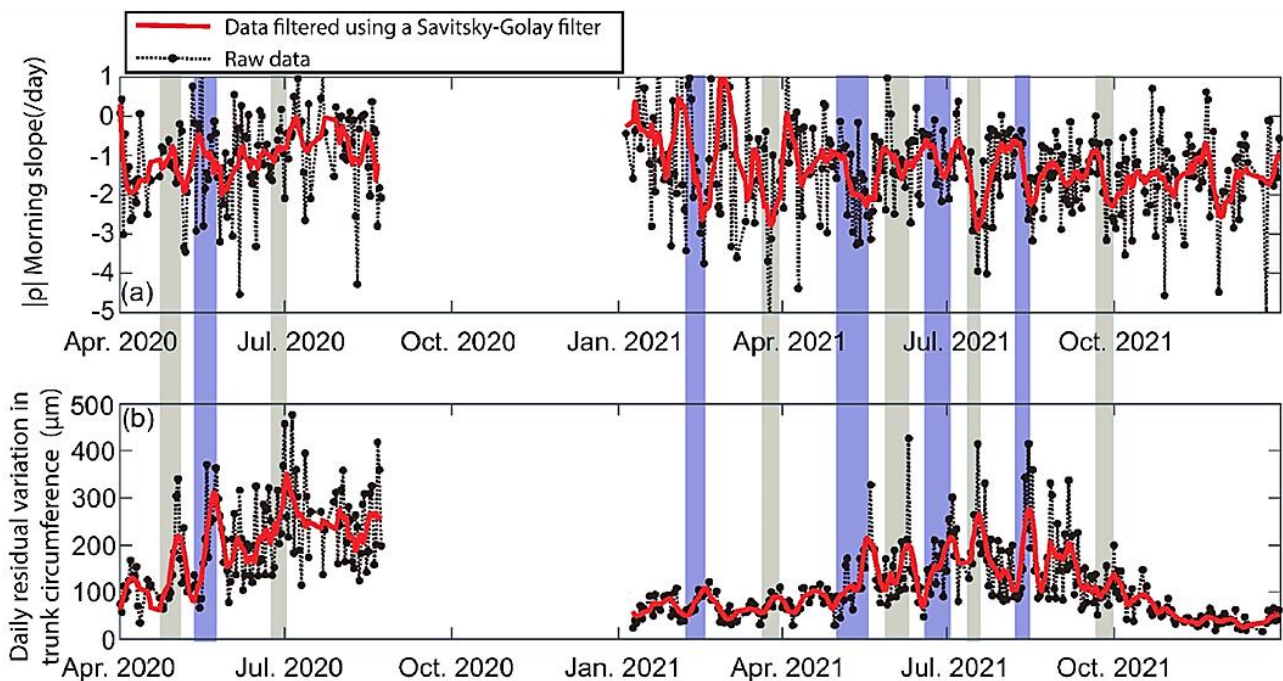


Figure IV. 5 : La corrélation entre l'état hydrique des plantes a travers les variations quotidiennes de la circonférence du tronc et γ : a) Pente de cohérence temporelle du matin (c'est-à-dire 3 h après l'aube) et b) Amplitude journalière de ΔRr ; montrant les données brutes et les données filtrées à l'aide d'un filtre Savitsky-Golay. Des bandes verticales grises et bleues alternées (le changement de couleur est pour la clarté) mettent en évidence plusieurs jours consécutifs d'augmentation de la circonférence du tronc. La série chronologique de septembre à décembre 2021 a été exclue en raison de données manquantes

Nous avons appliqué un filtre Savitsky-Golay (polynôme de degré 5 et fenêtre temporelle de 7 jours) pour réduire le bruit des données brutes ΔR_r et γ . Les résultats montrent pour ΔR_r un signal saisonnier marqué, avec des valeurs faibles pendant la période de dormance (hiver au début du printemps) et une augmentation progressive de début mai à fin septembre, Figure IV.5. Pendant cette période de croissance, ΔR_r a alterné entre augmentation et diminution sur plusieurs jours consécutifs. En revanche, le signal saisonnier est moins marqué pour $p\gamma$, montrant également des oscillations, avec néanmoins des valeurs plus faibles en hiver.

L'analyse visuelle a révélé que la croissance de ΔR_r correspond généralement au taux de baisse temporelle de la cohérence, à l'exception de certaines périodes de jours consécutifs (principalement en juillet 2020). Pendant la période de croissance active (mai-août 2021), la pente de cohérence et le résidu de la circonférence du tronc ont montré des corrélations significatives de -0,39 et -0,71 ($n = 109$ points) respectivement, pour les valeurs brutes et filtrées. Cela confirme la sensibilité de cohérence à l'activité de la végétation, probablement en raison des variations de l'état hydrique dans les arbres d'oliviers.

II.1.4 Effets de la pluie sur la cohérence *in situ*

L'analyse de la pluie sur la cohérence interférométrique a porté sur la période du 4 janvier au 9 mars 2021, durant laquelle environ 47 millimètres de précipitations cumulées ont été enregistrées sur le site d'étude. Les résultats sont présentés sur la Figure IV.6. Les évolutions temporelles de cohérences correspondent, d'une part à celles, γ_{15} calculées avec une ligne de base temporelle constante, $\Delta t = 15$ min (Figure IV.6a) ainsi que celles, $\gamma_{<24}$ calculées pour $t_1 = 0h00$ de chaque jour et Δt variant de 15 min à 24 h (Figure IV.6a). Les périodes de pluie figurent en rectangle bleu avec les lettres alphabétiques.

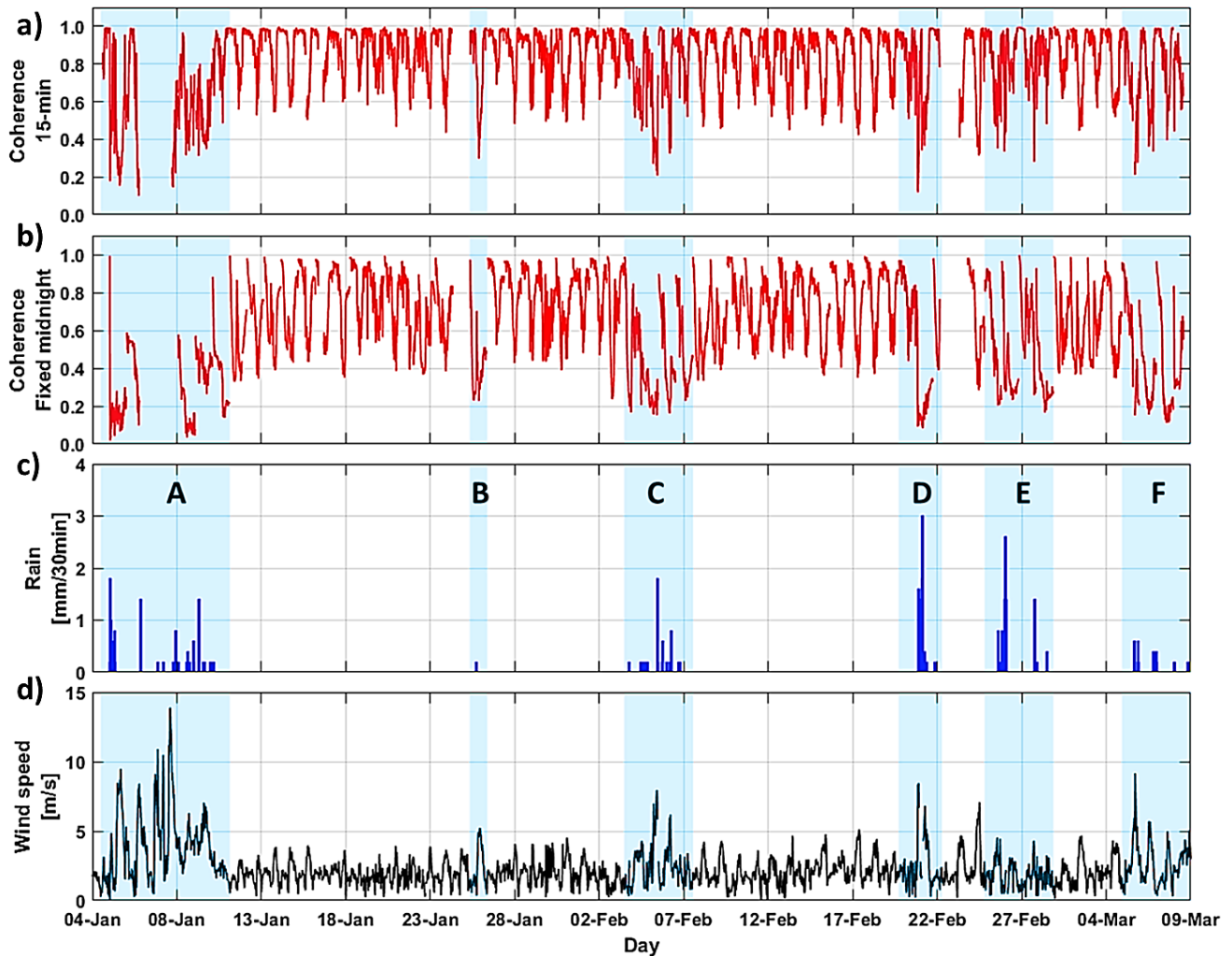


Figure IV. 6 : Mesures *in situ* de la période du 4 janvier au 9 mars 2021 : a) l'évolution de la cohérence avec un intervalle de temps de 15 minutes, b) la décorrélation temporelle de la cohérence avec $\Delta t = 15$ minutes, en fixant t_1 à 00:00, c) les mesures des précipitations, d) la vitesse du vent. Les périodes de pluie sont identifiées par les lettres A, B, C, D, E et F sur les graphes de la figure et sont colorées en arrière-plan bleu.

En analysant la dynamique globale de la cohérence et de la décorrélation à l'exception des jours caractérisés par des précipitations, la cohérence et la décorrélation présentaient généralement une stabilité diurne, avec des moyennes quotidiennes d'environ 0.85 et 0.7 respectivement, associées à une vitesse de vent moyenne de 2.1 m/s, Figure IV.6. Cependant, Les périodes de pluie, accompagnées de vents dépassant les 4 m/s, présentent des chutes significatives de la cohérence.

Les valeurs observées par temps sec pour $\Delta t = 15$ min se rétablissent relativement rapidement après l'arrêt des pluies en raison des faibles variations de l'état de la végétation à l'échelle de 15 min. En revanche, $\gamma_{<24}$ met plus de temps à retrouver son niveau, le temps nécessaire à pour la scène de retrouver son état de temps sec.

La journée du 5 janvier 2021 a été particulièrement remarquable parmi les différentes journées étudiées. En effet, les premières précipitations ont débuté précisément à minuit et 28 minutes, ce qui nous a permis d'avoir une mesure de cohérence, *in situ*, avant leur arrivée. À minuit et quart, $\gamma_{15} = \gamma_{<24} = 0.99$. Cependant, à minuit et demi, elles ont chuté pour atteindre $\gamma_{15} = \gamma_{<24} = 0.27$, représentant une baisse remarquable de près de 0.72, malgré une pluie d'intensité de seulement 0.2 mm. Les précipitations ont ensuite persisté jusqu'à 07h30, totalisant 6 millimètres. À ce moment-là, $\gamma_{<24} \approx 0.1$, tandis que γ_{15} retrouve rapidement une valeur élevée (0.8).

II.1.5 Effets de l'irrigation en goutte-à-goutte sur la cohérence

Le verger d'oliviers étudié bénéficie d'un système d'irrigation goutte-à-goutte constitué d'une paire de tuyaux le long de chaque rangée d'arbres, à une distance de 80 cm du tronc principal, Figure IV.7.

Malheureusement, cette configuration, combinée aux maintenances régulières des tuyaux par les ouvriers, n'a pas permis de détecter les variations du cycle diurne de l'humidité du sol de cette parcelle ni la fréquence des irrigations. En effet, l'irrigation a tendance à se concentrer autour des goutteurs, avec de faibles surfaces mouillées, alors que les sondes de mesures d'humidité du sol (TDR) étaient trop éloignées (80 cm) des tuyaux.

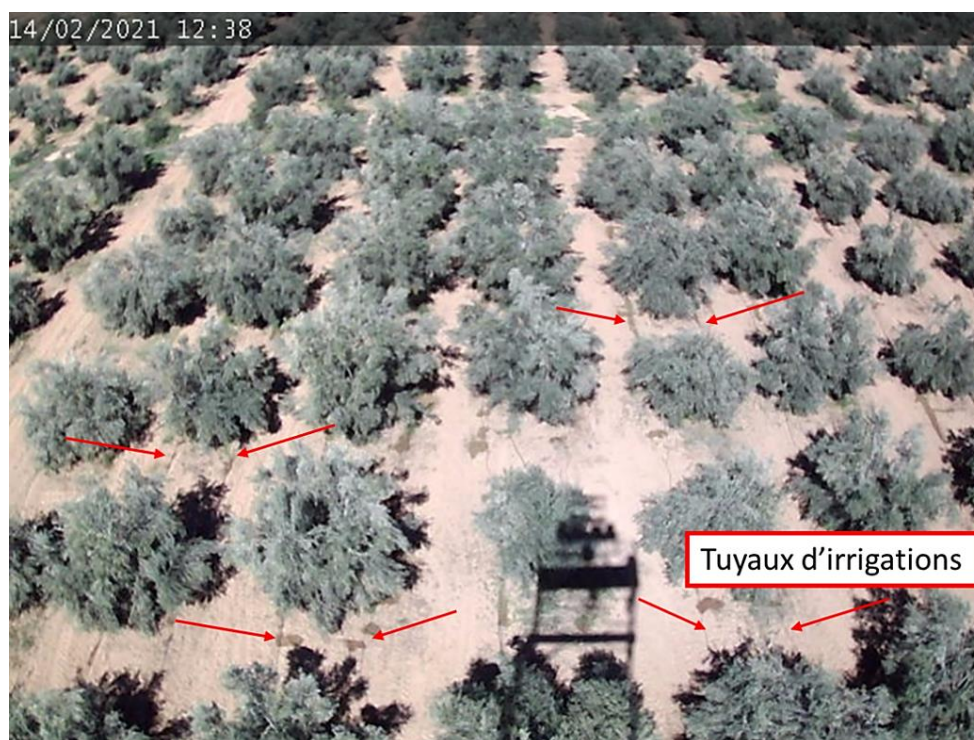


Figure IV. 7 : Photo du verger d'olivier prise le 14 février 2021 à midi par la webcam installée en haut de la tour.

Pour pallier ce problème, nous avons installé, en février 2021, une sonde TDR à une profondeur de 5 cm sous l'un des goutteurs, permettant de déterminer la fréquence d'irrigation, utilisé par l'agriculteur. Les mesures montrent des irrigations régulières, presque tous les deux jours, pendant une période de deux heures, principalement concentrée entre 7h et 10h du matin. Les résultats issus sont présentés dans la Figure IV.8.

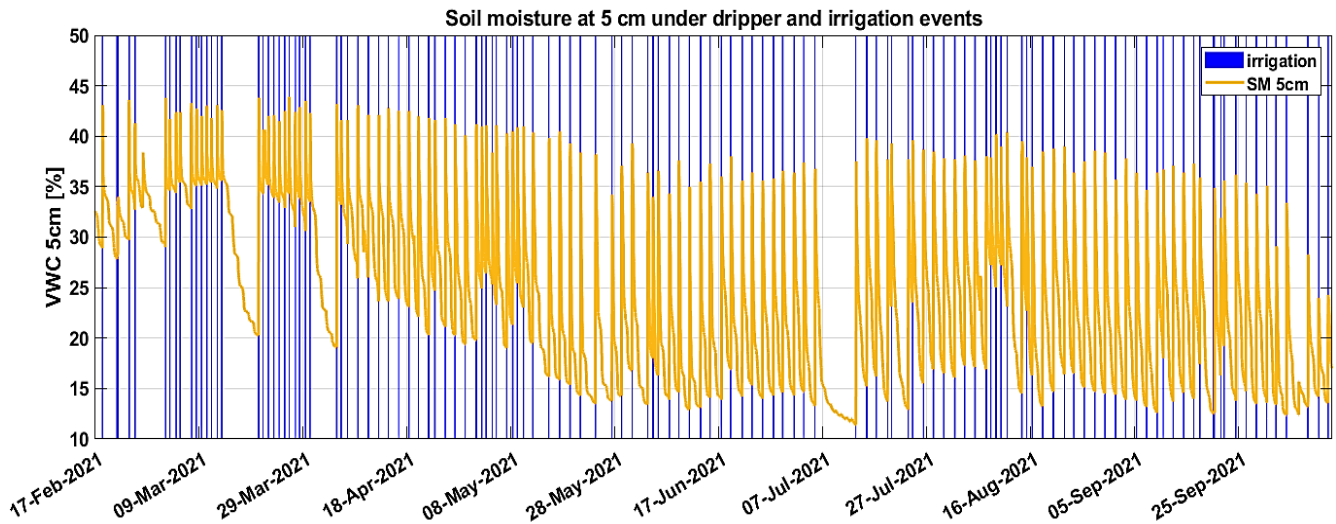


Figure IV. 8 : Mesure de l'humidité superficielle à 5cm sous l'un des goutte-à-goutte avec les événements d'irrigation détectés à partir de ces données marquées par les barres bleues.

L'effet de l'irrigation sur la cohérence a été analysé en calculant les cohérences en utilisant une ligne de base de 2 jours, entre les jours irrigués les jours non irrigués. Les cycles diurnes obtenus sont donnés la Figure IV.9 pour la période allant d'avril à mai 2021, pour les jours avec irrigation (boite a moustache en rouge) et les jours sans irrigation (boite a moustache en bleu), avec la médiane des deux cohérences (jours irrigués et non irrigués).

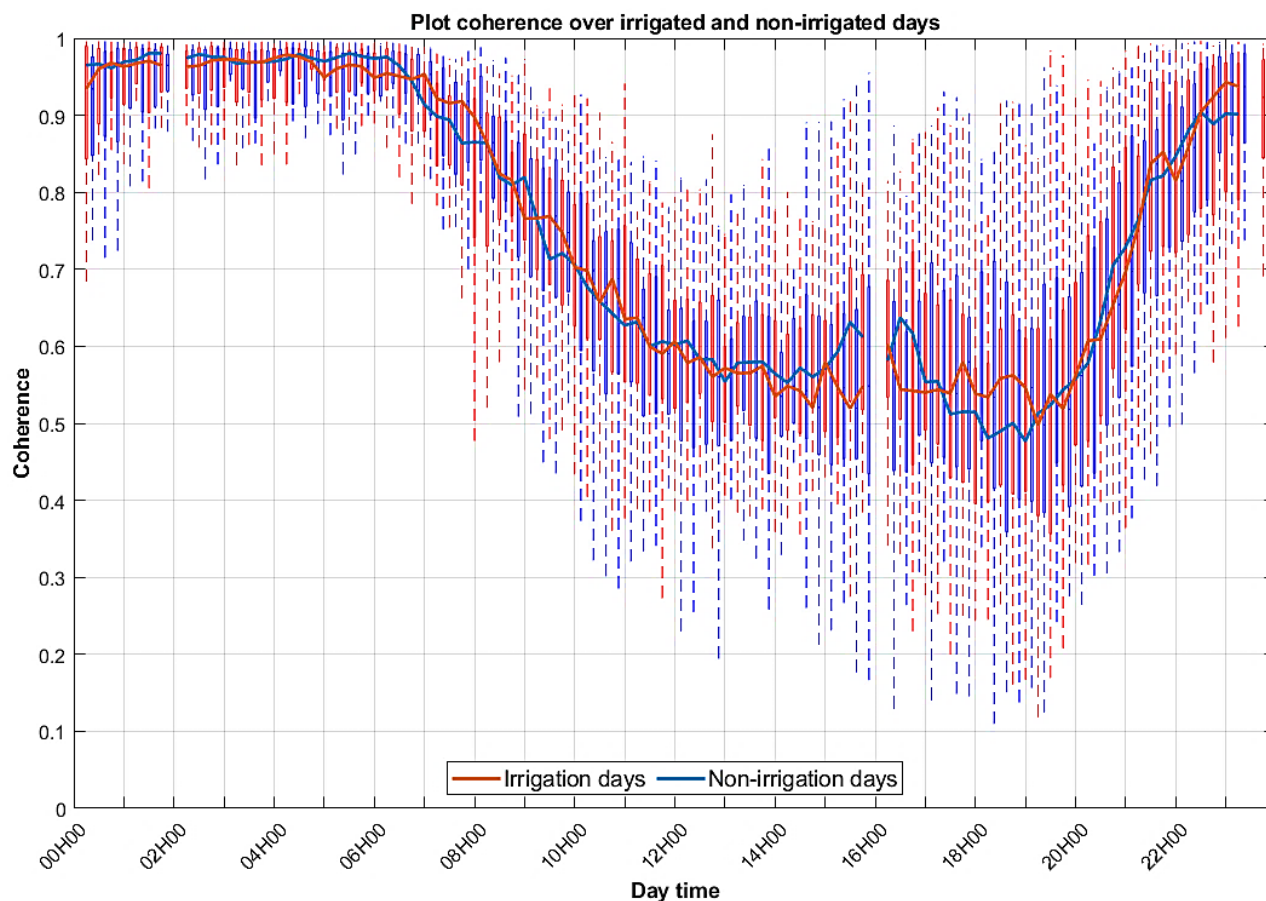


Figure IV. 9 : Les cohérences *in situ* pour la période allant d'avril à mai 2021, avec des lignes de base de 2 jours, ramenées à une échelle de 24 h, pour les jours avec irrigation (boite a moustache en rouge) et les jours sans irrigation (boite a moustache en bleu) avec la médiane des deux cohérences (jours irrigués et non irrigués).

De manière surprenante, aucune différence significative n'a été observée dans le cycle diurne entre les jours irrigués et non irrigués. Cette observation est étayée par un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 0.97$), ainsi qu'un comportement similaire des médianes entre les deux cohérences (Figure IV.9). Ce comportement similaire des cohérences entre jours d'irrigations et sans irrigations peut être attribuée au système goutte-à-goutte qui irrigue uniquement une petite partie du sol le long des tuyaux, Figure 7, laissant le reste du sol sec, ainsi qu'à une irrigation probablement déficitaire.

II.2. Lignes de base de plusieurs jours

II.2.1 L'évolution temporelle de la cohérence

Afin d'analyser le potentiel des données satellitaires caractérisées par des périodes de plusieurs jours (6 ou 12 pour Sentinel-1), nous avons analysé l'évolution temporelle de la cohérence interférométrique pour des lignes de base temporelles $\Delta t = t_2 - t_1$, allant de 15 min à 30 jours.

Nous nous sommes focalisés sur les périodes où l'activité physiologiques est importante, périodes estivales et printanières, pour lesquels les tendances de cohérence étaient plus prononcées en 2020 et 2021. Les résultats sont donnés Figure IV.10. La mesure représentée pour une ligne de base Δt donnée correspond à la médiane de toutes les cohérences calculées pour des lignes de base identique, avec t_0 correspondant à 00h00 de chaque jour de la période considérée. La bande bleue correspond à \pm l'écart-type.

