

Département de géomatique appliquée  
Faculté des lettres et sciences humaines  
Université de Sherbrooke

# **Caractérisation diélectrique micro-onde (1,4 GHz) des arbres et des sols**

Alex Mavrovic

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences géographiques (M.Sc.)  
Cheminement télédétection

15 juillet 2018

© Alex Mavrovic, 2018

## **Identification du jury**

### **Directeur de recherche :**

Dr Alain Royer, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke

### **Codirecteur de recherche :**

Dr Alexandre Roy, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke

### **Membre du jury interne :**

Dr Ramata Magagi, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke

### **Membre du jury externe :**

Dr Juha Lemmetyinen, Arctic Research Centre, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland

# Résumé

Le découplage du signal d'émission micro-onde entre la végétation et le sol demeure une difficulté omniprésente pour toutes applications en télédétection. Pour améliorer les produits micro-ondes globaux (e.g. humidité du sol, état de gel/dégel du sol) en milieu forestier, une meilleure estimation de la permittivité électrique de la végétation et du sol est requise. Dans le cadre de ce projet, un nouveau prototype de sonde coaxiale à terminaison ouverte adaptée aux mesures sur le terrain a été développé. Nous montrons dans ce travail que la sonde est apte à mesurer la permittivité électrique en bande L (1.4 GHz) de la végétation et du sol.

La sonde affiche des incertitudes maximales de 3,3% pour une large plage de valeurs de permittivité. La permittivité complexe de sept espèces d'arbres différentes a été caractérisée dans des conditions de gel et de dégel. Les résultats montrent que la permittivité électrique du tronc des arbres est fortement corrélée avec l'état de gel/dégel de la végétation et que cet état de gel/dégel de la végétation est sensible aux courts événements de dégel hivernal. Il a aussi été démontré que les différences de permittivité électrique interespèces sont importantes. La sonde coaxiale à terminaison ouverte s'est également révélée suffisamment précise pour capturer le cycle diurne de teneur en eau à l'intérieur du tronc des arbres.

Les mesures de permittivité électrique de sols organiques en chambre froide mettent en évidence une hystérésis importante entre le cycle de gel et de dégel du sol. Un tel phénomène n'est pas considéré dans les modèles de permittivité du sol actuel ni dans les algorithmes de détection du gel/dégel des sols. La sonde devrait permettre d'améliorer la modélisation du transfert radiatif en milieu forestier et ainsi permettre d'améliorer les produits satellitaires en bande L.

Mots clés : Sonde coaxiale à terminaison ouverte, Permittivité électrique micro-onde, Radiométrie micro-onde, Bande L, Gel/Dégel, Végétation, Sol.

# Abstract

The decoupling of the signal between vegetation and soil remains an omnipresent difficulty for all remote sensing applications in the microwave spectrum. To improve global microwave products (e.g. soil moisture, freeze/thaw soil state) in the forest environment, a better estimate of the permittivity of vegetation and soil is required. As part of this project, a new prototype of open-ended coaxial probe adapted for field measurements has been developed.

The probe is designed to measure the L-band permittivity (1.4 GHz) of vegetation and soil. The probe displays maximum uncertainties of 3.3% for a wide range of permittivity values. The complex permittivity of seven different tree species was characterized under freezing and thawing conditions. The results show that the permittivity of tree trunks is strongly correlated with the freeze/thaw state of vegetation, the tree freeze/thaw state is sensitive to short winter thawing events and the inter species differences in permittivity are important. The open-ended coaxial probe is also precise enough to capture the diurnal cycle of water content within the tree trunks.

The permittivity measurements of organic soils in cold chamber show a significant hysteresis between the freezing and thawing cycles. Such phenomenon is not considered in current soil permittivity models or in soil freeze/thaw detection algorithms. The probe will allow to improve radiative transfer models in forest environment and thus improve L-band satellite products.

Keywords : Open-ended coaxial probe, Microwave electrical permittivity, Microwave radiometry, L-Band, Freeze/Thaw, Vegetation, Soil.

## Remerciements

Ce travail a été possible grâce à la grande collaboration de Bilal Filali, doctorant en génie civil à l'Université de Sherbrooke, dans la conception et la fabrication de la sonde coaxiale. Une aide précieuse a été fournie par Patrick Cliche, ingénieur électronique au CARTEL, pour l'élaboration de la méthodologie de prise de mesures. Gabriel Diab, coordonnateur de laboratoire au département de géomatique de l'Université de Sherbrooke, a également fourni plusieurs conseils concernant la fabrication des solutions salines et les liquides de références pour la validation de la calibration. Le projet n'aurait jamais décollé sans la contribution d'Alexandre Roy, codirecteur de mon projet de maîtrise et chercheur postdoctoral au CARTEL et à l'Université de Montréal, qui a piloté le projet à partir du tout début. J'aimerais également mentionner les collaborations avec le département de physique de l'Université de Sherbrooke (Bertrand Reulet), l'Université de la Saskatchewan (Warren Helgason, Bruce Johnson et Alan Barr), Environnement et Changement climatique Canada (Peter Toose), le CESBIO (Simone Bircher, Arnauld Mialon et Yan Kerr), l'IMS (François Demontoux et Jean-Yves Deletage), l'Université de Guelph (Aaron Berg et Renato Pardo) et Mariam El-Amine (stagiaire au CARTEL) pour la collecte de données et les conseils. Finalement, je remercie Alain Royer, directeur de mon projet de maîtrise et professeur titulaire au département de géomatique, de m'avoir permis de travailler sur ce projet stimulant.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Mise en contexte . . . . .	1
1.2	Problématique . . . . .	2
1.3	Questions de recherche . . . . .	4
1.4	Objectifs . . . . .	4
1.5	Organigramme méthodologique . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Permittivité électrique de la végétation</b>	<b>6</b>
2.1	Présentation de l'article scientifique . . . . .	6
2.2	Résumé de l'article scientifique en français . . . . .	7
2.3	Article scientifique . . . . .	8
2.3.1	Introduction . . . . .	8
2.3.2	Methods . . . . .	10
2.3.3	Study sites . . . . .	12
2.3.4	Results . . . . .	13
2.3.5	Discussion . . . . .	16
2.3.6	Conclusion . . . . .	18
2.3.6	Acknowledgments . . . . .	19
2.3.7	References . . . . .	19
2.4	Matériel supplémentaire accompagnant l'article scientifique . . . . .	22
2.5	Inversion du modèle $\omega - \tau$ à partir de données radiométriques au sol . . . . .	26
2.5.1	Sites d'étude . . . . .	26
2.5.2	Modèle $\omega - \tau$ . . . . .	28
2.5.3	Algorithme de la mission SMAP . . . . .	30
2.5.4	Algorithme de la mission SMOS . . . . .	31
2.5.5	Résultats et analyse . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Permittivité électrique du sol</b>	<b>35</b>
3.1	Méthodologie . . . . .	35
3.2	Modèle de Mironov <i>et al.</i> (2010) . . . . .	35
3.3	Modèle de Zhang <i>et al.</i> (2003) . . . . .	36
3.4	Résultats . . . . .	37
3.5	Discussion . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Conclusion et perspectives du projet</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>Financement</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>Bibliographie complémentaire à l'article</b>	<b>43</b>

<b>7</b>	<b>Annexe A - Guide d'utilisation de la sonde coaxiale</b>	<b>47</b>
7.1	Introduction et montage . . . . .	47
7.2	Calibration du réflectomètre . . . . .	49
7.3	Calibration de la sonde coaxiale . . . . .	50
7.4	Prise de mesure . . . . .	52
7.5	Préparation de la surface de contact pour mesure sur tronc d'arbre . . .	53
7.6	Liste du matériel nécessaire . . . . .	54
7.7	Comment manipuler les connecteurs de type N et SMA . . . . .	55
7.8	Schéma de fonctionnement des codes MATLAB . . . . .	56

## Liste des figures

Figure 1	Schéma des modèles de transfert radiatif en présence de végétation	3
Figure 2	Organigramme méthodologique . . . . .	5
Figure A1	Permittivité électrique relative de l'eau et de la glace selon le modèle de relaxation de Deby . . . . .	9
Figure A2	Sonde coaxiale à terminaison ouverte, champ électrique et montage	11
Figure A3	Mesure de la permittivité d'un tronc d'arbre . . . . .	13
Figure A4	Profondeur sondée . . . . .	14
Figure A5	Permittivité de différents liquides de référence . . . . .	15
Figure A6	Permittivité du polytétrafluoroéthylène (PTFE) solide . . . . .	15
Figure A7	Profil radial de la permittivité d'un tronc d'épinette noire . . . . .	16
Figure A8	Cycles diurnes de la permittivité de l'aubier d'un pin rouge . . . . .	17
Figure 3	(S1) Trunk radial profile of the relative permittivity in L-band of larches at the OBS site in Saskatchewan. . . . .	22
Figure 4	(S2) Trunk radial profile of the relative permittivity in L-band of red pines at the SIRENE station at the Université de Sherbrooke. . . . .	23
Figure 5	(S3) Trunk radial profile of the relative permittivity in L-band of aspens at the SIRENE station at the Université de Sherbrooke. . . . .	23
Figure 6	(S4) Trunk radial profile of the relative permittivity in L-band of black cherry at the SIRENE station at the Université de Sherbrooke. . . . .	24
Figure 7	(S5) Trunk radial profile of the relative permittivity (unitless) in L-band of red spruce at the Montmorency site in Québec. . . . .	24
Figure 8	(S6) Imaginary relative permittivity in L-band of a stack of paper sheets . . . . .	25
Figure 9	(S7) Boxplot of the variability of the L-band relative permittivity of the frozen trunk of tree species from OBS, SIRENE and Montmorency (MOMO) sites. . . . .	25
Figure 10	Schéma des radiomètres de l'UdeS et d'ECCC au site OBS en Saskatchewan . . . . .	28
Figure 11	Photos des radiomètres déployés au site OBS . . . . .	28
Figure 12	Modèle $\omega - \tau$ , contributions à la température de brillance observée par le radiomètre tourné vers le ciel sous la canopée . . . . .	29
Figure 13	Produit MODIS d'occupation du sol et de NDVI près du site OBS	31
Figure 14	Transmissivité, émissivité, permittivité électrique et température de la végétation en bande L au site OBS . . . . .	32
Figure 15	Transmissivité de la végétation en bande L par rapport à la permittivité électrique de la végétation au site OBS . . . . .	33



Figure 16	Montage expérimental de mesure de la permittivité électrique d'un échantillon de sol en chambre froide . . . . .	36
Figure 17	Permittivité électrique d'un échantillon de sol provenant du site OBS pour trois cycles complets de gel/dégel . . . . .	37
Figure 18	Volume sondé par la sonde coaxiale et les sondes commerciales d'humidité HydraProbe . . . . .	38
Figure 19	Montage permettant de communiquer avec la sonde coaxiale à terminaison ouverte via un réflectomètre . . . . .	47
Figure 20	Schéma du champ électrique généré par la sonde coaxiale à terminaison ouverte . . . . .	48
Figure 21	Panneau de contrôle du logiciel <i>RVNA</i> pour le réflectomètre <i>Planar R54</i> de <i>Copper Mountain Technologies</i> . . . . .	48
Figure 22	Prise de mesure sur tronc d'arbre avec la sonde coaxiale à terminaison ouverte . . . . .	53
Figure 23	Préparation de la surface de contact pour mesure de la permittivité sur tronc d'arbre . . . . .	54
Figure 24	Connecteurs SMA mâle et femelle . . . . .	55
Figure 25	Schéma du traitement des données par le programme de calibration de la sonde coaxiale . . . . .	56
Figure 26	Schéma du traitement des données par le programme de traitement des données brutes du réflectomètre . . . . .	56

## Liste des tableaux

Tableau A1	Essences d'arbre étudiées . . . . .	18
Tableau A2	Écart-type moyen entre les mesures de la sonde coaxiale et les valeurs de référence . . . . .	18
Tableau A3	Permittivité de différentes essences d'arbre gelées et dégelées . .	21
Tableau 1	Caractéristiques des sites d'études . . . . .	26
Tableau 2	Données acquises et fournies pour chaque site d'étude . . . . .	27
Tableau 3	Transmissivité de forêts de conifères dégelés . . . . .	34
Tableau 4	Transmissivité de forêts de conifères gelés . . . . .	34
Tableau 5	Caractéristiques de l'échantillon de sol provenant du site OBS .	36
Tableau 6	Permittivité électrique de sols organiques dégelés . . . . .	39
Tableau 7	Permittivité électrique de sols organiques gelés . . . . .	40

## Liste des acronymes

BERMS : Boreal Ecosystem Research and Monitoring Sites  
CARTEL : Centre d'Applications et de Recherches En Télédétection  
CESBIO : Centre d'Études Spatiales de la BIOSphère  
CFI : Canadian Foundation for Innovation  
CONAE : Comisión Nacional de Actividades Espaciales  
CRSNG : Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada  
CSA : Canadian Space Agency  
ECCC : Environnement et Changement Climatique Canada  
GI : Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems  
GRIMP : Groupe de Recherche Interdisciplinaire sur les Milieux Polaires  
IMS : Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système  
INRA : Institut national de la recherche agronomique  
LAI : Leaf Area Index (indice de surface foliaire)  
MEMLS : Microwave Emission Model of Layered Snowpacks  
MODIS : Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer  
MOMO : Site de recherche de la forêt Montmorency  
NASA : National Aeronautics and Space Administration  
NDVI : Normalized Difference Vegetation Index  
NEIGE-FM : Site de recherche de la forêt Montmorency  
NSERC : National Sciences and Engineering Research Council of Canada  
OBS : Old Black Spruce (site de recherche du réseau BERMS)  
OECP : Open-Ended Coaxial Probe (sonde coaxiale à terminaison ouverte)  
PTFE : Polytétrafluoroéthylène  
RMSE : Root-Mean-Square Error  
RVNA : Reflectometer Vector Network Analyzer (réflectomètre analyseur de réseau)  
SIRENE : Site interdisciplinaire de recherche en environnement extérieur  
SMA : SubMiniature version A  
SMAP : Soil Moisture Active Passive  
SMOS : Soil Moisture and Ocean Salinity  
SNSF : Swiss National Science Foundation  
TD GRMDM : Temperature Dependable Generalized Refraction Mixing Dielectric Model  
UdeS : Université de Sherbrooke  
VOD : Vegetation Optical Depth (épaisseur optique de la végétation)  
WVC : Volumetric Water Content (teneur en eau volumétrique)

# 1 Introduction

## 1.1 Mise en contexte

Depuis les 50 dernières années, l’environnement nordique au Canada est le siège de changements observables de plus en plus marqués comme la hausse des températures du sol et la modification du cycle saisonnier du gel/dégel de surface. Ces phénomènes liés au réchauffement climatique sont jusqu’à deux fois plus importants dans le Nord que dans tout autre type d’environnement et ils pourraient y avoir des effets de rétroaction majeurs sur le climat nordique (IPCC, 2013 ; AMAP, 2017 ; McMahon *et al.*, 2010 ; Penuelas *et al.*, 2009). Les conséquences de la modification du cycle annuel du gel/dégel sont nombreuses et considérables puisqu’il influence les bilans d’énergie à la surface du globe, la pérennité du pergélisol, l’hydrologie, la photosynthèse annuelle et les flux de carbone (Kim *et al.*, 2014 ; Böttcher *et al.*, 2014 ; Langer *et al.*, 2011 ; Hollinger *et al.*, 1999). Il faut aussi rappeler que les zones subissant un cycle saisonnier de gel/dégel s’étendent sur 51% de la surface immergée (Smith et Brown, 2009). Cependant, la difficulté d’accès, l’éloignement et l’étendue des milieux nordiques rendent leur étude ardue. Dans ces régions isolées, la télédétection satellitaire est le moyen privilégié pour le suivi de l’évolution de ces changements, en particulier dans le domaine micro-onde à basse fréquence qui offre des données synoptiques sur l’ensemble du territoire. La bande L (1.4 GHz) offre plusieurs avantages pour de telles applications en raison de sa grande sensibilité au contraste gel/dégel (Roy *et al.*, 2017), sa faible sensibilité à la neige sèche (Sckwank *et al.*, 2015), sa pénétration plus profonde dans la végétation et dans le sol par rapport aux fréquences plus élevées grâce à sa plus grande longueur d’onde (Owe et Van de Griend, 1998), ainsi que son insensibilité aux effets atmosphériques et à l’ennuage (Le Vine et Abraham, 2000).

Une nouvelle génération de radiomètres satellitaires en bande L a été lancée au cours de la dernière décennie offrant une couverture globale avec un temps de repassage de quelques jours : la mission SMAP de la NASA (Entekhabi *et al.*, 2010), la mission SMOS de l’Agence spatiale européenne (Kerr *et al.*, 2010) et la mission Aquarius conjointement pilotée par la NASA et la CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales, agence spatiale argentine) (Le Vine *et al.*, 2010). Les mesures micro-ondes en bande L sont principalement utilisées pour mesurer l’humidité du sol, la salinité des océans et la détection du gel/dégel des surfaces, mais elles sont également sensibles à la teneur en eau (Volumetric Water Content, VWC) de la végétation puisque l’épaisseur optique de la végétation (Vegetation Optical Depth, VOD) y est fortement corrélée (Konings et Gentine, 2017, Wigneron *et al.*, 2017, Ulaby et Long, 2014, Jackson et Schmugge, 1991). Cependant, le découplage du signal entre sol et végétation demeure une difficulté omniprésente pour toutes applications de télédétection micro-onde peu importe la fréquence (Kerr *et*

*al.*, 2012, Roy *et al.*, 2012, Roy *et al.*, 2014, Wigneron *et al.*, 2017) puisque la végétation affecte le signal micro-onde par émission, atténuation et diffusion (Wang *et al.*, 1980, Wigneron *et al.*, 2007). La télédétection satellitaire demeure néanmoins le moyen privilégié pour suivre l'évolution du climat des vastes régions nordiques éloignées et difficiles d'accès.

## 1.2 Problématique

La télédétection dans le domaine micro-onde se base sur des modèles d'interactions entre les ondes électromagnétiques et les surfaces. Ces modèles sont typiquement constitués de relations semi-empiriques greffées autour de calculs résolvant les équations de Maxwell. De tels modèles ont déjà été appliqués aux données radiométriques des régions nordiques sur une large plage de fréquences micro-ondes afin d'obtenir de l'information sur les caractéristiques du couvert nival (Royer *et al.*, 2017), l'état de la végétation (Mo *et al.*, 1982), l'humidité du sol (Kerr *et al.*, 2012) et l'état du sol (gel/dégel) (Kim *et al.*, 2012).

En milieu nordique, la forêt boréale représente le principal défi du découplage entre sol et végétation. Les modèles de transfert radiatif dans le domaine micro-onde sont généralement très mal paramétrés pour considérer la contribution non négligeable de la végétation (Roy *et al.*, 2016). Pourtant, le signal émis par la surface du sol est altéré par la végétation à travers laquelle il passe et la végétation contribue au signal par son émission (figure 1). Les efforts actuels pour inclure la végétation dans les modèles de transfert radiatif nécessitent l'évaluation de la permittivité électrique de celle-ci (Ferrazzoli *et al.*, 2002; Kurum *et al.*, 2011; Kurum *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2017). La permittivité électrique représente une quantification de la réponse d'un milieu à un champ électrique. La permittivité électrique des arbres étant très difficile à mesurer sur le terrain dans le domaine micro-onde, elle est généralement dérivée de relations semi-empiriques la reliant au contenu en eau de la végétation (Kerr *et al.*, 2010; Kerr *et al.*, 2012). Le contenu en eau des arbres est également difficile à mesurer et les tentatives d'une telle mesure sont encore au niveau de développement (Matheny *et al.*, 2015). Dans la littérature scientifique, certaines mesures de permittivité électrique micro-onde des arbres ont déjà été réalisées (Way *et al.*, 1990), mais aucun détail sur la méthodologie, la précision et la validation de la mesure de la permittivité électrique micro-onde en bande L et au-delà ne semble disponible. À ce jour, le travail le plus complet portant sur cette problématique demeure celui de El-Rayes et Ulaby (El-Rayes et Ulaby, 1987), datant maintenant de 30 ans. Cependant, ce travail portait principalement sur la mesure de la permittivité électrique micro-onde des feuilles. Pour le tronc, seulement deux espèces d'arbres furent étudiées (sapin baumier et peuplier) en conditions estivales sans regard sur la variabilité tempo-

relle de la permittivité d'un arbre suivant ses processus biologiques diurnes et saisonniers. Il faut aussi mentionner que la technique proposée dans ce dernier article est destructive (requière l'abattage de l'arbre) et peu adaptée au terrain. De plus, peu de mesures de la permittivité électrique de la végétation en conditions hivernales n'ont encore été tentées (Way *et al.*, 1990). Or, en bande L, lorsque l'eau gèle, la permittivité chute (figure A1<sup>1</sup>). Le contraste de permittivité électrique entre l'été et l'hiver pourrait avoir des impacts importants sur l'identification des cycles gel/dégel en forêt boréale (Roy *et al.*, 2015).

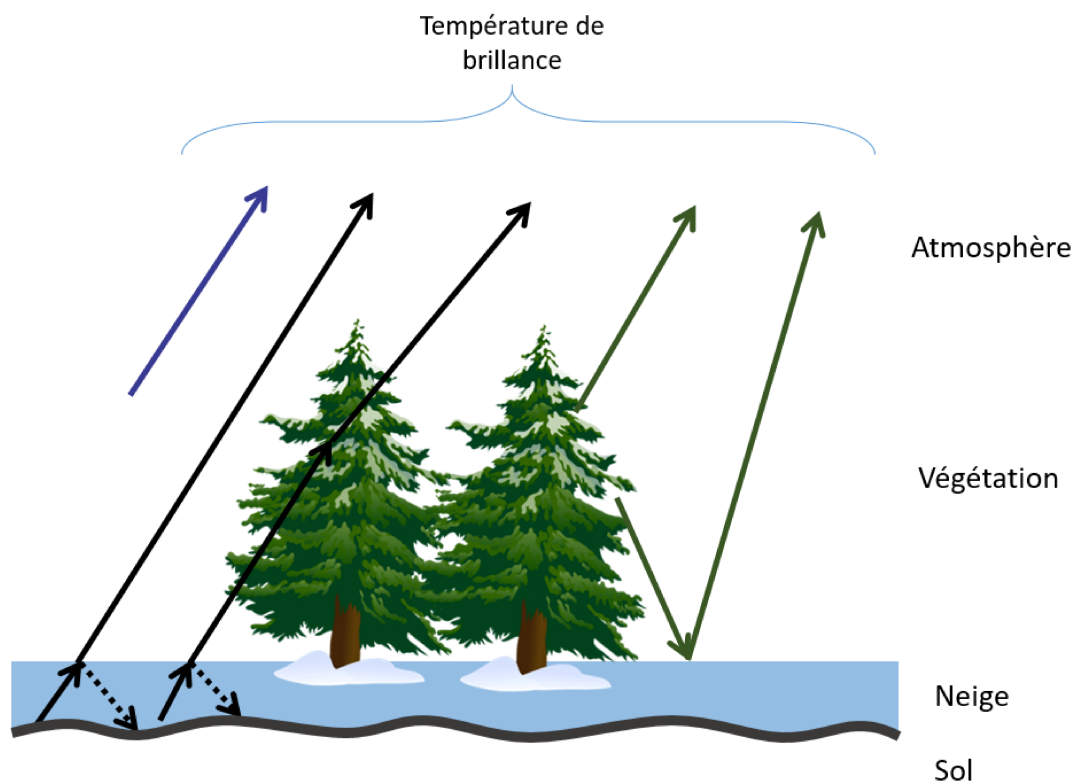


FIGURE 1 – Schéma des modèles de transfert radiatif en présence de végétation. Les rayons noirs sont ceux issus du sol, les rayons verts sont issus de l'émission micro-onde de la végétation et le rayon bleu est issu de l'atmosphère. Inspiré de Mo *et al.* (1982).