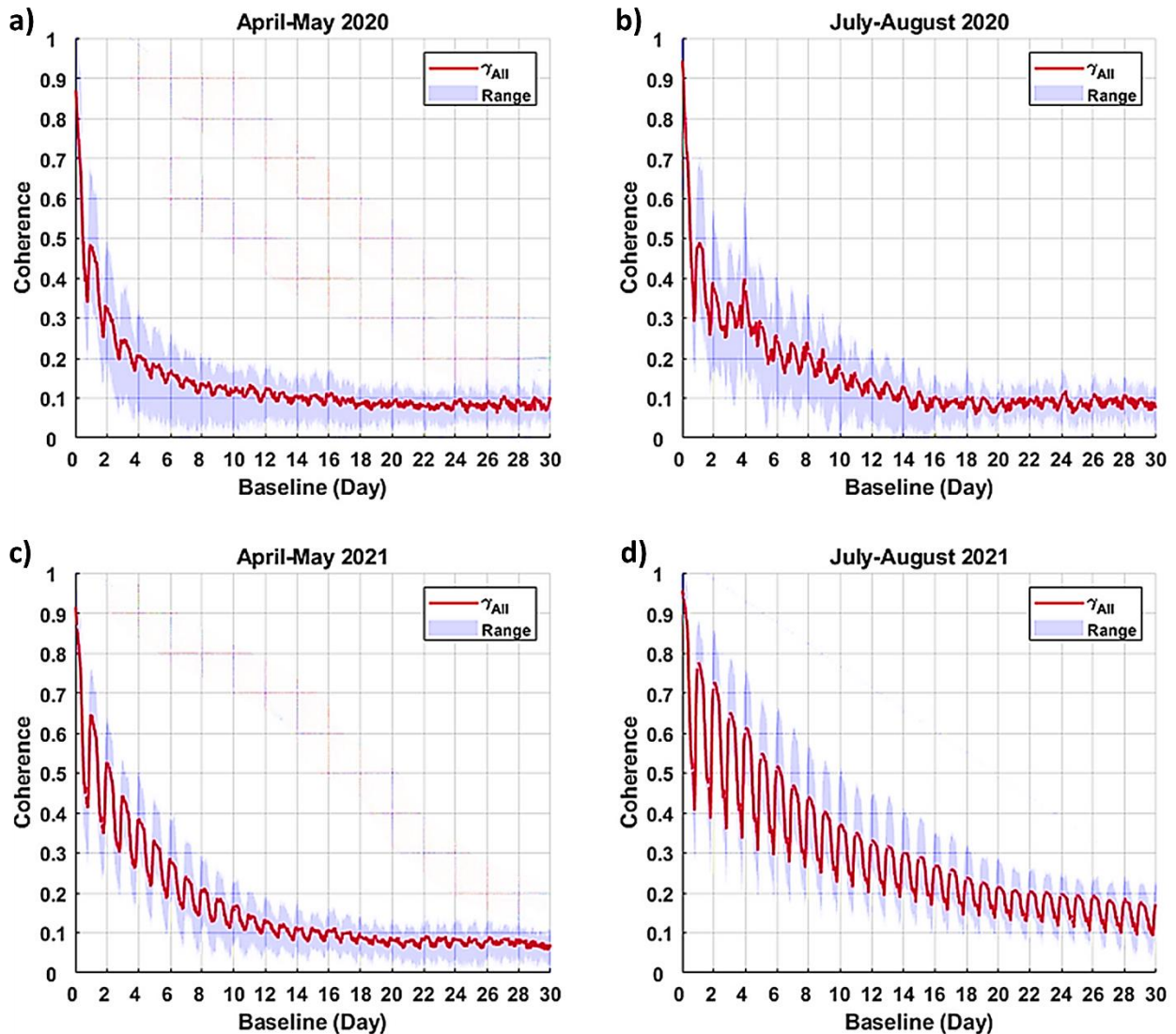


Figure IV. 10 : Evolution de la cohérence pour les lignes de base $\Delta t = t_2 - t_1$ allant de 15 min. à 30 jours (avec un pas de temps de 15 min) : a) avril-mai 2020, b) juillet-août 2020, c) avril-mai 2021, b) juillet-août 2021. La variable t_1 a été fixée à 00h00 chaque jour des périodes correspondantes.

Les résultats montrent des cycles diurnes identiques à ceux observés dans les Figure IV.2 & 3, convolués sur une courbe de décroissance exponentielle. En 2021, cette décroissance s'est avérée plus marquée au printemps qu'en été, avec une cohérence $\gamma < 0.3$ pour $\Delta t > 6$ jours et 12 jours,

respectivement (Figure IV.6 c-d). Cette plus forte décroissance au printemps pourrait être due à une activité végétale plus intense à cette période de l'année, entraînant ainsi une perte de cohérence entre les acquisitions radar. Les valeurs de cohérence plus fortes en été induisent également une discrimination nette des cycles diurnes pour les longues lignes de base avec $\gamma < 0,2$ pour des intervalles de temps $\Delta t > 22$ jours.

En analysant les données de 2020 (Figure IV.10 a-b), nous constatons des tendances similaires avec une décroissance plus forte et un cycle diurne moins prononcé qu'en 2021, pour les deux stades phénologiques. Par exemple, au printemps de 2020, la cohérence était inférieure ou égale à 0,4 pour des intervalles de temps $\Delta t = 4$ jours ou plus, tandis qu'en été, elle était inférieure pour des intervalles de $\Delta t = 6$ jours. Ces différences entre 2020 et 2021 soulignent l'influence des conditions spécifiques de chaque année sur la cohérence radar.

En étudiant de près les données de l'été 2020, Figure IV.10 a), nous avons remarqué des chutes abruptes de la cohérence à certaines dates bien précises. Par exemple, la Figure IV.11 illustre l'évolution de γ pour des lignes de base $\Delta t = t_2 - t_1$ allant de 15 min à 10 jours, pour 2 dates t_1 distinctes : Le 1^{er} et le 3 juillet 2020 à 00h00. On note une chute brutale de cohérence respectivement pour $\Delta t = 2$ et 3 jours, soit les 3 et 6 juillet.

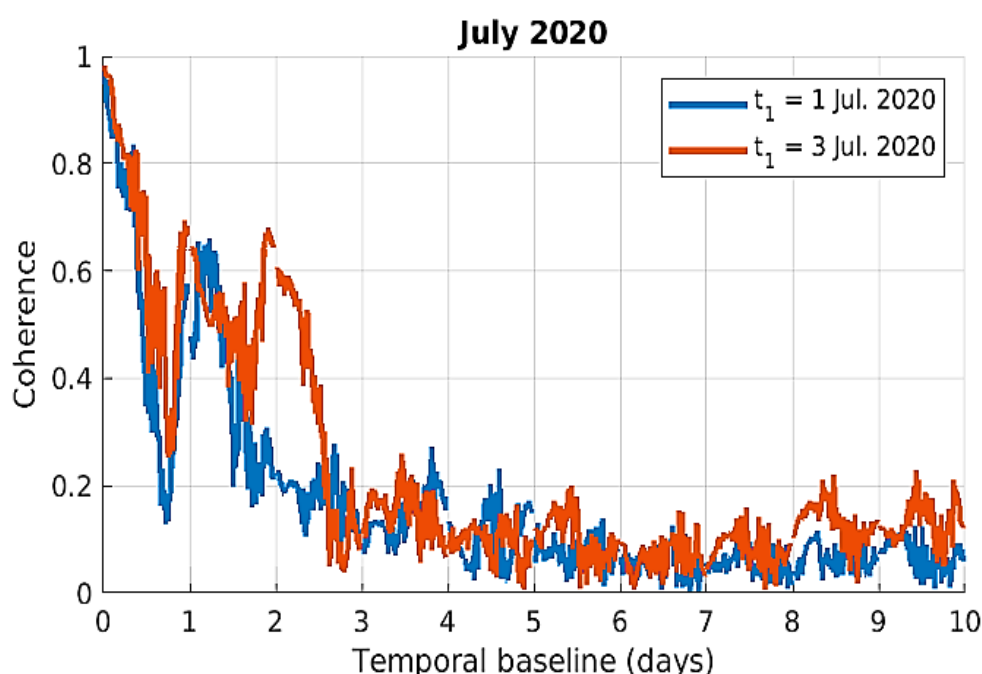


Figure IV. 11 : Dynamique de cohérence, en multi-look, pour les lignes de base temporelles croissantes $\Delta t = t_2 - t_1$ de 0 à 30 jours (avec un pas de temps de 15 min) pour $t_1 = 00:00$ les 1^{er} et 3 juillet 2020 (montrant une baisse soudaine à la fin des 2 et 5 juillet).

Après enquête, il a été déterminé que ces changements n'étaient pas dus ni à des problèmes électroniques ni au système radar *in situ*, puisque qu'aucune chute de cohérence avec une ligne de base de 15 min n'a été observé ces jours-là. De plus, aucune activité agricole ou changements brusques de couverture végétale, ou événement météorologique imprévu (tempête, pluie) n'a eu lieu. Par ailleurs, l'irrigation ne peut en être la cause étant donné qu'aucune chute de cohérence similaire n'a été observée en 2021. La cause la plus probable serait une forte augmentation de la rugosité du sol causée par des animaux sauvages, en particulier les sangliers, régulièrement aperçus dans la parcelle d'oliviers durant l'été de 2020, et qui ont été chassés en 2021.

Ces observations démontrent l'importance de prendre en compte les facteurs saisonniers et environnementaux dans l'interprétation des variations de cohérence interférométrique. L'analyse fine des données permet de mieux comprendre les mécanismes complexes qui influent sur la cohérence radar, et cela est essentiel pour une utilisation optimale de cette technique de télédétection avancée dans la surveillance de la végétation et des écosystèmes terrestres.

II.2.2 Effet de la récolte des oliviers sur la cohérence

Afin de mieux étudier la sensibilité de la cohérence à la géométrie des arbres d'oliviers, nous avons analysé l'impact de la récolte des olives sur la cohérence. En 2021, celle-ci a été effectuée le 11 novembre. La Figure IV.12 illustre la dynamique de la médiane des 40 valeurs de cohérences calculées pour $t_1 = 00h00$ pour tous les jours compris entre le 1^{er} octobre et le 10 novembre, pour les lignes de base temporelles allant de 15 min à 30 jours avec la contrainte : $t_2 < 10$ novembre. Par exemple, si $t_1 = 1^{\text{er}}$ novembre à 00h00, Δt ne peut excéder 10 jours. Les écart-type de la cohérence sont illustrés en violet.

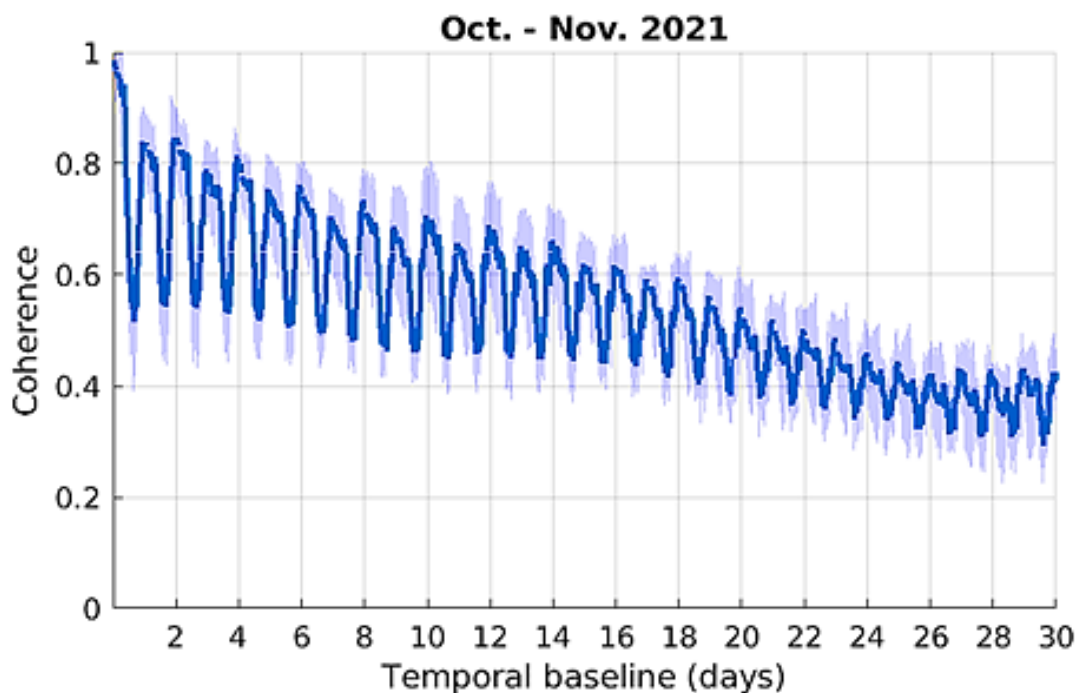


Figure IV. 12 : Dynamique de la cohérence pour les lignes de base temporelles croissantes $\Delta t = t_2 - t_1$ de 0 min à 30 jours (du 1er Octobre au du 10 Novembre 2021 avec un pas de temps de 15 min) en multi-look avec les écart-type en violet du multi-look. La variable t_1 a été fixée à 00h00 chaque jour des périodes correspondantes

Ces courbes sont similaires aux observations précédentes du printemps et de l'été, Figure IV.10, avec des cycles diurnes bien marqués jusque pour des grandes lignes de base, une perte générale plus faible et linéaire plutôt qu'exponentielle. Cela est dû au fait que cette période de l'année se caractérise par des conditions climatiques plus stables et une activité végétale moins intense comparativement au printemps ou à l'été de la même année.

La Figure IV.13 montre l'évolution de la cohérence pour $t_1 = 25$ octobre à 00h00. Elle met clairement en évidence la chute brutale de γ le 11 novembre, date de la récolte (ligne verticale).

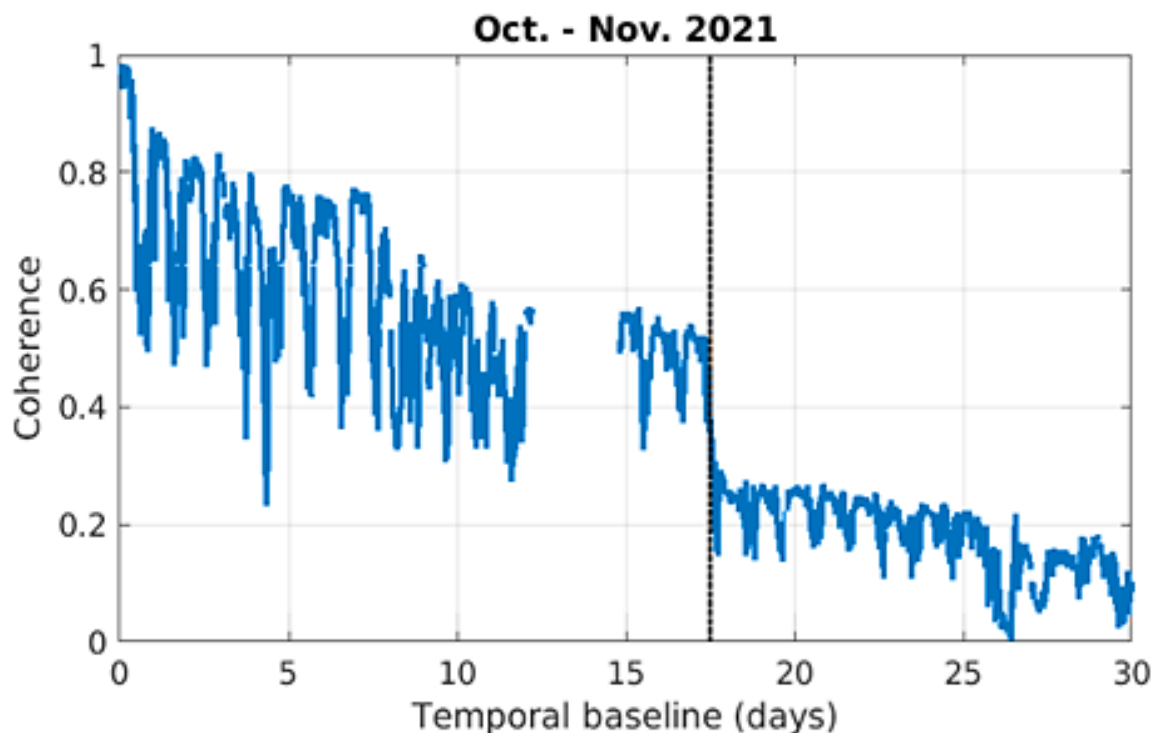


Figure IV. 13 : Dynamique de cohérence pour les lignes de base temporelles croissantes $\Delta t = t_2 - t_1$ de 0 à 30 jours (avec un pas de temps de 15 min) pour $t_1 = 00:00$ le 25 octobre 2021 (montrant les effets de la récolte des olives (c'est-à-dire, 11 Novembre, ligne verticale).

Il convient de noter que la récolte des olives consiste simplement à cueillir les olives sans altérer de manière significative la structure de l'arbre, notamment les feuilles qui ne doivent pas être arrachées. Malgré cela, ces résultats démontrent la sensibilité de la cohérence aux changements liés à la récolte, *i.e.* suppression des olives dans la canopée et également changement d'état du sol en raison du piétinement par les ouvriers agricoles.

Ces observations démontrent que la réponse radar en bande C sur le site d'étude est sensible à la fois aux feuilles et olives de la couverture végétale, ainsi qu'aux changements de géométrie du sol durant la récolte.

II.2.3 Analyse du cycle diurne pour des lignes de bases de plusieurs jours

Afin de nous rapprocher de conditions satellitaires, de période de revisite de plusieurs jours (la meilleure configuration actuellement correspond à 6 jours pour Sentinel-1) nous avons analysé le cycle diurne de γ pour des lignes des bases de 1, 3, 6, 9, 12 et 18 jours. Les résultats sur les trois stades phénologiques étudiées toutes sur l'année 2021 sont montrés dans la Figure IV.14. Le stade phénologique de repos végétal a été exclu pour se concentrer que sur les autres phases de développement végétatif.

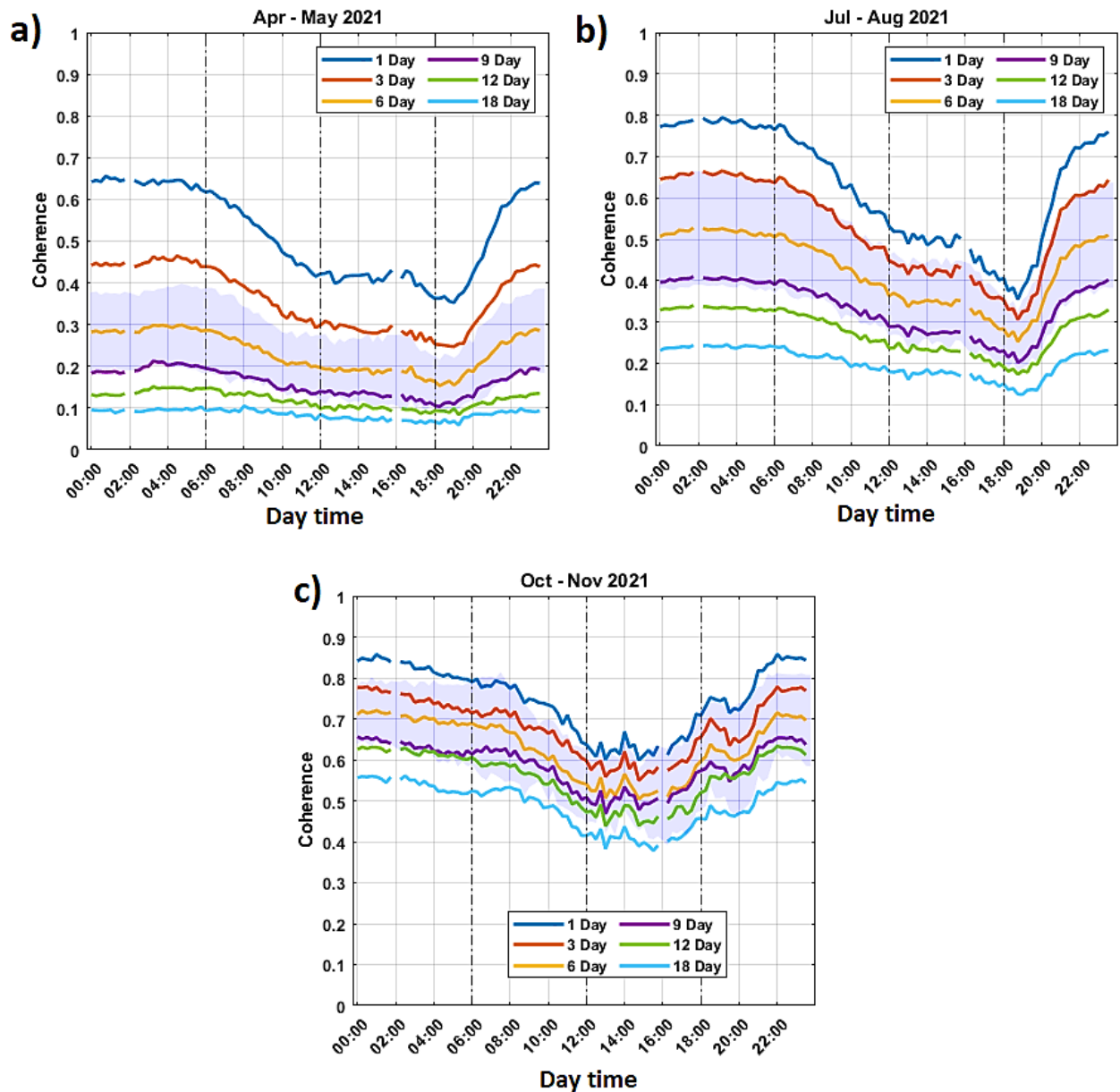


Figure IV. 14 : Cycle diurne de la cohérence médiane, en multi-look, estimée pour les lignes de base $\Delta t = 1, 3, 6, 9, 12$ et 18 j pour (a) Avril-Mai 2021, (b) Juillet-Août 2021 et (c) Octobre-Novembre 2021. Les zones bleu clair indiquent les écart types correspondant à $\Delta t = 6$ jours seulement.

Les résultats obtenus ont montré des cycles diurnes de γ similaires à celles déjà observées sur une journée (Figures IV 2 & 3), notamment, pour un intervalle de temps de 1 jour. Nous constatons également que la moyenne de la médiane de la cohérence ainsi que l'amplitude du cycle diurne diminuaient à fur et à mesure que les lignes de base temporelle augmentaient, Figure IV.10. Ces observations sont conformes à celles précédemment rapportées.

Les résultats montrent également que la cohérence est plus faible au printemps, lorsque la végétation est active, et plus élevée en automne. La signature diurne de la cohérence, sur ces trois périodes, s'est maintenue de manière marquée :

- En printemps pour un intervalle de temps de 6 jours γ est compris entre 0,15 à 0,30
- En été pour un intervalle de temps de 12 jours γ varier entre 0,20 et 0,35.
- En automne pour un intervalle de temps supérieur ou égal à 18 jours γ varie entre 0,40 et 0,55.

Ces résultats suggèrent que le système Sentinel-1, caractérisé par un temps de revisite de 6 jours, principalement en Europe et nord d'Afrique, et de 12 jours dans le reste du monde (ESA, 2020), offre des estimations suffisamment sensibles lors du passage du matin, permettant de corréler les données avec l'état hydrique de la végétation. De plus, les satellites Sentinel-1-A et B lorsqu'ils sont fonctionnels (B est actuellement hors service et va être remplacé par Sentinel-1C), présentent une cohérence allant de 0,25 à 0,70 sur une ligne de base temporelle de 6 jours, en fonction de la saison.

Pour évaluer le potentiel des heures de passage des satellites radar (aux alentours de 6h et 18h selon l'orbite montante ou descendante) nous avons procédé aux calculs de la cohérence, *in situ*, avec différentes lignes de base $\Delta t = t_2 - t_1$, allant de 0 à 30 jours (avec un pas de 1 jour), au même moment du passage de Sentinel-1 sur la parcelle d'olivier étudiée : 06h30 pour l'orbite descendante (n° 52), et 18h30 pour l'orbite ascendante (n°118), (Section IV.3 Chapitre II).

Les cohérences ont été calculées sur les stades phénologiques de 2021, année considérée comme la plus stable (en raison du comportement erratique de la cohérence en 2020, Figures IV.10 & 11). Le stade phénologique de repos végétal a été exclu pour se concentrer que sur les autres phases de développement végétatifs. Les résultats sont montrés sur la Figure IV.15 pour : a) 06h30 et b) 18h30. Les zones bleu clair sur les figures illustrent les écart types pour la période de Juillet-Aout seulement.

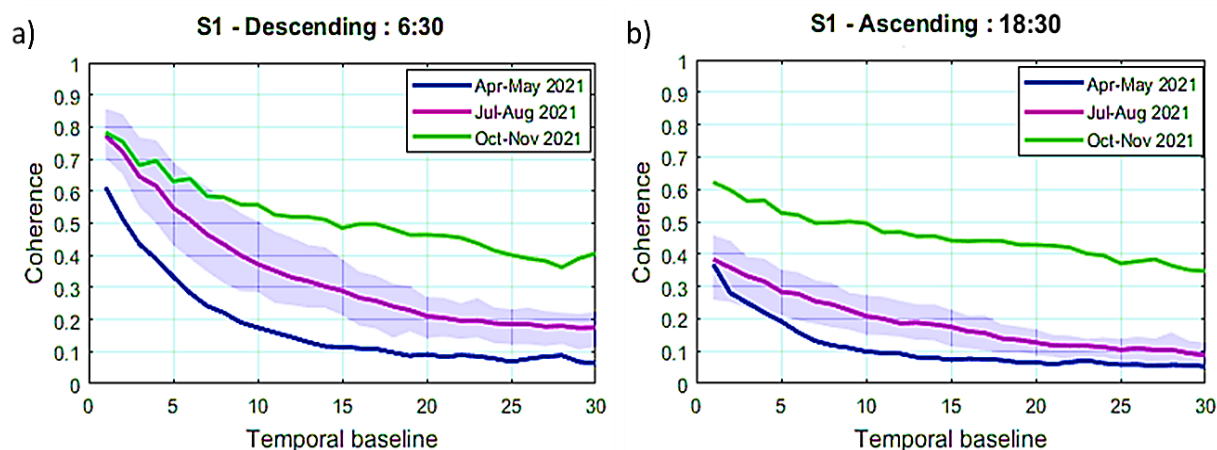


Figure IV. 15 : Dynamique de la cohérence médiane pour les lignes de base croissantes $\Delta t = t_2 - t_1$ de 0 à 30 jour (avec un pas de temps de 1 j) pour trois périodes de 2 mois (a) à 06h30 et (b) 18h30. Les zones bleu clair indiquent les écarts types pour la période de Juillet–Août seulement.