Le sol constituant une condition frontière des modèles, la détermination de ses paramètres s'avère cruciale afin de bien simuler son interaction avec les ondes électromagnétiques. Plusieurs modèles phénoménologiques doivent ainsi être intégrés afin de simuler la permittivité électrique du sol à partir de paramètres facilement accessibles sur le terrain. Notamment, l'utilisation du modèle de Mironov (Mironov *et al.*, 2009 et 2010) est largement répandue pour simuler la permittivité électrique des sols, particulièrement depuis son utilisation dans les algorithmes pour l'inversion de l'humidité du sol à partir des données du satellite SMOS (Bircher *et al.*, 2012; Wigneron *et al.*, 2007) et SMAP (Colliander *et al.*, 2017). Le modèle de Mironov requiert principalement les paramètres

1. Les figures et tableaux dont la numérotation commence par un A réfèrent aux figures et tableaux de l'article.

d'entrées suivant : fraction d'argile, température et humidité. Malgré un certain succès (Mialon *et al.*, 2015), le modèle de Mironov n'arrive pas à bien simuler la permittivité électrique dans toutes les conditions rencontrées sur le terrain. Le modèle est particulièrement mis en défaut pour des sols gelés et semi-gelés. D'autres modèles sont également couramment utilisés, mais ils souffrent de la même difficulté à obtenir des mesures in situ de permittivité électrique des sols gelés. Le modèle de Dobson (Dobson *et al.*, 1985), un prédécesseur du modèle de Mironov *et al.* (2010), en est un autre exemple. D'autres modèles se contentent simplement d'une permittivité fixe et constante déterminée par l'utilisateur pour les sols gelés (Pulliainen *et al.*, 1999). Tout comme pour les modèles de végétation, les modèles de sol souffrent de la difficulté d'obtenir des mesures de la permittivité de sols gelés, les sondes actuelles ne permettant généralement pas une telle mesure en bande L. Bien que la permittivité des sols gelés est beaucoup moins variable que celle des sols dégelés selon les modèles, la quantité de glace ( $\varepsilon_{glace} \approx 3$ ) et d'eau dégelée ( $\varepsilon_{eau} \approx 90$ ) pourrait avoir une influence non négligeable sur la permittivité des sols gelés (Zhang *et al.*, 2010, Roy *et al.*, 2017).

### 1.3 Questions de recherche

Au regard de l'importance de la permittivité électrique dans les modèles de transfert radiatif micro-onde et dans la compréhension du rôle du gel/dégel sur le signal en bande L, il est nécessaire d'obtenir des mesures in situ précises et fiables de la permittivité électrique de la végétation et du sol. Conséquemment, comment obtenir ces mesures et comment permettraient-elles l'amélioration des produits globaux de gel/dégel satellitaires ?

### 1.4 Objectifs

L'objectif général de mon projet de recherche est d'améliorer les simulations des modèles de transfert radiatif micro-onde en bande L dans un contexte de forêt boréale à partir de la caractérisation diélectrique de la végétation et des sols. Les efforts déployés pour améliorer ces modèles sont principalement dirigés dans le cadre de la détection du gel/dégel des surfaces. Pour parvenir à l'accomplissement de cet objectif général, trois objectifs spécifiques seront requis.

1. Développer et calibrer une sonde adaptée aux mesures sur le terrain permettant de mesurer la permittivité électrique micro-onde en bande L de la végétation et des sols.
2. Mesurer la permittivité électrique des arbres et estimer leur contribution au signal radiométrique en forêt boréale.
3. Mesurer la permittivité électrique des sols en situation de gel/dégel et comparer les résultats aux modèles standards de permittivité.

## 1.5 Organigramme méthodologique

L'organigramme méthodologique de ce mémoire est divisé en trois sections correspondant aux trois objectifs du projet (figure 2). Les objectifs 1 et 2, développement de la sonde coaxiale et mesure de la permittivité de la végétation, sont abordés dans la section 2 du mémoire où l'article scientifique est présenté. L'objectif 3, mesure de la permittivité du sol, est abordé dans la section 3 du mémoire.

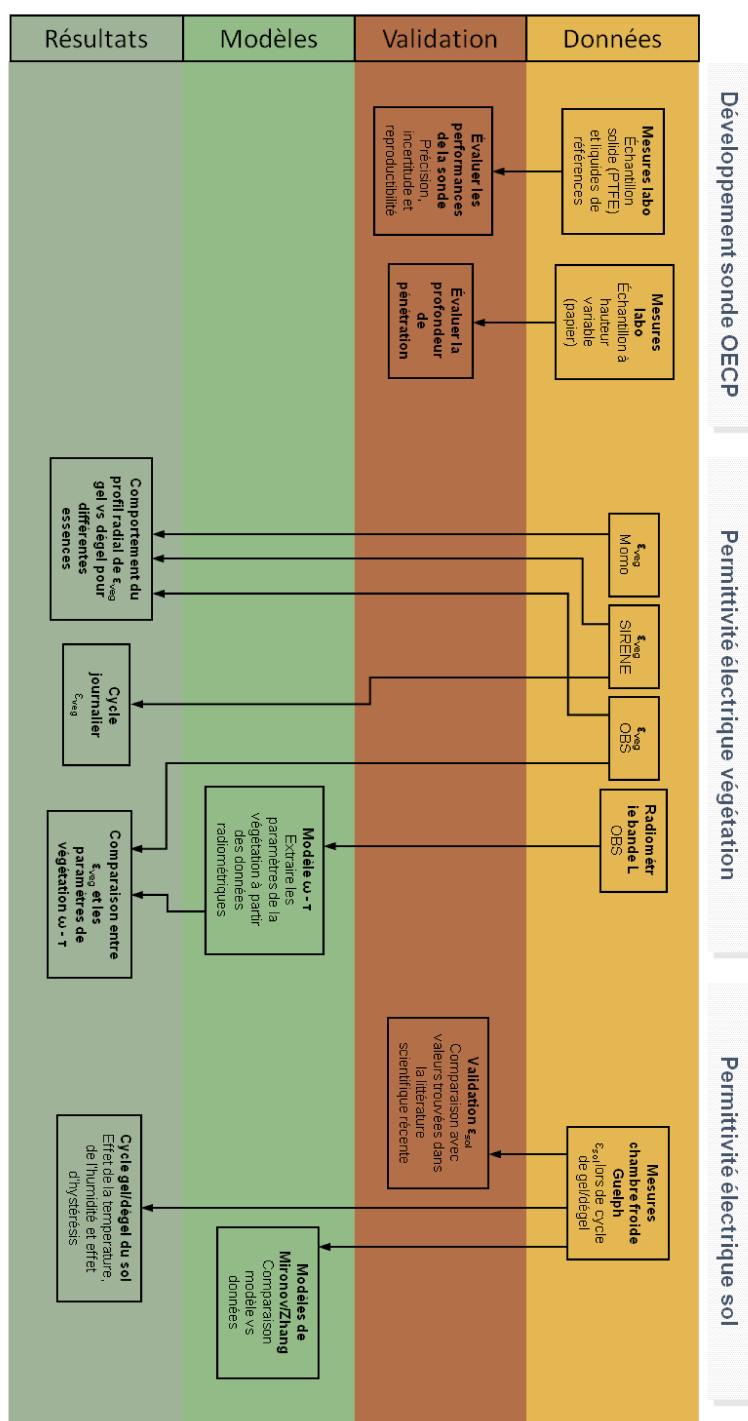


FIGURE 2 – Organigramme méthodologique.



## 2 Permittivité électrique de la végétation

### 2.1 Présentation de l'article scientifique

Le manuscrit scientifique qui suit a été soumis à la revue scientifique Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems (GI) le 12 mars 2018, a été accepté pour publication le 25 juin 2018 et a été publié le 12 juillet 2018. L'article y est présenté de façon intégrale tel que publié. Il est à préciser que la numérotation des lignes, sections, figures, tableaux et équations est indépendante au reste du mémoire. Les références aux figures et tableaux de l'article seront précédées par la lettre "A" dans le mémoire. Précisons aussi que les références citées dans cet article ne sont pas répétées à la bibliographie générale du présent mémoire. Le matériel supplémentaire accompagnant l'article se trouve à la section 2.4.

Cet article traite de la conception et validation de la sonde coaxiale à terminaison ouverte, ainsi que des mesures de permittivités saisonnières et journalières sur le tronc de diverses essences d'arbres. Les éléments traités dans cet article ne sont pas répétés dans le mémoire.

L'article est déjà accessible à l'adresse suivante :

<https://www.geosci-instrum-method-data-syst.net/7/195/2018/gi-7-195-2018.html>

La référence pouvant être utilisée pour citer cet article est la suivante :

*Mavrovic, A., Roy, A., Royer, A., Filali, B., Boone, F., Pappas, C. and Sonnentag, O (2018) Dielectric characterization of vegetation at L-band using an open-ended coaxial probe. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, vol. 7, no° 3, p. 195-208.*

## 2.2 Résumé de l'article scientifique en français

Le découplage du signal micro-onde provenant du sol et de la végétation demeure un défi important pour toutes applications de télédétection micro-onde. Pour améliorer les produits micro-ondes satellitaires et aéroportées en milieu forestier, une estimation précise et fiable de la permittivité électrique relative ( $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ ) des arbres est requise. Pour se faire, nous avons développé une sonde coaxiale à terminaison ouverte adaptée à la mesure *in situ* de la permittivité en bande L (1-2 GHz) du tronc des arbres. La sonde affiche des incertitudes maximales de 3,3% pour une large plage de valeurs de permittivité, [2-40] pour  $\varepsilon'$  et [0,1-20] pour  $\varepsilon''$ . Nous avons mesuré la permittivité complexe de sept espèces d'arbres différentes en conditions de gel et dégel : épinette noire, mélèze, épinette rouge, sapin baumier, pin rouge, peuplier faux-tremble et cerisier noir. La variabilité interespèces de la permittivité est substantielle et peut aller jusqu'à 300% entre certaines espèces. Nos résultats montrent que la permittivité du tronc des arbres est fortement corrélée à l'état de gel/dégel de la végétation et que de courts événements de dégel hivernal suffisent à entraîner une augmentation significative de la permittivité de la végétation. La sonde coaxiale à terminaison ouverte s'est également révélée suffisamment précise pour capter le cycle diurne de teneur en eau à l'intérieur du tronc des arbres au cours de la saison de croissance.



## Dielectric characterization of vegetation at L band using an open-ended coaxial probe

Alex Mavrovic<sup>1,2</sup>, Alexandre Roy<sup>1,2,3,6</sup>, Alain Royer<sup>1,2</sup>, Bilal Filali<sup>4</sup>, François Boone<sup>5</sup>, Christoforos Pappas<sup>2,6</sup>, and Oliver Sonnentag<sup>2,6</sup>

<sup>1</sup>Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada

<sup>2</sup>Centre d'Études Nordiques, Université Laval, Québec, Québec, G1V 0A6, Canada

<sup>3</sup>Département des Sciences de l'Environnement, Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada

<sup>4</sup>Terraprobe Geoscience Corp., Vancouver, British Columbia, V3K 6X7, Canada

<sup>5</sup>Centre de Recherche en Nanofabrication et en Nanocaractérisation, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada

<sup>6</sup>Département de géographie, Université de Montréal, Montréal, Québec, H2V 2B8, Canada

**Correspondence:** Alex Mavrovic (alex.mavrovic@usherbrooke.ca)

Received: 12 March 2018 – Discussion started: 28 March 2018

Revised: 19 June 2018 – Accepted: 25 June 2018 – Published: 11 July 2018

**Abstract.** Decoupling the integrated microwave signal originating from soil and vegetation remains a challenge for all microwave remote sensing applications. To improve satellite and airborne microwave data products in forest environments, a precise and reliable estimation of the relative permittivity ( $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ ) of trees is required. We developed an open-ended coaxial probe suitable for in situ permittivity measurements of tree trunks at L-band frequencies (1–2 GHz). The probe is characterized by uncertainty ratios under 3.3% for a broad range of relative permittivities (unitless), [2–40] for  $\varepsilon'$  and [0.1–20] for  $\varepsilon''$ . We quantified the complex number describing the permittivity of seven different tree species in both frozen and thawed states: black spruce, larch, red spruce, balsam fir, red pine, aspen and black cherry. Permittivity variability is substantial and can range up to 300% for certain species. Our results show that the permittivity of wood is linked to the freeze–thaw state of vegetation and that even short winter thaw events can lead to an increase in vegetation permittivity. The open-ended coaxial probe proved to be precise enough to capture the diurnal cycle of water storage inside the trunk for the length of the growing season.

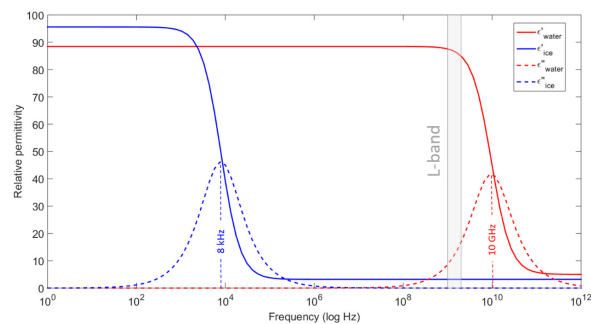
### 1 Introduction

The current generation of L-band satellite-based radiometers launched over the last decade – the NASA Soil Moisture Active Passive mission (SMAP; Entekhabi et al., 2010), the European Space Agency Soil Moisture Ocean Salinity mission (SMOS; Kerr et al., 2010) and the NASA/CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) joint Aquarius mission (Le Vine et al., 2010) – offer global coverage of L-band (1–2 GHz) observations with a revisit time of only a few days. Although microwave measurements at L-band wavelengths are mostly used to detect soil moisture, ocean salinity and land surface freeze–thaw, these wavelengths are also sensitive to vegetation water content (VWC) since the microwave vegetation optical depth (VOD) is proportional to the VWC of the aboveground biomass (Konings and Gentine, 2017; Wigneron et al., 2017; Ulaby and Long, 2014; Jackson and Schmugge, 1991). However, decoupling the integrated signal originating from soil and vegetation remains challenging for all microwave remote sensing applications (Kerr et al., 2012; Roy et al., 2012, 2014) because vegetation contributes to microwave brightness temperature measurements and thus scatters and attenuates ground surface emissions (Wang et al., 1980; Wigneron et al., 2007).

Vegetation canopy radiative transfer modeling at L band remains a challenge when it comes to quantifying the non-negligible scattering and emission effects of vegetation (Wigneron et al., 2017; Kurum et al., 2012). The relative permittivity ( $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ ; hereinafter, permittivity refers to relative permittivity for readability) of a vegetation canopy couples its electromagnetic attributes to its physical properties. Current efforts to refine the representation of vegetation canopies in physical microwave radiative transfer models require the quantification of the permittivity of vegetation (Ferrazzoli et al., 2002; Kurum et al., 2011, 2012; Huang et al., 2017). Since the permittivity of trees is difficult to measure in the field at microwave frequencies, it is generally derived from semi-empirical relationships. However, the reliability of this measurement remains to be quantified (Shmugge et al., 1980; Kerr et al., 2010, 2012). The well-known  $\omega - \tau$  model used in SMOS and SMAP soil moisture algorithms (Mo et al., 1982; Ulaby et al., 1983; Wigneron et al., 2004) avoids the use of vegetation permittivity by prescribing a single-scattering albedo ( $\omega$ ) and VOD ( $\tau$ ), although it is likely that those two parameters themselves highly depend on the permittivity and VWC. To this day, field measurements of the latter remain challenging (Matheny et al., 2015).

Recent studies examining the impact of vegetation on L-band microwave passive remote sensing have focused mainly on tropical regions and grasslands (Konings et al., 2017a, b). In this paper, we focus on boreal forests, which encompass  $\approx 30\%$  of all global forested area (Brandt et al., 2013). The study of boreal forests is of particular importance for freeze–thaw event detection, one of the main objectives of both the SMAP and SMOS missions. Detecting these events is important for a better understanding of land surface–atmosphere interactions, including how the timing of the start of the thawing period influences the net ecosystem exchanges of carbon, water and energy (Kim et al., 2014; Panner Selvam et al., 2016; McDonald et al., 2004; Zhang et al., 2011; Chapin et al., 2005).

Freeze–thaw state detection at L band is based on the dielectric contrast between water and ice at these frequencies (Fig. 1). At L band, permittivity drops when water freezes. For oblique incidence angles ( $>0^\circ$  from nadir), horizontal polarization is more affected than its vertical counterpart during the phase change, which offers the possibility of using a polarization ratio as an effective tool for determining soil freeze–thaw status (Roy et al., 2017; Rautiainen et al., 2016). The use of L band for freeze–thaw detection has been demonstrated experimentally (Derkson et al., 2017; Roy et al., 2015, 2017; Rautiainen et al., 2012, 2014, 2016). However, the permittivity of vegetation in frozen versus thawed conditions is of particular interest for the detection of soil freeze–thaw events, since soil and vegetation might not freeze or thaw concurrently. In midwinter, for example, with air temperatures below the freezing point, trees minimize their physiological activities. During this dormancy phase, sap flow ceases and VWC drops. Some of the water in the tree freezes,



**Figure 1.** Real ( $\epsilon'$ ) and imaginary ( $\epsilon''$ ) parts of the relative permittivity (unitless) of water and ice at 273 K according to the Debye relaxation model (Mätzler, 1987; Artemov and Volkov, 2014).

and the ice fraction in the trunk varies as a function of tree composition and air temperature (Sparks, 2001) and could theoretically lead to a variation in tree permittivity in relation to air temperature.

During the growing season the tree contributions to the L-band signal are related to water fluxes and storage in tree sapwood in accordance with the demonstrated relationship between  $\epsilon$  and VWC (Jackson and Schmugge, 1991). The high liquid water content of sapwood should translate into high wood permittivity in contrast to dry heartwood. Sapwood thickness varies substantially by species and by region (Quiñonez-Piñon and Valeo, 2017).

To our knowledge, only a small number of measurements of tree permittivity at microwave frequencies have been reported (e.g., El-Rayes and Ulaby, 1987; Way et al., 1990; McDonald et al., 2002; Franchois et al., 1998). Most of these studies report limited details on the accuracy and validation of the instruments used to measure permittivity and are restricted in scope. For example, El-Rayes and Ulaby (1987) focused on the measurement of leaf permittivity in a laboratory. The trunks of only two species of tree, balsam fir (*Abies balsamea*) and black cherry (*Prunus serotina*), were studied in summer conditions and the temporal variability induced by their diurnal and seasonal biological processes was not considered. It should further be noted that the technique proposed in El-Rayes and Ulaby (1987) is poorly adapted to field conditions and required the tree to be cut down. Even fewer permittivity measurements of vegetation have been attempted in winter conditions (Way et al., 1990). The difference between the summer and winter permittivity of tree trunks could have important impacts on the identification of freeze–thaw cycles in forest environments but this phenomenon remains poorly understood (Roy et al., 2015, 2016).

The goal of this study is to introduce and validate a newly developed open-ended coaxial probe (OECF) for in situ measurements of tree trunk permittivity at L band. The OECF measures a reflection coefficient at the interface between the

probe and the medium of interest. Subsequently, the permittivity is inferred from its empirical relationship with the reflection coefficient. Section 2 describes the theory behind OECP measurements and their calibration. Section 3 explains the OECP measurement methodology, the study sites and the tree species. In Sects. 4 and 5, the performance, capabilities and limitations of the probe are presented and discussed. Furthermore, vegetation permittivity results during frozen and thawed periods for various species are presented.

## 2 Methods

### 2.1 Open-ended coaxial probe measurement principle

Permittivity ( $F/m$ ) describes the reaction of a medium to an external electric field. The relative permittivity (unitless) is the ratio between the permittivity of a medium and vacuum permittivity. Relative permittivity is described by a complex number ( $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ ). The real part of the permittivity ( $\epsilon'$ ) describes the effect of the reorientation of the electric dipole inside the medium that drives wave propagation, and the imaginary part ( $\epsilon''$ ) describes the absorption (or loss) by the medium. It should be noted that the real and imaginary parts are not independent but linked through the Kramers–Kronig relations (Klingshirn, 2012). A high value of real permittivity characterizes a medium that strongly opposes the application of an external electric field (e.g.,  $\epsilon'_{\text{water}} \approx 90$ ). In contrast, a low real permittivity characterizes a medium that does not strongly oppose the application of an external electric field (e.g.,  $\epsilon'_{\text{air}} \approx 1$ ).

The general principle when dealing with permittivity measurements is to calculate the medium response to an applied electric field. Five main techniques are used for measuring this response in the microwave domain: waveguide (Demontoux et al., 2008), transmitting and receiving antenna (Ghodgaonkar et al., 1990), resonant cavity (Hakki and Coleman, 1960; Bircher et al., 2016), transmission line (Topp et al., 1980) and OECP (Stuchly et al., 1982; Demontoux et al., 2016). The first three techniques are more difficult to adapt for in situ field measurements on trees due to their constraints on the geometry of the samples and the size and fragility of the measuring devices (e.g., network analyzer required, sample of a specific shape required to fit in a container).

In this study, we designed, developed and validated an OECP operating at the L band. The permittivity of the probed medium is inferred from the reflection coefficient ( $\rho$ ) measured at the interface between the probe and the medium (Fig. 2a). The probe was developed with the requirement that it must be operational during field campaigns in remote forest environments. Therefore, the system had to be easily transportable, reasonably sized in terms of weight and dimensions, low in energy consumption, operational at low temperatures and weatherproof. The design of our probe was inspired by the work of Filali et al. (2006, 2008). Filali et

al. (2006) developed an OECP for nondestructive measurements of concrete dielectric properties in the 100–900 MHz spectrum. OECPs are dimension dependent, and thus the radius of the inner conducting cylinder and the dielectric material determine the effective frequency range of the probe. The dimensions of our OECP were chosen to cover the L-band spectrum (centered at 1.4 GHz). The probe comprises two coaxial conducting cylinders, 65 mm in length. The inner metal cylinder has a radius of 5 mm, while the outer metal cylinder has inner and outer radii of 16.2 and 30 mm, respectively. The 11.2 mm gap between the coaxial aluminum cylinders is filled with polytetrafluoroethylene (PTFE), a dielectric material. The probe was custom-made (Atelier Pedro, Sherbrooke, QC, Canada) following Filali et al. (2006, 2008). The OECP generates an electric field through its own coaxial dielectric medium as well as through a medium adjacent to its exposed end (Fig. 2a). The probe's external electric field extends to a distance comparable to the inner diameter of the probe, but its range varies substantially according to the permittivity of the medium studied (Eq. 1). The electric field range defines the thickness of the sampled medium and can be estimated using the penetration depth  $\delta_d$  (Eq. 1) describing the travel distance of an electromagnetic plane wave before being attenuated by a factor  $1/e$  where  $e$  is the Euler number.