Les variations de la signature temporelle du γ ont été étudiées en fonction du moment de la journée et de la saison. Les résultats ont montré des différences significatives entre le matin et le soir, indépendamment de la période étudiée. Les valeurs de γ étaient globalement plus faibles le soir que le matin, en raison des vitesses de vent plus élevées observées fin de journée (Figures IV 2 & 3).

Pendant la saison estivale, caractérisée par une activité végétale accrue, la cohérence temporelle de γ se maintenait à des niveaux élevés le matin, avec des valeurs supérieures à 0,4 pour des $\Delta t \leq 8$ jours. Cependant, cette cohérence diminuait pour les lignes de base plus longues, atteignant des valeurs faibles et stables autour de $\gamma \approx 0,2$ $\Delta t \geq 18$ jours. De façon similaire, le printemps et l'été affichaient également des signatures temporelles comparables le matin ($\gamma \approx 0,2$ pour $\Delta t \leq 18$ jours).

Durant la période automnale, la cohérence affichait les valeurs les plus élevées par rapport aux 2 autres saisons, présentant des comportements similaires tant le matin que le soir. Cette observation coïncide avec les observations antérieures montrant que les niveaux élevés nocturne de γ sont atteints plus tôt en automne, en raison de périodes de vent plus courtes et moins intenses durant la journée, Figures IV.2 et IV.3. De plus, la stabilité de la canopée, alourdie par les olives, ainsi que l'effet du contenu en eau des olives, qui reste élevé durant la phase de maturation, renforcent la stabilité de la cohérence pendant cette période automnale.

II.3. Comparaison des cohérences estimées : *in situ* et sentinel-1

Compte tenu du fait que les satellites Sentinel-1, de fréquence de répétition de 6 jours, offrent des estimations sensibles, en particulier pendant la période printanière où l'activité végétale est la plus intense. Il était naturel de se pencher sur la comparaison des cohérences interférométriques issues des données radar *in situ* avec ceux de Sentinel-1. La comparaison est montrée dans la Figure IV.12. Les cohérences des données *in situ* sont calculées à partir des cycles les plus proches de l'heure d'acquisition, soit $t_1 = 6h30$ et $18h30$ et $t_2 = t_1 + 6$ jours. Il faut noter que l'estimation de la cohérence sur les 4 cycles encadrant l'heure d'acquisition de Sentinel-1, soit 6h-7h et 18-19h, donne des résultats identiques, une corrélation de $R^2 = 0.81$ étant observée entre ces 2 estimation des cohérences.

La comparaison entre les cohérence *in situ* et Sentinel-1 sont présentés dans la Figure IV.16 a & b respectivement pour les mesures acquises à 6h30 et 18h30. Les cohérences *in situ* ont été calculées en dissociant les couples d'antenne correspondant aux polarisations HH et HV. La Figure IV.16 présente : a) la comparaison avec les données Sentinel-1 pour le passage descendant de l'orbite 52 et b) le passage ascendant de l'orbite 118. Les cohérences provenant de Sentinel-1 sont présentés sous forme de cercles en rouge, tandis que ceux des mesures *in situ* sont en carrés noirs. Les mesures de cohérences *in situ* calculées tous les jours (à partir des cycles les plus proches de l'heure d'acquisition de sentinel-1 avec un $\Delta t = 6$ jours, en haut : 06h30, en bas : 18h30) sont affichées en étoiles en vert pour une meilleure lisibilité de l'évolution temporelle des mesures *in situ* permettant l'observation des tendances de variation. Les cumuls journaliers de pluie mesurées sont aussi présentés sur les figures sous forme de bars bleus.

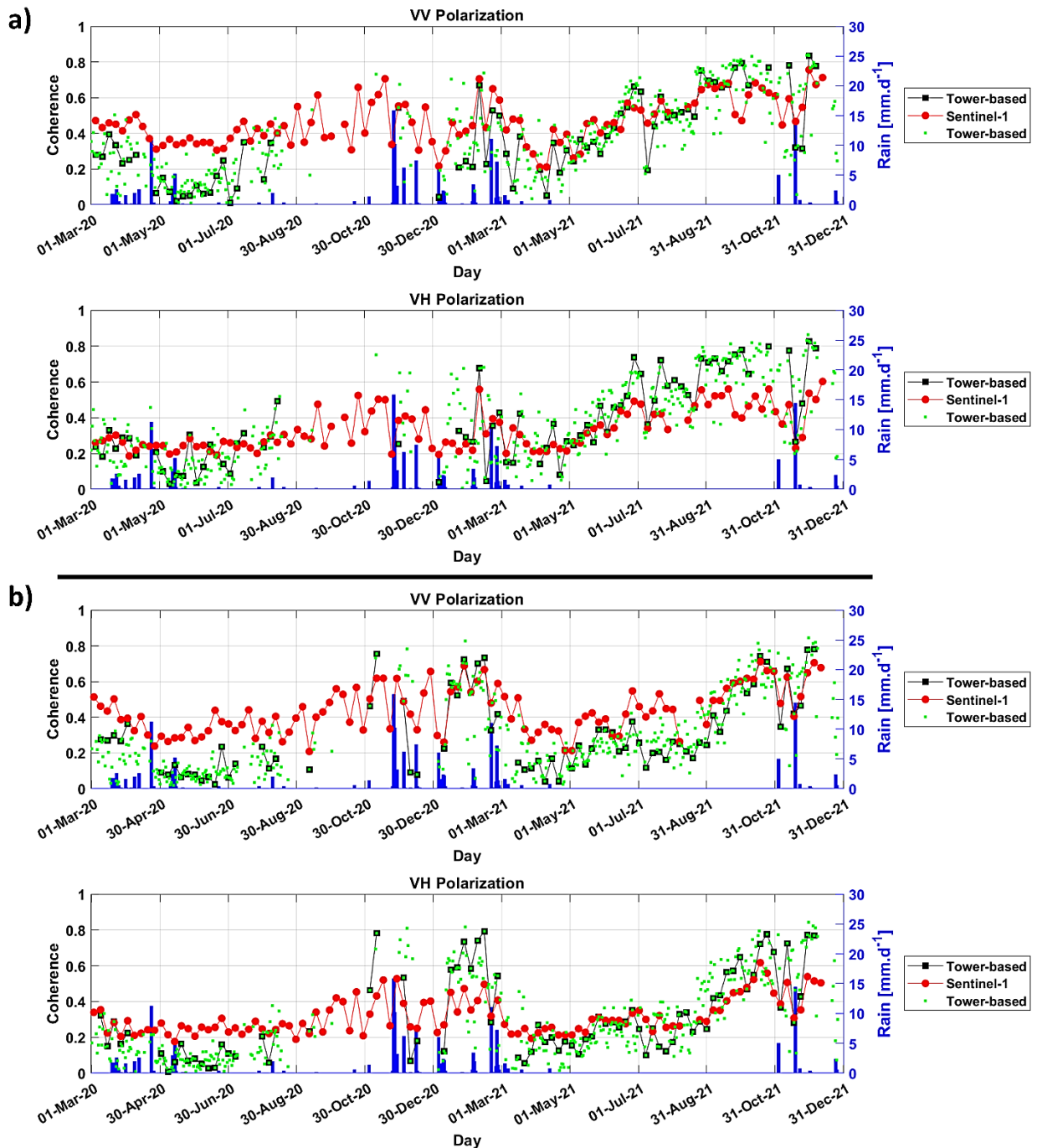


Figure IV. 16 : Comparaison des cohérences en polarisation VV et VH issues des mesures *in situ*, (carrés noirs) et de Sentinel-1 (cercles rouges) pour a) l'orbite descendant (6h30, $\theta = 35.2^\circ$) et b) l'orbite ascendant (18h30, $\theta = 45.6^\circ$). Les cumuls journaliers de pluie mesures sont aussi présentés sous forme de barres bleus.

La concordance entre les données *in situ* et les données Sentinel-1 a été examinée en considérant leur dynamique globale, absolue et saisonnière. On observe un bon accord global des coefficients de corrélation $R=0,68$ et $0,79$ pour les polarisations VV et VH, à 6h30, et $R=0,74$ et $0,83$ à 18h30. Lorsque les polarisations VV et VH des données Sentinel-1 ont été combinées, les valeurs de R étaient respectivement de $0,79$ et $0,83$ pour les orbites 52 et 118. On observe un comportement

globalement similaire quel que soit les polarisation ou l'heure de la journée. Les cohérences sont maximales durant l'hiver (autour de 0.6-0.7), puis diminuent à la fin de l'hiver pour atteindre leur minimum vers mai. Puis elles croissent progressivement et régulièrement pour atteindre de nouveau leur maximum vers fin août pour les mesures du matin, et fin octobre pour celles du soir, le retard de phase avec les mesures le soir correspondant au vents significatifs en fin de journée jusqu'à la fin de l'automne (Figure IV.2 & 3).

Les plus grandes différences entre les cohérence *in situ* et Sentinel-1 apparaissent à l'été et l'automne 2021 en polarisation VH le matin, où les valeurs de cohérence *in situ* sont supérieurs de 0.3 à celles de Sentinel-1 (Par exemple, le 22 juillet 2021, γ *in situ* affichaient 0.72 tandis que celles de Sentinel-1 0.42. De manière similaire, le 26 octobre 2021, les valeurs étaient de 0.8 pour les mesures *in situ* contre 0.56 pour Sentinel-1). D plus, une chute de la cohérence a été observée le 3 juillet, et cela pour les 2 systèmes, dont nous ignorons la cause. On peut noter les valeurs minimales quasi nulles pour les cohérences *in situ* par rapport au seuil minimal $\gamma = 0.2$ déjà observé comme niveau de bruit pour les cohérences de Sentinel-1 (Frison et al., 2018). Il apparaît que les cohérences Sentinel-1 présentent des fluctuations à l'automne 2020 qui ne peuvent être analysées d'avantage en raison de problèmes techniques à cette période empêchant les acquisitions *in situ*. Enfin, il y a peu de différences entre les cohérences en polarisation VV et VH pour les mesures *in situ*, alors que des valeurs supérieures en polarisation VV sont observées pour Sentinel-1, les différences pouvant atteindre jusqu'à 0.3 en août 2021 le soir ($\gamma = 0.6$ et 0.3 respectivement).

On peut également noter la sensibilité de γ aux épisodes pluvieux, phénomène déjà souvent observé par le passé (Ullmann et al., 2019; Villarroya-Carpio et al., 2022; Villarroya-Carpio & Lopez-Sanchez, 2023; Zhao et al., 2021).

III. Analyse du coefficient de rétrodiffusion

Dans cette section, nous procédons à l'analyse des intensités du signal radar *in situ*, les comparant aux paramètres environnementaux, aux mesures physiologiques. L'intensité $I = \frac{P_r}{P_e}$ (P_r et P_e désignant respectivement les puissances reçues et émises par les antennes) du signal radar a été calculée pour des distances comprises entre 25 et 40 m. Elle est directement proportionnelle au coefficient radar de rétrodiffusion σ^0 (Section IV.2.3 Chapitre II). Toutefois, les réponses radar ont été calibrées de manière relative (en prenant l'impulsion de la séquence A du 1^{er} mai 2020 à minuit comme référence). Il faut donc se rappeler la calibration absolue n'a pas encore été faite pour les résultats présentés ici, qui peuvent donc être vus comme des résultats préliminaires. Nous terminons cette partie par une comparaison avec l'évolution temporelle de σ^0 estimée à partir des données Sentinel-1.

III.1. Observations à l'échelle annuelle

A la différence des cohérences, les intensités de la réponse radar en polarisation VV, VH, et HH (respectivement I_{VV} , I_{VH} , et I_{HH}) montrent des différences significatives. La corrélations (R) étaient de l'ordre de 0.47, 0.73 et 0.42 respectivement entre les polarisations VV-VH, VV-HH et VH-HH, sur la période qui s'étale du 1^{er} Mars 2020 au 31 décembre 2021. Aussi les intensités dans les 3 polarisations sont présentées séparément. La Figure IV.17 présente la comparaison de l'évolution temporelle de I_{VV} , I_{VH} , et I_{HH} avec les paramètres environnementaux et mesures physiologiques WS , VPD , ETR , les précipitations, ΔR_r , $Sapflow$, ainsi que l'humidité du sol à 10 cm) pour la période s'étendant du 1^{er} mars 2020 au 31 décembre 2021. Les courbes en noirs correspondent à un lissage effectué par une moyenne gaussienne glissante sur deux jours (analogues à celles de la Figure IV.1).

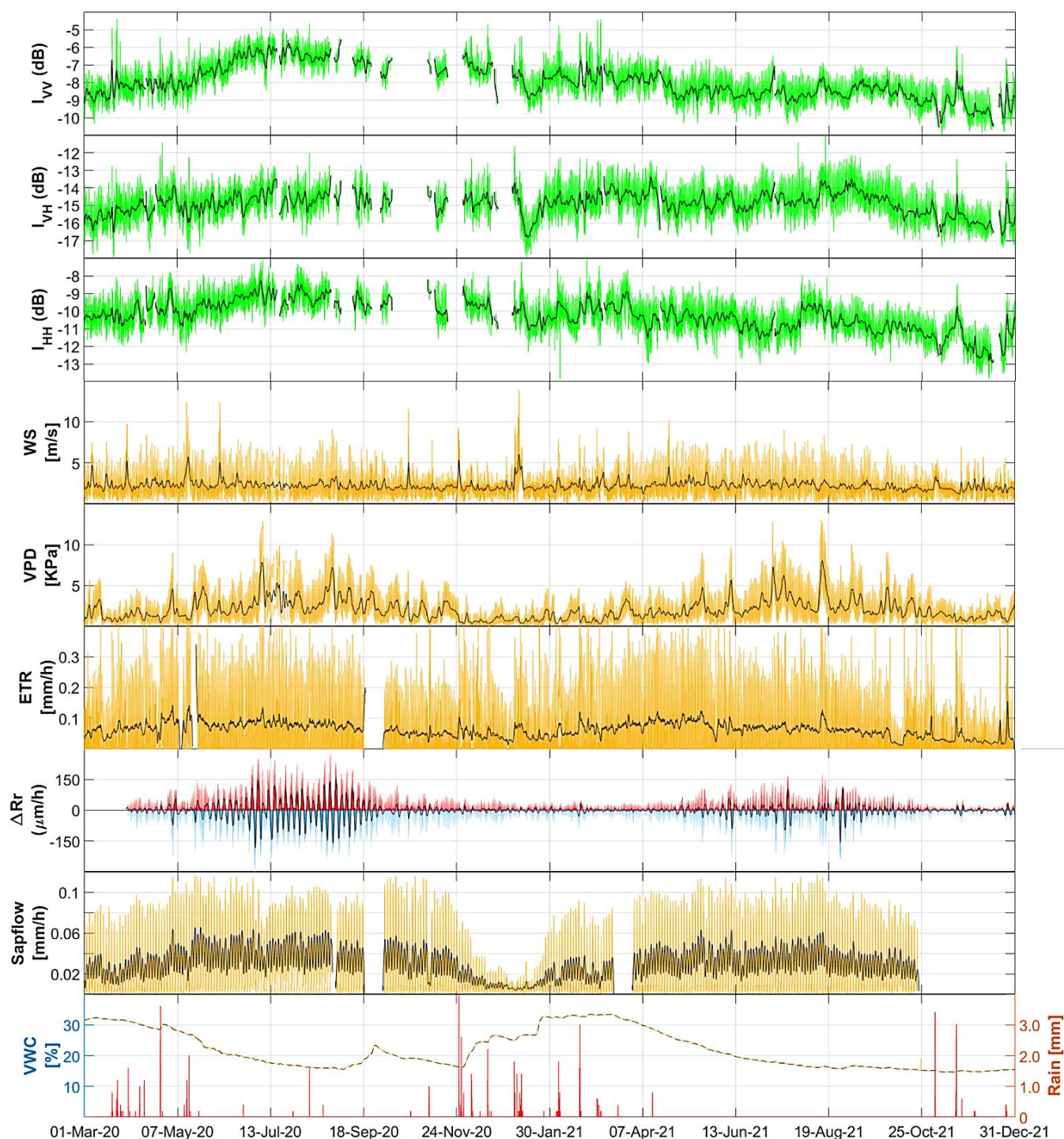


Figure IV. 17 : Séries chronologiques des intensités I , en bande C, en plus des paramètres environnementaux et mesures physiologiques pour la période 2020-2021. Du haut en bas : Les courbes en verts représentent les mesures d'intensités, respectivement, en polarisation VV, VH et HH. Les courbes en jaunes représentent les paramètres environnementaux et les mesures physiologiques : WS (Vitesse du vent), VPD (déficit de pression de vapeur), ETR (évapotranspiration réel), ΔRr (variations résiduelles dendrométriques des troncs d'arbres) avec courbes rouges expansions positifs et rouges contractions négatives des troncs d'arbres, $Sapflow$ (les flux de sèves), VWC (l'humidité du sol à 10cm) ainsi que $Rain$ (les précipitations) en rouge. Les courbes en noirs dans les tracés correspondent à la tendance des mesures utilisant une moyenne mobile pondérée gaussienne sur deux jours.

Les intensités radar ne présentent pas de cycles saisonniers prononcés avec des amplitudes annuelles ≤ 7 dB. En se concentrant sur l'année 2021 pour laquelle la série de mesure est quasi continue (à la différence de 2020), le cycle saisonnier le plus marqué est celui de I_{HH} , où on observe une décroissance lente et progressive de janvier à juin, une remontée rapide en juillet, et à nouveau une décroissance progressive jusqu'en décembre à l'exception d'un pic en octobre. La même tendance, quoique moins nette, est observée également pour I_{VV} . Ces tendances ne sont pas observées en 2020 où le signal augmente au contraire, de mars à juin (respectivement de 3 et 2.5 dB pour I_{VV} et I_{HH}), pour décroître progressivement ensuite. En polarisation HV, I_{HV} reste relativement stable pour l'ensemble de la période 2020-2021.

Un événement remarquable s'est produit en janvier 2021, lorsque toutes les 3 polarisations ont enregistré une baisse abrupte sur une période de 8 jours (atteignant jusqu'à 3 dB pour I_{HV}). Cette chute coïncide avec une tempête, caractérisée par des vents forts et des précipitations continues durant cette période (environ 14 mm de pluie avec des vitesses de vent supérieures à 5 m/s). Par la suite, le signal radar a mis près d'un mois pour retrouver son niveau antérieur à cet événement, comme le montre la Figure IV.17.

Malgré ce comportement globalement stable de I , des corrélations notables ont été observés avec ETR et Sapflow durant 2020-2021 : des coefficients de corrélation de 0,35, 0,30 et 0,45 pour l' ETR , et de 0,19, 0,18 et 0,27 pour les flux de sève, respectivement pour les polarisations VV, VH et HH.

On peut remarquer également une corrélation indirecte élevée entre l'intensité radar et les fortes valeurs de VPD (> 5 KPa en périodes estivales), avec des coefficients R de 0,64, 0,72 et 0,36 pour les polarisations VV, VH et HH respectivement. Cette corrélation indirecte peut être attribuée à l'impact du VPD sur la teneur en eau des arbres, sous des VPD et ETR élevés en périodes estivales, pour laquelle les arbres ont tendance à fermer leurs stomates pour minimiser la perte d'eau au niveau des feuilles (Grossiord et al., 2020; Inoue et al., 2021; Medrano et al., 2002). Cette dynamique affecte à son tour les flux de sève dans le xylème, les variations du diamètre des troncs, et par conséquent l'état hydrique global des arbres (Čermák et al., 2007; Monteith, 1995; Pfautsch et al., 2015).

De plus, il a été observé des liens étroits entre les variations d'intensités radar et les événements pluvieux. Cette sensibilité sera discutée en détails dans la section III.3 de ce chapitre.

III.2. Echelle diurne

Les évolutions moyennes diurnes des intensités radar en polarisations VV, VH et HH, ont été comparés à celles de : flux de sève, l'*ETR*, et les variations résiduelles dendrométriques des troncs des d'arbres Pour chaque stade physiologique des oliviers. Les résultats obtenus sont présentés sous formes de boîtes à moustaches, Figures IV.18 & 19 respectivement pour les années 2020 et 2021. Le pas de temps correspond à celui des acquisitions concernées (15 min pour les paramètres radar, 30 min pour les autres mesures). Chaque boîte à moustache, Figure IV.18 et IV.19, représente la médiane, 1er et 3ème quartile, ainsi que le minimum, la médiane et maximum.

Les bandes roses indiquent le début de l'augmentation des intensités, par rapport aux mesures nocturnes (de minuit à 6 heures du matin), jusqu'à ce que la médiane de *WS* excède la médiane des valeurs nocturne de 10 %. Les bandes bleues débutent à la fin de la période marquée en rose, jusqu'à ce que les intensités retrouvent ses valeurs nocturnes. La période diurne correspondant donc aux bandes roses et bleues.

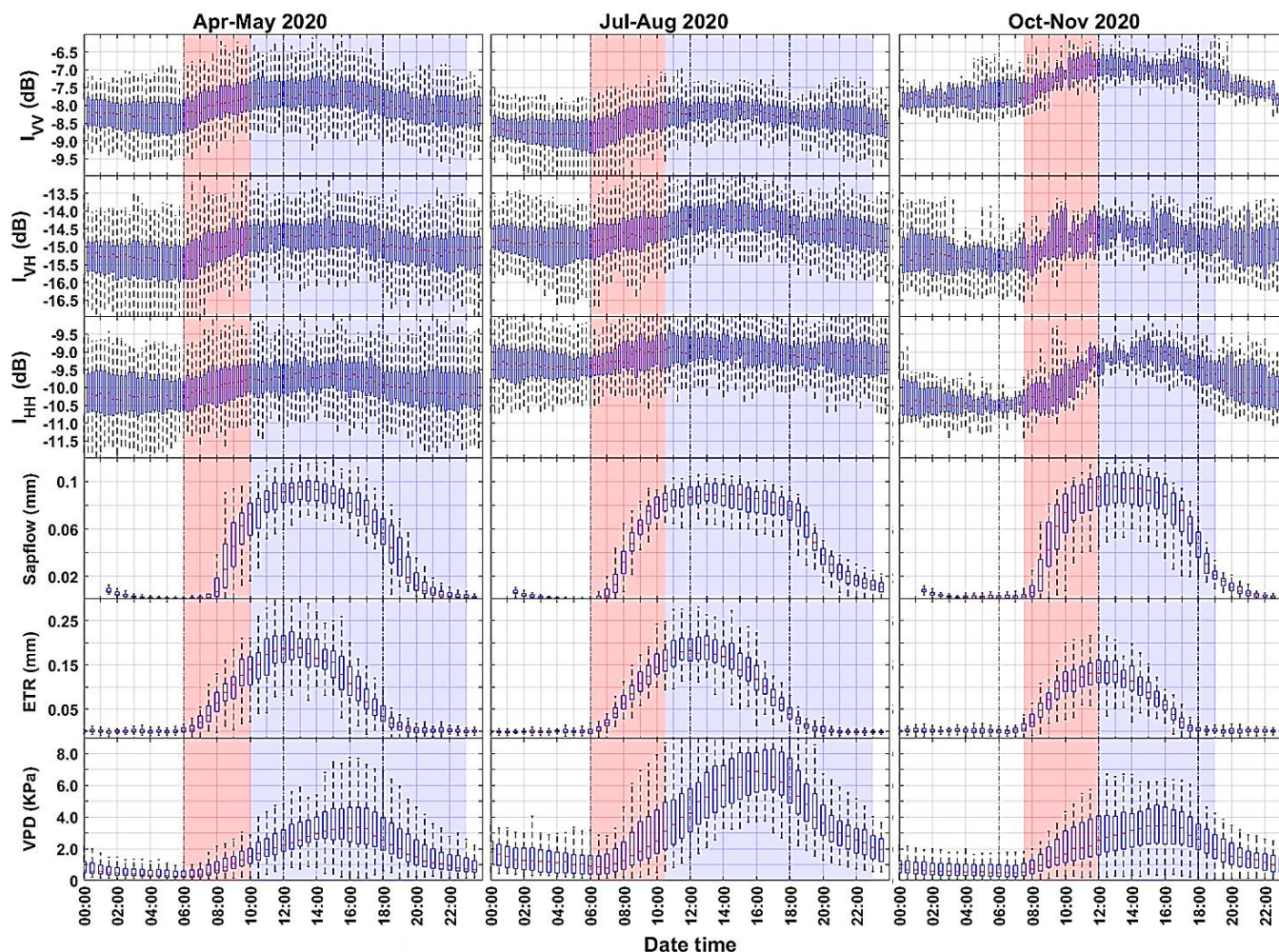


Figure IV. 18 : Dynamique quotidienne sous forme de boîtes à moustaches sur les stades phénologiques de 2020 (les barres d'erreur sont min et max) de (de haut en bas) : Les intensités (I) relative aux coefficients de rétrodiffusions en polarisation VV, VH et HH sur 15 min, les flux de sèves (*Sapflow*), l'évapotranspiration (*ETR*) et les variations résiduelles des troncs d'oliviers (ΔR). De gauche à droite : résultats pour quarts périodes de 2 mois de 2020 ramenés à une échelle de 24 h. Les bandes roses indiquent le début de la diminution diurne progressive des I pour chaque stade phénologique étudiée, jusqu'à ce que la médiane des vitesses de vent enregistrées pour chaque stades phénologiques excède la médiane nocturne de 10 % (début de la bande bleu). Les bandes bleues indiquent le reste de la période jusqu'à ce que I retrouve ses valeurs nocturnes.