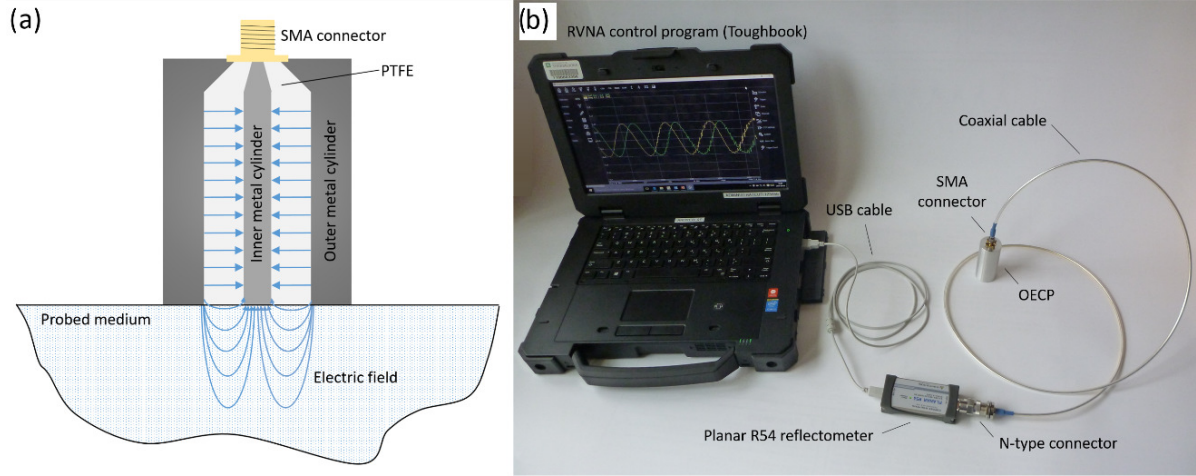
$$\delta_d = \frac{c}{2\pi f} \frac{\sqrt{\epsilon'}}{\epsilon''}, \quad (1)$$

where  $f$  represents the frequency (Hz), and  $c$  is the speed of light in a vacuum ( $\text{m s}^{-1}$ ).

A reflectometer (Planar R54; Copper Mountain Technologies, Indianapolis, IN, USA) was used to measure  $\rho$  from the reflected wave at the interface between the probe and the probed medium. We chose to use a low-cost reflectometer such as the Planar R54 (USD 3000) instead of a more expensive network analyzer ( $\sim$ USD 15 000) since only the  $\rho$  measurement is needed for our OECP. The Planar R54 reflectometer was chosen because of its ease of use in the field, small size and wide operational temperature range (from  $-40$  to  $+50$  °C). The reflectometer connects to a laptop on which manufacturer software is used to control and acquire the  $\rho$  data. Figure 2b gives an overview of the complete measurement system.

### 2.2 Open-ended coaxial probe calibration

To obtain the estimate of the medium's permittivity, the OECP must first be calibrated with reference media. The calibration process involves obtaining the calibration parameters necessary to transform  $\rho$  into the permittivity of the probed medium. The medium permittivity can be deduced from its admittance  $Y$  (inverse of the impedance) obtained by solving



**Figure 2.** (a) Diagram of the electrical field produced by the open-ended coaxial probe. (b) Open-ended coaxial probe kit for permittivity measurement. The reflectometer manufacturer provides the RVNA control program. An SMA N cable is required to connect the probe to the Planar R54 reflectometer.

the following equation (Filali et al., 2006, 2008):

$$Y(\varepsilon) = \frac{2jk^2}{f\mu_o \ln\left(\frac{a}{b}\right)} \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi \frac{\cos\varphi e^{-jkr}}{r} d\varphi du du', \quad (2)$$

where  $k$  is the wavenumber ( $k = f\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_o \mu_o}$ ),  $r = \sqrt{u^2 + u'^2 + 2uu' \cos\varphi}$  in radians per meter,  $f$  is the frequency in hertz,  $\varepsilon_r$  is the media relative permittivity,  $\varepsilon_o$  is the vacuum absolute permittivity,  $\mu_o$  is the vacuum absolute permeability,  $(u, u', \varphi)$  are the cylindrical coordinates and  $a$  and  $b$  represent the internal and external radius of the coaxial probe in meters, respectively. One notices that the integral of Eq. (2) is in cylindrical coordinates. Solving Eq. (2) numerically requires a vast amount of computing power because of integration singularities. Hence, a well-documented Taylor series approximation is used to make the calculation process much more effective with only subtle differences in results (Blackham and Pollard, 1997). The following equation is derived from the use of the Taylor series approximation of the exponential term in Eq. (2):

$$Y(\varepsilon) = \frac{2jk^2}{f\mu_o \ln\left(\frac{a}{b}\right)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k^{n-\frac{1}{2}} I_n}{(n-1)!}, \quad (3)$$

where

$$I_n = (-j)^{n-1} \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi r^{n-2} \cos\varphi d\varphi du du'. \quad (4)$$

The probe reflection coefficient  $\Gamma$  can be obtained using Eq. (5) where  $Y_o$  represents the admittance of the probe

( $Y_o = \frac{1}{50} \Omega^{-1}$ ) and  $Y(\varepsilon)$  represents the admittance of the medium.

$$\Gamma = \frac{Y(\varepsilon) - Y_o}{Y(\varepsilon) + Y_o} \quad (5)$$

In order to obtain the reflection coefficient  $\Gamma$  at the contact interface between the probe and the sample, it is important to know how this coefficient is affected by the components that separate the measuring plane from the reflectometer (reflectometer input connector, coaxial cable and coaxial probe). The following relation connects the reflection coefficient  $\rho$  measured by the reflectometer to  $\Gamma$ :

$$\Gamma = \frac{\rho - S_{11}}{S_{11}\rho + S_{12}S_{21} - S_{11}S_{22}}, \quad (6)$$

where  $S_{ij}$  ( $i, j \in \{1, 2\}$ ) represents the probe scattering parameters. Since Eq. (7) has three unknown parameters ( $S_{11}$ ,  $S_{12}S_{21}$  and  $S_{22}$ ), it is necessary to use at least three reference media with known reflection coefficients  $\Gamma$  (or the permittivity) to solve the resulting system of equations (Eq. 7). Here we used an open circuit, a short circuit and a known reference solution as reference media. The reference solutions are saline solutions whose relationship between the NaCl concentration and the permittivity is described by the Cole–Cole equation (Cole and Cole, 1941) that has previously been verified for this type of application (Nyshadham et al., 1992). A single solution would be sufficient to perform calibration; nevertheless, a set of five saline solutions with concentrations ranging from 10 to 30 parts per thousand (ppt) was used to ensure greater precision. Thus, by measuring  $\rho$ , it is possible

to determine  $\Gamma$  and then find the probed material permittivity.

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{\Gamma_1 \Gamma_2 \rho_3 (\rho_1 - \rho_2) + \Gamma_1 \Gamma_3 \rho_2 (\rho_3 - \rho_1) + \Gamma_2 \Gamma_3 \rho_1 (\rho_2 - \rho_3)}{\Gamma_1 \Gamma_2 (\rho_1 - \rho_2) + \Gamma_1 \Gamma_3 (\rho_3 - \rho_1) + \Gamma_2 \Gamma_3 (\rho_2 - \rho_3)} \\ S_{22} &= \frac{\Gamma_1 (\rho_2 - S_{11}) + \Gamma_2 (S_{11} - \rho_1)}{\Gamma_1 \Gamma_2 (\rho_2 - \rho_1)} \\ S_{12} S_{21} &= \frac{(\rho_1 - S_{11})(1 - S_{22} \Gamma_1)}{\Gamma_1} \end{aligned} \quad (7)$$

### 2.3 Performance evaluation

Probed depth is an important parameter needed for permittivity measurements because it indicates the minimum required sample thickness. By measuring the permittivity of a stack of paper sheets with a metallic plate underneath, it is possible to experimentally evaluate the probed depth of the OECP (El-Rayes and Ulaby, 1987). The permittivity of paper is relatively low, around  $\epsilon'_{\text{paper}} \approx 2.95$  (El-Rayes and Ulaby, 1987), in contrast to the apparent high permittivity induced by the high reflection coefficient of metallic material at microwave frequencies. Therefore, by increasing the height of the paper stack (i.e., adding more paper sheets) the permittivity stabilizes when the metallic plate no longer affects the probe. The expected penetration depth at L band for paper is about 9 mm when calculated using Eq. (1).

To investigate the uncertainty associated with the OECP measurements, liquid and solid standards with well-known permittivities were used to identify any systematic errors and evaluate probe precision. The root mean square error (RMSE) percentage between our measured permittivity and the expected permittivity as found in the scientific literature was calculated to quantify the probe's precision. The four liquid references chosen (ethylene glycol, 1-propanol, 2-propanol and 1-butanol) have well-known frequency and temperature dependencies (Gregory and Clarke, 2012). Furthermore, they do not interact with the probe's materials. For the solid reference, polytetrafluoroethylene (PTFE) was chosen as the permittivity is given by Webster (2003) and it can be easily shaped into an appropriate sample size.

### 2.4 Tree permittivity measurements using an open-ended coaxial probe

One of the main challenges in taking measurements of vegetation material with an OECP is obtaining a smooth surface to ensure full contact between the probe and the solid sample. Any air gap between the probe and the solid wood sample substantially affects the measurement as the low permittivity of air will systematically produce lower permittivity readings. To obtain accurate measurements in tree trunks, a set of Forstner drill bits (Freud Tools Inc., High Point, NC, USA), typically used in woodworking, was modified to create a flat surface at the desired depth in the tree trunk (Fig. 3a). To ensure proper contact, soft rotary tools were used to polish and clean the wood surface (Fig. 3b). Figure 3b shows a typical tangential cut that has been prepared for measurement.

This method for creating a smooth surface in the tree trunk proved to be suitable for obtaining reliable and reproducible permittivity measurements of tree trunks without disturbing the sampling area of the trunk (see Sect. 4.2). Figure 3c demonstrates the process followed to collect the permittivity measurements of the tree. For every depth in a given trunk cavity, two or three measurements were taken. Permittivity results presented in this article are the average of those multiple measurements at the same depth in the examined tree trunks.

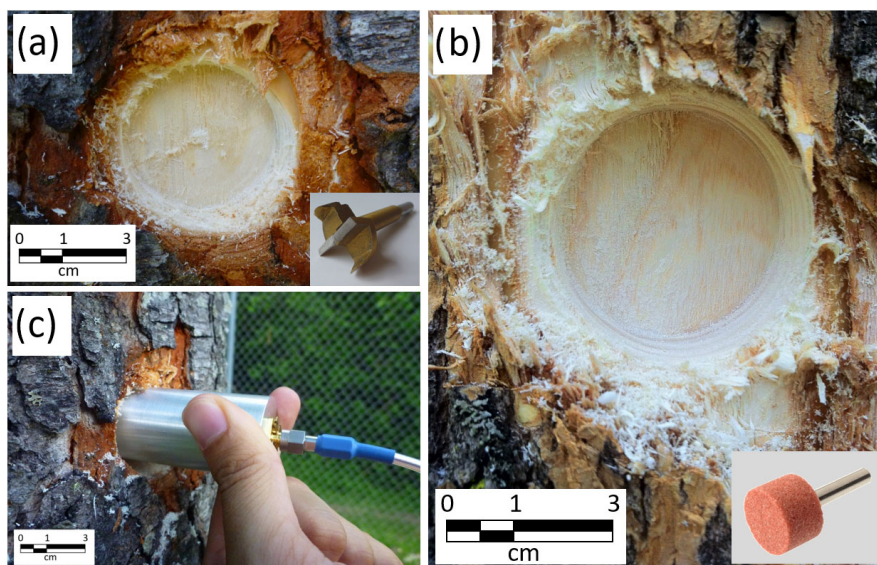
During the growing season, due to tree transpiration and associated water flow in the sapwood, OECP measurements must be taken shortly after the cut to avoid an accumulation of sap around the sample area. Repeated measurements after the initial cut show that the measured trunk permittivity remains stable for 2 to 5 min depending on the species and season (data not shown). Under frozen conditions, this is not a concern since there is no biological reaction in response to the cut. The sapwood depth was estimated visually using tree cores extracted with an increment borer (Maeglin, 1959). Because it was shown that the OECP calibration is temperature dependent, the OECP was always thermalized to the outdoor temperature before calibrations and measurements were taken.

For continuous measurement and to avoid any oozing or drying issues due to the tree's biological reaction to the wound, the gap between the probe and the cavity edges was sealed with plumber's putty. The plumber's putty does not affect measurements because it is placed around the edge of the probe, away from the open-ended measuring surface of the OECP probe. The OECP was inserted into the middle of the sapwood (6 mm of depth) in a red pine (*Pinus resinosa*; see Sect. 3.2) for continuous permittivity measurements over several weeks during September 2017. One permittivity measurement was taken every 5 min. Soil moisture EC-TM sensors (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA) were inserted in the soil at 5 cm, 10 cm and vertical positions around the studied tree to monitor soil water availability.

In this article, the state of the vegetation will be referred to as fully frozen when the soil, air and tree-skin temperatures are permanently below the freezing point. It will be referred to as fully thawed when the soil, air and tree-skin temperatures remain permanently above the freezing point for several consecutive days. A winter thaw event refers to a period when the air and tree-skin temperature rise above the freezing point, while the soil temperature stays below 0 °C.

## 3 Study sites

Tree permittivity measurements were taken at three different sites for a total of seven tree species (five conifers and two hardwoods). For each species, several measurements were obtained at several depths per tree. All measurements were taken at breast height ( $\approx 1.3$  m above ground level). The per-



**Figure 3.** Tangential cut of a black cherry trunk for permittivity measurement. (a) First, a hole is drilled in the trunk using a modified Forstner drill bit. (b) The surface is then flattened using a soft rotary tool. (c) Black cherry trunk permittivity measurement using the OECP. A scale is provided for the images, but not for the tools.

mittivity vertical variability along the trunk was not investigated in this article; a slight increase in permittivity is expected from roots to the top of the tree (Franchois et al., 1998). A detailed description of the sites studied and the measurements obtained can be found in Table 1.

The Old Black Spruce (OBS) site is located in northern Saskatchewan near Canada's boreal forest southern limit and is composed mainly of black spruce (*Picea mariana*) with about 10% larch (*Larix laricina*) (Gower et al., 1997; Bergeron et al., 2007). For this study, bimonthly measurements of tree permittivity were conducted at the site from January to May 2017. In addition, a 5-day study was conducted starting on 16 September 2016 to capture tree dielectric characteristics towards the end of summer and a second took place starting on 3 May 2017 to capture the spring freeze–thaw transition phase. The Montmorency Forest research site (NEIGE-FM) is located in a boreal forest stand in Québec dominated by balsam fir (*Abies balsamea*) with occasional red spruce (*Picea rubens*). It was visited four times for 2-day visits starting on 2 November 2016, 18 January 2017, 8 March 2017 and 11 May 2017. The research station Site Interdisciplinaire de Recherche en Environnement Extérieur (SIRENE) is located in a mixed forest stand in Québec dominated by red pine plantation with aspens (*Populus tremuloides*) and black cherry (*Prunus serotina*). It was visited seven times between June 2016 and May 2017.

## 4 Results

### 4.1 Probed depth

The permittivity of a stack of paper sheets stabilized at a thickness of 10 mm (Fig. 4). At that thickness, the effect of paper sheet height is too low to be observed given the probe's precision (see Sect. 4.2). Because the probed depth depends on the permittivity of the material, it is expected that samples with higher permittivity will have a shallower probed depth. The permittivity of paper is close to the lower end of the range of permittivity expected for vegetation material, and thus a 10 mm measurement should be seen as the upper limit of the probed depth of the OECP. For this reason, all results shown in this article were taken with samples of thickness greater than 10 mm to ensure there is no measurement disturbance in the probe's effective electrical field.

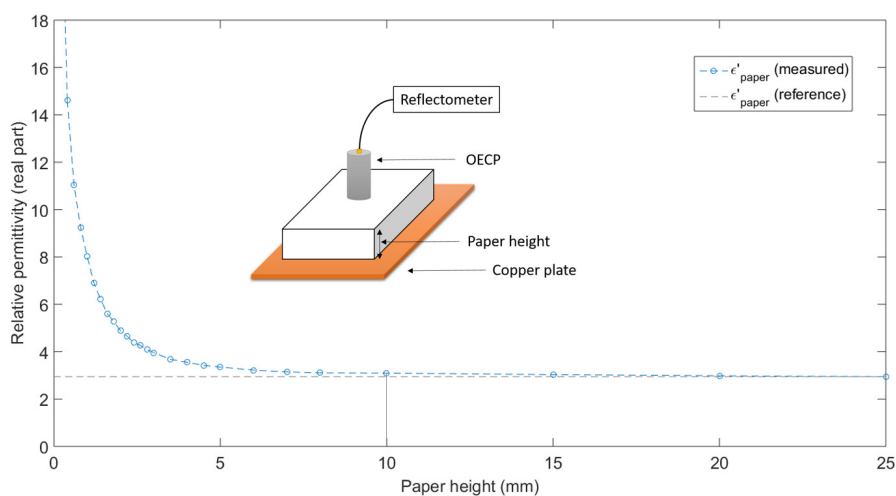
### 4.2 Performance evaluation

A validation of the OECP performance was conducted by using liquid and solid standards (Fig. 5). The results summarized in Table 2 show consensus between our measurements and the reference data. In the L-band wavelength range, the standard deviation between the reference and measured data is under 2.5% (Table 2). For some liquids, we can observe the beginning of a deviation out of the frequency domain for which the probe was designed (1–2 GHz). Such deviation was to be expected and can be ignored for our L-band measurements since only the 1–2 GHz range is used. As a



**Table 1.** Study sites and tree measurement details for Old Black Spruce (OBS), Montmorency Forest research site (NEIGE-FM) and Site Interdisciplinaire de Recherche en Environnement Extérieur (SIRENE). DBH stands for the diameter of the tree at breast height.

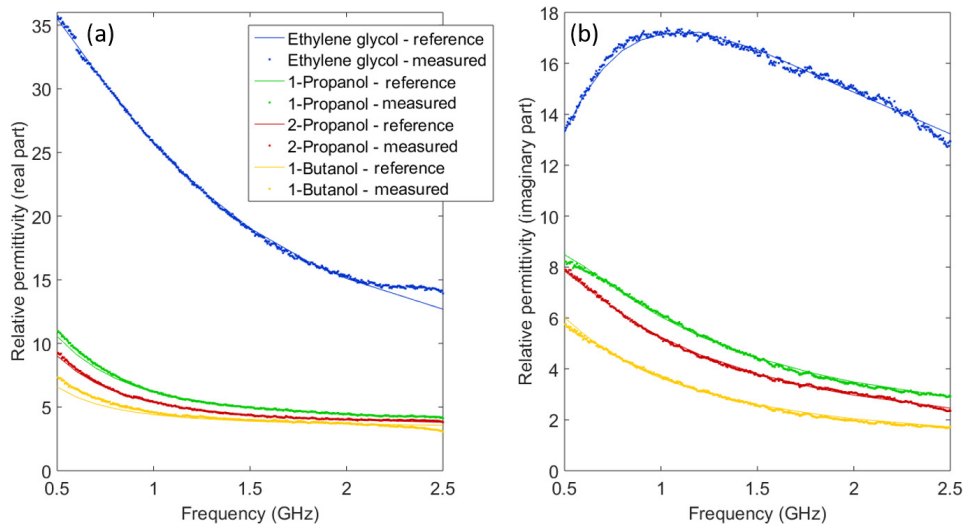
Sites	GPS coordinates	Species		Number of measured trees	Average DBH in cm (standard deviation)
		Common	Latin		
OBS	53°59'14" N 105°07'04" W	Black spruce	<i>Picea mariana</i>	16	11.4 (1.6)
OBS	53°59'14" N 105°07'04" W	Larch	<i>Larix laricina</i>	5	22.1 (3.5)
NEIGE-FM	47°19'20" N 71°09'05" W	Red spruce	<i>Picea rubens</i>	3	13.7 (1.1)
NEIGE-FM	47°19'20" N 71°09'05" W	Balsam fir	<i>Abies balsamea</i>	2	15.0 (1.3)
SIRENE	45°22'25" N 71°55'22" W	Red pine	<i>Pinus resinosa</i>	6	27.0 (4.5)
SIRENE	45°22'25" N 71°55'22" W	Aspen	<i>Populus tremuloides</i>	5	21.0 (1.9)
SIRENE	45°22'25" N 71°55'22" W	Black cherry	<i>Prunus serotina</i>	2	30.2 (1.2)

**Figure 4.** Real relative permittivity (unitless) at L band (1–2 GHz averaging) of a stack of paper sheets. The permittivity imaginary part is provided in the Supplement (Fig. S6).

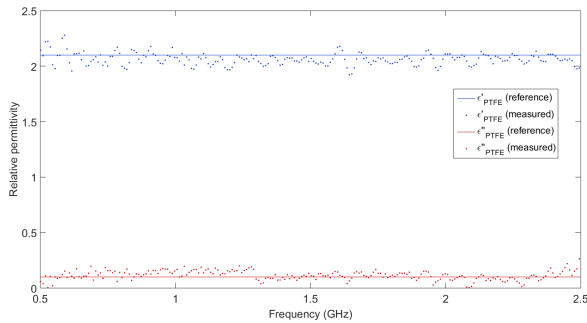
result, measurements made on the same liquid standard vary less than 0.5 % over 20 independent measurements.

To test contact with the flattened surface and evaluate OECP precision, solid sample measurements were also conducted (Fig. 6). The consensus between our measurements and the reference data deteriorates slightly to 3.3 % for the real permittivity while using PTFE solid samples (Table 2). It should be noted that the 40 % standard deviation in Table 1 for the imaginary part is mainly due to the fact that  $\epsilon''$

for PTFE is almost zero at L band; the fluctuations are still consistent with the real part. Overall, the lab tests on well-known references confirmed that the OECP is suitable to acquire permittivity data with a precision of up to 3.3 %. With the solid samples, the reproducibility over 20 independent measurements fluctuates up to 1 %.



**Figure 5.** Real (a) and imaginary (b) relative permittivity (unitless) of various well-known liquid standards. The temperature of the reference curve is 20 °C.



**Figure 6.** Real ( $\epsilon'_{\text{PTFE}}$ ) and imaginary ( $\epsilon''_{\text{PTFE}}$ ) relative permittivity (unitless) of a block of polytetrafluoroethylene (PTFE).

### 4.3 Dielectric characterization of tree trunks

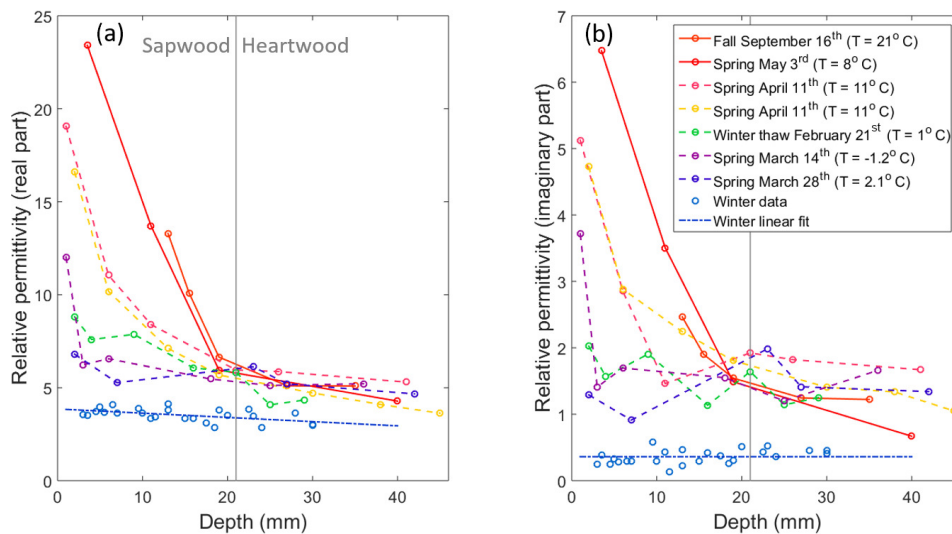
#### 4.3.1 Freeze–thaw state and species-specific permittivities

Two patterns can be observed in Fig. 7: (1) the influence of sapwood depth on the radial profile and (2) the effect of the freeze–thaw state on the permittivity of the tree trunks. There are two distinct behaviors of the radial profiles during the thawed season. In the first several millimeters of the trunk, sapwood permittivity is higher due to a high water content, but permittivity decreases quickly to a lower and well-constrained value in the heartwood (Fig. 7). It has to be noted that since the probed depth can reach up to 10 mm, there is a bias toward lower permittivity near the interface sapwood–heartwood because the probe is measuring some dryer wood behind the actual sapwood.