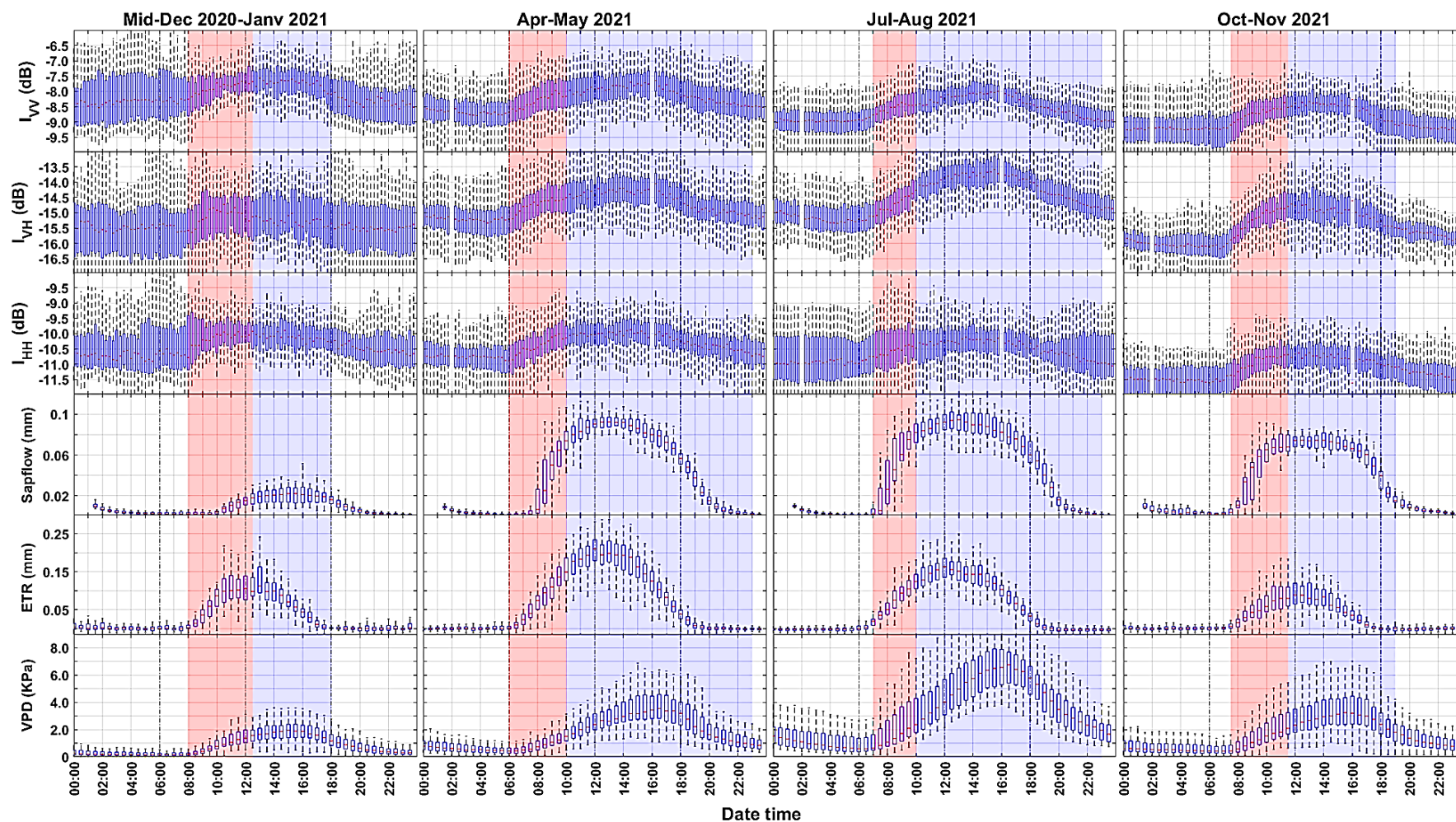


Figure IV. 19 : Dynamique quotidienne sous forme de boîtes à moustaches sur les stades phénologiques de 2021 (les barres d'erreur sont min et max) de (de haut en bas) : Les intensités (I) relative aux coefficients de rétrodiffusions en polarisation VV, VH et HH sur 15 min, les flux de sèves (*Sapflow*), l'évapotranspiration (*ETR*) et les variations résiduelles des troncs d'oliviers (ΔR). De gauche à droite : résultats pour quarts périodes de 2 mois de 2020 ramenés à une échelle de 24 h. Les bandes roses indiquent le début de la diminution diurne progressive des I pour chaque stade phénologique étudiée, jusqu'à ce que la médiane des vitesses de vent enregistrées pour chaque stades phénologiques excède la médiane nocturne de 10 % (début de la bande bleu). Les bandes bleues indiquent le reste de la période jusqu'à ce que I retrouve ses valeurs nocturnes.

En analysant les intensités, I , des 3 polarisations, des cycles diurnes bien définis sont observés à l'exception de la période hivernale (période caractérisée par un cycle diurne de faible amplitude d'environ 0.76 dB, 0.64 dB et 0.74 dB pour les polarisations VV, VH et HH.). Les cycles diurnes, sur la période étudiée, sont caractérisés par un comportement nocturne stable, avec le début de l'activité végétale correspond à une augmentation de l'intensité radar, atteignant ses valeurs maximales au même moment que *ETR* et *Sapflow* ; entre 12h-14h en printemps et été, et 12-13h en automne. Le signal radar reste ensuite relativement stable jusqu'en milieu d'après-midi (≈ 16 h), après quoi une baisse progressive est observée jusqu'à retrouver ainsi les niveaux nocturnes dans la soirée.

Les valeurs moyennes observées en 2020 sont supérieures à celles de 2021, avec une différence d'environ 1 dB en polarisations VV, et HH, confirmant les observations Figure IV.18 & 19.

Stade de repos végétatif (mi-décembre-janvier)

À ce stade où l'activité phénologiques des arbres d'oliver est réduite, les intensités radar suivent un schéma diurne peu prononcé. Les amplitudes sont plus marquées entre 18 heures et 8 heures que pendant la journée (de 9h à 17h), et ce, pour toutes les polarisations. Cette fluctuation d'amplitude des intensités observée (entre 18h et 8h) est attribuée aux précipitations, la plupart des pluies (plus de 90 %) se concentrant sur cette plage horaire.

Durant la journée (de 9h à 17h), les intensités semblent avec une tendance généralement stable, ce qui pourrait être attribué à la synchronisation de la rétrodiffusion, en bande C, avec le contenu en eau de la canopée, qui subit peu de variations en raison du ralentissement de l'activité physiologique des oliviers, comme en témoin les faibles taux de *Sapflow*, à l'exception de quelques fluctuations sur les intensités observées.

Les variations moyennes diurne des intensités sont d'environ 0.76 dB, 0.64 dB et 0.74 dB, respectivement, pour les polarisations VV, VH et HH.

Stade de la floraison (avril-mai)

Durant le stade de floraison (avril-mai), qui se caractérise par d'importantes changements tant au niveau de l'activité physiologique et de structure géométrique des oliviers, nous avons observés un cycle diurne plus régulière et homogène des intensités, avec des amplitudes plus centrées

autour de la médiane, et se distingue nettement par rapport à celui observé pendant le stade de repos végétal.

Le cycle diurne des intensités I est présente une stabilité durant la nuit, (-8,6 dB, -15,2 dB et -9 dB pour I_{VV} , I_{VH} et I_{HH} , en 2021), suivi d'une ascension progressive dès 6 heures du matin, en corrélation avec l'augmentation de l' ETR jusqu'à midi. Cette augmentation est synchronisée avec les pics moyens atteints par les flux de sève et l'évapotranspiration, qui atteignent respectivement environ de 0,1 mm/30min et 0,3 mm/30min.

De midi et jusqu'à 16h, lorsque le VPD atteint un maximum moyen de 3,55 KPa, I demeure relativement stable, avec des valeurs autour de -7,65 dB, -14,10 dB et -10,04 dB pour les polarisations VV, VH et HH en 2021. Après cette période, il entame une décroissance progressive jusqu'à retrouver ses valeurs nocturnes initiales.

Stade du durcissement du noyau (juillet-août)

Pendant ce stade de développement, les mesures d'intensités ont enregistré les variations diurnes les plus prononcées de toute l'année 2020 et de toute l'année 2021, Figure IV.18 et IV.19. Les différences moyennes, entre les valeurs minimums nocturne et les maximums atteints durant la journée pour l'année 2021, étaient d'environ 0,97 dB, 1,49 dB et 0,81 dB pour les polarisations VV, VH et HH, respectivement. Les intensités ont montré également une baisse générale d'environ 0,5 dB sur l'ensemble des mesures en polarisation VV, tandis que le comportement moyen en polarisation VH présente une augmentation diurne plus marquée par rapport aux mesures effectuées pendant le stade de floraison.

Ces différences de comportement en la polarisation VV et VH, peuvent s'expliquer, en prenant en compte les conditions météorologiques et physiologiques spécifiques des oliviers discutés précédemment pour ce stade, par la sensibilité accrue de la polarisation VV à l'humidité superficiel faible du sol, plus sec, tandis qu'à VH, a sa sensibilité accrue au changement de l'activité de la canopée durant ce stade (Baghdadi et al., 2017; Greifeneder et al., 2018; Vreugdenhil et al., 2018).

Nous avons observé aussi que les maximums des I , quelle que soit la polarisation, coïncide avec les pics du VPD ver 16h. Après ce moment, les I commencent à diminuer, revenant à leurs niveaux nocturnes, comme l'illustre les Figures IV.18 et IV.19. Cette tendance peut s'expliquer en partie par l'augmentation continue de la demande climatique, ainsi que par la fermeture

progressive des stomates pour éviter la transpiration en raison du stress hydrique, avec une période d'activité prolongée en raison de la durée accrue de la journée, limitant ainsi la perte d'eau des arbres (Chaves et al., 2003; Larsen et al., 1989).

Stade de la maturation des fruits (octobre -novembre)

En examinant les mesures radar *in situ*, durant ce stade phénologique de maturation des fruits, on remarque que les valeurs d'intensités avaient les niveaux les plus bas sur l'ensemble des stades phénologiques que ça soit pour 2020 ou pour 2021. De plus, nous avons observé que les *I* étaient principalement influencées par le *VPD* et le flux de sève. Les coefficients de corrélation (*R*) s'élevaient à environ 0,15, 0,31 et 0,57 pour le *VPD*, et à environ 0,33, 0,55 et 0,66 pour le flux de sève, respectivement pour les polarisations VV, VH et HH. En revanche, les variations moyennes diurnes étaient plus marquées pour la polarisation VH, atteignant environ 1,11 dB, que pour VV et HH, qui étaient respectivement d'environ 0,91 dB et 0,71 dB pour l'année 2021.

Ces observations mettent clairement en évidence l'influence des propriétés de la canopée sur le signal radar, en particulier en ce qui concerne la polarisation VH, par rapport à la moyenne annuelle. Cela pourra s'expliquer surtout par le fait qu'à ce stade, le contenu en eau des olives, qui caractérise la canopée, reste élevé, dépassant généralement les 60% (El Qarnifa et al., 2019; Ortega-García et al., 2008).

III.3. Effets de la pluie

L'effet temporel des précipitations sur les intensités est examiné dans cette section, en se concentrant sur la période allant du 4 janvier au 9 mars 2021, pendant laquelle environ 47 millimètres de pluie ont été enregistrés sur le site d'étude. La Figure IV.21 présente les résultats pour cette période spécifique, avec l'évolution de la rétrodiffusion en polarisation VV, VH et HH, ainsi que les précipitations. Les périodes pluvieuses (A, B, C, D, E et F) ont été colorées en arrière-plan bleu sur la Figure IV.20.

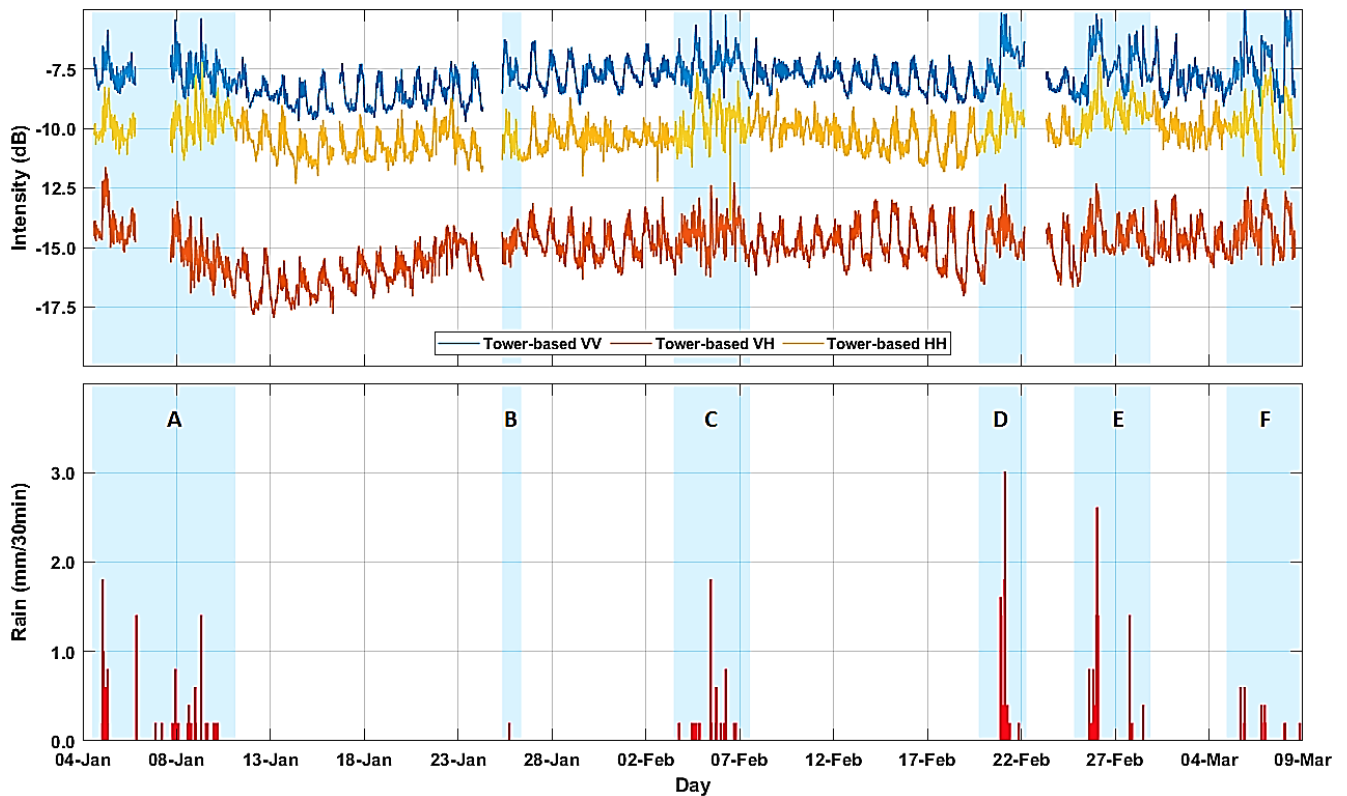


Figure IV. 20 : Mesures *in situ* de la période du 4 janvier au 9 mars 2021 : a) l'évolution de la rétrodiffusion en polarisation VV, VH et HH, b) les mesures des précipitations. Les périodes de pluie sont identifiées par les lettres A, B, C, D, E et F sur les graphes de la figure et sont colorées en arrière-plan bleu.

Pendant les six périodes de pluie (A, B, C, D, E et F comme illustré dans la Figure IV.21), les intensités radar montrent un comportement erratique, indépendamment de la polarisation, avec une nette augmentation de l'intensité avec les fortes pluies. Pour illustrer, durant la période pluvieuse « E » (Figure IV.21), on observe une augmentation d'environ 3 dB, 2.4 dB et 2.8 dB respectivement pour les polarisations VV, VH et HH. Cette augmentation peut s'expliquer par l'interception d'une grande partie de la pluie par la canopée phénomène déjà observé par (Monteith & Ulander, 2021), ainsi que par la forte humidité du sol augmentant la contribution de surface (Ulaby et al., 1984) comme en témoigne la plus grande différence d'augmentation pour I_{VV} , nettement plus sensible à cette dernière (Baghdadi et al., 2017; Greifeneder et al., 2018; Vreugdenhil et al., 2018).

Dès que la pluie s'arrête, une diminution de l'intensité radar sur plusieurs jours est observée, jusqu'à retrouver les niveaux précédents les pluies. Ces variations sont probablement dues à la diminution progressive de la teneur en humidité superficielle du sol.

III.4. Analyse du comportement des coefficients de rétrodiffusions entre les mesures *in situ* et Sentinel-1

Compte tenu du fait que les satellites Sentinel-1, avec une fréquence de revisite de 6 jours, offrent des estimations sensibles en cohérence, section II.3 chapitre II, notamment durant la période printanière où l'activité végétale est la plus intense, il était donc naturel d'examiner la comparaisant des intensités issues des données radar *in situ* avec ceux de Sentinel-1.

Les intensités radar *in situ* I_{VV} et I_{HH} acquises à 6h30 et 18h30 (heures d'acquisitions de Sentinel-1) sont comparées aux coefficients de rétrodiffusion radar σ_{VV}^0 et σ_{HH}^0 des données sentinel-1 pour la période mars 2020-décembre 2021, Figure IV.21, ci-dessous avec : a) la comparaison avec les données Sentinel-1 pour le passage descendant de l'orbite 52 et b) le passage ascendant de l'orbite 118. Les intensités provenant de Sentinel-1 sont présentés sous forme de cercles en rouge, tandis que ceux des mesures *in situ* sont en carrés noirs. Les mesures des intensités *in situ* calculées tous les jours (à l'heure d'acquisition de sentinel-1 avec un $\Delta t = 6$ jours, en haut : 06h30, en bas : 18h30) sont affichées en étoiles en vert pour une meilleure lisibilité de l'évolution temporelle des mesures *in situ* permettant l'observation des tendances de variation. Les cumuls journaliers de pluie mesures sont aussi présentés sur les figures sous forme de bars bleus.

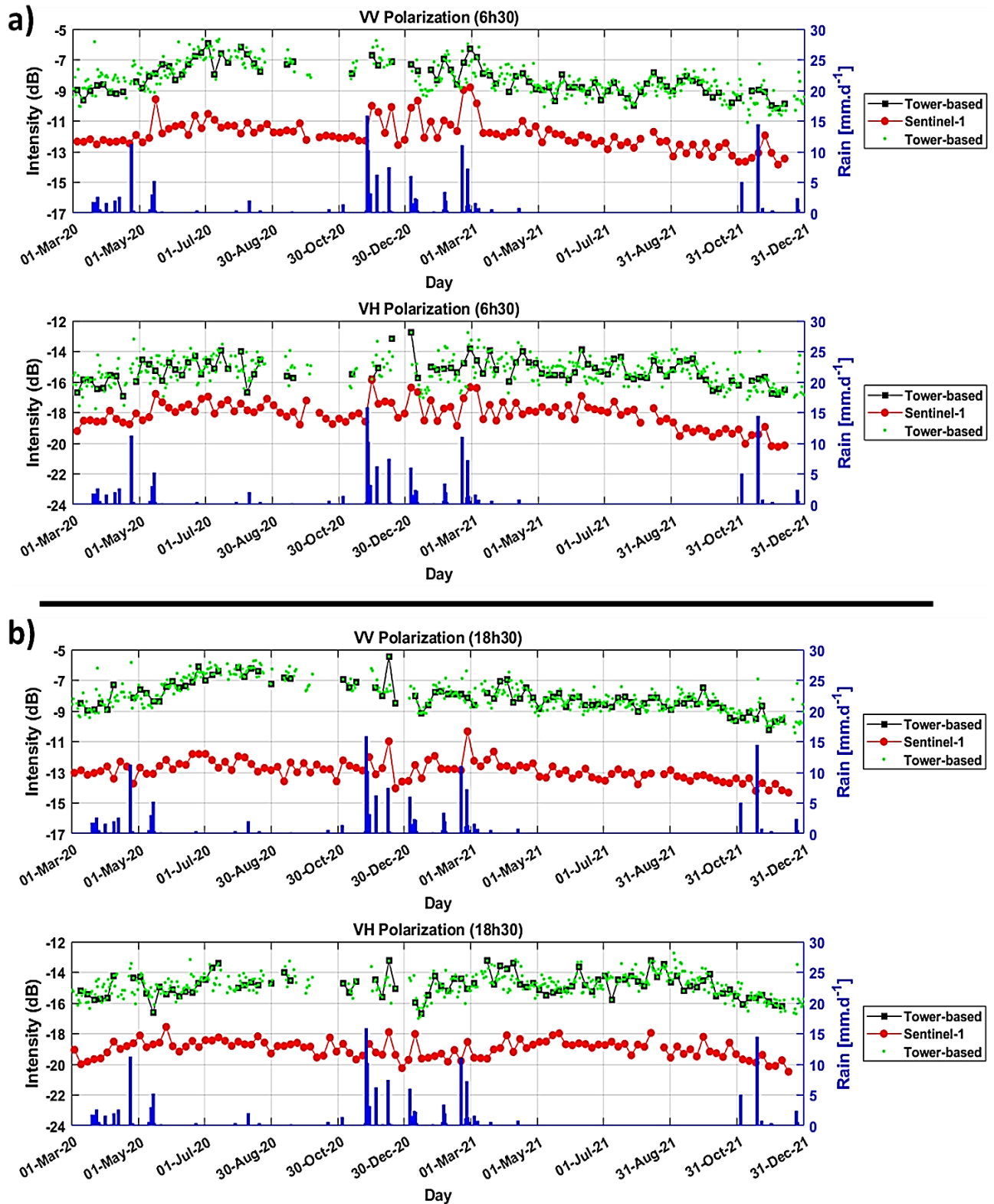


Figure IV. 21 : Comparaison des coefficients de rétrodiffusion issus de Sentinel-1 pour les Orbites 52 (a) du matin ($\theta = 35^\circ$) et les Orbites 118 (b) le soir ($\theta = 45^\circ$) avec les mesures *in situ*. Pour chaque graphe, a) et b), (en haut) polarisations VV et (en bas) VH. Les rectangles noirs sont les acquisitions *in situ*. Les cercles rouges correspondent aux données Sentinel-1. Les étoiles vertes correspondent aux acquisitions du radar *in situ* glissantes sur une échelle de 24 heures (en haut : 06h30, en bas : 18h30). Le cumul journalier de pluie en bar bleus

Les résultats montrent une dynamique globalement similaire intensités entre les mesures *in situ* et les données de Sentinel-1, avec coefficients de corrélation (R) de 0.77 et 0.52 pour les polarisations VV et VH respectivement, pour les acquisitions matinales, et 0.63 et 0.33 pour les acquisitions à 18h30. Ce bon accord global est remarquable, notamment en raison de la différence de configuration d'acquisition des 2 systèmes, en termes d'angle d'incidence et angle azimutal parallèle aux rangées d'arbre pour les mesure *in situ*, ce qui n'est pas le cas pour la visée Sentinel-1.

La différence moyenne entre les 2 systèmes (I *in situ* et σ^0 Sentinel-1) est d'environ 3.6 dB et 2.8 dB respectivement pour les polarisations VV et VH pour 6h30, et environ 4.8 dB et 4.2 dB pour 18h30. Là encore, il est difficile de pousser les interprétations très loin en raison des différences d'acquisition des systèmes : l'angle d'incidence plus élevé des données *in situ* réduit considérablement l'influence de la contribution du sol.

Les tendances intra-annuelles des intensités ont montré une augmentation au printemps et en été, suivie par une diminution en automne et en hiver, plus prononcée en 2020 qu'en 2021. Ceci pourra être attribuer à l'état hydrique des arbres ainsi qu'aux périodes de déficit hydrique, intra-annuelle, comme déjà observé et discuté ultérieurement dans le Chapitre III.

Les résultats mettent en évidence une sensibilité remarquable du signal radar, qu'il soit sur les mesures *in situ* ou de Sentinel-1, en réponse aux précipitations, indépendamment de la polarisation. Cette sensibilité est particulièrement prononcée pour les intensités enregistrées à 6h30, caractérisées par une incidence plus faible ($\theta = 35^\circ$) par rapport à celles relevées à 18h30 ($\theta = 45^\circ$). Ces observations suggèrent une forte contribution du sol et de son humidité superficielle sur le signal radar pendant les périodes de pluie, notamment lors des acquisitions matinales avec de faibles angles d'incidences.

Il est important de souligner que le bon accord entre les deux systèmes d'acquisition n'était pas attendu, étant donné leurs différences significatives dans les configurations géométriques, de plus que les mesures *in situ* n'ont été calibrées qu'en relatives.

IV. Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre était d'explorer le comportement de la cohérence interférométrique (γ) des mesures *in situ*, en bande C, en relation avec les paramètres reliés à l'état hydrique des arbres d'oliviers pour les années 2020-2021. Une analyse préliminaire a aussi été présentée pour les données radar en intensité (I), proportionnelles à σ^0 qui n'ont malheureusement pu être seulement calibrées de manière relatives. La cohérence interférométrique s'est avérée indépendante des états de polarisation, avec des coefficients de corrélation > 0.96 (Section IV.2.4 Chapitre II). De plus, les résultats ont souligné une sensibilité accrue de γ à la vitesse du vent et aux flux hydriques internes associés l'activité des oliviers.

Un cycle diurne net de γ est observé pour une ligne de base de 15 min : γ reste élevé et stable durant la nuit, puis diminue le matin avec le début de l'activité de la végétation, atteint son minimum dans l'après-midi lorsque le vent est à son maximum, puis augmente pour atteindre son niveau nocturne dans la soirée. L'amplitude et la longueur de ce cycle varient au cours de l'année avec les variables climatiques et les stades phénologiques des oliviers. Elles sont maximales au printemps et en été, et minimales en automne et en hiver. Les analyses détaillées ont mis en évidence des corrélations significatives le matin entre la γ et *ETR*, notamment lorsque la vitesse du vent est inférieure à 2 m/s ($R^2 = 0.55$ et 0.43 en 2020 pendant les phases de durcissement du noyau). La comparaison avec variations dendrométriques résiduelles diurnes des troncs d'arbres a montré que la diminution matinale de γ est liée au mouvement de l'eau dans les xylèmes, ce qui est en accord avec l'hypothèse selon laquelle l'évapotranspiration joue un rôle majeur dans cette réduction matinale de la cohérence, confirmant des observations similaires dans les forêts tropicales et boréales (El Idrissi Essebtey et al., 2020; Hamadi et al., 2015; Monteith & Ulander, 2022b; Ulander et al., 2018).

La sensibilité de γ aux événements pluvieux a été observée, confirmant des observations passées dans les forêts tropicales (Hamadi et al., 2015). Enfin, l'effet de l'irrigation par goutte-à-goutte sur le vergé d'oliviers n'a pas montré un impact significatif sur la cohérence (faibles surfaces mouillées), avec un cycles diurnes estimés entre les jours irrigués et des jours non irrigués qui a montré une forte corrélation ($R^2= 0.97$), avec qu'un comportement similaire des médianes entre les deux cohérences.

L'analyse de la dynamique temporelle de γ pour des lignes de base de plusieurs jours a souligné l'importance de prendre en compte les facteurs saisonniers et environnementaux pour interpréter les variations de γ . Les résultats ont également mis en évidence la sensibilité du signal radar à

l'état du sol et de la végétation. En outre, une forte sensibilité de la cohérence en bande C a été observée face aux petits changements des diffusionmètres de la canopée, telle que les oliviers, ainsi qu'à des modifications géométriques du sol lors de la récolte, entraînant une chute brusque de γ .

L'estimation de la cohérence pour des lignes de base de plusieurs jours a montré que les cycles diurnes sont toujours marqués après plusieurs jours (une amplitude de 0.25 est observée pour $\Delta t = 16$ jours pour l'été 2021). En particulier, la revisite de 6 jours, qui permet des analyses de cohérence significatives, illustrant le potentiel de la mission Sentinel-1 qui offre des estimations suffisamment sensibles à l'état hydrique de la végétation, en fonction de la saison, notamment lors de son passage matinal en orbite descendante.

Un résultat remarquable est le bon accord global observé avec les cohérences *in situ* et ceux issues des satellites Sentinel-1, ceci malgré les différences de configuration d'acquisition (incidence, azimut). Cependant, des divergences apparaissent au printemps et à l'été 2021 sans pouvoir fournir d'analyses plus poussées en raison des différences d'acquisitions de ces 2 systèmes.

Contrairement à la cohérence, les intensités radar *in situ* ont révélé des différences significatives entre les différentes polarisations. Les intensités n'ont pas présenté des cycles saisonniers prononcés sur le verger d'oliviers étudié, avec des comportements différents entre 2020 et 2021. Des corrélations significatives ont été observées avec, l'*ETR* et *Sapflow* ($R=0.35, 0.30$ et 0.45 pour VV, VH et HH et $R= 0.19, 0.18$ et 0.27 pour VV, VH et HH, respectivement pour *ETR* et *Sapflow* sur la période 2020-2021) montrant leur sensibilité à l'état hydrique du couvert végétal.

Des cycles diurnes sont également observés : constante durant la nuit, l'intensité radar croît le matin pour atteindre un maximum autour de midi puis décroît pour retrouver sa valeur nocturne en fin d'après-midi (une augmentation matinale en corrélation avec le début de la transpiration des arbres, et une diminution à l'absence de l'activité végétale). L'amplitude maximale de ces cycles sont < 4 dB pour les plus marqués durant l'été, et sont moins importants que ceux observée pour la cohérence.

La comparaison des intensités *in situ* avec le coefficient de rétrodiffusion σ^0 de Sentinel-1 a montré, comme pour la cohérence, un bon accord global avec des coefficients de corrélation élevés ($R^2 = 0.77$ et 0.52 pour les polarisations VV et VH le matin, $R^2=0.63$ et 0.33 le soir).

Les résultats obtenus confirment la sensibilité de la cohérence radar à l'état hydrique de la végétation, et plus particulièrement sur un couvert d'oliviers, lors des mesures effectuées le matin en l'absence de vent. Les valeurs sont toujours significatives pour des lignes de base temporelles de plusieurs jours, montrant le potentiel des missions satellitaires, notamment Sentinel-1 pour ce domaine. La cohérence interférométrique s'avère plus adaptée pour le suivi de l'état hydrique des couverts que les coefficients de rétrodiffusion radar σ^0 , ces derniers étant sensibles à de multiples paramètres (géométrie, densité, taille, orientation et humidité des diffuseurs de la végétation, humidité et rugosité du sol) difficiles à isoler.

Conclusion générale et perspective

La région Méditerranéenne subit une pression croissante sur ses ressources en eau, accentuée par la rareté de cette dernière due aux changements climatiques ces dernières décennies. Cette situation est aggravée par une demande sans cesse croissante surtout dans l'agriculture qui consomme, à elle seule, plus de 85% des ressources hydriques disponibles. Il est donc essentiel d'adopter des stratégies de gestion durable de l'eau, impliquant une révision des pratiques agricoles, l'adoption de technologies efficaces et une gestion intégrée des ressources en eau. Dans ce contexte, il est vital d'évaluer précisément l'état hydrique des plantes pour une meilleure gestion efficace des ressources en eau en termes d'irrigation à large échelle. Cela découle du fait que des mesures *in situ* dans des environnements comme les agrosystèmes méditerranéens sont une tâche complexe et coûteuse en raison de leurs grandes variabilités.

L'objectif global de la présente thèse s'articule autour de l'évaluation de l'utilité des données radar en bande C pour surveiller le fonctionnement hydrique et étudier le cycle diurne d'une oliveraie irriguée dans une région semi-aride au Maroc. Ce travail est organisé autour de trois objectifs spécifiques : tout d'abord, la mise en place et l'analyse des données radar en bande C issues d'un dispositif radar *in situ*, mis en place pour la première fois dans un environnement semi-aride, avec une résolution spatiotemporelle très fine. Ensuite, analyser de ces séries de données avec les paramètres environnementaux et aux mesures physiologiques automatiques effectuées sur l'oliveraie étudiée, ainsi qu'aux acquisitions satellitaires effectuées par Sentinel-1. Enfin, approfondir notre compréhension de l'état hydrique et du cycle de croissance des oliviers en analysant les mesures dendrométriques des troncs des arbres avec les paramètres environnementaux.

Ainsi, une grande partie de ce travail de thèse a été dédiée à la mise en place, la maintenance et le traitement des différentes données des dispositifs *in situ* (radar, physiologiques et météorologiques), ainsi qu'au traitement des images satellitaires radar de Sentinel-1.

Le dispositif expérimental radar *in situ*, qui est le cœur de ce travail, est une tour de 20 mètres sur laquelle des acquisitions pleinement polarimétriques ont été acquises grâce à des antennes cornets et un générateur d'ondes VNA (Vector Network Analyzer) pendant la période 2020-2021. Sur la base de ces mesures *in situ*, le comportement de la cohérence interférométrique (γ) et les intensités, proportionnelles au coefficient de rétrodiffusion (σ^0), ont été explorés :

Le comportement de la cohérence interférométrique s'est avéré indépendante des états de polarisation, avec des coefficients de corrélation > 0.96 , et une sensibilité à la vitesse du vent et aux flux hydriques internes associés l'activité des oliviers. Des cycles diurnes nets de γ sont

observés sur un pas de temps de 15 min, avec des γ qui restent élevés et stables pendant la nuit, puis diminuent le matin avec le début de l'activité végétale. Les valeurs minimales de ces cycles diurnes sont atteintes dans l'après-midi, lorsque le vent est à son maximum, après quoi, une augmentation progressive de la cohérence est observée jusqu'à retrouver à ses niveaux nocturnes en soirée. L'amplitude et la durée de ces cycles variaient tout au long de l'année en fonction des conditions climatiques et des stades phénologiques des oliviers, avec des niveaux maximaux observés au printemps et en été, et minimales en automne et en hiver.

Les analyses détaillées ont révélé des corrélations significatives le matin entre γ et le taux d'évapotranspiration, en particulier lorsque la vitesse du vent est inférieure à 2 m/s ($R^2 = 0.55$ et 0.43 en 2020 pendant les stades de durcissement du noyau). Comparativement aux variations diurnes résiduelles dendrométriques des troncs des arbres, l'analyse a révélé que la diminution matinale de γ est corrélée aux mouvements de l'eau dans le xylème, soutenant ainsi l'hypothèse selon laquelle l'évapotranspiration est un facteur déterminant de cette réduction matinale de la cohérence. Ces résultats sont en accord avec des observations similaires dans les écosystèmes forestiers tropicaux et boréaux.

L'impact de l'irrigation par goutte-à-goutte du verger d'olivier étudié n'a pas révélé de différence significative sur les cohérences interférométriques : Les cycles diurnes estimés entre les jours irrigués et non irrigués ont montré une corrélation élevée ($R^2 = 0.97$), avec des médianes présentant des comportements similaires pour les deux cohérences. Ce comportement similaire des cohérences peut être attribué au système goutte-à-goutte qui irrigue uniquement une petite partie du sol le long des tuyaux, conformément aux observations sur terrain.

L'analyse de la dynamique temporelle de γ sur des lignes de base de plusieurs jours a souligné l'importance de prendre en compte les facteurs saisonniers et environnementaux pour interpréter les variations de la cohérence interférométrique en bande C. Les résultats ont également mis en lumière la sensibilité du signal radar à la fois au sol et à la végétation, ainsi qu'aux événements pluvieux.

Des baisses abruptes de γ sur des lignes de base de plusieurs jours, à des dates spécifiques au printemps et en été 2020, ont été observées. Ces changements majeurs ne pouvaient être attribués à des problèmes électroniques du système radar *in situ*, sachant bien qu'aucune activité agricole, modification brusque de la couverture végétale ou événements météorologiques n'ont été observés durant ces périodes. La cause la plus probable serait une forte augmentation de la rugosité du sol causée par des animaux sauvages, en particulier les sangliers, qui ont été

régulièrement aperçus dans la parcelle d'olivier pendant l'année 2020, mettant en évidence la grande sensibilité de la cohérence aux changements de rugosité du sol. De plus, une sensibilité significative de la cohérence aux changements, même minimes, dans la végétation a été observée, notamment avec de petits éléments tels que les olives, lors de la récolte des oliviers, entraînant une chute brutale de la cohérence.

L'estimation de la cohérence sur des lignes de base de plusieurs jours a montré également que les cycles diurnes restaient prononcés même après plusieurs jours (une amplitude de 0.25 est observée pour $\Delta t = 16$ jours pour l'été 2021). En particulier, la revisite de 6 jours, permettant des analyses de cohérence significatives. Cela illustre le potentiel de la mission Sentinel-1 (avec une revisite de 6 jours en Europe et au nord de l'Afrique), qui offre des estimations suffisamment sensibles de l'état hydrique de la végétation, en fonction de la saison, notamment lors de son passage matinal en orbite descendante.

Un résultat remarquable est l'accord satisfaisant observé entre les cohérences *in situ* obtenues et ceux provenant des satellites Sentinel-1, et cela malgré les variations dans les configurations d'acquisition des deux systèmes (telles que l'incidence et l'azimut). Cependant, des divergences ont été observées sur la cohérence issue des deux systèmes au printemps et à l'été 2021, mais des analyses plus approfondies et plus poussées n'ont pas pu être menées en raison des disparités des configurations dans les acquisitions entre ces deux.

Contrairement à la cohérence, les intensités radar *in situ*, proportionnelles aux coefficients de rétrodiffusion (σ^0), ont révélé des disparités significatives entre les polarisations. Sur le verger d'olivier étudié, les intensités n'ont pas manifesté de cycle saisonnier prononcé, présentant des comportements distincts entre 2020 et 2021. Des corrélations significatives ont été observées avec l'*ETR* et le flux de sève ($R=0.35$, 0.30 et 0.45 pour VV, VH et HH respectivement, et $R=0.19$, 0.18 et 0.27 pour VV, VH et HH respectivement pour l'*ETR* et le flux de sève sur la période 2020-2021), soulignant leur sensibilité à l'état hydrique du couvert végétal. En revanche, des cycles diurnes nets ont été également observés : l'intensité radar reste constante durant la nuit, avec une augmentation le matin pour atteindre un pic autour de midi, puis une diminution pour retrouver sa valeur nocturne en fin d'après-midi. Cette augmentation matinale est corrélée au début de la transpiration des arbres, tandis que la diminution est associée à l'absence d'activité végétale. L'amplitude maximale de ces cycles a été inférieure à 4 dB pour les plus prononcés pendant l'été, ce qui est moins prononcé que ceux observés pour la cohérence.

La comparaison des intensités *in situ* avec le coefficient de rétrodiffusion, σ^0 , de Sentinel-1 a révélé, tout comme pour la cohérence, un bon accord global avec des coefficients de corrélation élevés ($R^2 = 0.77$ et 0.52 pour les polarisations VV et VH le matin, $R^2=0.63$ et 0.33 le soir). Les résultats ont mis en évidence une sensibilité remarquable du signal radar, qu'il soit pour les mesures *in situ* ou de Sentinel-1, en réponse aux précipitations, indépendamment de la polarisation. Cette sensibilité a été particulièrement prononcée pour les intensités enregistrées à 6h30, caractérisées par une incidence plus faible ($\theta = 35^\circ$) par rapport à celles relevées à 18h30 ($\theta = 45^\circ$). Ces observations suggèrent une forte contribution du sol et de son humidité superficielle sur le signal radar pendant les périodes de pluie, notamment lors des acquisitions matinales avec de faibles angles d'incidences.

Ces résultats confirment la sensibilité de la cohérence radar à l'état hydrique de la végétation, notamment sur un couvert d'oliviers, lors des mesures effectuées le matin en l'absence de vent. Les valeurs restaient significatives pour la cohérence à des lignes de base temporelles de plusieurs jours, mettant en évidence le potentiel des missions satellitaires, notamment Sentinel-1, dans ce domaine.

La cohérence interférométrique, qui mesure la stabilité de la scène en termes de géométrie et d'humidité des diffuseurs à l'échelle de la longueur d'onde, s'avère être plus adaptée pour le suivi de l'état hydrique des couverts que les coefficients de rétrodiffusion radar σ^0 . Ces derniers sont sensibles à de multiples paramètres (géométrie, densité, taille, orientation et humidité des diffuseurs de la végétation, humidité et rugosité du sol) qui sont difficiles à isoler.

L'analyse approfondie de l'état hydrique des oliviers étudiés pendant les périodes de croissance et de déficit hydrique (*TWD*) a été réalisée en examinant de manière détaillée les mesures dendrométriques (ΔR), les flux de sève et les données météorologiques collectées entre 2020 et 2022. Les résultats obtenus révèlent que la saison de croissance débute après la période de repos végétatif, vers la fin de février, et se termine après le stade de maturation des olives, début décembre. La croissance annuelle la plus prononcée a été enregistrée en 2021 (5,02 mm). Les variations annuelles de ΔR ont montré des cycles distincts en 2021, avec une croissance rapide au printemps, une augmentation progressive en été, un plateau fluctuant en automne, et une légère diminution en hiver. De plus, les données ont révélé plusieurs périodes de déficit hydrique prolongé, indiquant des périodes de sécheresse persistante sur plusieurs jours : Deux périodes se sont particulièrement démarquées, s'étendant sur 9 mois ; de fin mars 2020 à début mars 2021, avec un pic de déficit d'environ 1125 μm , et de juin à fin septembre 2022, avec un déficit maximum d'environ 1000 μm .

Les profils temporels annuels de variations dendrométriques résiduelles (ΔR_r) ont mis en évidence des variations importantes du rythme saisonnier en 2021, se distinguant nettement des autres années étudiées : L'année 2021 a été caractérisée par des taux de croissance élevés, tandis que l'année 2020 a enregistré les taux de déficit hydrique les plus élevés, dépassant de 2,8 fois ceux de 2021, et surpassant de 1,3 fois ceux de 2022.

Concernant les effets des facteurs climatiques sur la croissance et le déficit hydrique des arbres d'oliviers, les résultats ont révélé des corrélations positives entre la croissance et l'humidité de l'air, avec des valeurs atteignant 0,67 pour avril 2022, 0,52 pour février 2022, et un pic notable de 0,79 en mai 2021. Des corrélations inverses significatives ont également été observées entre la croissance et le flux de sève, notamment au printemps 2021, par rapport aux années 2020 et 2022.

Des corrélations significatives ont été observées entre le *TWD* et le déficit de pression de vapeur (*VPD*). Ce dernier se révélant être l'un des paramètres météorologiques les plus influents, avec des $R= 0,74, 0,83$ et $0,72$ respectivement pour mai 2020, avril 2021 et avril 2022 entre *VPD* et *TWD*. Cette liaison découle de la forte demande en eau des oliviers lors du pic d'activité végétative, conjuguée à une augmentation progressive de la demande climatique. De plus, des corrélations significatives ont été également observées entre la température de brillance des arbres (*Ttree*) et le *TWD* ($R > 0,6$ d'avril à octobre sur les trois années étudiées (2020, 2021 et 2022)).

Par ailleurs, l'analyse du comportement du ΔR_r et des flux de sève a révélé des cycles diurnes distincts et réguliers, indépendamment du mois, avec un décalage temporel de phase entre ces deux variables. Une hypothèse a été avancée pour l'étroite comportement des cycles diurnes entre les flux de sève et les variations dendrométriques des troncs d'olivier. Cette hypothèse met en évidence les mécanismes de régulation des réponses des arbres aux conditions météorologiques, et leur activité métabolique en relation avec le mouvement des flux de sève et les variations dendrométriques des troncs d'arbres en se basant sur deux points d'inflexion. Une exception du comportement proposé par cette hypothèse a été observé pendant le stade phénologique de dormance ce qui renforce d'avantage cette hypothèse, qui reste à vérifier dans de futures recherches pour une compréhension approfondie des mécanismes physiologiques des arbres d'oliviers en réponse aux conditions environnementales changeantes.

Les résultats présentés dans ce travail sont qualitatifs, puisque cette expérience représente une première dans son genre jamais réalisée sur une culture arborée dans un environnement semi-

aride, avec une résolution spatiotemporelle aussi fine sur une longue période. Ces travaux ouvrent de nombreuses perspectives avec la calibration des intensités radar *in situ*. Cette calibration vise à combiner les données de σ^0 , calibrées, avec des modèles de transfert radiatif tels que MIMICS. Cela pourrait aider à étudier d'une manière plus précise le stress hydrique des cultures et son impact sur le contenu en eau de la végétation, ainsi que sur différents processus physiques et à divers stades de la saison. L'exploitation du bilan hydrique sur les oliviers étudiés, en particulier l'humidité dans la zone racinaire, à l'aide de la cohérence interférométrique et du coefficient de rétrodiffusion, pourrait s'avérer très utile pour le développement d'outils de pilotage de l'irrigation à des échelles locales dans un premier temps. Par la suite, la combinaison de ces données avec les données satellitaires, en particulier avec l'arrivée de futures missions comme HydroTerra ou BIOMASS, permettra de mieux comprendre l'état hydrique de la végétation et facilitera ainsi la gestion de l'irrigation à grande échelle.

L'exploitation d'autres domaines de longueur d'onde, conjointement avec les mesures radar *in situ*, doivent être également envisagée pour la détection du stress hydrique, tels que l'infrarouge thermique et le visible. Des campagnes *in situ* supplémentaires sur d'autres périodes et sur différents types de couverture végétale devraient permettre d'affiner les analyses et d'évaluer le potentiel des données radar pour des estimations directes de l'état hydrique des couverts végétaux.