**Table 2.** Root mean square error (RMSE) between the measured L-band relative permittivity value (real and imaginary parts) and the accepted value in the scientific literature for the data presented in Figs. 5 and 6. The percentage of error is in parentheses.

Sample	RMSE <sub>real</sub> (error %)	RMSE <sub>ima</sub> (error %)
Ethylene glycol	0.16 (0.8 %)	0.14 (0.8 %)
1-Propanol	0.04 (0.8 %)	0.08 (1.7 %)
2-Propanol	0.042 (0.9 %)	0.06 (1.5 %)
1-Butanol	0.1 (2.5 %)	0.068 (2.5 %)
PTFE	0.068 (3.3 %)	0.041 (41.1 %)

During winter, sap flow approaches zero, resulting in consistently low tree trunk permittivity across the whole range of trunk depths (Fig. 7). With the warmer days of spring, plant biological activity including sap flow recommences, resulting in an increase in sapwood thickness and peak permittivity. A midwinter thaw event occurred at OBS from 15 to 21 February. During those warmer days, the air temperature reached 5 °C. This event was sufficient to melt water inside the trees as the sapwood permittivity measurements of that day were similar to measurements taken during warmer spring temperatures when trees were biologically active. Since the ground was still frozen, it is unlikely that the trees started to photosynthesize. Another winter 1-day thaw event was captured at the Montmorency site on 8 March and displayed the same behavior as the OBS winter thaw event (data available in the Supplement, Fig. S5). These short thaw events caused a permittivity increase in the sapwood, which leads us to conclude that the vegetation freeze–thaw signal is particularly sensitive to short winter thaw events.



**Figure 7.** Trunk radial profile of the real (a) and imaginary (b) relative permittivity (unitless) at L band of black spruce at the OBS site in Saskatchewan. The gray vertical line approximates the sapwood depth estimated visually with tree core samples. The winter data were always collected well below the freezing point through the middle of winter.

Substantial differences were observed in the frozen permittivity of different tree species (Table 3), ranging from 3.52 to 9.13 for the real part and from 0.36 to 3.23 for the imaginary part. Evaluating thawed tree permittivity is challenging since permittivity changes with depth. However, it should be noted that L-band interaction would be higher with the sapwood because it is the outer layer of the tree and its permittivity is higher than the heartwood. To ensure a representative averaging of the sapwood permittivity, we did not make measurements too close to the interface between sapwood and heartwood to avoid a bias toward lower permittivity. Knowing that the sapwood thickness of the trees used in this study is around 2 cm, the average permittivity reported in Table 3 for different thawed species was estimated by averaging the permittivity through the first centimeter under the bark using a trapezoidal numerical integration over that first centimeter. Again, significant differences were observed in the thawed permittivity of the tree species, ranging from 11.14 to 27.66 for the real part and from 3.05 to 9.33 for the imaginary part. Most of the thawed data date back to the end of spring (i.e., a fully thawed environment) and it should be kept in mind that some of these value patterns are to be expected during the growing season due to water storage in the trees and diurnal fluctuations as a result of tree hydrodynamics, as discussed below. Since all measurements used to calculate the permittivity of the thawed trees were collected in the latter part of the afternoon (between 15:00 and 18:00 local time), the evaluated permittivity corresponds to the daily minimum (see Sect. 4.3.2).

#### 4.3.2 Diurnal cycles of tree permittivity

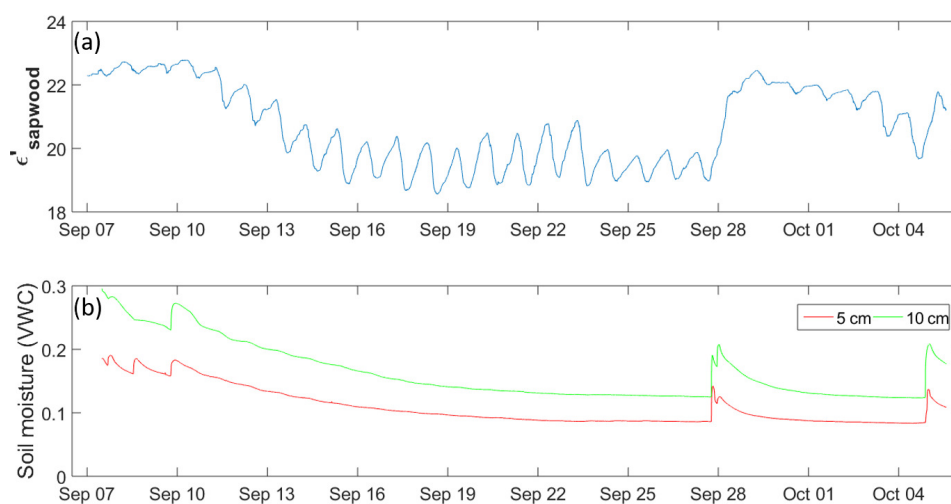
The continuous measurements on the red pine show that the OCEP captures diurnal permittivity cycles (Fig. 8a). Since permittivity is strongly correlated with liquid water content (i.e., tree water storage), the diurnal cycles are mainly linked to the tree's daily use of its water resources (Matheny et al., 2015). Water storage depletes during the day as a result of tree transpiration. During the late afternoon to early morning hours, trees replenish their water storage as a result of lower atmospheric demand and transpiration rates (e.g., Pappas et al., 2018). This is why maximum peak permittivity occurred during the night (between 18:00 and 20:00 local time) and the minima occurred between 15:00 and 17:00 local time. The soil moisture peaks measured by the EC-TM sensors in Fig. 8b correspond to rain events, with the major one occurring on the evening of 27 September. The days after rain events correspond to higher permittivity. After those rain events, there was a substantial amount of water available in the soil, enhancing water content in the sapwood.

## 5 Discussion

This study presents a new instrument for measuring tree trunk permittivity and demonstrates its applicability, precision and reliability for several common temperate and boreal tree species in North America. The OECP system is affordable (total costs are around USD 7000) when compared with other systems used to measure permittivity at microwave frequencies. The Canadian boreal forest is largely dominated by

**Table 3.** Complex L-band relative permittivity for different tree species in thawed and frozen states. The standard deviation of the data is in parentheses when the number of trees probed was relevant for this statistic.  $\epsilon'_{1\text{cm average}}$  represents the average value of the trunk permittivity through the first centimeter under the bark, while  $\epsilon'_{\text{average}}$  represents the average value across the whole radial profile as seen in Fig. 7. All data were taken between 15:00 and 18:00 local time. Detailed data are available in the Supplement for thawed trees (Figs. S1 to S5) and frozen trees (Fig. S7).

Tree species	Site	Thawed		Frozen	
		$\epsilon'_{1\text{cm average}}$	$\epsilon''_{1\text{cm average}}$	$\epsilon'_{\text{average}}$	$\epsilon''_{\text{average}}$
Black spruce	OBS	19.20	5.19	3.52 (0.36)	0.36 (0.11)
Larch	OBS	13.63	3.39	4.02 (0.58)	1.49 (0.20)
Red spruce	NEIGE-FM	27.66	7.72	6.57 (0.78)	0.78 (0.35)
Balsam fir	NEIGE-FM	11.14	3.05	—	—
Red pine	SIRENE	19.38	6.26	8.80 (0.31)	3.17 (0.14)
Aspen	SIRENE	21.55 (1.33)	5.49 (0.50)	6.22 (1.12)	2.21 (0.69)
Black cherry	SIRENE	27.20	9.33	9.13 (1.31)	3.23 (0.63)



**Figure 8.** (a) Daily cycle of red pine sapwood L-band permittivity (unitless) at the SIRENE site, and (b) soil moisture at 5 and 10 cm of depth (EC-TM probe).

coniferous species, such as black spruce, which are evergreen trees with a small number of relatively thin branches. The influence of needles and branches on radiometric measurements is considered negligible at L band due to their size and quantity (Ferrazzoli et al., 2002). The diameter of branches needs to be a significant fraction of the wavelength to influence the signal. At L band, the wavelength (about 20 cm) is much smaller than the diameter of branches for typical trees (black spruce) in boreal forests. Nevertheless, for deciduous forest, branch permittivity can still be measured using the same technique used for the trunk, but only for branches with a diameter greater than the OECF diameter. Measurements of broad-leaved leaf permittivity could be obtained by stacking a pile of leaves thicker than the probed depth (El-Rayes and Ulaby, 1987).

The period over which the data were collected allows for a better understanding of seasonal fluctuations in tree permittivity and its dependence on thaw events. The clear discrepancy between the freeze and thawed trunk permittivity is due to the water phase change and the limited biological activity of trees during winter. Tree species have a broad range of strategies for regulating their internal water storage and the resulting transpiration rates. Trees growing in an environment with annual freeze–thaw cycles have to be resistant to freezing-induced cavitation in their conductive xylem (plant tissues where water transport occurs). Even with anti-freeze mechanisms that allow them to keep 25 % of their water in liquid state while air temperatures are below  $-20^{\circ}\text{C}$ , trees still experience ice formations, at least in the outer layers of the tree trunk (Sparks et al., 2001). For example, coniferous species are characterized by smaller conduit diameters

in their xylem to avoid internal damage (Sakai and Larcher, 1987). Sparks (2001) showed that there is no clear correlation between wood temperature and the volumetric water content inside the trunk. This absence of a correlation demonstrates the importance of obtaining direct permittivity measurements of vegetation material for radiometric modeling purposes because there is no reliable relationship between a tree's permittivity and its other easily measured physical properties. However, even if it was shown that the permittivity was quite stable when a tree was frozen, there are still some variations when air temperature was around 0 °C. Hence, it would be interesting in future work to analyze with continuous measurements how the permittivity varies during freeze–thaw transitions.

Tree permittivity measurements can be of particular interest for the calibration and validation of microwave radiative transfer models for vegetation canopies. Radiative transfer models use the permittivity of the different layers (i.e., soil, snow and vegetation) to simulate wave–matter interactions. Since permittivity is challenging to measure in the field, it is typically derived from empirical relationships using more easily measurable parameters such as VWC and temperature. In Ferrazzoli et al. (2002), the dielectric constant of vegetation was computed with the semi-empirical formula given by Ulaby et al. (1986). The problem is that few of those relationships exist for vegetation and their applicability is limited. When the information for such parameterization is not available, models like  $\omega - \tau$  compute the missing information through semi-empirical optimization. In situ permittivity measurements make it possible to validate and calibrate those empirical relationships using physical-based microwave radiative transfer models. Tree permittivity is one of the main inputs in physical-based microwave radiative transfer models and can thus be considered as one of the main sources of uncertainty in the vegetation microwave emission and scattering properties calculation (Ferrazzoli et al., 2002; Kurum et al., 2011; Huang et al., 2017). In conjunction with L-band passive microwave ground-based radiometer and/or airborne observations in forested areas, tree permittivity measurements may inform microwave radiative transfer models to better understand and quantify the emission and scattering properties of vegetation. For example, Kurum et al. (2011) used an OECP with a vector network analyzer to measure tree permittivity in order to parameterize their first-order radiative transfer model for microwave radiometry of a forest canopy at L band. Furthermore, the permittivity measurements could be used to calibrate semi-empirical vegetation microwave emission models such as the  $\omega - \tau$  model, as the  $\omega - \tau$  parameters should be linked to tree permittivity. Hence the OECP measurements, in conjunction with radiometer observations, could lead to  $\omega - \tau$  calibration and link  $\omega - \tau$  to tree hydraulic properties. Improving microwave radiative transfer model capabilities will thus enhance our capacity to decouple the signal coming from soil

and vegetation and enhance soil moisture, freeze–thaw and tree hydraulics retrieval algorithms in boreal forest.

This study showed that tree permittivity is closely linked to tree hydraulic characteristics: during the thawed period, variations in tree permittivity are related to the tree's water storage, while in winter, tree freezing led to a strong decrease in permittivity. Hence, following empirical calibration (e.g., Matheny et al., 2015), the probe could be used to monitor the hydraulic properties of trees including water storage and the amount of frozen water in the tree. Compared to other methods to measure tree water storage, such as inserting soil moisture probes (Matheny et al., 2015), using several OECPs on a tree would make it possible to measure water storage and the amount of frozen water at different depths in the tree. However, for such long-term measurement applications, the biological reaction of the tree to the wound created by the cut made to insert the probe will have to be evaluated. Figure 8a shows a coherent signal over more than a month of measurements, suggesting that the tree's response to wounding is minimal; however, measurements over a longer period of time would be necessary to ensure the possibility of using the probe over full seasonal cycles to monitor the hydraulic functioning of trees. It is difficult to modify the dimensions of the probe without impacting its frequency limit since this is geometry dependent. Nevertheless, it is possible to reduce the dimensions of the probe for less invasive measurements, which will further increase the frequency limit. Moreover, it is possible to produce a series of probes operating up to higher frequency limits by reducing the size of their aperture, given that the limitation of the probed depth is acceptable.

## 6 Conclusions

This paper showed that the open-ended coaxial probe (OECP) is a suitable device to monitor the L-band permittivity (real and imaginary parts) of tree trunks. The OECP device that was developed displayed uncertainties under 3.3 % with a solid reference target and under 2.5 % with liquid standards. The permittivity of seven tree species was evaluated in both frozen and thawed states and revealed significant differences in the permittivity of those species. A clear distinction can be made between the dielectric characterization of (1) sapwood, for which the permittivity is high because of the high permittivity of water but decreases with depth, and (2) heartwood, for which the permittivity is low and constant. Our results indicate that the vegetation freeze–thaw state is sensitive to short winter thaw events. The OECP also proved to be precise enough to capture the growing season's diurnal cycle of fluctuations of tree water storage; however, its suitability for long-term continuous measurements requires further testing in order to quantify the impact of wounding effects.

Future work will examine the suitability of the OECP for soil permittivity measurements. Having a single instrument able to measure the L-band permittivity of both soil and vegetation in situ would be a useful tool for calibrating and validating microwave radiative transfer models.

*Data availability.* The research data can be accessed by direct request to the author.

**The Supplement related to this article is available online at <https://doi.org/10.5194/gi-7-195-2018-supplement>.**

*Author contributions.* AM, AR and Alain Royer designed the study. BF and FB designed the probe. AM, AR and CP collected the data. AM processed the data. All authors contributed to editing the paper.

*Competing interests.* The authors declare that they have no conflict of interest.

*Acknowledgements.* This work was made possible thanks to the contributions of the Canadian Space Agency (CSA), Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and Canada Foundation for Innovation (CFI). Christoforos Pappas acknowledges the support of the Swiss National Science Foundation (SNSF), the Stavros Niarchos Foundation and the ETH Zurich Foundation (grants P2EZP2\_162293 and P300P2\_174477). We thank Bertrand Reulet for providing us with equipment for early tests, Atelier Pedro for manufacturing the probe, Warren Helgason for his logistical help, Bruce Johnson, Peter Toose, Joël Lemay and Mariam El-Amine for their help in the field, and Patrick Cliche and Gabriel Diab for their help with technical issues. We would also like to thank the three reviewers for helping us to improve the paper.

Edited by: Mehrez Zribi

Reviewed by: S. Bircher and one anonymous referee

## References

- Artemov, V. and Volkov, A.: Water and Ice Dielectric Spectra Scaling at 0° C, *Ferroelectrics*, 466, 158–165, 2014.
- Bergeron, O., Margolis, H., Black, A., Coursolle, C., Bunn, A., Barr, A., and Wofsy, S.: Comparison of carbon dioxide fluxes over three boreal black spruce forests in Canada, *Glob. Change. Biol.*, 13, 89–107, 2007.
- Bircher, S., Demontoux, F., Razafindratsima, S., Zakharova, E., Drusch, M., Wigneron, J.-P., and Kerr, Y.: L-Band Relative Permittivity of Organic Soil Surface Layers – A New Dataset of Resonant Cavity Measurements and Model Evaluation, *Remote Sens.-Basel*, 8, 1024, 2016.
- Blackham, D. and Pollard, R.: An improved technique for permittivity measurements using a coaxial probe, *IEEE T. Instrum. Meas.*, 46, 1093–1099, 1997.
- Brandt, J. P., Flannigan, M. D., Maynard, D. G., Thompson, I. D., and Volnet, W. J. A.: An introduction to Canada's boreal zone: ecosystem processes, health, sustainability, and environmental issues, *Environ. Rev.*, 21, 207–226, 2013.
- Chapin, F., Sturm, M., Serreze, M., McFadden, J., Key, J., Lloyd, A., McGuire, A., Rupp, T., Lynch, A., Schimel, J., Beringer, J., Chapman, W., Epstein, H., Euskirchen, E., Hinzman, L., Jia, G., Ping, C., Tape, K., Thompson, C., Walker, D., and Welker, J.: Role of land-surface changes in Arctic summer warming, *Science*, 310, 657–660, 2005.
- Cole, K. and Cole, R.: Dispersion and absorption in dielectrics – Alternating current characteristics, *J. Chem. Phys.*, 9, 341–351, 1941.
- Demontoux, F., Le Crom, B., Ruffie, G., Wigneron, J.-P., Grant, J., Mironov, V., and Lawrence, H.: Electromagnetic characterization of soil-litter media: Application to the simulation of the microwave emissivity of the ground surface in forests, *The European Physical Journal Applied Physics*, 44, 303–315, 2008.
- Demontoux, F., Razafindratsima, S., Bircher, S., Ruffie, G., Bonnaud, F., Jonard, F., Wigneron, J.-P., Sbartai, Z. M., and Kerr, Y.: Efficiency of end effect probes for in situ permittivity measurements in the 0.5–6 GHz frequency range and their application for organic soil horizons study, *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 254, 78–88, 2016.
- Derksen, C., Xu, X., Scott Dunbar, R., Colliander, A., Kim, Y., Kimball, J. S., Black, T. A., Euskirchen, E., Langlois, A., Lorant, M. M., Marsh, P., Rautiainen, K., Roy, A., Royer, A., and Stephens, J.: Retrieving landscape freeze/thaw state from Soil Moisture Active Passive (SMAP) radar and radiometer measurements, *Remote Sens. Environ.*, 194, 48–62, 2017.
- El-Rayes, M. and Ulaby, F.: Microwave dielectric spectrum of vegetation – Part I: Experimental observations, *IEEE T. Geosci. Remote. GE-25*, 541–549, 1987.
- Entekhabi, D., Njoku, E., O'Neill, P., Kellogg, K., Crow, W., Edelstein, W., Entin, J., Goodman, S., Jackson, T., Jackson, J., Kimball, J., Piepmeier, J., Koster, R., Martin, N., McDonald, K., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J., Spencer, M., Thurman, S., Tsang, L., and Van Zyl, J.: The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission, *P. IEEE*, 98, 704–716, 2010.
- Entekhabi, D., Yueh, S., O'Neill, P.E., Wood, E. F., Njoku, E. G., Entin, J. K., and Kellogg, K. H.: The NASA Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission Status and Early Results, *Proc. EGU General Assembly Conference Abstracts*, 17, 5973, 2015.
- Ferrazzoli, P., Guerriero, L., and Wigneron, J.-P.: Simulating L-Band Emission of Forests in View of Future Satellite Applications, *IEEE T. Geosci. Remote*, 40, 2700–2708, 2002.
- Filali, B., Rhazi, J.-E., and Ballivy, G.: Measurement of the dielectric properties of concrete by a large coaxial probe with open end, *Can. J. Phys.*, 84, 365–379, 2006.
- Filali, B., Boone, F., Rhazi, J.-E., and Ballivy, G.: Design and calibration of a large open-ended coaxial probe for the measurement of the dielectric properties of concrete, *IEEE T. Microw. Theory*, 56, 2322–2328, 2008.
- Franchois, A., Pineiro, Y., and Lang, R.: Microwave permittivity measurements of two conifers, *IEEE T. Geosci. Remote*, 36, 1384–1395, 1998.