Références bibliographiques

- Abdel-Rahman, A. A., & El-Sharkawi, H. M. (1974). Response of olive and almond orchards to partial irrigation under dry-farming practices in semi-arid regions: - II. Plant-soil water relations in olive during the growing season. *Plant and Soil*, 41(1). <https://doi.org/10.1007/BF00017940>
- Abourida, A., Simonneaux, V., Sadik, E., Brahim, B., & Fathallah, S. (2009). Estimation des volumes d'eau pompés dans la nappe pour l'irrigation (plaine du Haouz, Marrakech, Maroc). Comparaison d'une méthode statistique et d'une méthode basée sur l'utilisation de la télédétection. *Revue Des Sciences de l'eau*, 22(1). <https://doi.org/10.7202/019820ar>
- Adamala, S., Rajwade, Y. A., & Reddy, Y. V. K. (2016). Estimation of wheat crop evapotranspiration using NDVI vegetation index. *Journal of Applied and Natural Science*, 8(1). <https://doi.org/10.31018/jans.v8i1.767>
- Alam, M., Kruger, G., Megdal, S. B., & Songstad, D. (2014). Impact of Technology and Policy on Sustainable Agricultural Water Use and Food Security. In D. D. Songstad, J. L. Hatfield, & D. T. Tomes (Eds.), *Convergence of Food Security, Energy Security and Sustainable Agriculture* (pp. 75–112). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55262-5_5
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A., & Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899–920. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2010.12.015>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & W, a B. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. *Irrigation and Drainage*. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Allen, Smith, M., Perrier, A., & Pereira, L. (1994). An Update for the Definition of Reference Evapotranspiration AND An Update for the Calculation of Reference Evapotranspiration. *ICID Bulletin of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 43(2).
- Amani, B., Olfa, B., Raoul, L., & Mohamed, B. (2013). COMPARISON BETWEEN SAP FLOW MEASUREMENTS AND TWO PREDICTION CLIMATE FORMULAS TO ESTIMATE TRANSPIRATION IN OLIVE ORCHARDS (OLEA EUROPAEA L. CV. CHEMLALI). *European Scientific Journal, ESJ*, 9(21), 1857–7881. <https://doi.org/10.19044/ESJ.2013.V9N21P>

- Aryal, S., Häusser, M., Griebinger, J., Fan, Z., & Bräuning, A. (2020). “dendRoAnalyst”: A tool for processing and analysing dendrometer data. *Dendrochronologia*, 64, 125772. <https://doi.org/10.1016/J.DENDRO.2020.125772>
- Asiyabi, R. M., Ghorbanian, A., Tameh, S. N., Amani, M., Jin, S., & Mohammadzadeh, A. (2023). Synthetic Aperture Radar (SAR) for Ocean: A Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3310363>
- Askne, J. (1996). Synthetic Aperture Radar: Principles and Applications. *The Determination of Geophysical Parameters From Space: Proceedings of the Forty-Third Scottish Universities Summer School in Physics, University of Dundee, August 15-September 3, 1994*, 43, 45.
- Baghdadi, N., Hajj, M. El, Zribi, M., & Bousbih, S. (2017). Calibration of the Water Cloud Model at C-Band for winter crop fields and grasslands. *Remote Sensing*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/rs9090969>
- Baghdadi, N., & Zribi, M. (2016). *Observation des Surfaces Continentales par Télédétection: Hydrologie continentale*.
- Bai, Zechao., Fang, Shibo., Gao, Jian., Zhang, Yuan., Jin, Guowang., Wang, Shuqing., Zhu, Yongchao., & Xu, Jiabin. (2020). Could Vegetation Index be Derive from Synthetic Aperture Radar? – The Linear Relationship between Interferometric Coherence and NDVI. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63560-0>
- Baldocchi, D. (2008). TURNER REVIEW No. 15. “Breathing” of the terrestrial biosphere: Lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. In *Australian Journal of Botany* (Vol. 56, Issue 1). <https://doi.org/10.1071/BT07151>
- Baldocchi, D. D., Xu, L., & Kiang, N. (2004). How plant functional-type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak–grass savanna and an annual grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123(1–2), 13–39. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2003.11.006>
- Balzter, H., Cole, B., Thiel, C., & Schnullius, C. (2015). Mapping CORINE land cover from Sentinel-1A SAR and SRTM digital elevation model data using random forests. *Remote Sensing*, 7(11). <https://doi.org/10.3390/rs71114876>

- Baraha, S., & Sahoo, A. K. (2023). Synthetic aperture radar image and its despeckling using variational methods: A Review of recent trends. In *Signal Processing* (Vol. 212). <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2023.109156>
- Barbouchi, M., Chaabani, C., Cheikh M'Hamed, H., Abdelfattah, R., Lhissou, R., Chokmani, K., Ben Aissa, N., Annabi, M., & Bahri, H. (2022). Wheat Water Deficit Monitoring Using Synthetic Aperture Radar Backscattering Coefficient and Interferometric Coherence. *Agriculture (Switzerland)*, *12*(7). <https://doi.org/10.3390/agriculture12071032>
- Báreková, A., Bárek, V., Kováčová, M., Novotná, B., & Kišš, V. (2020). Climate conditions impact on the sap flow into plants and their dendrometric changes. *Journal of Ecological Engineering*, *21*(6). <https://doi.org/10.12911/22998993/124077>
- Bauerle, W. L., Dudley, J. B., & Grimes, L. W. (2003). Genotypic Variability in Photosynthesis, Water Use, and Light Absorption among Red and Freeman Maple Cultivars in Response to Drought Stress. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *128*(3), 337–342. <https://doi.org/10.21273/JASHS.128.3.0337>
- Bauer-Marschallinger, B., Cao, S., Navacchi, C., Freeman, V., Reuß, F., Geudtner, D., Rommen, B., Vega, F. C., Snoeij, P., Attema, E., Reimer, C., & Wagner, W. (2021). The normalised Sentinel-1 Global Backscatter Model, mapping Earth's land surface with C-band microwaves. *Scientific Data*, *8*(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01059-7>
- Bays, H. E., Antoun, J., Censani, M., Bailony, R., & Alexander, L. (2022). Obesity pillars roundtable: Obesity and individuals from the Mediterranean region and Middle East. *Obesity Pillars*, *2*, 100013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.obpill.2022.100013>
- Behnassi Mohamed and Rahman, M. A. and D. J. and R. G. and G. H. and P. O. and R. N. (2021). Enhancing Resilience for Food and Nutrition Security Within a Changing Climate. In M. and E. H. M. and R. M. R. Behnassi Mohamed and Barjees Baig (Ed.), *Emerging Challenges to Food Production and Security in Asia, Middle East, and Africa: Climate Risks and Resource Scarcity* (pp. 1–42). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72987-5_1
- Benlloch-González, M., Arquero, O., Fournier, J. M., Barranco, D., & Benlloch, M. (2008). K+ starvation inhibits water-stress-induced stomatal closure. *Journal of Plant Physiology*, *165*(6). <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2007.05.010>
- Bernd, L., & Stephen, T. C. (1985). *Turfgrass Water Conservation*. 143–144.

- Biondi, F., Hartsough, P. C., & Estrada, I. G. (2005). Daily weather and tree growth at the tropical treeline of North America. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(1). [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2005\)037\[0016:DWATGA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2005)037[0016:DWATGA]2.0.CO;2)
- Biondi, F., & Rossi, S. (2015). Plant-water relationships in the Great Basin Desert of North America derived from *Pinus monophylla* hourly dendrometer records. *International Journal of Biometeorology*, 59(8). <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0907-4>
- Bouchemakh, L., Boutarfa, S., Smara, Y., & Souissi, B. (2012). SUR LE FILTRAGE DU CHATOIEMENT DANS LES IMAGES RADAR SAR POLARIMÉTRIQUES: ÉTUDE DES RÉGIONS D'ALGER ET D'ORAN. *Teledetection*, 10(2–3), 113–127.
- Boudhar, A., Duchemin, B., Hanich, L., & Chehbouni, A. (2007). Analyse de la dynamique des surfaces enneigées du Haut Atlas marocain à partir des données SPOT-VEGETATION. *Secheresse*, 18(4). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.09.008>
- Boukhari, A., Chikhaoui, M., Mharzi Alaoui, H., & Naimi, M. (2020). Analysis of the Silting Rate in the “Hachef” Dam Situated in Northern Morocco in the Context of Global Change. *Journal of Geographic Information System*, 12, 112–124. <https://doi.org/10.4236/jgis.2020.122007>
- Boukhari, A., Naimi, M., Chikhaoui, M., & Raclot, D. (2019). *Caractérisation de la dégradation spécifique des sols pour la région septentrionale du Maroc*. 7, 288–293.
- Boulet, G., Mougnot, B., Lhomme, J. P., Fanise, P., Lili-Chabaane, Z., Olioso, A., Bahir, M., Rivalland, V., Jarlan, L., Merlin, O., Coudert, B., Er-Raki, S., & Lagouarde, J. P. (2015). The SPARSE model for the prediction of water stress and evapotranspiration components from thermal infra-red data and its evaluation over irrigated and rainfed wheat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(11). <https://doi.org/10.5194/hess-19-4653-2015>
- Brisco, B., Brown, R. J., Koehler, J. A., Sofko, G. J., & McKibben, M. J. (1990). The diurnal pattern of microwave backscattering by wheat. *Remote Sensing of Environment*, 34(1). [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90082-W](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90082-W)
- Browning, K. A., & Gurney, R. J. (2001). Global Energy and Water Cycles. *Agricultural and Forest Meteorology*, 110, 69.
- Buchroithner, M. F. (2001). A decade of trans-European remote sensing cooperation. In *EARSel Symposium (20th : 2000 : Dresden, Germany)*. A.A. Balkema.

- Bullard, J. E., Ockelford, A., Strong, C. L., & Aubault, H. (2018). Impact of multi-day rainfall events on surface roughness and physical crusting of very fine soils. *Geoderma*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.038>
- Camargo, M. A. B., & Marengo, R. A. (2023). Stem growth of Amazonian species is driven by intra-annual variability in rainfall, vapor pressure and evapotranspiration. *Acta Botanica Brasiliica*, 37. <https://doi.org/10.1590/1677-941X-ABB-2022-0219>
- Čermák, J., Kučera, J., Bauerle, W. L., Phillips, N., & Hinckley, T. M. (2007). Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, 27(2). <https://doi.org/10.1093/treephys/27.2.181>
- Chakraborty, A., Mitran, T., & Meena, R. S. (2020). *Geospatial Technologies for Crops and Soils*.
- Chaponnière, A. (2005). *Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride : cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain)*. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010047426>
- Charfi Masmoudi, C., Masmoudi, M., Abid-Karray, J., & Mechlia, N. Ben. (2011). Sap flow measurements in young olive trees (*Olea europaea* L.) cv. Chétoui under Tunisian conditions. In *Scientia Horticulturae* (Vol. 129, Issue 4). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.05.030>
- Chartres, C., & Varma, S. (2010). *Out of Water: from abundance to scarcity and how to solve the world's water problems*.
- Chavarria, G., & dos Santos, H. P. (2012). Plant Water Relations: Absorption, Transport and Control Mechanisms. In G. Montanaro & B. Dichio (Eds.), *Advances in Selected Plant Physiology Aspects*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/33478>
- Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought - From genes to the whole plant. In *Functional Plant Biology* (Vol. 30, Issue 3). <https://doi.org/10.1071/FP02076>
- Chiraz, M.-C. (2013). Growth of Young Olive Trees: Water Requirements in Relation to Canopy and Root Development. *American Journal of Plant Sciences*, 4(7), 1316–1344. <https://doi.org/10.4236/AJPS.2013.47163>

- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Quéré, C. Le, Myneni, R. B., Piao, S., & Thornton, P. (2013). The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Change, IPCC Climate*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.015>
- Cienciala, E., Kučera, J., & Malmer, A. (2000). Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo. *Journal of Hydrology*, 236(1–2). [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00291-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00291-2)
- Cloude, S. R., & Pettier, E. (1996). A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2). <https://doi.org/10.1109/36.485127>
- Cook, C. E. (Charles E., & Bernfeld, M. (1967). *Radar signals : an introduction to theory and application*. Academic Press. <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9780121867508/radar-signals>
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J. P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M. N., & Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. In *Nature Climate Change* (Vol. 8, Issue 11). <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>
- Curlander, J. C., & McDonough, R. N. (1991). *Synthetic aperture radar : systems and signal*. XVII, 647 p. <https://worldcat.org/title/23016384>
- Dagar, J. C., Gupta, S. R., & Teketay, D. (2021). Agroforestry for Degraded Landscapes: Recent Advances and Emerging Challenges - Vol. 2. In *Agroforestry for Degraded Landscapes: Recent Advances and Emerging Challenges - Vol. 2* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1007/978-981-15-6807-7>
- Dasdemir, Assoc, Atik, A., İmtiyaz, S., Platanus, Kapak, M., Sosyal, M., Platanus, Y., Grubu, & Gündoğdu, A. (2023). *INTERNATIONAL RESEARCH IN AGRICULTURE, FORESTRY AND AQUACULTURE SCIENCES EDITORS*.
- Dawes, M. A., Zweifel, R., Dawes, N., Rixen, C., & Hagedorn, F. (2014). CO2 enrichment alters diurnal stem radius fluctuations of 36-yr-old *Larix decidua* growing at the alpine tree line. *New Phytologist*, 202(4). <https://doi.org/10.1111/nph.12742>

- De Grandi, Gianfranco Frank, & De Grandi, Elsa Carla. (2021). Spatial Analysis for Radar Remote Sensing of Tropical Forests. In *Spatial Analysis for Radar Remote Sensing of Tropical Forests*. <https://doi.org/10.1201/9780429290657>
- De Schepper, V., Van Dusschoten, D., Copini, P., Jahnke, S., & Steppe, K. (2012). MRI links stem water content to stem diameter variations in transpiring trees. *Journal of Experimental Botany*, 63(7). <https://doi.org/10.1093/jxb/err445>
- De Swaef, T., Steppe, K., & Lemeur, R. (2009). Determining reference values for stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in young apple trees based on plant responses to water deficit. *Agricultural Water Management*, 96(4). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.09.013>
- Deslauriers, A., Anfodillo, T., Rossi, S., & Carraro, V. (2007). Using simple causal modeling to understand how water and temperature affect daily stem radial variation in trees. *Tree Physiology*, 27(8). <https://doi.org/10.1093/treephys/27.8.1125>
- Deus, D., Gloaguen, R., & Krause, P. (2013). Water balance modeling in a semi-arid environment with limited in situ data using remote sensing in lake manyara, east african rift, tanzania. *Remote Sensing*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/rs5041651>
- Devine, W. D., & Harrington, C. A. (2011). Factors affecting diurnal stem contraction in young Douglas-fir. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(3). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.11.004>
- Diarra, A., Jarlan, L., Er-Raki, S., Le Page, M., Aouade, G., Tavernier, A., Boulet, G., Ezzahar, J., Merlin, O., & Khabba, S. (2017). Performance of the two-source energy budget (TSEB) model for the monitoring of evapotranspiration over irrigated annual crops in North Africa. *Agricultural Water Management*, 193, 71–88. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2017.08.007>
- Dietrich, L., & Kahmen, A. (2019). Water relations of drought-stressed temperate trees benefit from short drought-intermittent rainfall events. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.012>
- Dijk, A., Moene, A. F., & de Bruin, H. (2004). The principles of surface flux physics: Theory, practice and description of the ECPACK library. *The Principles of Surface Flux Physics: Theory, Practice and Description of the ECPACK Library*.

- Dixon, H. H., & Joly, J. (1895). On the Ascent of Sap. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B*, 186, 563–576. <http://www.jstor.org/stable/91804>
- Dkhar, N. (2018). *TERI Energy & Environment Data Diary and Yearbook (TEDDY 2016/17)*.
- Do, F., & Rocheteau, A. (2002). Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 2. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system. *Tree Physiology*, 22(9), 649–654. <https://doi.org/10.1093/TREEPHYS/22.9.649>
- Dobson, M. C., McDonald, K., & Pierce, L. (1991). Diurnal variation in radar backscatter from a loblolly pine forest in late summer. *Digest - International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 3. <https://doi.org/10.1109/igarss.1991.579266>
- D’Odorico, P., Laio, F., Porporato, A., Ridolfi, L., Rinaldo, A., & Rodriguez-Iturbe, I. (2010). Ecohydrology of terrestrial ecosystems. *BioScience*, 60(11). <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.11.6>
- Domonkos, P., Tóth, R., & Nyitrai, L. (2023). Chapter 2 - Upper air observation and remote sensing. In P. Domonkos, R. Tóth, & L. Nyitrai (Eds.), *Climate Observations* (pp. 31–57). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90487-2.00012-8>
- Dontsova, K., Balogh-Brunstad, Z., & Le Roux, G. (2020). Biogeochemical cycles: Ecological drivers and environmental impact. In *Biogeochemical Cycles: Ecological Drivers and Environmental Impact*. <https://doi.org/10.1002/9781119413332>
- Downes, G. M., Drew, D., Battaglia, M., & Schulze, D. (2009). Measuring and modelling stem growth and wood formation: An overview. *Dendrochronologia*, 27(2). <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.06.006>
- Drew, D. M., & Downes, G. M. (2009). The use of precision dendrometers in research on daily stem size and wood property variation: A review. *Dendrochronologia*, 27(2). <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.06.008>
- Drew, D. M., Downes, G. M., & Battaglia, M. (2010). CAMBIUM, a process-based model of daily xylem development in Eucalyptus. *Journal of Theoretical Biology*, 264(2). <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2010.02.013>

- Drew, D. M., Richards, A. E., Downes, G. M., Cook, G. D., & Baker, P. (2011). The development of seasonal tree water deficit in *Callitris intratropica*. *Tree Physiology*, 31(9). <https://doi.org/10.1093/treephys/tpr031>
- Duchemin, B., Hadria, R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J. C. B., Kharrou, M. H., Khabba, S., Mougnot, B., Olioso, A., Rodriguez, J. C., & Simonneaux, V. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, 79(1). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.02.013>
- Duchesne, L., Houle, D., & D'Orangeville, L. (2012). Influence of climate on seasonal patterns of stem increment of balsam fir in a boreal forest of Québec, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 162–163, 108–114. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2012.04.016>
- Dünisch, O., & Morais, R. R. (2002). Regulation of xylem sap flow in an evergreen, a semi-deciduous, and a deciduous Meliaceae species from the Amazon. *Trees - Structure and Function*, 16(6). <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0182-6>
- Dzurisin, D., & Lu, Z. (2007). Interferometric synthetic-aperture radar (InSAR). In D. Dzurisin (Ed.), *Volcano Deformation: Geodetic Monitoring Techniques* (pp. 153–194). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-49302-0_5
- Eder, F., De Roo, F., Rotenberg, E., Yakir, D., Schmid, H. P., & Mauder, M. (2015). Secondary circulations at a solitary forest surrounded by semi-arid shrubland and their impact on eddy-covariance measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 211–212. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.06.001>
- Ehrenberger, W., Rüger, S., Fitzke, R., Vollenweider, P., Günthardt-Goerg, M., Kuster, T., Zimmermann, U., & Arend, M. (2012). Concomitant dendrometer and leaf patch pressure probe measurements reveal the effect of microclimate and soil moisture on diurnal stem water and leaf turgor variations in young oak trees. *Functional Plant Biology*, 39(4). <https://doi.org/10.1071/FP11206>
- El Idrissi Essebtey, S., Villard, L., Borderies, P., Koleck, T., Burban, B., & Le Toan, T. (2022). Long-Term Trends of P-Band Temporal Decorrelation over a Tropical Dense Forest-

- Experimental Results for the BIOMASS Mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3082395>
- El Idrissi Essebtey, S., Villard, L., Borderies, P., Koleck, T., Monvoisin, J. P., Burban, B., & Le Toan, T. (2020). Temporal Decorrelation of Tropical Dense Forest at C-Band: First Insights from the TropiScat-2 Experiment. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(6). <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2937382>
- El Qarnifa, S., El Antari, A., & Hafidi, A. (2019). Effect of Maturity and Environmental Conditions on Chemical Composition of Olive Oils of Introduced Cultivars in Morocco. *Journal of Food Quality*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/1854539>
- Elachi, C., Bicknell, T., Jordan, R. L., & Wu, C. (1982). Spaceborne Synthetic-Aperture Imaging Radars: Applications, Techniques, and Technology. *Proceedings of the IEEE*, 70(10). <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12448>
- Engdahl, M. (2013). Multitemporal InSAR in land-cover and vegetation mapping. In *Thesis*.
- Er-Raki, S. (2007). *Estimation des besoins en eau des cultures dans la région de Tensift AL Haouz : Modélisation, Expérimentation et Télédétection | Request PDF*. https://www.researchgate.net/publication/249010452_Estimation_des_besoins_en_eau_de_s_cultures_dans_la_region_de_Tensift_AL_Haouz_Modelisation_Expérimentation_et_Telédétection
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Khabba, S., Simonneaux, V., Jarlan, L., Ouldbba, A., Rodriguez, J. C., & Allen, R. (2010). Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: Can weather forecast data be used as alternate of ground meteorological parameters? *Journal of Arid Environments*, 74(12). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.07.002>
- ESA. (2012). Sentinel-1: ESA's radar observatory mission for GMES operational services. In *ESA Special Publication* (Vol. 1, Issue 1322).
- ESA. (2020). *Observation Scenario*.
- Escalona, J., Flexas, J., & Medrano, H. (2002). Drought effects on water flow, photosynthesis and growth of potted grapevines. *Vitis*, 41(2).
- Essebtey, S. E. I., Villard, L., Borderies, P., Koleck, T., Burban, B., & Toan, T. Le. (2020). Comparative Study of Temporal Decorrelation at P, L and C-Bands: First Insights from the

- Tropiscat-2 Experiment. *2020 Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium, M2GARSS 2020 - Proceedings*.
<https://doi.org/10.1109/M2GARSS47143.2020.9105253>
- Evelt, S. R. (2001). Water and energy balances at soil-plant-atmosphere interfaces. In *Soil Physics Companion*. <https://doi.org/10.1201/9781420041651.ch5>
- Ezzahar, J. (2007). *Spatialisation des flux d'énergie et de masse à l'interface biosphère-atmosphérique dans les régions semi-arides en utilisant la méthode de scintillation*.
https://opac.imist.ma/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=23766&shelfbrowse_itemnumber=26003
- Fan, Z. X., Bräuning, A., Fu, P. L., Yang, R. Q., Qi, J. H., Grießinger, J., & Gebrekirstos, A. (2019). Intra-annual radial growth of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* is mainly controlled by moisture availability in the Ailao Mountains, southwestern China. *Forests*, *10*(10).
<https://doi.org/10.3390/f10100899>
- FAO. (2011). State of Food and Agriculture 2010-2011. In *Lancet* (Vol. 2).
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. E. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, *45*(2). <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Fernández, J. E. (2017). Plant-based methods for irrigation scheduling of woody crops. In *Horticulturae* (Vol. 3, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020035>
- Fernández, J. E., & Cuevas, M. V. (2010). Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. In *Agricultural and Forest Meteorology* (Vol. 150, Issue 2).
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.006>
- Fernández, J. E., & Moreno, F. (1999). Water use by the olive tree. In *Journal of Crop Production* (Vol. 2, Issue 2). https://doi.org/10.1300/J144v02n02_05
- Fernández, J. E., Palomo, M. J., Díaz-Espejo, A., Clothier, B. E., Green, S. R., Girón, I. F., & Moreno, F. (2001). Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: Tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management*, *51*(2).
[https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00119-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00119-6)

- Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Thapa, R. B., & Cherrington, E. (2019). SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation. *THE SAR HANDBOOK Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*.
- Friend, A. D., Arneth, A., Kiang, N. Y., Lomas, M., Ogée, J., Rödenbeck, C., Running, S. W., Santaren, J. D., Sitch, S., Viovy, N., Ian Woodward, F., & Zaehle, S. (2007). FLUXNET and modelling the global carbon cycle. *Global Change Biology*, 13(3). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01223.x>
- Friesen, J. (2008). Regional vegetation water effects on satellite soil moisture estimations for West Africa. In *Ecology and Development Series 63*.
- Friesen, J., Winsemius, H. C., Beck, R., Scipal, K., Wagner, W., & De Giesen, N. Van. (2007). Spatial and seasonal patterns of diurnal differences in ERS scatterometer soil moisture data in the volta basin, West Africa. *IAHS-AISH Publication*, 316.
- Frison, P. L., Fruneau, B., Kmiha, S., Soudani, K., Dufrêne, E., Le Toan, T., Koleček, T., Villard, L., Mougín, E., & Rudant, J. P. (2018). Potential of Sentinel-1 data for monitoring temperate mixed forest phenology. In *Remote Sensing* (Vol. 10, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/rs10122049>
- Frison, P. L., Jarlan, L., & Mougín, E. (2016). Using Satellite Scatterometers to Monitor Continental Surfaces. *Land Surface Remote Sensing in Continental Hydrology*, 79–113. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-104-8.50003-6>
- Frison, P. L., & Lardeux, C. (2018). Vegetation Cartography from Sentinel-1 Radar Images. In *QGIS and Applications in Agriculture and Forest* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1002/9781119457107.ch6>
- Frison, P. L., Lardeux, C., Fruneau, B., & Rudant, J. P. (2019). Polarimétrie radar complète et partielle pour le suivi des surfaces terrestres. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 2019-June(219–220). <https://doi.org/10.52638/rfpt.2019.464>
- Frison, P. L., & Mougín, E. (1996). Monitoring global vegetation dynamics with ERS-1 wind scatterometer data. *International Journal of Remote Sensing*, 17(16). <https://doi.org/10.1080/01431169608949139>

- Frolking, Steve., Milliman, T., McDonald, K., Kimball, J., Zhao, M., & Fahnestock, M. (2006). Evaluation of the Sea Winds scatterometer for regional monitoring of vegetation phenology. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(17). <https://doi.org/10.1029/2005JD006588>
- Frolking, S., Milliman, T., Palace, M., Wisser, D., Lammers, R., & Fahnestock, M. (2011). Tropical forest backscatter anomaly evident in SeaWinds scatterometer morning overpass data during 2005 drought in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 115(3). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.11.017>
- Gan, G., & Gao, Y. (2015). Estimating time series of land surface energy fluxes using optimized two source energy balance schemes: Model formulation, calibration, and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.04.007>
- Garg, A., Sharma, R., & Dhingra, V. (2011). *Polarization studies in a computer based laboratory*.
- Gerdes, G., Allison, B. E., & Pereira, L. S. (1994). Overestimation of soybean crop transpiration by sap flow measurements under field conditions in Central Portugal. *Irrigation Science*, 14(3). <https://doi.org/10.1007/BF00193135>
- Giovannelli, A., Muzzini, V. G., Traversi, M. L., & Cinti, B. De. (2021). *Early Detection of Decline in Tree Health. Could the Pace of Stem Water Be an Effective Indicator?* <https://doi.org/10.3390/iecf2020-08112>
- Goodman, J. W. (1976). Some fundamental properties of speckle*. *Journal of the Optical Society of America*, 66(11). <https://doi.org/10.1364/josa.66.001145>
- Goodman, J. W., & Narducci, L. M. (1986). Statistical Optics . *Physics Today*, 39(10). <https://doi.org/10.1063/1.2815179>
- Grandi, L., Oehl, M., Lombardi, T., de Michele, V. R., Schmitt, N., Verweire, D., & Balmer, D. (2023). Innovations towards sustainable olive crop management: a new dawn by precision agriculture including endo-therapy. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 14). <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1180632>
- Granier A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. For. Sci.*, 42(2), 193–200. <https://doi.org/10.1051/forest:19850204>

- Granier, A. (1987). Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3(4). <https://doi.org/10.1093/treephys/3.4.309>
- Greifeneder, F., Notarnicola, C., Hahn, S., Vreugdenhil, M., Reimer, C., Santi, E., Paloscia, S., & Wagner, W. (2018). The Added Value of the VH/VV Polarization-Ratio for Global Soil Moisture Estimations from Scatterometer Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(10). <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2865185>
- Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T. W., Sperry, J. S., & McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6), 1550–1566. <https://doi.org/10.1111/NPH.16485>
- Gucci, R., & Cantini, C. (2019). Pruning and Training Systems for Modern Olive Growing. In *Pruning and Training Systems for Modern Olive Growing*. <https://doi.org/10.1071/9780643101302>
- Hamadi, A., Albinet, C., Borderies, P., Koleček, T., Villard, L., Ho Tong Minh, D., & Le Toan, T. (2014). Temporal survey of polarimetric P-Band scattering of tropical forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(8). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2282357>
- Hamadi, A., Borderies, P., Albinet, C., Koleček, T., Villard, L., Ho Tong Minh, D., Le Toan, T., & Burban, B. (2015). Temporal coherence of tropical forests at P-band: Dry and rainy seasons. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(3). <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2350513>
- Häusler, G. (1998). “Coherence Radar” and “Spectral Radar”—New Tools for Dermatological Diagnosis. *Journal of Biomedical Optics*, 3(1). <https://doi.org/10.1117/1.429899>
- Henderson, F. M., & Lewis, A. J. (1998). *Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing Third edition, Volume 2 John Wiley and Sons.*
- Henriksen, S. W. (1975). Radar-Range Equation. *Proceedings of the IEEE*, 63(5), 813–814. <https://doi.org/10.1109/PROC.1975.9829>
- Herrmann, V., McMahon, S. M., Detto, M., Lutz, J. A., Davies, S. J., Chang-Yang, C. H., & Anderson-Teixeira, K. J. (2016). Tree circumference dynamics in four forests characterized

using automated dendrometer bands. *PLoS ONE*, 11(12).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169020>

Herzog, K. M., Häslner, R., & Thum, R. (1995). Diurnal changes in the radius of a subalpine Norway spruce stem: their relation to the sap flow and their use to estimate transpiration. *Trees: Structure and Function*, 10(2), 94–101. <https://doi.org/10.1007/BF00192189>

Holmes, J. W. (1984). Measuring evapotranspiration by hydrological methods. *Agricultural Water Management*, 8(1–3). [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(84\)90044-1](https://doi.org/10.1016/0378-3774(84)90044-1)

Hölttä, T., Linkosalo, T., Riikonen, A., Sevanto, S., & Nikinmaa, E. (2015). An analysis of Granier sap flow method, its sensitivity to heat storage and a new approach to improve its time dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 211–212, 2–12. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2015.05.005>

Huryna, H., & Pokorný, J. (2016). The role of water and vegetation in the distribution of solar energy and local climate: a review. *Folia Geobotanica*, 51(3). <https://doi.org/10.1007/s12224-016-9261-0>

Imperatore, P., & Pepe, A. (2016). *Geospatial Technology*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/61680>

Inoue, T., Sunaga, M., Ito, M., Yuchen, Q., Matsushima, Y., Sakoda, K., & Yamori, W. (2021). Minimizing VPD Fluctuations Maintains Higher Stomatal Conductance and Photosynthesis, Resulting in Improvement of Plant Growth in Lettuce. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.646144>

Ishikawa, M., Avtar, R., & Mo, S. (2023). Using interferometric synthetic aperture rader (InSAR) analysis to detect ground deformation related to irreversibly changing ground ice, Mongolia. *Land Degradation and Development*, 34(9). <https://doi.org/10.1002/ldr.4644>

Jarlan, L., Khabba, S., Er-Raki, S., Le Page, M., Hanich, L., Fakir, Y., Merlin, O., Mangiarotti, S., Gascoin, S., Ezzahar, J., Kharrou, M. H., Berjamy, B., Saaïdi, A., Boudhar, A., Benkaddour, A., Laftouhi, N., Abaoui, J., Tavernier, A., Boulet, G., ... Escadafal, R. (2015a). Remote Sensing of Water Resources in Semi-Arid Mediterranean Areas: the joint international laboratory TREMA. *International Journal of Remote Sensing*, 36(19–20). <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1093198>

- Jarlan, L., Khabba, S., Er-Raki, S., Le Page, M., Hanich, L., Fakir, Y., Merlin, O., Mangiarotti, S., Gascoin, S., Ezzahar, J., Kharrou, M. H., Berjamy, B., Saaïdi, A., Boudhar, A., Benkaddour, A., Laftouhi, N., Abaoui, J., Tavernier, A., Boulet, G., ... Escadafal, R. (2015b). Remote Sensing of Water Resources in Semi-Arid Mediterranean Areas: the joint international laboratory TREMA. *International Journal of Remote Sensing*, 36(19–20). <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1093198>
- Jensen, M. E., Burman, R. D., Allen, R. G. (Rick G.), & American Society of Civil Engineers. Committee on Irrigation Water Requirements. (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements: a manual. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice (USA)*. No. 70., 332. <https://doi.org/10.3/JQUERY-UIJS>
- Jones, Bruce., & Brien, E. (2014). The new politics of strategic resources: Energy and food security challenges in the 21st century. In *The New Politics of Strategic Resources: Energy and Food Security Challenges in the 21st Century*. <https://doi.org/10.1007/9780815725343>
- Jones, P. D., New, M., Parker, D. E., Martin, S., & Rigor, I. G. (1999). Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Reviews of Geophysics*, 37(2). <https://doi.org/10.1029/1999RG900002>
- 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 2008 29:4*, 29(4), 421–469. <https://doi.org/10.1007/S10712-008-9037-Z>
- Kargas, G., & Soulis, K. X. (2019). Performance evaluation of a recently developed soil water content, dielectric permittivity, and bulk electrical conductivity electromagnetic sensor. *Agricultural Water Management*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.002>
- Karmaoui, A., Ben Salem, A., El Jaafari, S., Chaachouay, H., Moumane, A., & Hajji, L. (2022). Exploring the land use and land cover change in the period 2005–2020 in the province of Errachidia, the pre-sahara of Morocco. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.962097>
- Khoali, S., Lakhyar, Z., Laamari, A., & Faris, H. (2023). Analyse de la performance et de l'efficience des exploitations agricoles de la région Tadla. *African and Mediterranean Agricultural Journal - Al Awamia*, 140, 75–94. <https://doi.org/10.34874/IMIST.PRSM/AFRIMED-I140.43740>

- Kildal, P. S., & Lier, E. (1988). Hard horns improve cluster feeds of satellite antennas. *Electronics Letters*, 24(8). <https://doi.org/10.1049/el:19880333>
- Kim, E. S., Cho, H. B., Heo, D., Kim, N. S., Kim, Y. S., Lee, K., Lee, S. H., & Ryu, J. (2019). Precision monitoring of radial growth of trees and micro-climate at a Korean Fir (*Abies koreana* Wilson) forest at 10 minutes interval in 2016 on Mt. Hallasan National Park, Jeju Island, Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 43(1). <https://doi.org/10.1186/s41610-019-0117-4>
- Kim, Kyeongrok., Kang, J., & Kim, J. H. (2022). Phase calibration for ideal wideband chirp in satellite-based synthetic aperture radar. *ICT Express*, 8(4). <https://doi.org/10.1016/j.ict.2021.09.007>
- Kondawar, S. B., & Modak, P. R. (2020). Chapter 2 - Theory of EMI shielding. In K. Joseph, R. Wilson, & G. George (Eds.), *Materials for Potential EMI Shielding Applications* (pp. 9–25). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817590-3.00002-6>
- Konings, A. G., Yu, Y., Xu, L., Yang, Y., Schimel, D. S., & Saatchi, S. S. (2017). Active microwave observations of diurnal and seasonal variations of canopy water content across the humid African tropical forests. *Geophysical Research Letters*, 44(5). <https://doi.org/10.1002/2016GL072388>
- Kumar, D. (2021). Urban objects detection from C-band synthetic aperture radar (SAR) satellite images through simulating filter properties. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85121-9>
- Kumjian, M. R. (2018). Weather Radars. In C. Andronache (Ed.), *Remote Sensing of Clouds and Precipitation* (pp. 15–63). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72583-3_2
- Kunz, L. B., & Long, D. G. (2005). Calibrating SeaWinds and QuikSCAT scatterometers using natural land targets. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(2). <https://doi.org/10.1109/LGRS.2004.842468>
- Kustas, W. P., Norman, J. M., Anderson, M. C., & French, A. N. (2003). Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment*, 85(4). [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00036-1)

- Lalic, B., Eitzinger, J., Dalla Marta, A., Orlandini, S., Firanj Sremac, A., & Pacher, B. (2018). Agricultural Meteorology and Climatology. In *Manuali – Scienze Tecnologiche*. Firenze University Press. <https://doi.org/10.36253/978-88-6453-795-5>
- Lambers, H., & Oliveira, R. S. (2019). Plant Water Relations. In H. Lambers & R. S. Oliveira (Eds.), *Plant Physiological Ecology* (pp. 187–263). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29639-1_5
- Larsen, F. E., Higgins, S. S., & Al Wir, A. (1989). Diurnal water relations of apple, apricot, grape, olive and peach in an arid environment (Jordan). *Scientia Horticulturae*, 39(3). [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(89\)90134-9](https://doi.org/10.1016/0304-4238(89)90134-9)
- Lavee, S., Rallo, L., Rapoport, H. F., & Troncoso, A. (1996). The floral biology of the olive: Effect of flower number, type and distribution on fruitset. *Scientia Horticulturae*, 66(3–4). [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(96\)00941-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(96)00941-7)
- Le-Page, M., Berjamy, B., Fakir, Y., Bourgin, F., Jarlan, L., Abourida, A., Benrhanem, M., Jacob, G., Huber, M., Sghrer, F., Simonneaux, V., & Chehbouni, G. (2012). An Integrated DSS for Groundwater Management Based on Remote Sensing. The Case of a Semi-arid Aquifer in Morocco. *Water Resources Management*, 26(11), 3209–3230. <https://doi.org/10.1007/S11269-012-0068-3/METRICS>
- Leberl, F. W. (1990). Radargrammetric image processing. In *Artech House remote sensing library* (pp. xvii, 595 p., [8] p. of plates). <http://books.google.de/books?id=KjHNAAAACAAJ>
- Lee, J.-S., & Pottier, E. (2009). Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications. In *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. <https://doi.org/10.1201/9781420054989>
- Lee, J. Sen, Grunes, M. R., Schuler, D. L., Pottier, E., & Ferro-Famil, L. (2006). Scattering-model-based speckle filtering of polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(1). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.859338>
- Lee-Lueng Fu, & Holt, B. (1982). *Seasat views oceans and sea ice with synthetic aperture radar*.
- Leštianska, A., Fleischer, P., Merganičová, K., Fleischer, P., Nalevanková, P., & Štřelcová, K. (2023). Effect of Provenance and Environmental Factors on Tree Growth and Tree Water Status of Norway Spruce. *Forests*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/f14010156>

- Li, R., He, Y., Chen, J., Zheng, S., & Zhuang, C. (2023). Research Progress in Improving Photosynthetic Efficiency. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 24, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/ijms24119286>
- Lionello, P., & Scarascia, L. (2018). The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Regional Environmental Change*, 18(5). <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1290-1>
- Lockhart, J. A. (1965). An analysis of irreversible plant cell elongation. *Journal of Theoretical Biology*, 8(2). [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(65\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0022-5193(65)90077-9)
- Long, D. G., & Skouson, G. B. (1996). Calibration of spaceborne scatterometers using tropical rain forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2). <https://doi.org/10.1109/36.485119>
- Lu, P., Urban, L., & Zhao, P. (2004). Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: Theory and practice. *Acta Botanica Sinica*, 46(6).
- Luo, T., Young, R., & Reig., P. (2015). Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings. *World Resources Institute, August*.
- Ma, Y., Zhou, J., Liu, S., Zhang, W., Zhang, Y., Xu, Z., Song, L., & Zhao, H. (2022). Estimation of evapotranspiration using all-weather land surface temperature and variational trends with warming temperatures for the River Source Region in Southwest China. *Journal of Hydrology*, 613. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128346>
- Mandal, D., Bhattacharya, A., & Rao, Y. S. (2021). Vegetation Models: Empirical and Theoretical Approaches. In D. Mandal, A. Bhattacharya, & Y. S. Rao (Eds.), *Radar Remote Sensing for Crop Biophysical Parameter Estimation* (pp. 37–72). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4424-5_3
- Martínez-Sancho, E., Treydte, K., Lehmann, M. M., Rigling, A., & Fonti, P. (2022). Drought impacts on tree carbon sequestration and water use – evidence from intra-annual tree-ring characteristics. *New Phytologist*, 236(1). <https://doi.org/10.1111/nph.18224>
- Marzuki, M. I., Rahmania, R., Kusumaningrum, P. D., Akhwady, R., Sianturi, D. S. A., Firdaus, Y., Sufyan, A., Hatori, C. A., & Chandra, H. (2021). Fishing boat detection using Sentinel-1 validated with VIIRS Data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 925(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/925/1/012058>

- Maselli, F., Chiesi, M., Angeli, L., Fibbi, L., Rapi, B., Romani, M., Sabatini, F., & Battista, P. (2020). An improved NDVI-based method to predict actual evapotranspiration of irrigated grasses and crops. *Agricultural Water Management*, 233. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106077>
- Mashaly, A. S., & Mahmoud, T. A. (2021). A Survey on Speckle Noise Reduction for SAR Images. In *Studies in Big Data* (Vol. 77). https://doi.org/10.1007/978-3-030-59338-4_15
- Masmoudi-Charfi, C., & Ben Mechlia, N. (2007). Characterization of young olive trees growth during the first six years of cultivation. *Advances in Horticultural Science*, 21(2).
- Massman, W. J., Fox, D. G., Zeller, K. F., & Lukens, D. (1990). Verifying eddy correlation measurements of dry deposition: a study of the energy balance components of the Pawnee Grasslands. *Research Paper - US Department of Agriculture, Forest Service, RM-288*.
- Matsuo, S. (1938). A direct-reading radio-wave-reflection-type absolute altimeter for aeronautics. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 26(7). <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1938.228387>
- Mauder, M., Oncley, S. P., Vogt, R., Weidinger, T., Ribeiro, L., Bernhofer, C., Foken, T., Kohsiek, W., Bruin, H. A. R., & Liu, H. (2007). The energy balance experiment EBEX-2000. Part II: Intercomparison of eddy-covariance sensors and post-field data processing methods. *Boundary-Layer Meteorology*, 123(1), 29–54. <https://doi.org/10.1007/S10546-006-9139-4/METRICS>
- McDonald, K. C., Zimmermann, R., & Kimball, J. S. (2002). Diurnal and spatial variation of xylem dielectric constant in Norway Spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) as related to microclimate, xylem sap flow, and xylem chemistry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(9). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803737>
- McInerney, D., & Kempeneers, P. (2015). Open source geospatial tools: Applications in Earth observation. In *Open Source Geospatial Tools: Applications in Earth Observation*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01824-9>
- MedECC. (2020). Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report. *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future*.

- Medrano, H., Escalona, J. M., Bota, J., Gulías, J., & Flexas, J. (2002). Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: Stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of Botany*, 89. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf079>
- Meliho, M., Khattabi, A., Jobbins, G., & Sghir, F. (2020). Impact of meteorological drought on agriculture in the tensift watershed of morocco. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4). <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.279>
- Meng, Shengwang., Fu, Xiaoli., Zhao, Bo., Dai, Xiaoqin., Li, Qingkang., Yang, Fengting., Kou, Liang., & Wang, Huimin. (2021). Intra-annual radial growth and its climate response for Masson pine and Chinese fir in subtropical China. *Trees - Structure and Function*, 35(6). <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02152-5>
- Merrill, S. (1963). Introduction to Radar Systems. *The Aeronautical Journal*, 67(629), 313–313. <https://doi.org/10.1017/S0368393100078755>
- Milano, M., Bleu, P., & Antipolis, S. (2010). *The foreseeable impacts of climate change on the water resources of four major Mediterranean catchment basins.*
- Mishra, R. K. (2023). Fresh Water availability and Its Global challenge. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, 4(3), 1–78. <https://doi.org/10.37745/bjmas.2022.0208>
- Mitchell, D., Erfani, E., Garnier, A., Lawson, P., Morrison, H., & Avery, M. (1998). *Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing: Third edition, Volume 2.* <https://doi.org/10.2172/1337701>
- Moiwo, J. P., & Tao, F. (2015). Contributions of precipitation, irrigation and soil water to evapotranspiration in (semi)-arid regions. *International Journal of Climatology*, 35(6). <https://doi.org/10.1002/joc.4040>
- Monteith, A. (2020). *Temporal Characteristics of Boreal Forest Radar Measurements.* Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).
- Monteith, A. R., & Ulander, L. M. H. (2018). Temporal survey of P- A nd L-band polarimetric backscatter in boreal forests. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(10). <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2814825>

- Monteith, A. R., & Ulander, L. M. H. (2021). Temporal Characteristics of P-Band Tomographic Radar Backscatter of a Boreal Forest. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3050611>
- Monteith, A. R., & Ulander, L. M. H. (2022a). A Tower-Based Radar Study of Temporal Coherence of a Boreal Forest at P-, L-, and C-Bands and Linear Cross Polarization. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3074098>
- Monteith, A. R., & Ulander, L. M. H. (2022b). A Tower-Based Radar Study of Temporal Coherence of a Boreal Forest at P-, L-, and C-Bands and Linear Cross Polarization. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3074098>
- Monteith, J. (1995). A reinterpretation of stomatal responses to humidity. *Plant, Cell & Environment*, 18(4), 357–364. <https://doi.org/10.1111/J.1365-3040.1995.TB00371.X>
- Montginoul, M., & Molle, F. (2019). *Modernisation des périmètres irrigués au Maroc : une solution aux effets contrastés pour les agriculteurs et la ressource en eau. Le cas d'un périmètre du N'Fis - Haouz*. <https://hal.science/hal-02963118>
- Moorhead, Jerry. (2019). Field-Scale Estimation of Evapotranspiration. In *Advanced Evapotranspiration Methods and Applications*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80945>
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1). <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>
- Morino, K., Minor, R. L., Barron-Gafford, G. A., Brown, P. M., & Hughes, M. K. (2021). Bimodal cambial activity and false-ring formation in conifers under a monsoon climate. *Tree Physiology*, 41(10). <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab045>
- Munson, D. C., O'Brien, J. D., & Kenneth Jenkins, W. (1983). A Tomographic Formulation of Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar. *Proceedings of the IEEE*, 71(8). <https://doi.org/10.1109/PROC.1983.12698>
- Nadezhkina, N. (1999). Sap flow index as an indicator of plant water status. *Tree Physiology*, 19(13). <https://doi.org/10.1093/treephys/19.13.885>

- Nasirzadehdizaji, R., Cakir, Z., Balik Sanli, F., Abdikan, S., Pepe, A., & Calò, F. (2021). Sentinel-1 interferometric coherence and backscattering analysis for crop monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106118>
- Ndehedehe, C. (2022). Satellite Remote Sensing of Terrestrial Hydrology. In *Satellite Remote Sensing of Terrestrial Hydrology*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-99577-5>
- Nicholson, S. E. (2011). Introduction to dryland environments. In *Dryland Climatology* (pp. 3–23). Cambridge University Press.
- Oberhuber, W., Gruber, A., Kofler, W., & Swidrak, I. (2014). Radial stem growth in response to microclimate and soil moisture in a drought-prone mixed coniferous forest at an inner Alpine site. *European Journal of Forest Research*, 133(3). <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0777-z>
- Obojes, N., Meurer, A. K., Newesely, C., Tasser, E., Oberhuber, W., Mayr, S., & Tappeiner, U. (2022). Swiss stone pine growth benefits less from recent warming than European larch at a dry-inner alpine forest line as it reacts more sensitive to humidity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108788>
- Oh, Y. (2004). Quantitative retrieval of soil moisture content and surface roughness from multipolarized radar observations of bare soil surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(3). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.821065>
- Olioso, A., Inoue, Y., Ortega-Farias, S., Demarty, J., Wigneron, J. P., Braud, I., Jacob, F., Lecharpentier, P., Ottlé, C., Calvet, J. C., & Brisson, N. (2005). Future directions for advanced evapotranspiration modeling: Assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. *Irrigation and Drainage Systems*, 19(3–4). <https://doi.org/10.1007/s10795-005-8143-z>
- Olive phenological phases and their nutrition requirements - SQM Specialty Plant Nutrition*. (n.d.). Retrieved June 16, 2022, from <https://sqmnutrition.com/en/essays/olive-phenological-phases-and-their-nutrition-requirements/>
- Oliver, C., & Quegan, S. (2004). *Understanding synthetic aperture radar images*. Raleigh. <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:001695272>

- Orgaz, F., Villalobos, F. J., Testi, L., & Fereres, E. (2007). A model of daily mean canopy conductance for calculating transpiration of olive canopies. *Functional Plant Biology*, 34(3). <https://doi.org/10.1071/FP06306>
- Ortega-García, F., Blanco, S., Peinado, M. Á., & Peragón, J. (2008). Polyphenol oxidase and its relationship with oleuropein concentration in fruits and leaves of olive (*Olea europaea*) cv. “Picual” trees during fruit ripening. *Tree Physiology*, 28(1). <https://doi.org/10.1093/treephys/28.1.45>
- Ortuño, M. F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M. C., Alarcón, J. J., & Torrecillas, A. (2006). Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees - Structure and Function*, 20(1). <https://doi.org/10.1007/s00468-005-0004-8>
- Ouaadi, N., Ezzahar, J., Khabba, S., Er-Raki, S., Chakir, A., Ait Hssaine, B., Le Dantec, V., Rafi, Z., Beaumont, A., Kasbani, M., & Jarlan, L. (2021). C-band radar data and in situ measurements for the monitoring of wheat crops in a semi-Arid area (center of Morocco). *Earth System Science Data*, 13(7). <https://doi.org/10.5194/essd-13-3707-2021>
- Ouaadi, N., Jarlan, L., Ezzahar, J., Zribi, M., Khabba, S., Bouras, E., Bousbih, S., & Frison, P. L. (2020). Monitoring of wheat crops using the backscattering coefficient and the interferometric coherence derived from Sentinel-1 in semi-arid areas. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112050. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2020.112050>
- Ouchi, K. (2013). Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics. In *Remote Sensing* (Vol. 5, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/rs5020716>
- Özkan, İ., & Baykal, P. (2016, February). *Investigation of Electromagnetic Polarization Properties of Silver-Containing Robotuft Carpets*.
- Paget, A. C., Long, D. G., & Madsen, N. M. (2016). RapidScat Diurnal Cycles over Land. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(6). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2515022>
- Pandit, A., Sawant, S., Mohite, J., & Pappula, S. (2022). Sentinel-1-derived coherence time-series for crop monitoring in Indian agriculture region. *Geocarto International*, 37(25). <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.2022008>