- Ghodgaonkar, D., Varadan, V. V., and Varadan V. E.: Free-Space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Magnetic Materials at Microwave Frequencies, *IEEE T. Instrum. Meas.*, 39, 387–394, 1990.
- Gower, S., Vogel, J., Norman, J., Kucharik, C., Steele, S., and Stow, T.: Carbon distribution and aboveground net primary production in aspen, jack pine, and black spruce stands in Saskatchewan and Manitoba, Canada, *J. Geophys. Res.*, 102, 29029–29041, 1997.
- Gregory, A. and Clarke, R.: Tables of the complex permittivity of dielectric reference liquids at frequencies up to 5 GHz, National Physical Laboratory technical report, MAT 23, Teddington, Middlesex, UK, 87 pp., 2012.
- Hakki, B. and Coleman, P.: A dielectric resonator method of measuring inductive capacities in the millimeter range, *IEEE T. Microw. Theory*, 8, 402–410, 1960.
- Huang, H., Tsang, L., Njoku, E., Colliander, A., Liao, T.-H., and Ding, K.-H.: Propagation and scattering by a layer of randomly distributed dielectric cylinders using Monte Carlo simulations of 3-D Maxwell equations with applications in microwave interactions with vegetation, *IEEE Access*, 5, 11985–12003, 2017.
- Jackson, T. and Schmugge, T.: Vegetation effects on the microwave emission of soils, *Remote Sens. Environ.*, 36, 203–212, 1991.
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J. P., Delwart, S., Cabot, F. O., Boutin, J., Escorihuela, M. J., Font, J., Reul, N., Gruhier, C., and Juglea, S. E.: The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle, *IEEE T. Geosci. Remote*, 98, 666–687, 2010.
- Kerr, Y., Waldteufel, P., Richaume, P., Wigneron, J., Ferrazzoli, P., Mahmoodi, A., Al Bitar, A., Cabot, F., Gruhier, C., Juglea, S., Leroux, D., Mialon, A., and Delwart, S.: The SMOS soil moisture retrieval algorithm, *IEEE T. Geosci. Remote*, 50, 1384–1403, 2012.
- Kim, Y., Kimball, K., Zhang, K., Didan, K., Velicogna, I., and McDonald, K.: Attribution of divergent northern vegetation growth responses to lengthening non-frozen seasons using satellite optical-NIR and microwave remote sensing, *Int. J. Remote Sens.*, 35, 3700–3721, 2014.
- Klingshirn, C. F.: *Semiconductor Optics – Graduate Texts in Physics (Chapter: Kramers–Kronig Relations)*, Springer, Berlin, Heidelberg, 849 pp., 2012.
- Konings, A. and Gentine, P.: Global variations in ecosystem-scale isohyricity, *Glob. Change. Biol.*, 23, 891–905, 2017.
- Konings, A., Williams, A., and Gentine, P.: Sensitivity of grassland productivity to aridity controlled by stomatal and xylem regulation, *Nat. Geosci.*, 10, 284–290, 2017a.
- Konings, A., Yu, Y., Xu, L., Yang, Y., Schimel, D., and Saatchi, S.: Active microwave observations of diurnal and seasonal variations of canopy water content across the humid African tropical forests, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 2290–2299, 2017b.
- Kurum, P., Lang, R., O’Neil, P., Joseph, A., Jackson, T., and Cosh, M.: A First-Order Radiative Transfer Model for Microwave Radiometry of Forest Canopies at L-Band, *IEEE T. Geosci. Remote*, 49, 3167–3179, 2011.
- Kurum, P., O’Neil, P., Lang, R., Joseph, A., Cosh, M., and Jackson, T.: Effective tree scattering and opacity at L-band, *Remote Sens. Environ.*, 118, 1–9, 2012.
- Le Vine, D. M., Lagerloef, G. S., and Torrusio, S.: Aquarius and remote sensing of sea surface salinity from space, *P. IEEE*, 98, 688–703, 2010.
- Maeglin, R.: Increment cores: how to collect, handle and use them, General technical report FPL-25 for the U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, United States, 18 pp., 1959.
- Matheny, A., Bohrer, G., Garrity, S., Morin, T., Howard, C., and Vogel, C.: Observations of stem water storage in trees of opposing Hydraulic strategies, *Ecosphere*, 9, 6, 165, 2015.
- Mätzler, C.: Applications of the interaction of microwaves with the natural snow cover, *Remote Sensing Review*, 2, 259–387, 1987.
- McDonald, K., Zimmermann, R., and Kimball, J.: 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 T. Geosci. Remote*, 40, 2063–2082, 2002.
- McDonald, K., Kimball, J., Njoku, E., Zimmerman, R., and Zhao, M.: Variability in springtime thaw in the terrestrial high latitudes: monitoring a major control on the biospheric assimilation of atmospheric CO<sub>2</sub> with spaceborne microwave remote sensing, *Earth Interact.*, 8, 20, 23 pp., 2004.
- Mo, T., Choudhury, B., Schmugge, T., Wang, J., and Jackson, T.: A model for microwave emission from vegetation-covered fields, *J. Geophys. Res.*, 87, 11229–11237, 1982.
- Nyshadham, A., Sibbald, C., and Stuchly, S.: Permittivity measurements using open-ended sensors and reference liquid calibration – An uncertainty analysis, *IEEE T. Microw. Theory*, 40, 305–314, 1991.
- Panneer Selvam, B., Laudon, H., Guillemette, F., and Berggren, M.: Influence of soil frost on the character and degradability of dissolved organic carbon in boreal forest soils, *J. Geophys. Res.-Biogeo.*, 121, 829–840, 2016.
- Pappas, C., Matheny, A., Baltzer, J., Barr, A., Black, T., Bohrer, G., Detto, M., Maillet, J., Roy, A., Sonntag, O., and Stephens, J.: Boreal tree hydrodynamics: asynchronous, diverging, yet complementary, *Tree Physiol.*, 38, 953–964, <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy043>, 2018.
- Quiñonez-Piñón, R. and Valeo, C.: Allometry of Sapwood Depth in Five Boreal Trees, *Forests*, 11, 8, 457, 2017.
- Rautiainen, K., Lemmetyinen, J., Pulliainen, J., Vehviläinen, J., Drusch, M., Kontu, A., Kainulainen, J., and Seppänen, J.: L-band radiometer observations of soil processes at boreal and sub-Arctic environments, *IEEE T. Geosci. Remote*, 50, 1483–1497, 2012.
- Rautiainen, K., Lemmetyinen, J., Schwank, M., Kontu, A., Ménard, C. B., Mätzler, C., Drusch, M., Wiesmann, A., Ikonen, J., and Pulliainen, J.: Detection of soil freezing from L-band passive microwave observations, *Remote Sens. Environ.*, 147, 206–218, 2014.
- Rautiainen, K., Parkkinen, T., Lemmetyinen, J., Schwank, M., Wiesmann, A., Ikonen, J., Derksen, C., Davydov, S., Davydova, A., Boike, J., and Langer, M.: SMOS prototype algorithm for detecting autumn soil freezing, *Remote Sens. Environ.*, 180, 346–360, 2016.
- Roy, A., Royer, A., Wigneron, J.-P., Langlois, A., Bergeron, J., and Cliche, P.: A simple parameterization for a boreal forest radiative transfer model at microwave frequencies, *Remote Sens. Environ.*, 124, 371–383, 2012.
- Roy, A., Royer, A., and Hall, R.: Relationship between forest microwave transmissivity and structural parameters for the Cana-

- dian boreal forest, *IEEE Geosci. Remote S.*, 11, 1802–1806, 2014.
- Roy, A., Royer, A., Derksen, C., Brucker, L., Langlois, A., Mialon, A., and Kerr, Y. H.: Evaluation of Spaceborne L-Band Radiometer Measurements for Terrestrial Freeze/Thaw Retrievals in Canada, *IEEE J. Sel. Top. Appl.*, 8, 4442–4459, 2015.
- Roy, A., Royer, A., St-Jean-Rondeau, O., Montpetit, B., Picard, G., Mavrovic, A., Marchand, N., and Langlois, A.: Microwave snow emission modeling uncertainties in boreal and subarctic environments, *The Cryosphere*, 10, 623–638, <https://doi.org/10.5194/tc-10-623-2016>, 2016.
- Roy, A., Toose, P., Williamson, M., Rowlandson, T., Derksen, C., Royer, A., Lemmetyinen, J., Berg, A., and Arnold, L.: Response of L-Band brightness temperatures to freeze/thaw and snow dynamics in a prairie environment from ground-based radiometer measurements, *Remote Sens. Environ.*, 191, 67–80, 2017.
- Sakai, A. and Larcher, W.: Frost survival of plants. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, USA, 321 pp., 1987.
- Schmugge, T., Jackson, T., and McKim, H.: Survey of Methods for Soil Moisture Determination, *Water Resour. Res.*, 16, 961–979, 1980.
- Sparks, J., Campbell, G., and Black, R.: Water content, hydraulic conductivity, and ice formation in winter stems of *Pinus contorta*: a TDR case study, *Oecologia*, 127, 468–475, 2001.
- Stuchly, M., Athey, T., Samaras, G., and Taylor, G.: Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: Part I and II, *IEEE T. Microw. Theory, MMT-30*, 87–92, 1982.
- Topp, G., Davis, G., and Annan, A.: Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 16, 574–582, 1980.
- Ulaby, F., Razani, M., and Dobson, M.: Effects of vegetation cover on the microwave radiometric sensitivity to soil moisture, *IEEE T. Geosci. Remote, GE-21*, 51–61, 1983.
- Ulaby, F., Moore, R. K., and Fung, A. K.: *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. III, From Theory to Applications*, Artech House, Dedham, MA, USA, 1986.
- Ulaby, F. and Long, D.: *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, USA, 1116 pp., 2014.
- Way, J., Paris, J., Kasischke, E., Slaughter, C., Viereck, L., Christensen, N., Dobson, M., Ulaby, F., Richards, J., Milne, A., Sieber, A., Ahern, F., Simonett, D., Hoffer, R., Imhoff, M., and Weber, J.: The effect of changing environmental conditions on microwave signatures of forest ecosystems : preliminary results of the March 1988 Alaskan aircraft SAR experiment, *Int. J. Remote Sens.*, 11, 1119–1144, 1990.
- Wang, W.-C., Pinto, J., and Yung, Y.: Climatic effects due to halogenated compounds in the Earth's atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 37, 333–338, 1980.
- Webster, J.: *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays*, CRC Press, Boca Raton, USA, 768 pp., 2003.
- Wigneron, J.-P., Pardé, M., Waldteufel, P., Chanzy, A., Kerr, Y., Schmidl, S., and Skou, N.: Characterizing the dependence of vegetation model parameters on crop structure, view angle and polarization at L-band, *IEEE T. Geosci. Remote*, 42, 416–425, 2004.
- Wigneron, J.-P., Kerr, Y., Waldteufel, P., Saleh, K., Escorihuela, M.-J., Richaume, P., Ferrazzoli, P., Derosnay, P., Gurney, R., Calvet, J.-C., Grant, J., Guglielmetti, M., Hombuckle, B., Mätler, C., Pelletier, T., and Schwank, M.: L-band Microwave Emission of the Biosphere (L-MEB) Model : Description and calibration against experimental data sets over crop fields, *Remote Sens. Environ.*, 107, 639–655, 2007.
- Wigneron, J.-P., Jackson, T. J., O'Neill, P., Lannoy, De, de Rosnay, P., Walker, J. P., Ferrazzoli, P., Mironov, V., Bircher, S., Grant, J. P., Kurum, M., Schwank, M., Munoz-Sabater, J., Das, N., Royer, A., Al-Yaari, A., Al Bitar, A., Fernandez-Moran, R., Lawrence, H., Mialon, A., Parrens, M., Richaume, P., Delwart, S., and Kerr, Y.: Modelling the passive microwave signature from land surfaces: a review of recent results and application to the L-band SMOS and SMAP soil moisture retrieval algorithms, *Remote Sens. Environ.*, 192, 238–262, 2017.
- Zhang, K., Kimball, J., Kim, Y., and McDonald, K.: Changing freeze-thaw seasons in northern high latitudes and associated influences on evapotranspiration, *Hydrol. Process.*, 25, 4142–4151, 2011.



## 2.4 Matériel supplémentaire accompagnant l'article scientifique

Cette section présente l'ensemble des données mesurées pour les différentes espèces d'arbres du tableau A3 : mélèze (figure 3), pin rouge (figure 4), peuplier faux-tremble (figure 5), cerisier noir (figure 6) et épinette rouge (figure 7). Cette section présente également la partie imaginaire de la permittivité pour le test de la profondeur sondée (figure 8), ainsi qu'une boîte à moustaches des données de permittivité de troncs d'arbres gelés pour montrer la variabilité des mesures données dans le tableau A3 de l'article (figure 9).

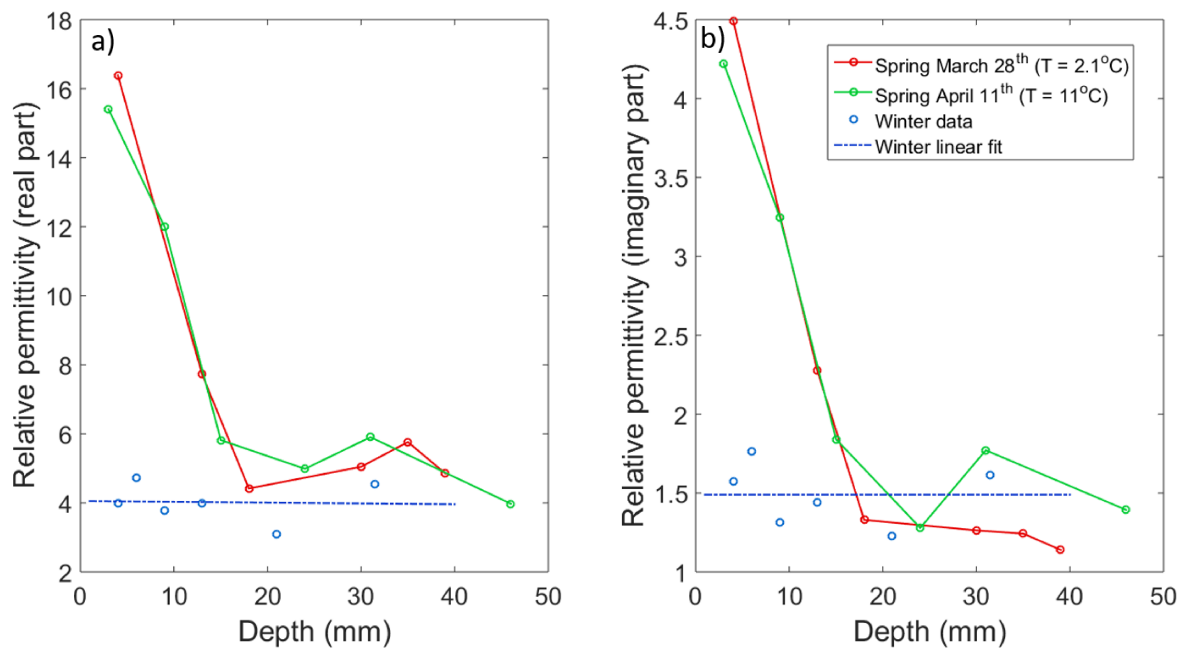


FIGURE 3 – (Figure S1) Trunk radial profile of the real (a) and imaginary (b) relative permittivity in L-band of larches at the OBS site in Saskatchewan. The winter data were always collected well below freezing point.

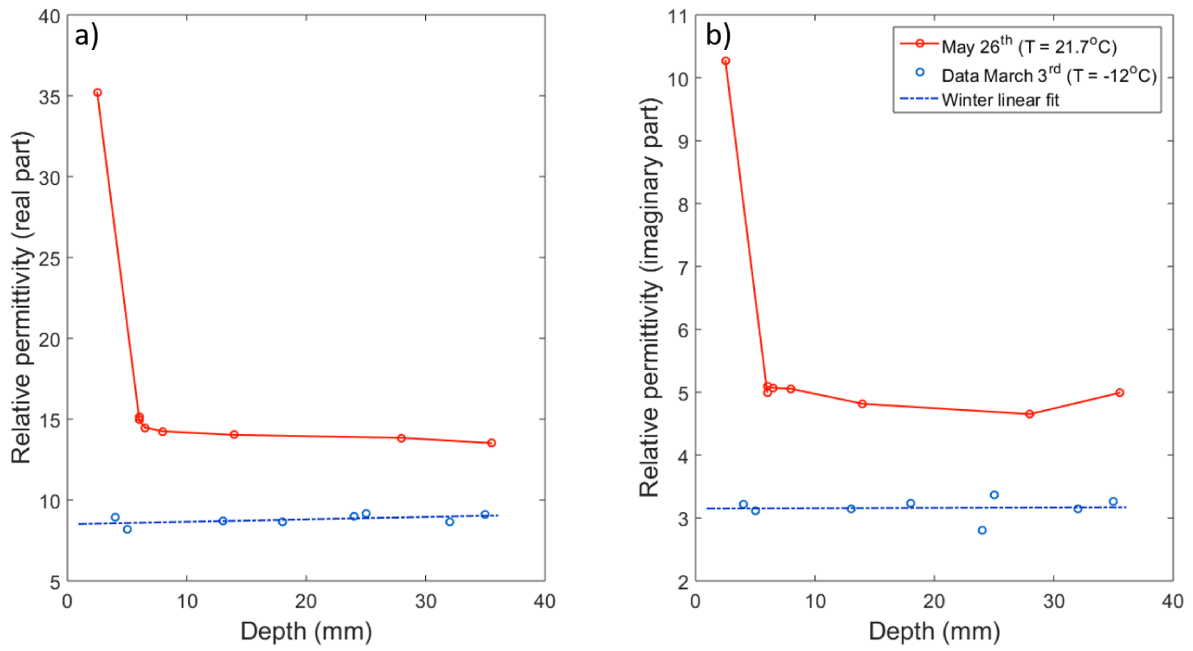


FIGURE 4 – (Figure S2) Trunk radial profile of the real (a) and imaginary (b) relative permittivity in L-band of red pines at the SIRENE station at the Université de Sherbrooke. The winter data were always collected well below freezing point.

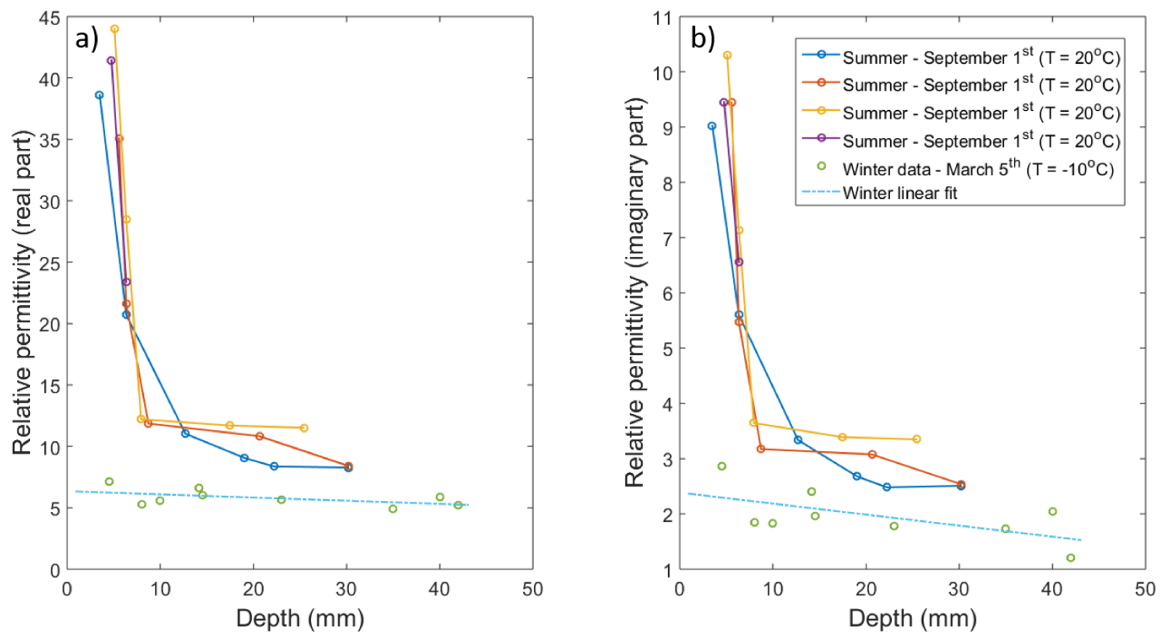


FIGURE 5 – (Figure S3) Trunk radial profile of the real (a) and imaginary (b) relative permittivity in L-band of aspens at the SIRENE station at the Université de Sherbrooke. The winter data were always collected well below freezing point.

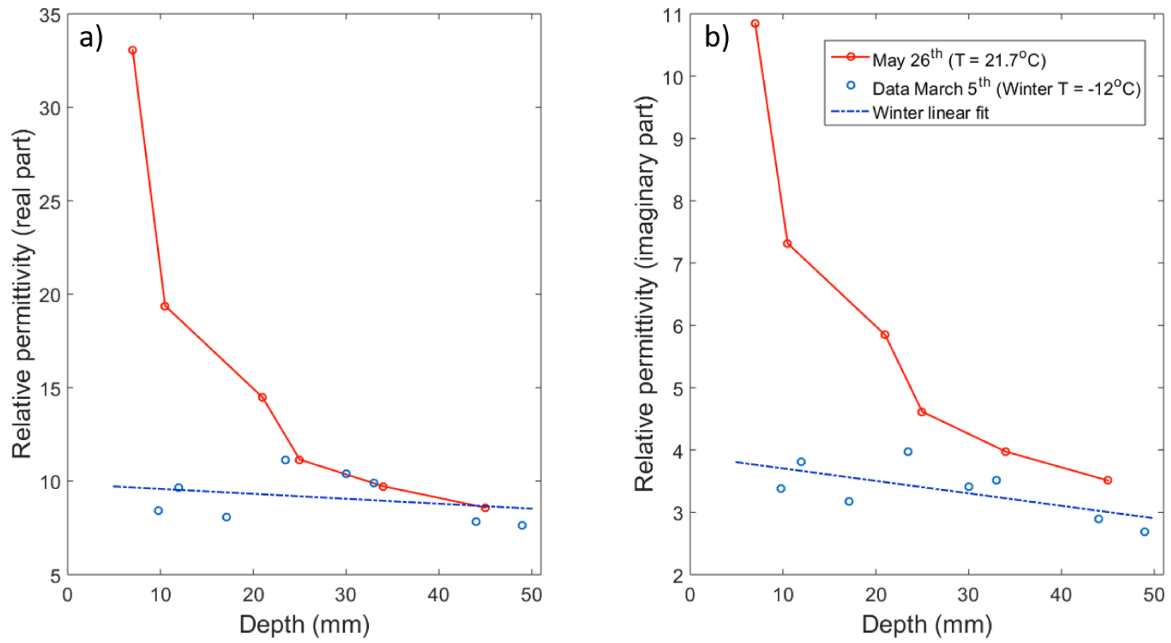


FIGURE 6 – (Figure S4) Trunk radial profile of the real (a) and imaginary (b) relative permittivity in L-band of black cherry at the SIRENE station at the Université de Sherbrooke. The winter data were always collected well below freezing point.

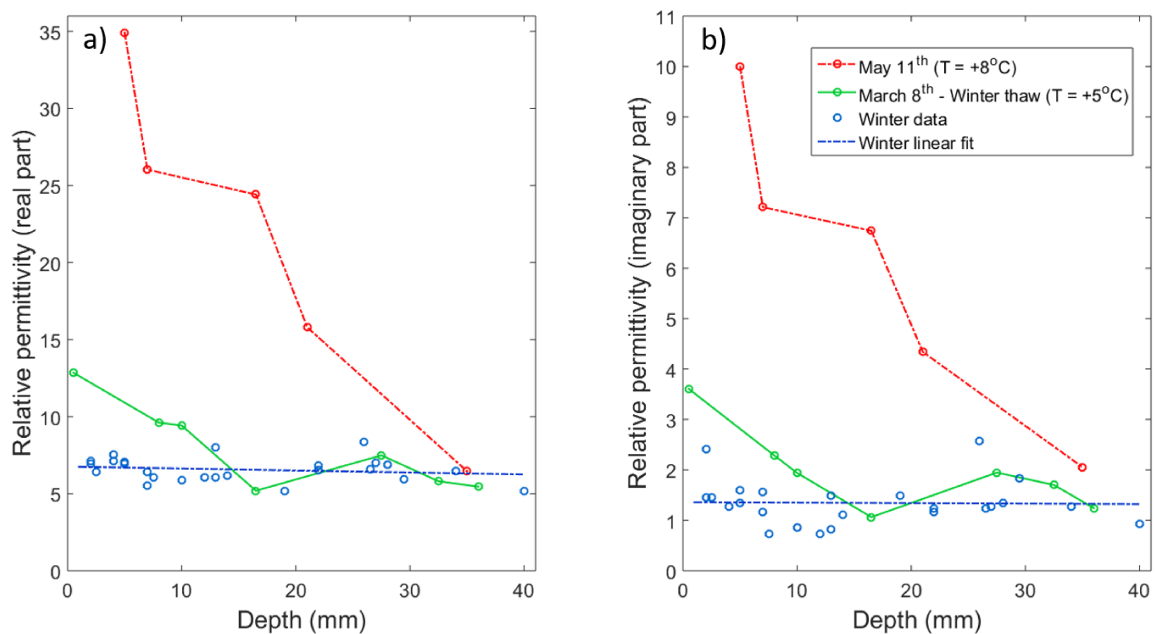


FIGURE 7 – (Figure S5) Trunk radial profile of the real (a) and imaginary (b) relative permittivity (unitless) in L-band of red spruce at the Montmorency site in Québec. The winter data were always collected well below freezing point. The green data (March 8) corresponds to a short winter thaw event where air temperature went above  $0^{\circ}\text{C}$  during daytime.

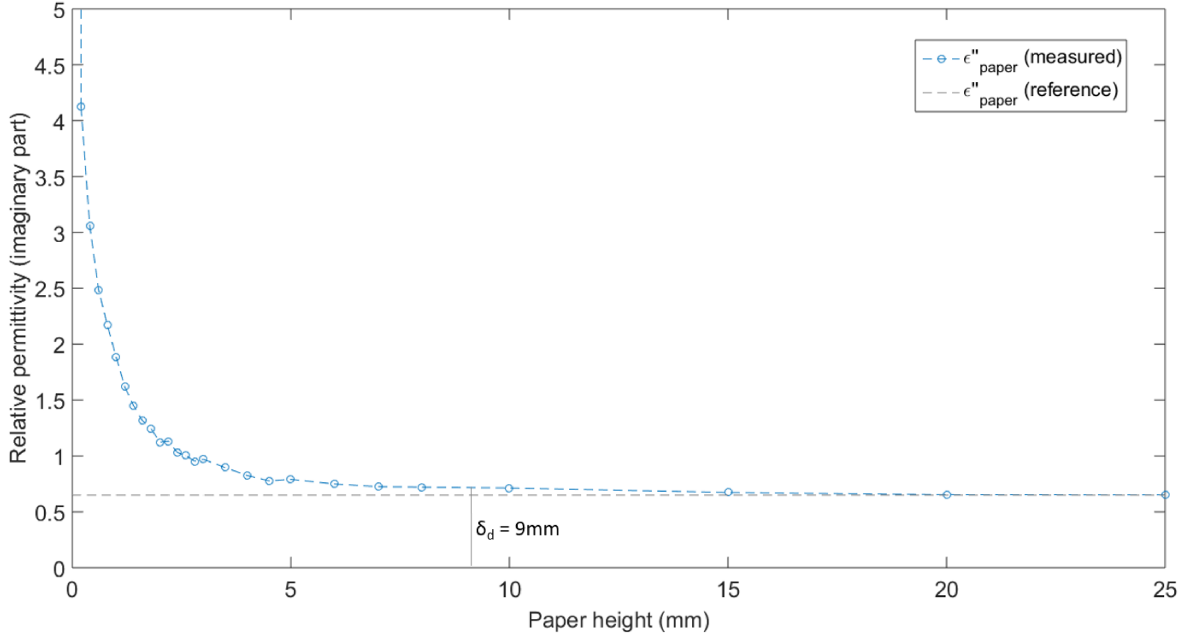


FIGURE 8 – (Figure S6) Imaginary relative permittivity in L-band of a stack of paper sheets.  $\delta_d$  is the penetration depth.

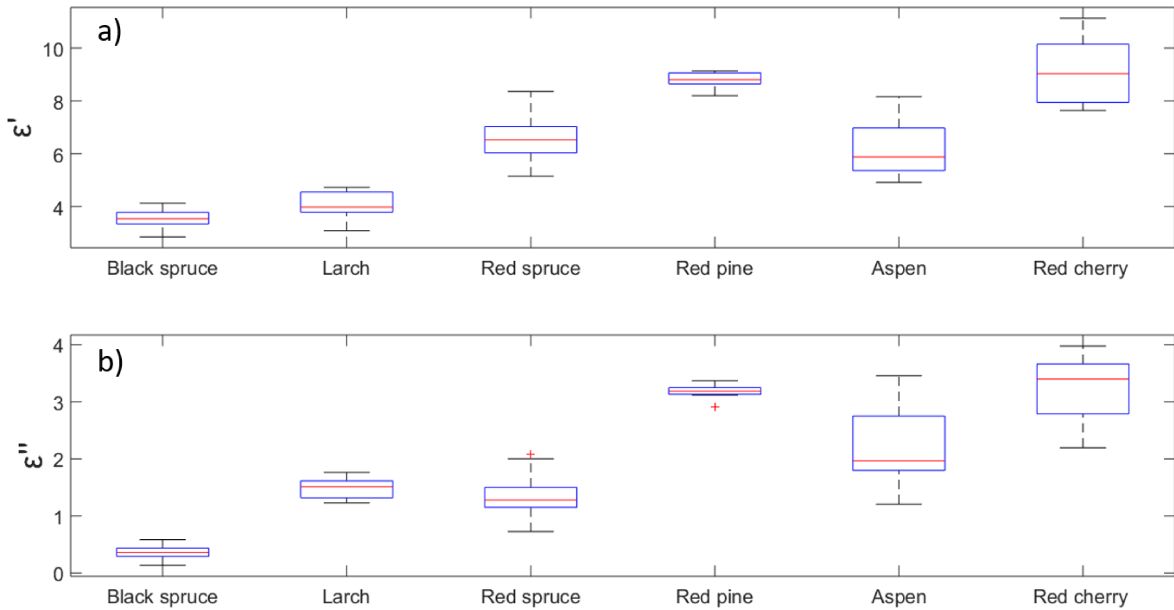


FIGURE 9 – (Figure S7) Variability of the L-band real ( $\epsilon'$ ) and imaginary ( $\epsilon''$ ) relative permittivity (unitless) of the frozen trunk of tree species from OBS, SIRENE and Montmorency (MOMO) sites. The permittivity is averaged over the full extend of the trunk radial profile. The central red mark of the boxplot indicates the median, the blue box includes the data between the 25<sup>th</sup> and 75<sup>th</sup> percentiles, the black whiskers extend the full range of data excluding the outlier data that are represented by a red cross.

## 2.5 Inversion du modèle $\omega - \tau$ à partir de données radiométriques au sol

Cette section fournit des résultats complémentaires à l'article scientifique sur la modélisation de la transmissivité et l'émissivité de la végétation avec le modèle  $\omega - \tau$ . L'objectif de cette section est de comparer la transmissivité de la végétation obtenue à partir du modèle  $\omega - \tau$  et des mesures radiométriques en bande L au sol avec la permittivité du tronc des arbres obtenue à partir de la sonde OECP, les valeurs de transmissivité trouvées dans la littérature scientifique pour des forêts de conifères similaires au site OBS, ainsi que les valeurs de transmissivité calculées à partir des algorithmes des missions SMAP et SMOS. Pour bien comprendre le cadre dans lequel le modèle a été utilisé, des informations supplémentaires sur les sites d'études, principalement le site OBS, sont fournies.

### 2.5.1 Sites d'étude

Les trois sites sélectionnés sont le site de recherche OBS (Old Black Spruce) dans le réseau BERMS (Boreal Ecosystem Research and Monitoring Sites), le site de recherche de la forêt Montmorency (MOMO) et la station SIRENE (Site interdisciplinaire de recherche en environnement extérieur) de l'Université de Sherbrooke. Le tableau 1 fournit les caractéristiques de chaque site, le tableau 2 résume les données récoltées sur chacun des sites et le tableau A1 de l'article scientifique (section 2.3) expose les différentes essences d'arbres mesurées.

TABLEAU 1 – Caractéristiques des sites d'études. ECCC est l'acronyme d'Environnement et Changement climatique Canada. Le LAI (Leaf Area Index ou indice de surface foliaire) du site OBS provient de Chen *et al.* (2006).

Sites d'étude	Coordonnées GPS	Opérateur du site	Type de forêt	Essences d'arbre	Type de sol	Fréquence des Visites	LAI
OBS	53°59'14"N 105°7'4" O	Université de la Saskatchewan et ECCC	Boréale	- Épinette noir - Mélèze	Organique très humide	Bimensuelles	-
Forêt Montmorency	47°19'20"N 71°9'5" O	Université Laval	Boréale	- Sapin baumier - Bouleau blanc - Épinette rouge	Minéral sablonneux	Bimestriel l'hiver	3,8
SIRENE	45°22'25"N 71°55'22" O	Université de Sherbrooke	Mixte	- Pin rouge - Peuplier faux-tremble - Cerisier noir	Minéral sablonneux	Régulière	-

Au site OBS, l'équipe du GRIMP (Groupe de Recherche Interdisciplinaire sur les Milieux Polaires) collabore depuis la saison hivernale 2016-2017 avec Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) et l'Université de la Saskatchewan dans le cadre d'une importante campagne terrain permettant d'acquérir des données radiométriques

TABLEAU 2 – Données acquises et fournies pour chaque site d'étude. Les mesures de permittivité électrique de la végétation et du sol sont acquises à l'aide du nouveau prototype de sonde coaxiale à terminaison ouverte (sonde OECP). Les flux de sèves sont fournis par Christoforos Pappas, chercheur postdoctoral à l'Université de Montréal, à partir de sondes Granier (Granier, 1987).

Sites d'étude	Station et données météo	Mesures $\epsilon_{\text{sol}}$ (gel/dégel)	Mesures $\epsilon_{\text{vég}}$ (gel/dégel)	Mesures $\epsilon_{\text{vég}}$ continues	Radiométrie bande L	Flux de sève
OBS	✓	✓	✓		✓	✓
Forêt Montmorency	✓		✓			
SIRENE	✓		✓	✓		✓

terrestres en continues en bande L sous et au-dessus de la canopée jusqu'à la fin de la saison hivernale 2017-2018 (figure 10 et 11). Le radiomètre PR-1475 (*Radiometrics Inc.*) de l'Université de Sherbrooke (UdeS) fonctionne à 1.4 GHz (Rowlandson *et al.*, 2018) et est placé au-dessus de la canopée, alors que celui d'ECCC est de conception unique et balaie les fréquences de 1375 à 1575 MHz (Toose *et al.*, 2017) sous la canopée. L'empreinte au sol du radiomètre de l'UdeS est d'environ 7 m de rayon, alors que celui d'ECCC fait environ 2.7 m. Durant la campagne, une fois aux deux semaines, des mesures multi angulaires et multi azimutales ont été prises. Durant ces visites, des mesures radiométriques de la végétation ont été prises en tournant le radiomètre ECCC vers le ciel (figure 12).

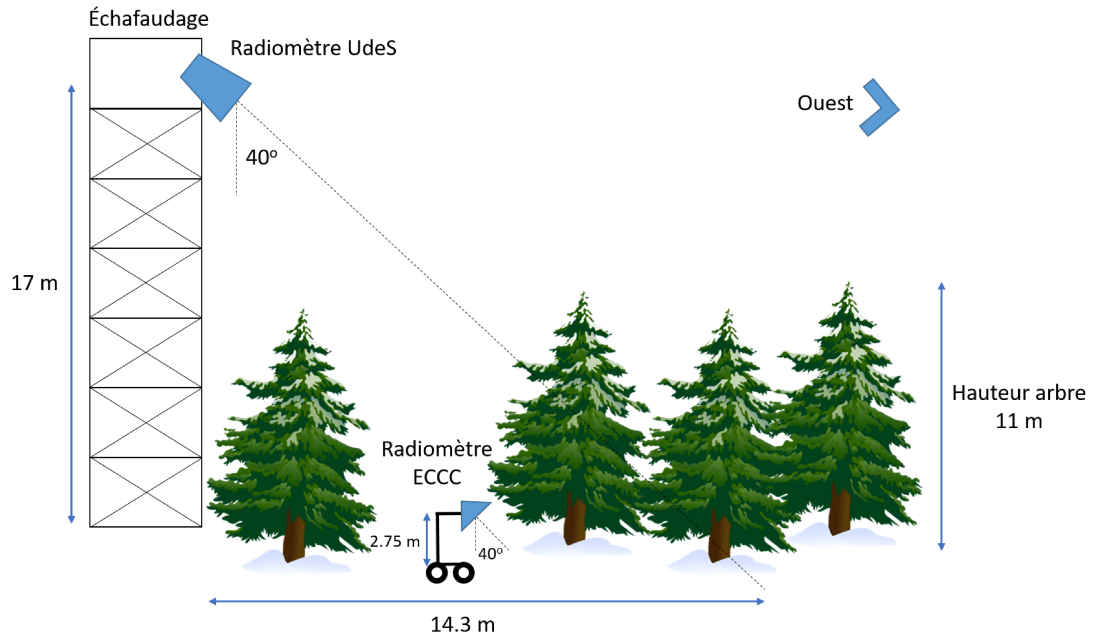


FIGURE 10 – Schéma des radiomètres de l'UdeS et d'ECCC au site OBS en Saskatchewan (vue de côté).

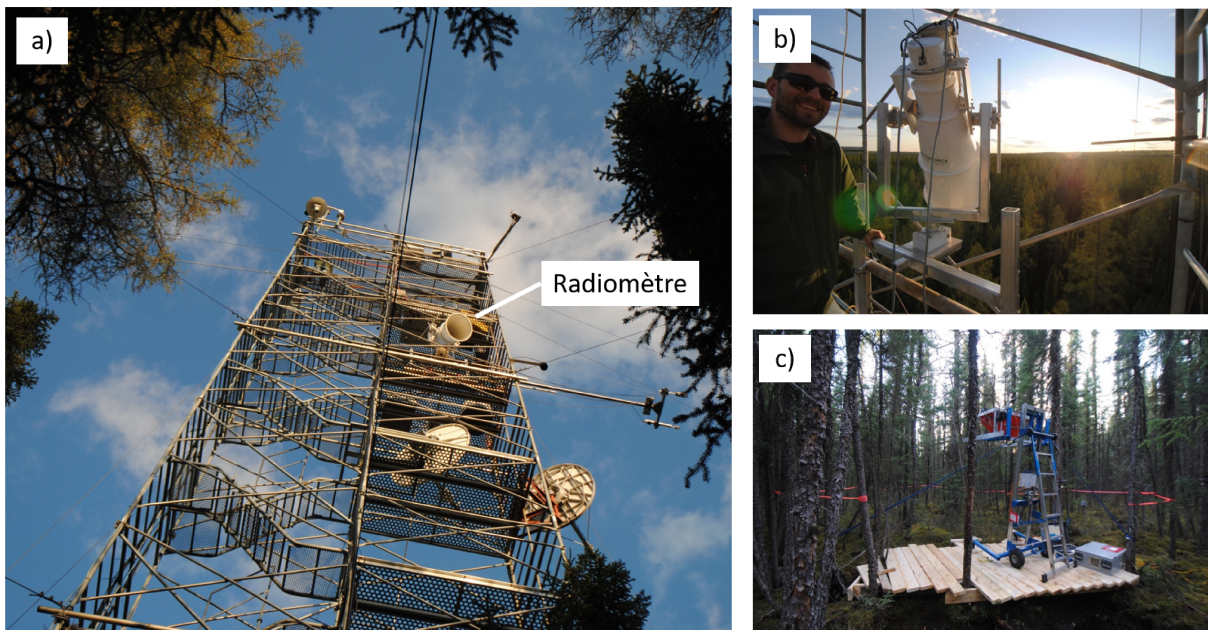


FIGURE 11 – Radiomètres déployés au site OBS pour la période de septembre 2016 à août 2018. a) Tour surplombant la canopée supportant le radiomètre de l'UdeS (22.5 m de haut). b) Radiomètre de l'UdeS installé sur la tour c) Radiomètre d'ECCC sous la canopée.

### 2.5.2 Modèle $\omega - \tau$

Le modèle de transfert radiatif de la végétation  $\omega - \tau$  (Mo *et al.*, 1982; Ulaby *et al.*, 1983; Wigneron *et al.*, 2004) est largement utilisé dans les algorithmes des missions

SMAP (O'Neill *et al.*, 2015) et SMOS (Kerr *et al.*, 2012) pour les produits standards opérationnels. Le modèle  $\omega - \tau$  est un modèle d'ordre zéro ignorant la diffusion des ondes par la canopée. Ce modèle tient compte de l'atténuation et de l'émission par le couvert végétal en l'assimilant à une couche unique aux propriétés homogènes. L'émissivité et la transmissivité de la canopée au site OBS ont pu être évaluées à partir du modèle  $\omega - \tau$  et la méthodologie proposée par Roy *et al.* (2012). Les mesures bimensuelles du radiomètre ECCC sous la canopée (radiomètre tourné vers le ciel) au site OBS ont permis d'inverser la transmissivité ( $\gamma$ ) et l'émissivité  $(1 - \gamma)(1 - \omega)$  du couvert végétal. Chaque terme de l'équation 1 est associé à une contribution du schéma de la figure 12.

$$T_{Brad} = T_{Bveg} + \gamma T_{B atm} + \omega(1 - \gamma)T_{B sol} \quad (1)$$

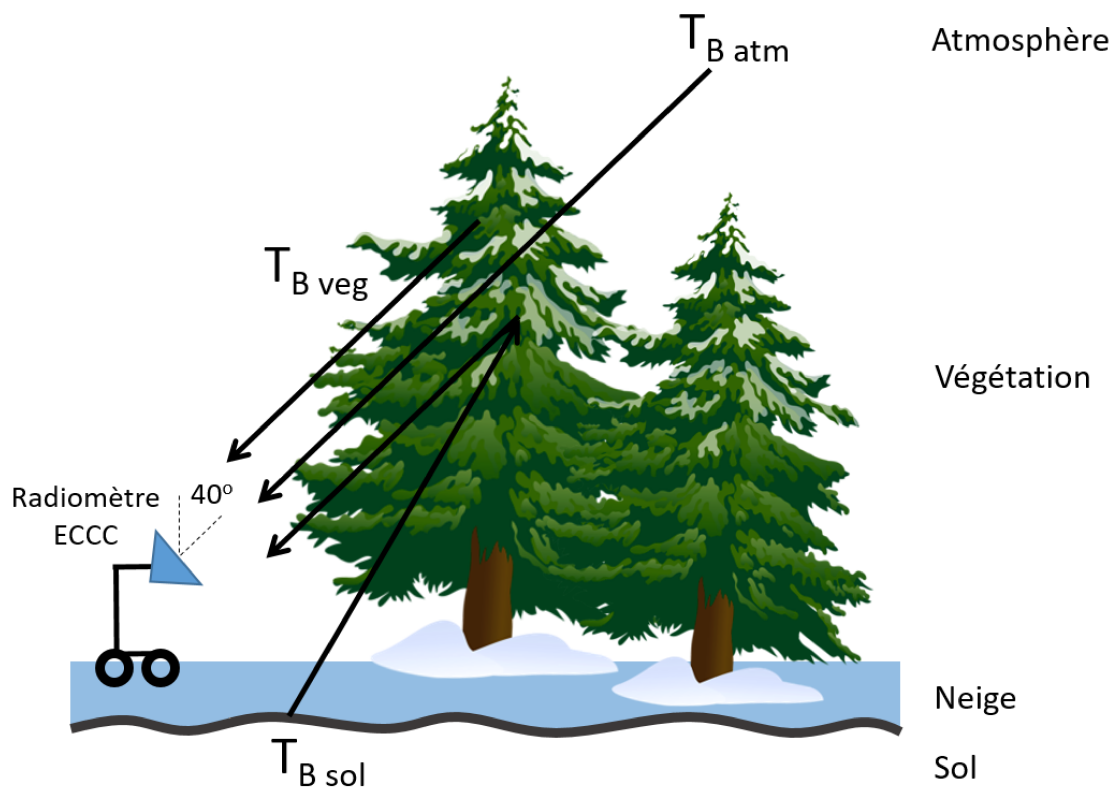


FIGURE 12 – Modèle  $\omega - \tau$ , contributions à la température de brillance observée par le radiomètre tourné vers le ciel sous la canopée.

où  $T_{Brad}$ ,  $T_{Bveg}$ ,  $T_{Bsol}$  et  $T_{B atm}$  représentent respectivement la température de brillance<sup>2</sup> observée par le radiomètre sous la canopée (*rad*), de la végétation (*veg*), du sol (*sol*) de l'atmosphère (*atm*).  $\omega$  est l'albédo de simple diffusion de la végétation et  $\gamma$  est la transmissivité de la végétation telle que décrite par l'équation 2.

2. La température de brillance d'une surface correspond à la température d'un corps noir délivrant la même luminance que la surface étudiée. Celle-ci est fonction de la longueur d'onde, de l'émissivité spectrale et de la température effective (Wigneron *et al.*, 2017) de la surface visée.



$$\gamma = e^{-\tau/\cos\theta} \quad (2)$$

où  $\tau$  est l'épaisseur optique de la végétation et  $\theta$  est l'angle d'incidence au nadir établi à  $40^\circ$  dans le cadre de l'analyse des données du site OBS. Il est à noter que  $\tau$  est fortement dépendant de la teneur en eau de la végétation (Konings et Gentine, 2017, Wigneron *et al.*, 2017, Ulaby et Long, 2014, Jackson et Schmugge, 1991). Le terme provenant du sol dans l'équation 1 peut être négligé puisque la valeur de  $\omega$  est généralement très faible. Pour réussir l'inversion, la valeur de  $\omega$  a été fixée à 0,06 puisque plusieurs études antérieures convergent vers cette valeur pour les forêts canadiennes de conifères (Wigneron *et al.*, 2017). L'article de Roy *et al.* (2012) conclut également que ce terme provenant du sol est négligeable. Sachant que  $T_{Bveg} = (1 - \gamma)(1 - \omega)T_{veg}$  (figure 12), on obtient ainsi l'équation 3 décrivant la transmissivité de la végétation en fonction de paramètres accessibles.

$$T_{Brad} = (1 - \gamma)(1 - \omega)T_{veg} + \gamma T_{B atm} \quad (3)$$

où  $T_{veg}$  est la température physique de la végétation.

### 2.5.3 Algorithme de la mission SMAP

L'algorithme de SMAP évalue la transmissivité de la végétation à partir de sa teneur en eau volumétrique qui est elle-même dérivée du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (O'Neill *et al.*, 2015). L'épaisseur optique de la végétation est liée à la teneur en eau volumétrique (VWC) via l'équation 4 (Jackson et Schmugge, 1991).

$$\tau = VWC \cdot b \quad (4)$$

où  $b$  est un paramètre lié à la structure de la végétation et dépend du type de végétation. Le paramètre de structure  $b$  est évalué à 0,1 pour les forêts de conifères à aiguilles persistantes (O'Neill *et al.*, 2015). VWC est quant à lui relié au NDVI via l'équation 5 (Chan *et al.*, 2013).

$$VWC = 1,9134 \cdot NDVI^2 - 0,3215 \cdot NDVI + \frac{\xi(NDVI_{max} - NDVI_{min})}{1 - NDVI_{min}} \quad (5)$$

où  $NDVI_{min}$  et  $NDVI_{max}$  sont respectivement le minimum et le maximum annuel du NDVI.  $\xi$  représente le facteur de tronc d'arbre (*stem factor*), il dépend du type de végétation. Le paramètre de tronc est calculé à partir du produit entre la hauteur moyenne des arbres et le ratio entre l'aire d'aubier et l'aire de feuillage. La valeur de  $\xi$  est évaluée à 15,96 pour les forêts de conifères à aiguilles persistantes (O'Neill *et al.*, 2015).

Afin de calculer la transmissivité de la végétation, l’algorithme de SMAP établit le type d’occupation du sol à partir des données du capteur MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) monté sur le satellite Aqua lancé et opéré par la NASA depuis 2002. L’algorithme de SMAP utilise également le NDVI de MODIS pour résoudre l’équation 5. Le NDVI n’est pas un indice fiable en présence d’un couvert neigeux au sol. Pour cette raison, la transmissivité de la végétation de l’algorithme de SMAP ne devrait pas être considérée comme fiable en présence de neige. L’algorithme fut appliqué sur le site OBS pour la période du 27 juillet 2016 au 16 octobre 2017 excluant les périodes où il y avait présence de neige au sol (figure 13).