- Panisset, J. S., Libonati, R., Gouveia, C. M. P., Machado-Silva, F., França, D. A., França, J. R. A., & Peres, L. F. (2018). Contrasting patterns of the extreme drought episodes of 2005, 2010 and 2015 in the Amazon Basin. *International Journal of Climatology*, 38(2). <https://doi.org/10.1002/joc.5224>
- Park, J. W., Korosov, A. A., Babiker, M., Sandven, S., & Won, J. S. (2018). Efficient Thermal Noise Removal for Sentinel-1 TOPSAR Cross-Polarization Channel. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(3). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2765248>
- Perämäki, M., Nikinmaa, E., Sevanto, S., Ilvesniemi, H., Siivola, E., Hari, P., & Vesala, T. (2001). Tree stem diameter variations transpiration in Scots pine: An analysis using a dynamic sap flow model. *Tree Physiology*, 21(12–13). <https://doi.org/10.1093/treephys/21.12-13.889>
- Pfautsch, S., Hölttä, T., & Mencuccini, M. (2015). Hydraulic functioning of tree stems - Fusing ray anatomy, radial transfer and capacitance. In *Tree Physiology* (Vol. 35, Issue 7). <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv058>
- Porcello, L. J., Massey, N. G., Innes, R. B., & Marks, J. M. (1976). Speckle reduction in synthetic-aperture radars. *J. Opt. Soc. Am.*, 66(11), 1305–1311. <https://doi.org/10.1364/JOSA.66.001305>
- Quartly, G. D., Chen, G., Nencioli, F., Morrow, R., & Picot, N. (2021). An overview of requirements, procedures and current advances in the calibration/validation of radar altimeters. *Remote Sensing*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/rs13010125>
- Quegan, S., Le Toan, T., Chave, J., Dall, J., Exbrayat, J. F., Minh, D. H. T., Lomas, M., D'Alessandro, M. M., Paillou, P., Papathanassiou, K., Rocca, F., Saatchi, S., Scipal, K., Shugart, H., Smallman, T. L., Soja, M. J., Tebaldini, S., Ulander, L., Villard, L., & Williams, M. (2019). The European Space Agency BIOMASS mission: Measuring forest above-ground biomass from space. *Remote Sensing of Environment*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.032>
- Rafi, Z., Merlin, O., Le Dantec, V., Khabba, S., Mordelet, P., Er-Raki, S., Amazirh, A., Olivera-Guerra, L., Ait Hssaine, B., Simonneaux, V., Ezzahar, J., & Ferrer, F. (2019). Partitioning evapotranspiration of a drip-irrigated wheat crop: Inter-comparing eddy covariance-, sap flow-, lysimeter- and FAO-based methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.031>

- Rahman, I. Md. M., & Hasegawa, H. (2012). *Water Stress*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/1419>
- Rajender, Dr. U. (2023). Designing of Synthetic Aperture Radar Based Control Algorithms for the Autonomous Vehicles. *INTERANTIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 07(01). <https://doi.org/10.55041/ijrsrem17444>
- Rallo, L., Torreño, P., Vargas, A., & Alvarado, J. (1994). DORMANCY AND ALTERNATE BEARING IN OLIVE. *Acta Horticulturae*, 356. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1994.356.28>
- Ramos, A., Rapoport, H. F., Cabello, D., & Rallo, L. (2018). Chilling accumulation, dormancy release temperature, and the role of leaves in olive reproductive budburst: Evaluation using shoot explants. *Scientia Horticulturae*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.11.003>
- Rana, G., & Katerji, N. (2000). Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: A review. *European Journal of Agronomy*, 13(2–3). [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8)
- Rathod, P., & Manekar, V. L. (2017). *Estimation of Pan Evaporation and Actual Evapotranspiration Using GIS and Remote Sensing*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55125-8_20
- Rawson, R., & Smith, F. (1974). *FOUR CHANNEL SIMULTANEOUS X-L BAND IMAGING SAR RADAR. 1*.
- Razali, S. M., Nuruddin, A. A., & Lion, M. (2019). Mangrove vegetation health assessment based on remote sensing indices for Tanjung Piai, Malay peninsular. *Journal of Landscape Ecology(Czech Republic)*, 12(2). <https://doi.org/10.2478/jlecol-2019-0008>
- Rehana, S., & Mujumdar, P. P. (2013). Regional impacts of climate change on irrigation water demands. *Hydrological Processes*, 27(20). <https://doi.org/10.1002/hyp.9379>
- Richard Bagan, César Luis García, Nebo Jovanovic, Ingrid Teich, Manfred Fink, & Sebinasi Dzikiti. (2020). Estimating evapotranspiration in a semi-arid catchment: A comparison of hydrological modelling and remote-sensing approaches. *Water SA*, 46(2 April). <https://doi.org/10.17159//wsa/2020.v46.i2.8231>
- Rocca, F., CAFFORIO, C., & PRATI, C. (1989). SYNTHETIC APERTURE RADAR:A NEW APPLICATION FOR WAVE EQUATION TECHNIQUES. *Geophysical Prospecting*,

- Rossi, S., Deslauriers, A., Gričar, J., Seo, J. W., Rathgeber, C. B. K., Anfodillo, T., Morin, H., Levanic, T., Oven, P., & Jalkanen, R. (2008). Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates. *Global Ecology and Biogeography*, 17(6). <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2008.00417.x>
- Rousseaux, M. C., Figuerola, P. I., Correa-Tedesco, G., & Searles, P. S. (2009). Seasonal variations in sap flow and soil evaporation in an olive (*Olea europaea* L.) grove under two irrigation regimes in an arid region of Argentina. *Agricultural Water Management*, 96(6). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.02.003>
- Saatchi, S., Asefi-Najafabady, S., Malhi, Y., Aragão, L. E. O. C., Anderson, L. O., Myneni, R. B., & Nemani, R. (2013). Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(2). <https://doi.org/10.1073/pnas.1204651110>
- Sánchez-Costa, E., Poyatos, R., & Sabaté, S. (2015). Contrasting growth and water use strategies in four co-occurring Mediterranean tree species revealed by concurrent measurements of sap flow and stem diameter variations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.012>
- Sandven, S., Johannessen, O., & Kloster, K. (2006). *Sea Ice Monitoring by Remote Sensing* (pp. 241 – 283). <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a2320>
- Sanz-Cortés, F., Martínez-Calvo, J., Badenes, M. L., Bleiholder, H., Hack, H., Llacer, G., & Meier, U. (2002). Phenological growth stages of olive trees (*Olea europaea*). *Annals of Applied Biology*, 140(2). <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2002.tb00167.x>
- Satake, M., & Hanado, H. (2004). Diurnal change of Amazon rain forest σ_0 observed by Ku-band spaceborne radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(6). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.825589>
- Schaber, G. G., Elachi, C., & Farr, T. G. (1980). Remote sensing data of SP Mountain and SP Lava flow in North-Central Arizona. *Remote Sensing of Environment*, 9(2). [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(80\)90005-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(80)90005-X)

- Schwerdt, M., Schmidt, K., Tous Ramon, N., Castellanos Alfonzo, G., Döring, B. J., Zink, M., & Prats-Iraola, P. (2016). Independent Verification of the Sentinel-1A System Calibration. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(3), 994–1007. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2449239>
- Selby, J. (2005). The geopolitics of water in the Middle East: Fantasies and realities. In *Third World Quarterly* (Vol. 26, Issue 2). <https://doi.org/10.1080/0143659042000339146>
- Sheil, D. (2003). Growth assessment in tropical trees: Large daily diameter fluctuations and their concealment by dendrometer bands. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(10). <https://doi.org/10.1139/x03-121>
- Shelton, M. L. (2008). Hydroclimatology: Perspectives and applications. In *Hydroclimatology: Perspectives and Applications* (Vol. 9780521848886). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754746>
- Sherin, G., Aswathi, K. P. R., & Puthur, J. T. (2022). Photosynthetic functions in plants subjected to stresses are positively influenced by priming. In *Plant Stress* (Vol. 4). <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100079>
- Shevah, Y. (2017). Chapter Six - Challenges and Solutions to Water Problems in the Middle East. In S. Ahuja (Ed.), *Chemistry and Water* (pp. 207–258). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809330-6.00006-4>
- Shokr, M., & Sinha, N. K. (2023). Sea ice: Physics and remote sensing. In *Sea Ice: Physics and Remote Sensing*.
- Shorachi, M., Kumar, V., & Steele-Dunne, S. C. (2022). Sentinel-1 SAR Backscatter Response to Agricultural Drought in The Netherlands. *Remote Sensing*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/rs14102435>
- Shuttleworth, W. J., & Wallace, J. S. (1985). Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111(465). <https://doi.org/10.1002/qj.49711146510>
- Sista, B., & Vemaganti, K. (2014). Estimation of statistical parameters of rough surfaces suitable for developing micro-asperity friction models. *Wear*, 316(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.04.012>
- Skolnik, Merrill. (1980). *Introduction to radar systems*. 581.

- Skolnik, M. I. (2008a). An Introduction and Overview of Radar. *Radar Handbook*, 1328.
- Skolnik, M. I. (2008b). An Introduction and Overview of Radar. *Radar Handbook*.
- Stannard, D. I., Gannett, M. W., Polette, D. J., Cameron, J. M., Waibel, M. S., & Spears, J. M. (2013). Evapotranspiration from Wetland and Open-Water Sites at Upper Klamath Lake , Oregon , 2008 – 2010. *Scientific Investigations Report 2013 – 5014*.
- Steele-Dunne, S. C., Friesen, J., & van de Giesen, N. (2012). Using Diurnal Variation in Backscatter to Detect Vegetation Water Stress. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(7), 2618–2629. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2194156>
- Steppe, K., Sterck, F., & Deslauriers, A. (2015). Diel growth dynamics in tree stems: Linking anatomy and ecophysiology. In *Trends in Plant Science* (Vol. 20, Issue 6). <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.03.015>
- Strozzi, T., Dämmert, P. B. G., Wegmüller, U., Martinez, J. M., Askne, J. I. H., Beaudoin, A., & Hallikainen, M. T. (2000). Landuse mapping with ERS SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2 I). <https://doi.org/10.1109/36.842005>
- Sunal, D., & Sunal, C. S. (1991). Tree Growth Rings: What They Tell Us. *Science Activities: Classroom Projects and Curriculum Ideas*, 28(2). <https://doi.org/10.1080/00368121.1991.9958101>
- Susan Moran, M., Hymer, D. C., Qi, J., & Sano, E. E. (2000). Soil moisture evaluation using multi-temporal synthetic aperture radar (SAR) in semiarid rangeland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 105(1–3), 69–80. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00189-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00189-1)
- Sweet, J., & Berthold, G. (1982). σ° Signature of the Amazon Rain Forest Obtained from the Seasat Scatterometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 20(1), 11–17. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1982.4307513>
- Tait, P. (2006). Introduction to radar target recognition. In *Introduction to Radar Target Recognition*. <https://doi.org/10.1049/PBRA018E>
- Tanouti, O., & Molle, F. (2013). Réappropriations de l'eau dans les bassins versants surexploités. *Études Rurales*, 192. <https://doi.org/10.4000/etudesrurales.9902>

- Tarbutck, E. J., & Lutgens, F. K. (2002). *Earth : an introduction to physical geology*. Prentice Hall.
- Taylor, A. H., Young, L. C., & Hyland, L. A. (1934). *System for detecting objects by radio*. Google Patents.
- Taylor, A. M., Gartner, B. L., & Morrell, J. J. (2002). Heartwood formation and natural durability - A review. *Wood and Fiber Science*, 34(4).
- Testi, L., Villalobos, F. J., & Orgaz, F. (2004). Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.005>
- Thom, A. S. (Alexander S. (1975). *Momentum, mass and heat exchange of plant communities. Vol.1, Edited by J.L. Monteith*.
- Tian, Y., Zhang, Q., Liu, X., & Meng, M. (2018). Stem radius variation in response to hydro-thermal factors in Larch. *Forests*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/f9100602>
- Tognetti, R., D'Andria, R., Morelli, G., Calandrelli, D., & Fragnito, F. (2004). Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees. *Plant and Soil*, 263(1). <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047738.96931.91>
- Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3). <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>
- Torres, M., Pierantozzi, P., Searles, P., Cecilia Rousseaux, M., García-Inza, G., Miserere, A., Bodoira, R., Contreras, C., & Maestri, D. (2017). Olive cultivation in the southern hemisphere: Flowering, water requirements and oil quality responses to new crop environments. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 8). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01830>
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B. Ö., Floury, N., Brown, M., Traver, I. N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., ... Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>

- Toulios, L., Spiliotopoulos, M., Papadavid, G., & Loukas, A. (2020). *Observation Methods and Model Approaches for Estimating Regional Crop Evapotranspiration and Yield in Agro-Landscapes: A Literature Review*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37421-1_5
- Touzi, R., Boerner, W. M., Lee, J. S., & Lueneburg, E. (2004). A review of polarimetry in the context of synthetic aperture radar: Concepts and information extraction. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3). <https://doi.org/10.5589/m04-013>
- Tumajer, J., Scharnweber, T., Smiljanic, M., & Wilmking, M. (2022). Limitation by vapour pressure deficit shapes different intra-annual growth patterns of diffuse- and ring-porous temperate broadleaves. *New Phytologist*, 233(6). <https://doi.org/10.1111/nph.17952>
- Twine, T. E., Kustas, W. P., Norman, J. M., Cook, D. R., Houser, P. R., Meyers, T. P., Prueger, J. H., Starks, P. J., & Wesely, M. L. (2000). Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(3), 279–300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00123-4)
- Ulaby, Fawwaz. (1975). Radar Response to Vegetation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 23(1). <https://doi.org/10.1109/TAP.1975.1140999>
- Ulaby, Fawwaz. (2018). Introduction to Satellite Remote Sensing: Atmosphere, Ocean, Land, and Cryosphere Applications [Book Review]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 6(4). <https://doi.org/10.1109/mgrs.2018.2873040>
- Ulaby, Fawwaz., Allen, C. T., Eger, G., & Kanemasu, E. (1984). Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 14(1–3). [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90010-5)
- Ulaby, Fawwaz., & Batlivala, Percy. (1976). Diurnal Variations of Radar Backscatter from a Vegetation Canopy. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 24(1). <https://doi.org/10.1109/TAP.1976.1141298>
- Ulaby, Fawwaz., Bush, Thomas., & Batlivala, Percy. (1975). Radar Response to Vegetation II: 8–18 GHz Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 23(5). <https://doi.org/10.1109/TAP.1975.1141133>
- Ulaby, Fawwaz., Dubois, Pascale., & Van Zyl, Jakob. (1996). Radar mapping of surface soil moisture. *Journal of Hydrology*, 184(1–2). [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02968-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02968-0)

- Ulaby, Fawwaz., & Long, David. (2014). Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing. In *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3998/0472119356>
- Ulaby, Fawwaz., Moore, R., & Fung, A. (1982). Microwave remote sensing: active and passive. Volume II. Radar remote sensing and surface scattering and emission theory. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume II. Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*.
- Ulaby, Fawwaz., Moore, R., & Fung, A. (1986). Microwave Remote Sensing: Active and Passive, vol. III, Volume Scattering and Emission Theory, Advanced Systems and Applications. *Inc., Dedham, Massachusetts, USA: Norwood, Massachusetts: Artech House*.
- Ulaby, Fawwaz., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1981). Microwave remote sensing: active and passive. Volume I: microwave remote sensing fundamentals and radiometry. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume I: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*.
- Ulander, L. M. H., Monteith, A. R., Soja, M. J., & Eriksson, L. E. B. (2018). Multiport vector network analyzer radar for tomographic forest scattering measurements. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(12). <https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2865673>
- Ullmann, T., Sauerbrey, J., Hoffmeister, D., May, S. M., Baumhauer, R., & Bubenzer, O. (2019). Assessing spatiotemporal variations of sentinel-1 InSAR coherence at different time scales over the atacama desert (Chile) between 2015 and 2018. *Remote Sensing*, 11(24). <https://doi.org/10.3390/rs11242960>
- UNEP. (2009). *Climate change in the Mediterranean | UNEP MAP*. 2009. <https://www.unep.org/unepmap/resources/factsheets/climate-change>
- USGS. (2019). Evapotranspiration and the Water Cycle. In *Evapotranspiration and the Water Cycle*.
- Vachon, P. W., Wolfe, J., & Greidanus, H. (2012). Analysis of Sentinel-1 marine applications potential. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351187>
- Van der Maaten, E., Bouriaud, O., van der Maaten-Theunissen, M., Mayer, H., & Spiecker, H. (2013). Meteorological forcing of day-to-day stem radius variations of beech is highly

- synchronic on opposing aspects of a valley. *Agricultural and Forest Meteorology*, 181, 85–93. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2013.07.009>
- Van der Maaten, E., Van der Maaten-Theunissen, M., Smiljanić, M., Rossi, S., Simard, S., Wilmking, M., Deslauriers, A., Fonti, P., von Arx, G., & Bouriaud, O. (2016). DendrometerR: Analyzing the pulse of trees in R. *Dendrochronologia*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.06.001>
- Van Emmerik, T., Steele-Dunne, S. C., Judge, J., & Van De Giesen, N. (2015). Impact of Diurnal Variation in Vegetation Water Content on Radar Backscatter from Maize During Water Stress. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(7), 3855–3869. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2386142>
- Van Emmerik, T., Steele-Dunne, S. C., Judge, J., & Van De Giesen, N. (2017). Dielectric Response of Corn Leaves to Water Stress. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(1). <https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2606662>
- Van Emmerik, T., Steele-Dunne, S., Paget, A., Oliveira, R. S., Bittencourt, P. R. L., Barros, F. de V., & van de Giesen, N. (2017). Water stress detection in the Amazon using radar. *Geophysical Research Letters*, 44(13), 6841–6849. <https://doi.org/10.1002/2017GL073747>
- Vasile, G., Trouvé, E., & Buzuloiu, V. (2006). Intensity-driven adaptive-neighborhood technique for polarimetric and interferometric SAR parameters estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(6). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.864142>
- Veci, L. (2015). Sentinel-1 Toolbox: TOPS Interferometry Tutorial. *Array Systems*. Available Online: [Http://Sentinel1.S3.Amazonaws.Com/Docs/SITBX%20Stripmap%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial.Pdf](http://Sentinel1.S3.Amazonaws.Com/Docs/SITBX%20Stripmap%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial.Pdf) (Accessed on 12 August 2017).
- Veloso, A., Mermoz, S., Bouvet, A., Le Toan, T., Planells, M., Dejoux, J. F., & Ceschia, E. (2017). Understanding the temporal behavior of crops using Sentinel-1 and Sentinel-2-like data for agricultural applications. *Remote Sensing of Environment*, 199, 415–426. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.07.015>
- Vermunt, P. C., Khabbazan, S., Steele-Dunne, S. C., Judge, J., Monsivais-Huertero, A., Guerriero, L., & Liu, P. W. (2020). Response of Subdaily L-Band Backscatter to Internal and Surface Canopy Water Dynamics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3035881>

- Vermunt, P. C., Steele-Dunne, S. C., Khabbazan, S., Judge, J., & van de Giesen, N. C. (2022). Extrapolating continuous vegetation water content to understand sub-daily backscatter variations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(5), 1223–1241. <https://doi.org/10.5194/hess-26-1223-2022>
- Vieira, J., Campelo, F., & Nabais, C. (2022). Environment Controls Seasonal and Daily Cycles of Stem Diameter Variations in Portuguese Oak (*Quercus faginea* Lambert). *Forests*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/f13020170>
- Vieira, J., Rossi, S., Campelo, F., Freitas, H., & Nabais, C. (2013). Seasonal and daily cycles of stem radial variation of *Pinus pinaster* in a drought-prone environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.06.009>
- Villarroya-Carpio, A., & Lopez-Sanchez, J. M. (2023). Multi-Annual Evaluation of Time Series of Sentinel-1 Interferometric Coherence as a Tool for Crop Monitoring. *Sensors*, 23(4). <https://doi.org/10.3390/s23041833>
- Villarroya-Carpio, A., Lopez-Sanchez, J. M., & Engdahl, M. E. (2022). Sentinel-1 interferometric coherence as a vegetation index for agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113208>
- Vreugdenhil, M., Wagner, W., Bauer-Marschallinger, B., Pfeil, I., Teubner, I., Rüdiger, C., & Strauss, P. (2018). Sensitivity of Sentinel-1 backscatter to vegetation dynamics: An Austrian case study. *Remote Sensing*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/rs10091396>
- Vurro, F., Janni, M., Coppedè, N., Gentile, F., Manfredi, R., Bettelli, M., & Zappettini, A. (2019). Development of an in vivo sensor to monitor the effects of vapour pressure deficit (VPD) changes to improve water productivity in agriculture. *Sensors (Switzerland)*, 19(21). <https://doi.org/10.3390/s19214667>
- Wang, Linxi., & Yu, Jiagu. (2023). Chapter 1 - Principles of photocatalysis. In J. Yu, L. Zhang, L. Wang, & B. Zhu (Eds.), *Interface Science and Technology* (Vol. 35, pp. 1–52). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18786-5.00002-0>
- Wang, Weizhen., Xu, F., & Wang, J. (2021). Energy exchange and evapotranspiration over the ejina oasis riparian forest ecosystem with different land-cover types. *Water (Switzerland)*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/w13233424>

- Wang, Xueyu., & Zhang, Quanzhi. (2023). Interspecific Differences of Stem Diameter Variations in Response to Water Conditions for Six Tree Species in Northeast China. *Forests*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/f14040805>
- Wanniarachchi, S., & Sarukkalige, R. (2022). A Review on Evapotranspiration Estimation in Agricultural Water Management: Past, Present, and Future. In *Hydrology* (Vol. 9, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/hydrology9070123>
- Wever, T., & Henkel, J. (1995). Evaluation of the AIRSAR system for soil moisture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 53(2). [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00046-4](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00046-4)
- Wilcox, B. P., Seyfried, M. S., & Breshears, D. D. (2003). The water balance on rangelands. In *Encyclopaedia of Water Science* (Issue 2).
- Wright, T. J. (2000). *Crustal deformation in Turkey from synthetic aperture radar interferometry*. University of Oxford.
- Xiao, S. Q., Zhou, M. T., & Zhang, Y. (2008). Millimeter Wave Technology in Wireless PAN, LAN, and MAN. In *Millimeter Wave Technology in Wireless PAN, LAN, and MAN*. <https://doi.org/10.1201/9780849382284>
- Xue, Feng., Jiang, Yuan., Dong, Manyu., Wang, Mingchang., Ding, Xinyuan., Yang, Xianji., Cui, Minghao., Xu, Hui., & Kang, Muyi. (2022). Different drought responses of stem water relations and radial increments in *Larix principis-rupprechtii* and *Picea meyeri* in a montane mixed forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108817>
- Yang, H., & Zehnder, A. J. B. (2002). Water scarcity and food import: A case study for southern Mediterranean countries. *World Development*, 30(8). [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(02\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(02)00047-5)
- Yoon, Y., Kim, C., Lee, J., & Yi, K. (2021). Interaction-Aware Probabilistic Trajectory Prediction of Cut-In Vehicles Using Gaussian Process for Proactive Control of Autonomous Vehicles. *IEEE Access*, 9. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3075677>
- Youness, D., & Abderrahim, F. (2024). Le Maroc à l'ère de l'économie frugale : Pratiques et perspectives. *Journal of Economics, Finance and Management (JEFM)*, 3(1), 1–33. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10468698>

- Zelege, K. T., & Wade, L. J. (2012). Evapotranspiration Estimation Using Soil Water Balance, Weather and Crop Data. In A. Irmak (Ed.), *Evapotranspiration*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/17489>
- Zeppel, M. J. B., Murray, B. R., Barton, C., & Eamus, D. (2004). Seasonal responses of xylem sap velocity to VPD and solar radiation during drought in a stand of native trees in temperate Australia. *Functional Plant Biology*, *31*(5). <https://doi.org/10.1071/FP03220>
- Zhao, Y., Longép e, N., Mouche, A., & Husson, R. (2021). Automated rain detection by dual-polarization sentinel-1 data. *Remote Sensing*, *13*(16). <https://doi.org/10.3390/rs13163155>
- Zweifel, R., Drew, D. M., Schweingruber, F., & Downes, G. M. (2014). Xylem as the main origin of stem radius changes in eucalyptus. *Functional Plant Biology*, *41*(5). <https://doi.org/10.1071/FP13240>
- Zweifel, R., Haeni, M., Buchmann, N., & Eugster, W. (2016). Are trees able to grow in periods of stem shrinkage? *New Phytologist*, *211*(3). <https://doi.org/10.1111/nph.13995>
- Zweifel, R., Item, H., & H asler, R. (2000). Stem radius changes and their relation to stored water in stems of young Norway spruce trees. *Trees - Structure and Function*, *15*(1). <https://doi.org/10.1007/s004680000072>
- Zweifel, R., Item, H., & H asler, R. (2001). Link between diurnal stem radius changes and tree water relations. *Tree Physiology*, *21*(12–13). <https://doi.org/10.1093/treephys/21.12-13.869>
- Zweifel, R., Sterck, F., Braun, S., Buchmann, N., Eugster, W., Gessler, A., H ani, M., Peters, R. L., Walthert, L., Wilhelm, M., Ziemi nska, K., & Etzold, S. (2021). Why trees grow at night. *New Phytologist*, *231*(6). <https://doi.org/10.1111/nph.17552>
- Zweifel, R., Zimmermann, L., & Newbery, D. M. (2005). Modeling tree water deficit from microclimate: an approach to quantifying drought stress. *Tree Physiology*, *25*(2), 147–156. <https://doi.org/10.1093/TREEPHYS/25.2.147>