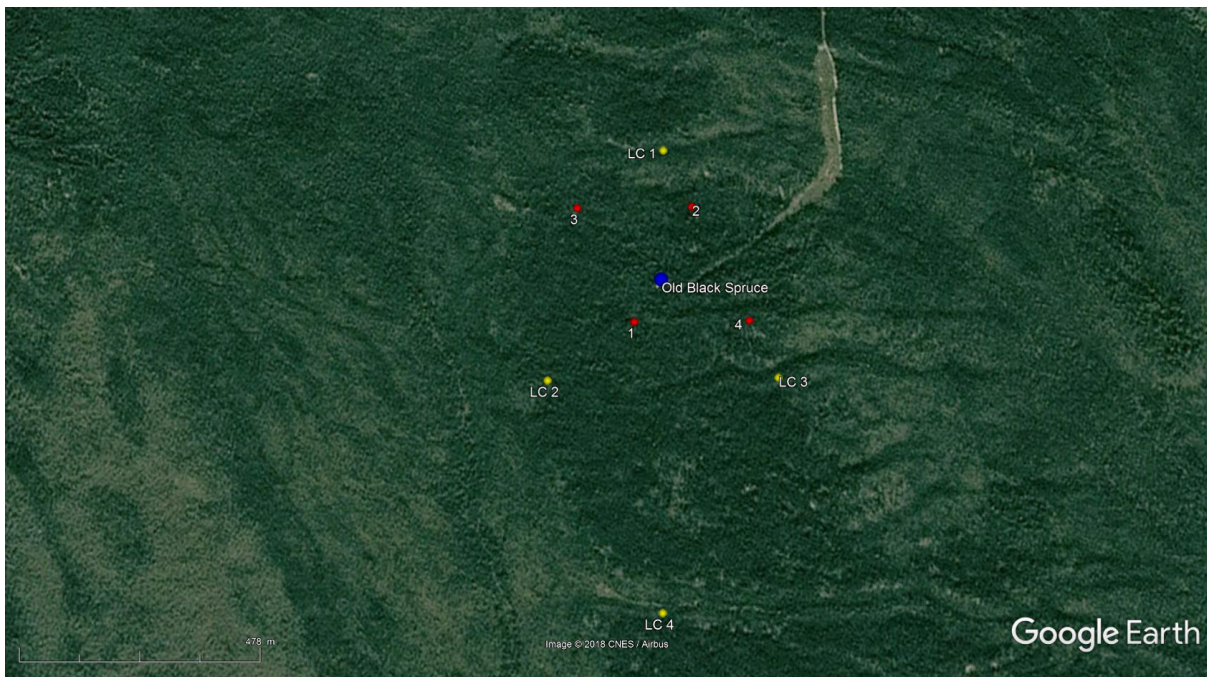


FIGURE 13 – Produit MODIS d’occupation du sol (points jaunes, résolution : 500m) et de NDVI (points rouges, résolution : 250m) près du site OBS (point bleu). Les points représentent le centre des pixels. Le temps de revisite du produit NDVI de MODIS est de 16 jours.

#### 2.5.4 Algorithme de la mission SMOS

L’algorithme de SMOS évalue la transmissivité de la végétation à partir de paramètres calibrés pour chaque type de végétation : l’albédo de simple diffusion ( $\omega = 0,06$  pour les forêts de conifères) et la rugosité de surface (SMOS, 2017). L’hypothèse d’une interpolation linéaire est utilisée dans le cas d’un pixel mixte. Les données SMOS présentées dans ce mémoire proviennent directement du produit d’épaisseur optique de la végétation (Fernandez-Moran *et al.*, 2017).

### 2.5.5 Résultats et analyse

Les résultats présentés à la figure 14 montrent l'évolution temporelle de la transmissivité et de l'émissivité dérivées des mesures radiométriques de la canopée (équation 3) avec les mesures de permittivité électrique des arbres prises avec la sonde OECP. On y observe une portion du cycle annuel de transmissivité, émissivité et permittivité des arbres avec un maximum de transmissivité en période hivernale et un maximum d'émissivité et de permittivité en période estivale. Les mesures radiométriques et de permittivité électrique ont été collectées au même moment lors des campagnes bimensuelles sur le site de OBS au cours de l'hiver 2016-2017. La figure 15 expose explicitement la corrélation entre la permittivité électrique et la transmissivité de la végétation. On observe deux régimes distincts correspondant aux phases de gel et de dégel de la végétation. Cependant, la quantité de données dans chacune des phases est insuffisante pour faire ressortir une relation claire entre la permittivité et la transmissivité de la végétation. Pour obtenir une telle relation, des mesures radiométriques et de permittivité devraient être effectuées en continu sur une longue période. La section 4.3.2 de l'article scientifique montre que de telles mesures sont maintenant possibles avec la sonde coaxiale développée dans le cadre de ce mémoire.

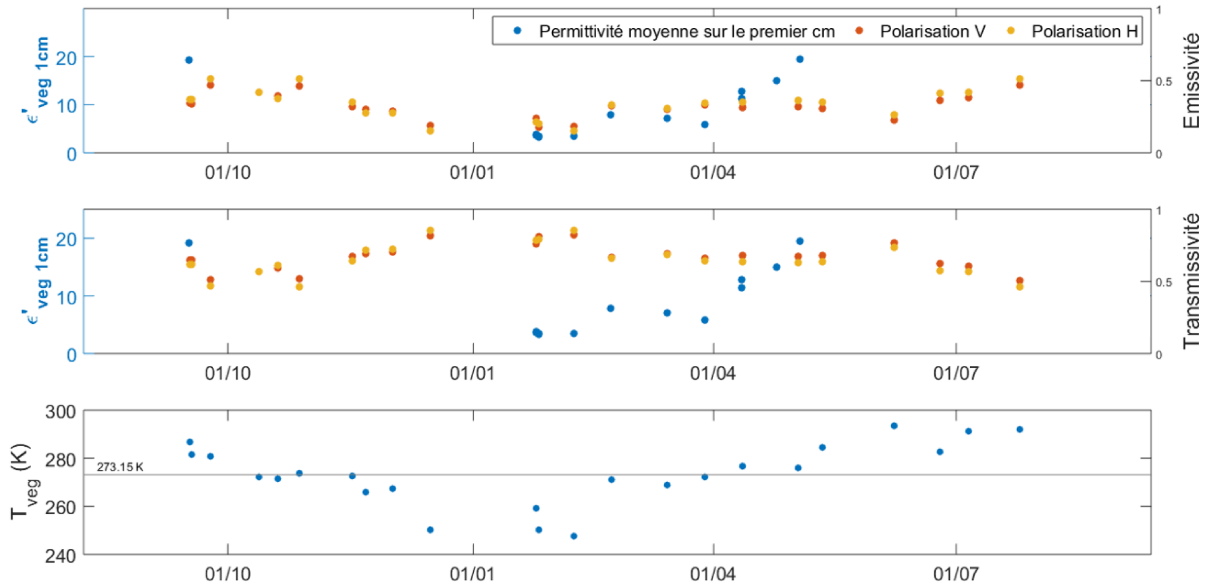


FIGURE 14 – Résultats des campagnes de terrain au site OBS pour la période de septembre 2016 à juillet 2017. La permittivité électrique réelle relative mesurée par la sonde OECP a été moyennée sur le premier cm du tronc. La transmissivité et l'émissivité de la végétation à un angle zénithal de  $40^\circ$  ont été évaluées à partir du modèle  $\omega - \tau$  et des mesures radiométriques.

Les valeurs de transmissivité obtenues pour la forêt boréale dégelée du site OBS sont cohérentes avec les valeurs obtenues pour d'autres forêts de conifères à travers la littérature scientifique bien que plus près des valeurs maximales (tableau 3). Les algorithmes de SMOS et SMAP semble fortement sous-estimer la valeur de la transmissivité de la

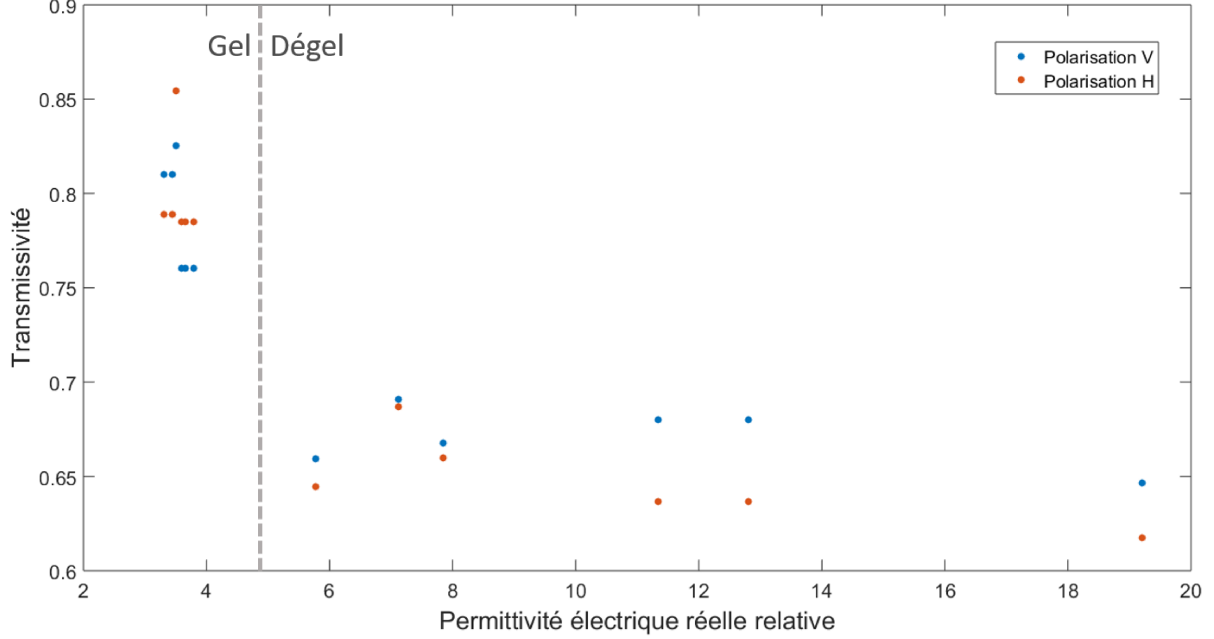


FIGURE 15 – Transmissivité de la végétation à un angle zénithal de  $40^\circ$  évaluée à partir du modèle  $\omega - \tau$  et les mesures radiométriques par rapport à la permittivité électrique réelle relative (sonde OECP) de la végétation  $\varepsilon'_{veg1cm}$  moyennée sur le premier cm du tronc. La distinction entre les données provenant de périodes de gel et de dégel est identifiée par la ligne pointillée verticale.

végétation comparativement aux mesures du site OBS. La différence avec les mesures est particulièrement importante pour l'algorithme SMAP. Cet écart est principalement reliée au  $\xi$  qui semble beaucoup trop élevé, une valeur plus faible permettrait d'obtenir des valeurs de transmissivité plus près des mesures. Peu d'études de validation et de paramétrisation de l'algorithme de SMAP sont disponibles pour la forêt boréale, la majorité se concentrant davantage sur les zones agricoles. Pourtant, une sous-estimation de la transmissivité de la végétation engendre nécessairement des erreurs majeures sur la détermination de l'humidité du sol en forêt boréale. Puisque l'algorithme de SMAP requiert le NDVI afin de calculer la transmissivité de la végétation, il ne lui est pas possible de calculer la transmissivité de la forêt boréale l'hiver due à la présence de neige. Alors que l'algorithme de SMAP ne fournit pas de valeur hivernale de transmissivité, l'algorithme produit des résultats cohérents avec les mesures au site OBS qui sont également supportés par les valeurs obtenues par Zheng *et al.* (2017) (tableau 4). Les algorithmes de SMAP et SMOS posent l'hypothèse que la transmissivité est indépendante de la polarisation due à la structure désordonnée de la végétation. Cette hypothèse semble confirmée par les mesures de transmissivité des études présentées aux tableaux 3 et 4 puisqu'un très faible écart est observé entre les polarisations horizontale et verticale. Cet écart est trop faible pour conclure une quelconque dépendance en polarisation.

En conclusion, les résultats montrent que la sonde développée permettrait de relier les mesures *in situ* de permittivité du tronc des arbres à la transmissivité dérivée des

mesures radiométriques au sol que nous avons réalisées. Ce jeu de données, bien qu'insuffisant pour tirer un modèle de corrélation, met clairement en évidence le contraste gel/dégel de la transmissivité. Ces valeurs de transmissivité sont en accord avec les valeurs rapportées dans la littérature, mais diffèrent des valeurs utilisées dans les modèles d'inversion de SMOS et SMAP en conditions de dégel.

TABLEAU 3 – Transmissivité de forêts de conifères dégelés. Le site d'étude de Zheng *et al.* (2017) comporte plusieurs essences de conifères. Nom latin du pin maritime : *Pinus pinaster*. Toutes les mesures ont été effectuées en bande L à partir de données radiométriques à l'exception des algorithmes de SMAP et SMOS.

Source	$\gamma_H$ - moy	$\gamma_V$ - moy	$\gamma_H$ - moy	$\gamma_V$ - plage	Nombre de mesures	Type de forêt	Période	Emplacement du site d'étude
Mavrovic 2018	0,65	0,67	[0,62-0,69]	[0,65-0,69]	6	Épinette noir	27/07/16 au 16/10/2017	Site OBS
Zheng 2017	0,573	0,603			13	Conifères	Septembre 2015	Nord de la Chine
Grant 2008	0,74	0,75			Continu	Pin maritime (plantation 5 ans)	Juillet à décembre 2004	Bordeaux, France
Grant 2008	0,52	0,56			Continu	Pin maritime (plantation 26 ans)	Juillet à décembre 2004	Bordeaux, France
Grant 2008	0,48	0,51			Continu	Pin maritime (plantation 32 ans)	Juillet à décembre 2004	Bordeaux, France
Grant 2008	0,43	0,45	[0,42-0,45]	[0,45-0,45]	3	Pin maritime (plantation 34 ans)	Juillet à décembre 2004	Bordeaux, France
Grant 2009	0,54	0,54	[0,52-0,56]	[0,53-0,55]	3	Pin maritime (plantation 37 ans)	Juillet à décembre 2004	Bordeaux, France
SMAP	0,23	0,23	[0,18-0,30]	[0,18-0,30]	15	Épinette noir	27/07/16 au 16/10/2017	Site OBS
SMOS	0,40	0,40	[0,28-0,59]	[0,28-0,59]	102	Épinette noir	27/07/16 au 16/10/2017	Site OBS

TABLEAU 4 – Transmissivité de forêts de conifères gelés. Le site d'étude de Zheng *et al.* (2017) comporte plusieurs essences de conifères. Nom latin du pin maritime : *Pinus pinaster*. Toutes les mesures ont été effectuées en bande L à partir de données radiométriques à l'exception de l'algorithme de SMOS.

Source	$\gamma_H$ - moy	$\gamma_V$ - moy	$\gamma_H$ - moy	$\gamma_V$ - plage	Nombre de mesures	Type de forêt	Période	Emplacement du site d'étude
Mavrovic 2018	0,80	0,79	[0,78-0,85]	[0,76-0,83]	6	Épinette noir	13/09/16 au 23/04/2017	Site OBS
Zheng 2017	0,884	0,874			12	Conifères	Décembre 2015	Nord de la Chine
SMOS	0,75	0,75	[0,62-0,87]	[0,62-0,87]	81	Épinette noir	13/09/16 au 23/04/2017	Site OBS

## 3 Permittivité électrique du sol

Cette section présente les résultats de permittivité d'échantillon de sol provenant du site OBS qui ont subi plusieurs cycles de gel/dégel en chambre froide. Les mesures obtenues à partir de la sonde OECP sont comparées à certains modèles de sol actuellement utilisés dans les algorithmes des missions SMAP et SMOS, ainsi qu'aux valeurs trouvées dans la littérature scientifique récente pour des sols organiques.

### 3.1 Méthodologie

L'expérience proposée est de comparer les mesures de permittivité électrique de la sonde coaxiale avec les simulations du modèle de Mironov *et al.* (2010), principalement lors de transitions entre l'état de gel et dégel. De plus, les mesures de permittivité de la sonde coaxiale seront comparées aux mesures de sondes commerciales opérant à plus basse fréquence.

Un échantillon de sol collecté au site de OBS a subi trois cycles complets de gel/dégel en chambre froide dans les laboratoires de l'Université de Guelph en Ontario avec la collaboration du professeur Aaron Berg et de son étudiant doctoral Renato Pardo Lara. La permittivité électrique y est mesurée avec la sonde OECP et trois sondes standards d'humidité HydraProbe de *Stevens Water Monitoring Systems* (figure 16). Toutes les sondes sont installées à 4,5 cm de profondeur afin de s'assurer qu'elles soient complètement ensevelies dans un échantillon de sol jugé homogène. Afin de reproduire les conditions naturelles de gel/dégel, l'échantillon de sol est placé dans un grand bac de sable afin que le front froid/chaud se propage du haut vers le bas à travers l'échantillon. La température de l'air est de  $-10^{\circ}C$  et  $10^{\circ}C$  pour les cycles de gel et dégel respectivement. La composition gravimétrique de l'échantillon de sol a été fournie par Alan Barr, chercheur scientifique pour Environnement et Changement climatique Canada (tableau 5). L'humidité et la densité de l'échantillon lors des mesures ont été obtenues par séchage au laboratoire d'analyses environnementales de l'Université de Sherbrooke avec l'aide de Gabriel Diab, coordonnateur de laboratoire à l'Université de Sherbrooke (tableau 5). L'échantillon est principalement composé de matière organique (tableau 5).

### 3.2 Modèle de Mironov *et al.* (2010)

Le modèle de Mironov, ou TD GRMDM (Temperature Dependable Generalized Refractive Mixing Dielectric Model), est un modèle semi-empirique aux bases physiques qui permet d'estimer la permittivité électrique micro-onde d'un sol à partir de ses caractéristiques physiques. Le modèle tient compte de la granulométrie du sol et de l'effet de la température du sol. L'approche de ce modèle lui permet de distinguer entre l'eau liée et

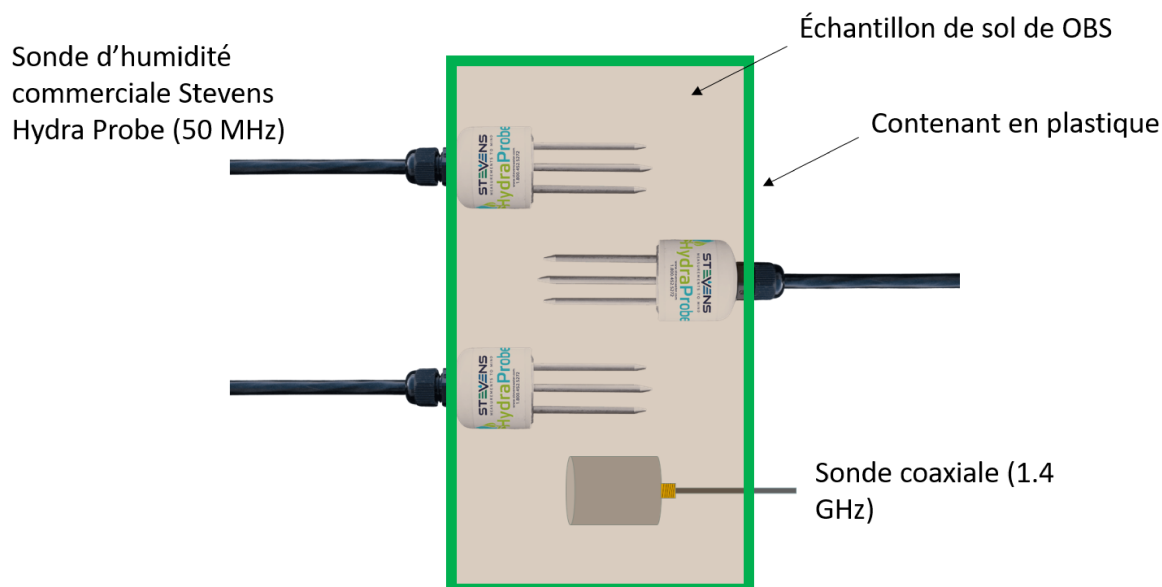


FIGURE 16 – Montage expérimental en chambre froide pour la mesure de la permittivité électrique d'un échantillon de sol du site OBS (vue du haut). L'expérimentation s'est déroulée dans les laboratoires de l'Université de Guelph en Ontario.

TABLEAU 5 – Caractéristiques de l'échantillon de sol provenant du site OBS.  $\theta_V$  représente la teneur en eau volumétrique,  $\theta_G$  représente la teneur en eau gravimétrique,  $\rho_w$  la densité apparente de l'échantillon et  $\rho_d$  la densité apparente de l'échantillon séché. La composition du sol non organique est donnée sous forme de pourcentage d'argile, sable et limon.

Composition gravimétrique				État au moment des mesures			
Organique	Argile	Sable	Limon	$\theta_V$	$\theta_G$	$\rho_w$	$\rho_d$
%	%	%	%	$m^3/m^3$	Kg/kg	$kg/m^3$	$kg/m^3$
59	2,36	29,85	8,79	0,3	0,83	850,0	356,2

libre. Les paramètres d'entrée que requiert TD GRMDM sont l'humidité, la température, la masse volumique apparente et la fraction d'argile du sol. Ce modèle a été construit et validé sur la base de données de sol pour toute la gamme de texture couverte par la mission SMOS (Mialon *et al.*, 2015, Mironov *et al.*, 2009, Mironov *et al.*, 2010).

### 3.3 Modèle de Zhang *et al.* (2003)

Le modèle de Zhang est une extension du modèle de Dobson (Dobson *et al.*, 1985) adapté aux sols gelés. Le modèle de Zhang permet d'évaluer la quantité de glace dans le sol afin d'obtenir une transition plus fluide entre la phase solide et liquide de l'eau. Ce modèle physique du sol permet d'estimer la permittivité électrique micro-onde d'un sol à partir de ses caractéristiques physiques, tout comme TD GRMDM. Les paramètres d'entrée que

requiert le modèle de Zhang sont l'humidité, la température, la masse volumique sèche et la composition (fraction d'argile, de limon et de sable) du sol (Zhang *et al.*, 2003, Zhang *et al.*, 2010, Mironov *et al.*, 2017).

### 3.4 Résultats

Les manipulations en chambre froide ont permis de mettre en évidence un effet d'hystérésis important autour du point de congélation (figure 17). Cet effet implique qu'il faudrait tenir compte du sens de l'évolution du processus (gel ou dégel) dans le calcul de la permittivité du sol puisque le comportement de la permittivité diffère près du point de congélation. Les caractéristiques du sol actuellement prises en compte dans les modèles du sol (température, teneur en eau, densité, etc.) ne seraient donc pas suffisantes pour simuler adéquatement la permittivité électrique du sol près du point de congélation.

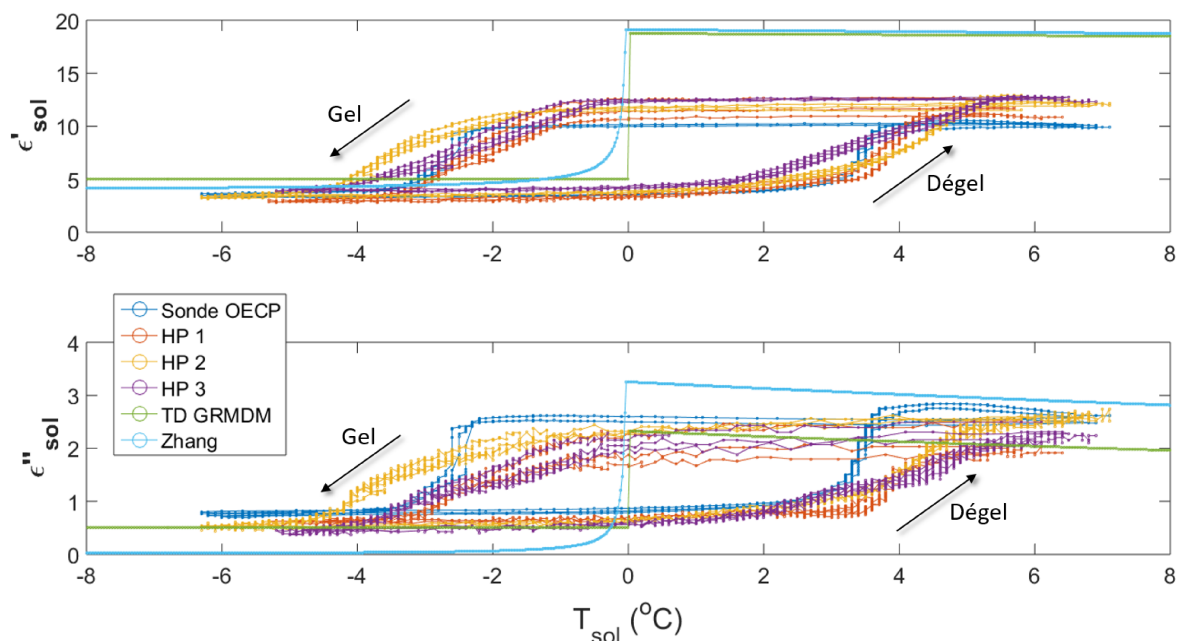


FIGURE 17 – Permittivité électrique relative réelle ( $\epsilon'_{sol}$ ) et imaginaire ( $\epsilon''_{sol}$ ) en chambre froide (Université de Guelph, Ontario, Canada) d'un échantillon de sol provenant du site OBS pour trois cycles complets de gel/dégel. Deux types de sondes sont utilisées, la sonde coaxiale à 1.4 GHz (OECP) et trois sondes standards d'humidité HydraProbe de *Stevens Water Monitoring Systems* à 50 MHz (HP). La température du sol  $T_{sol}$  est mesurée à la même profondeur que les sondes de permittivité. La ligne verte correspond au modèle TD GRMDM fourni par Jean-Pierre Wigneron de l'INRA en France.

La transition gel/dégel est plus rapide avec la sonde OECP qu'avec les sondes d'humidités commerciales (figure 17), ce phénomène est probablement dû à un effet de volume. Les sondes d'humidité moyennent la permittivité sur un volume beaucoup plus important que la sonde OECP (figure 18). On observe à la figure 17 une permittivité de dégel légèrement plus faible pour la sonde OECP que pour les sondes d'humidités fonctionnant à 50 MHz puisque la permittivité décroît légèrement avec la fréquence dans



cette région du spectre (figure A1). Pour la partie imaginaire de la permittivité, elle est plus importante à plus haute fréquence puisque l'absorption par le milieu est plus importante.

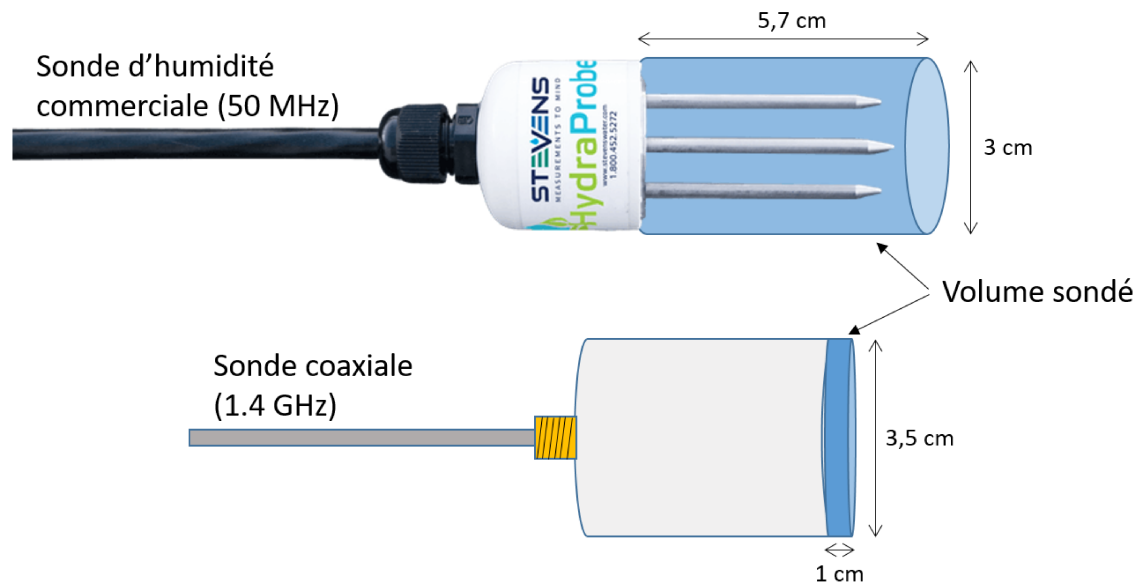


FIGURE 18 – Volume sondé par la sonde coaxiale et les sondes commerciales d'humidité HydraProbe. Le volume sondé de la sonde coaxiale a été déterminé dans l'article scientifique (section 4.1), alors que le volume sondé des sondes d'humidités commerciales est fourni par le fabricant.

Le modèle TD GRMDM et le modèle de Zhang ne parviennent pas à reproduire les résultats obtenus en chambre froide dans un environnement contrôlé (figure 17). Les modèles surestiment la permittivité réelle, alors qu'il sous-estime la permittivité imaginaire. On note cependant que le modèle de Zhang permet d'obtenir une transition plus fluide et qui correspond mieux aux observations. Ceci est dû au fait que le modèle de Zhang est apte à estimer la teneur en glace du sol, ainsi que la transition de cette glace se changeant en eau progressivement lorsque la température augmente. Le modèle de Zhang calcul une permittivité global du sol à partir d'une fraction d'eau et de glace. L'une de nos hypothèse sur la cause de l'hystérésis est que la permittivité du sol dépend de la matrice (ou géométrie) du mélange eau/glace dans le sol ce que le modèle de Zhang ne simule pas, d'où son inaptitude à reproduire l'effet d'hystérésis. Aussi, le modèle de Zhang ne considère actuellement qu'un seul seuil de transition eau/glace peut importe le sens du cycle, alors que nos résultats mettent en évidence deux seuil distincts entre les cycles de gel et dégel.

La permittivité du sol organique dégelé du site OBS mesurée avec la sonde OECP est inférieure aux valeurs trouvées dans la littérature scientifique pour les sols organiques (tableau 6). Cependant, la plupart des valeurs de référence trouvées sont obtenues à plus

haute humidité,  $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$  plutôt que  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . On sait que la permittivité des sols est fortement corrélée à l’humidité comme on peut le voir dans les résultats de Bircher *et al.* (2016). La permittivité obtenue par Bircher *et al.* (2016) à humidité comparable ( $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) se rapproche des valeurs obtenues avec la sonde OECP ce qui porte à croire que les valeurs obtenues pour le sol du site OBS sont cohérentes avec la littérature scientifique récente portant sur les sols organiques. Au regard de cette revue des mesures de permittivités de sols dégelés, on constate que les modèles TD GRMDM et de Zhang surestiment nettement la permittivité des sols organiques dégelés. Il est à noter que la dépendance en température de la permittivité des sols dégelés est suffisamment faible pour ne pas être un facteur important de la comparaison des valeurs présentées au tableau 6.

TABLEAU 6 – Permittivité électrique de sols organiques dégelés. Tous les sols présentés sont décrits comme étant organiques par les auteurs. Lorsque disponible, le pourcentage de matière organique (MO) est donné, ainsi que la composition du sol non organique : argile (A), sable (S) et limon (L). Toutes les mesures ont été effectuées en bande L sauf avis contraire.

Source	Méthode	T (°C)	$\theta_v$ ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	$\epsilon'$	$\epsilon''$	Composition gravimétrique
Demontoux 2016	Sonde coaxiale (type SMA)	20	0,4	20,06	2	17% A / 36% S / 46% L
Demontoux 2016	Sonde coaxiale (type N)	20	0,4	24,9	2,66	17% A / 36% S / 46% L
Demontoux 2008	Cavité résonante	22	0,4	19,66	2,95	70-80% S
Bircher 2016	Cavité résonante (régression)	20	0,4	17,89	2,87	1,3% A / 88% S / MO > 30%
Bircher 2016	Cavité résonante (régression)	20	0,3	12,20	2,29	1,3% A / 88% S / MO > 30%
Mironov 2010	Modèle	5	0,3	18,6	5	5,77% A
Zhang 2003	Modèle	5	0,3	18,9	2,9	5,77% A / 72,79% S / 21,44 % L
Mavrovic 2018	Sonde coaxiale	5	0,3	10,2	2,6	5,77% A / 72,79% S / 21,44 % L / 59% MO
Mavrovic 2018	HydraProbe (50MHz)	5	0,3	[10,95-12,71]	[1,8-2,6]	5,77% A / 72,79% S / 21,44 % L / 59% MO

Peu de mesures de permittivité de sols organiques gelés ont été effectuées par le passé. Les quelques mesures effectuées par Bircher *et al.* (2015) correspondent bien avec les mesures effectuées sur le site OBS (tableau 7). Le modèle TD GRMDM et de Zhang surestime également la partie réelle de la permittivité du sol gelé. Pour la partie imaginaire, le modèle TD GRMDM reproduit bien les mesures alors que le modèle de Zhang sous-estime largement sa valeur.

TABLEAU 7 – Permittivité électrique de sols organiques gelés. Tous les sols présentés sont décrits comme étant organiques par les auteurs. Lorsque disponible, le pourcentage de matière organique (MO) est donné, ainsi que la composition du sol non organique : argile (A), sable (S) et limon (L). Toutes les mesures ont été effectuées en bande L sauf avis contraire.

Source	Méthode	T (°C)	$\theta_v$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\epsilon'$	$\epsilon''$	Composition gravimétrique
Bircher 2015	Cavité résonante (1,26 GHz)	Gelé	0,3	[2,5-5,5]	[0,1-2]	MO > 30%
Bircher 2015	Guide d'onde	Gelé	0,3	[1,25-3,8]	[0,1-0,5]	MO > 30%
Mironov 2010	Modèle	-5	0,3	5	0,5	5,77% A
Zhang 2003	Modèle	-5	0,3	4,26	0,027	5,77% A / 72,79% S / 21,44 % L
Mavrovic 2018	Sonde coaxiale	-5	0,3	3,5	0,75	5,77% A / 72,79% S / 21,44 % L / 59% MO
Mavrovic 2018	HydraProbe (50MHz)	-5	0,3	[2,86-3,95]	[0,37-0,64]	5,77% A / 72,79% S / 21,44 % L / 59% MO

### 3.5 Discussion

En conclusion, les résultats obtenus en chambre froide avec la sonde OECP sont en accord avec les valeurs rapportées dans la littérature, mais différent des valeurs obtenues avec les modèles TD GRMDM et de Zhang.

Les modèles actuels, comme le modèle TD GRMDM et de Zhang, permettent déjà de considérer que le sol ne gèle pas nécessairement à 0°C via un seuil critique en température ajustable. La détermination de ces seuils est l'objet de recherches actuelles (Ren *et al.*, 2017), notamment de la part de nos collaborateurs à l'Université de Guelph. Une solution simple qui permettrait aux modèles de reproduire l'effet d'hystérésis observé en chambre froide serait d'établir un double seuil, un seuil gel et un seuil dégel. Cette solution nécessiterait l'ajout d'un nouveau paramètre d'entrée spécifiant la direction de la transition de phase. La détermination de ces seuils demeure un défi important et leurs déterminations demeurent actuellement empiriques. En reproduisant les expériences en chambre froide de gel/dégel avec différents niveaux d'humidité et différents types de sol, notamment des sols minéraux, il serait possible de déterminer empiriquement les seuils critiques en température de gel/dégel pour diverses conditions.

Le signal radiométrique de gel/dégel étant très sensible au premier centimètre de gel de sol (Roy *et al.*, 2017), le plus petit volume sondé de la sonde OECP semble être un outil mieux adapté à l'étude du gel/dégel du sol puisque le grand volume sondé des sondes de types *HydraProbe* ne leur permet pas de mesurer adéquatement le gel du tout premier centimètre de sol.

## 4 Conclusion et perspectives du projet

Ce projet de recherche a permis de développer un nouveau prototype de sonde coaxiale et une méthodologie de prise de mesures de la permittivité électrique micro-onde en bande L de la végétation et du sol sur le terrain. Avoir un seul instrument capable de mesurer à la fois la permittivité in situ de la végétation et du sol est un outil très utile pour calibrer et valider les modèles de transfert radiatif micro-onde. La sonde développée présente une incertitude inférieure à 3,3% pour une large plage de permittivités, ce qui est excellent et valide la signification des mesures. Les résultats montrent que la sonde coaxiale OECP est un instrument approprié pour suivre la permittivité micro-onde du tronc des arbres. Deux régions du tronc aux caractéristiques diélectriques distinctes ont été identifiées, 1) l'aubier où la permittivité est élevée en raison de la forte teneur en eau, mais diminue avec la profondeur, et 2) le duramen où la permittivité est faible et constante. Le cycle saisonnier de l'état de gel/dégel de la végétation fut également observé, car il est fortement corrélé avec la permittivité de l'arbre. Les résultats indiquent que l'état de gel/dégel de la végétation est sensible aux courts épisodes de dégel hivernal et que les différences de permittivité interespèces sont importantes. La sonde coaxiale s'est également avérée suffisamment précise pour capturer le cycle diurne de teneur en eau des arbres.

L'utilisation de la sonde sur un sol organique en chambre froide a permis de mettre en évidence un effet d'hystérésis important entre le cycle de gel et le cycle de dégel. Ce phénomène n'est actuellement pas pris en compte dans les algorithmes des produits satellitaires micro-onde. L'utilisation d'un double seuil en température de gel/dégel pourrait permettre de mieux reproduire les mesures en laboratoire.

Tout comme les sondes d'humidité fonctionnant à basse fréquence, la sonde OECP pourrait être utilisée pour mesurer la teneur en eau de divers milieux en développant une équation de calibration entre permittivité et teneur en eau. Bien qu'encore plus onéreuse que les sondes à plus basse fréquence, le plus petit volume sondé de la sonde OECP permet de cibler certaines zones trop minces pour être bien représentées par les mesures à basse fréquence. La teneur en eau du sol, des arbres et de la neige pourrait ainsi être mesurée avec une sonde OECP. La méthodologie développée dans ce mémoire pourrait également être utilisée à des fréquences plus élevées. La plage de fréquence de la sonde OECP dépend de sa géométrie, en modifiant les dimensions de la sonde, il devrait être possible de produire une série de sondes fonctionnant à diverses fréquences. Le développement de sondes dans des fréquences autour de 10 GHz permettrait d'être davantage sensible à la teneur en eau liquide des milieux étant donné que la permittivité imaginaire de l'eau à ces fréquences est plus importante.

## 5 Financement

Ce travail a été financé par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), l'Agence Spatiale Canadienne (projet SMAP) et le Programme de collaboration France-Québec.

## 6 Bibliographie complémentaire à l'article

- Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP) (2017) Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Report of the Arctic Monitoring and Assessment Program, Oslo, Norway, 269 pages.
- Bircher, S., Kerr, Y., Wigneron, J.-P. (2015) SMOSHiLat - Microwave L-band emissions from organic-rich soils in the northern cold climate zone and their impact on the SMOS soil moisture product. European Space Agency report, STSE – Changing Earth Science Network – Call 2012, 76 pages.
- Bircher, S., Balling, J., Skou, N., Kerr, Y. (2012) Validation of SMOS brightness temperatures during the HOBE airborne campaign, western Denmark. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 50, *no*°5, p. 1468-1482.
- Chan, S., Hunt, R., Bindlish, R., Njoku, E., Kimball, J., Jackson, T. (2013) Ancillary Data Report for Vegetation Water Content - SMAP Project Document # D-53061. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena California, United-States, 15 pages.
- Chen, J. M., Govind, A., Sonnentag, O.(2006) Leaf area index measurements at Fluxnet-Canada forest sites. Agricultural and Forest Meteorology, vol. 140, p. 257-268.
- Colliander, A., Jackson, T., Bindlish, R., Chan, S., Das, N., Kim, S., Cosh, M., Dunbar, R., Dang, L., Pashaian, L., Asanuma, J., Aida, K., Berg, A., Rowlandson, T., Yueh, S. (2017) Validation of SMAP surface soil moisture products with core validation sites. Remote Sensing of Environment, vol. 191, p. 215-231.
- Dobson, M., Ulaby, F., Hallikainen, M., El-Rayes, M. (1985) Microwave dielectric behavior of wet soil - Part II : Dielectric mixing models. Geoscientific Model Development, vol. GE-23, p. 35-46.
- Entekhabi, D., Njoku, E., O'Neill, P., Kellogg, K., Crow, W., Edelstein, W., Entin, J., Goodman, S., Jackson, T., Jackson, J., Kimball, J., Piepmeier, J., Koster, R., Martin, N., McDonald, K., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J., Spencer, M., Thurman, S., Tsang, L., Van Zyl, J. (2010) The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission. Proceedings of the IEEE, vol. 98, *no*°5, p. 704-716.
- Fernandez-Moran, R., Al-Yaari, A., Mialon, A., Mahmoodi, A., Al Bitar, A., De Lan-

- noy, G., Rodriguez-Fernandez, M., Lopez-Baeza, E., Kerr, Y., Wigneron, J.-P. (2017) SMOS-IC : An Alternative SMOS Soil Moisture and Vegetation Optical Depth Product. *Remote Sensing*, vol. 9, *no*<sup>o</sup>5, article number 457.
- Granier, A. (1987) Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, vol. 3, *no*<sup>o</sup>4, p. 309-320.
- Grant, J., Saleh-Contell, K., Wigneron, J.-P., Guglielmetti, M., Kerr, Y., Scwank, M., Skou, N., Van de Griend, A. (2008) Calibration of the L-MEB Model Over a Coniferous and a Deciduous Forest. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 46, *no*<sup>o</sup>3, p. 808-818.
- Grant, J., Van de Griend, A., Scwank, M., Wigneron, J.-P. (2009) Observations and Modeling of a Pine Forest Floor at L-Band. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 47, *no*<sup>o</sup>7, p. 2024-2034.
- Hollinger, D., Goltz, S., Davidson, E., Lee, J., Tu, K., Valentine, H. (1999) Seasonal patterns and environmental control of carbon dioxide and water vapor exchange in an ecotonal boreal forest. *Global Change Biology*, vol. 5, *no*<sup>o</sup>8, p. 891-902.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, États-Unis, 1535 pages.
- Kim, Y., Kimball, K., Zhang, K., McDonald, K. (2012) Satellite detection of increasing northern hemisphere non-frozen seasons from 1979 to 2008 : implications for regional vegetation growth. *Remote Sensing of Environment*, vol. 121, p. 472-487.
- Langer, M., Westermann, S., Muster, S., Piel, K., Boike, J. (2011) The surface energy balance of a polygonal tundra site in northern Siberia part 2 : winter. *The Cryosphere*, vol. 5, p. 509-524.
- Le Vine, D. et Abraham, S. (2000) Faraday rotation and passive microwave remote sensing of soil moisture from space. *Microwave radiometry and remote sensing of the earth's surface and atmosphere*, CRC press, Zheist, Netherlands, 552 pages (p. 89-96).
- McMahon, S., Parker, G., Miller, D. (2010) Evidence for a recent increase in forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, *no*<sup>o</sup>8, p. 3611-3615.

- Mialon, A., Richaume, P., Leroux, D., Bircher, S., Bitar, A., Pellarin, T., Wigneron, J.-P., Kerr, Y. (2015) Comparison of Dobson and Mironov Dielectric Models in the SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 53, *no*<sup>o</sup>6, p. 3084-3094.
- Mironov, V., Kosolapova, L., Fomin, S. (2009) Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 47, *no*<sup>o</sup>7, p. 2059-2070.
- Mironov, V., Savin, I. (2010) Temperature-Dependable Microwave Dielectric Model for an Arctic Soil. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 48, *no*<sup>o</sup>6, p. 585-589.
- Mironov, V., Kosolapova, L., Lukina, Y., Karavayskya, A., Molostovb, I. (2017) Temperature- and texture-dependent dielectric model for frozen and thawed mineral soils at a frequency of 1.4 GHz. *Remote Sensing of Environment*, vol. 200, p. 240-249.
- O'Neill, O., Chan, S., Njoku, E., Jackson, T., Bindlish, R. (2015) Soil Moisture Active Passive (SMAP) - Algorithm Theoretical Basis Document - Level 2 & 3 Soil Moisture (Passive) Data Products. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena California, United-States, 80 pages.
- Owe, M., Van de Griend, A. (1998) Comparison of soil moisture penetration depths for several bare soils at two microwave frequencies and implications for remote sensing. *Water resources research*, vol. 34, *no*<sup>o</sup>9, p. 2319-2327.
- Penuelas, J., Rutishauser, T., Filella, I. (2009) Phenology feedbacks on climate change. *Science*, vol. 324, *no*<sup>o</sup>5929, p. 887-888.
- Pulliainen, J., Grandell, J., Hallikainen, M. (1999) HUT Snow Emission Model and its Applicability to Snow Water Equivalent Retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, *no*<sup>o</sup>3, p. 1378-1390.
- Ren, J., Vanapalli, S., Han, Z. (2017) Soil freezing process and different expressions for the soil-freezing characteristic curve. *Sciences in cold and arid regions*, vol. 9, *no*<sup>o</sup>3, p. 221-228.
- Royer, A., Roy, A., Montpetit, B., St-Jean-Rondeau, O., Picard, G., Picard, G., Langlois,



- A. (2017) Comparison of commonly-used microwave radiative transfer models for snow remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, vol. 190, p. 247-259.
- Rowlandson, T., Berg, A., Roy, A., Kim, E., Pardo Lara, R., Powers, J., Lewis, K., Houser, P., McDonald, K., Toose, P., Wu, A., De Marco, E., Derksen, C., Entin, J., Collander, A., Xu, X., Mavrovic, A. (2018) Capturing Agricultural Soil Freeze/Thaw State through Remote Sensing and Ground Observations : A Soil Freeze/Thaw Validation Campaign. *Remote Sensing of Environment*, Submitted.
- Smith, S., Brown, J. (2009) Permafrost - Permafrost and seasonally frozen ground - Assessment of the status of the development of standards for the terrestrial essential climate variables. Global Terrestrial Observing System, Rome, Italie, 22 pages.
- SMOS (2017) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the SMOS Level 2 Soil Moisture Processor Development Continuation Project. Array Systems Computing Inc., Toronto, Ontario, Canada, 148 pages.
- Schwank, M., Mätzler, C., Wiesmann, A., Wegmüller, U., Pilliainen, J., Lemmetyinen, J., Rautiainen, K., Derksen, C., Toose, P., Drusch, M. (2015) Snow Density and Ground Permittivity Retrieved from L-Band Radiometry : A Synthetic Analysis. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, vol. 8, *no*<sup>o</sup>8, p. 3833-3845.
- Toose, P., Roy, A., Solheim, F., Derksen, C., Watts, T., Royer, A., Walker, A. (2017) Radio frequency interference mitigating hyperspectral L-band radiometer. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, vol. 6, *no*<sup>o</sup>1, p. 39-51.
- Zhang, L., Shi, J., Zhang, Z., Zhao, K. (2003) The estimation of dielectric constant of frozen soil-water mixture at microwave bands. *Proceedings of IGARSS*, 21–25 July 2003, Toulouse, France, vol. 4, p. 2903–2905.
- Zhang, L., Zhao, T., Jiang, L., Zhao, S. (2010) Estimate of phase transition water content in freeze–thaw process using microwave radiometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, *no*<sup>o</sup>12, p. 4248-4255.
- Zheng, X., Li, X., Jin, M., Jiang, T., Zhao, K. (2017) Characteristics of L-band transmissivity and effective scattering albedo of boreal forests : a case study in northeast China. *Remote Sensing Letters*, vol. 8, *no*<sup>o</sup>12, p. 1200-1209.

## 7 Annexe A - Guide d'utilisation de la sonde coaxiale

### 7.1 Introduction et montage

Ce document est un guide d'utilisation de la sonde coaxiale à terminaison ouverte OECP (Open-Ended Coaxial Probe) développée par Alex Mavrovic, Alexandre Roy et Bilal Filali. Les principes sous-jacents à la sonde OECP ne sont pas abordés ici, référez-vous à l'article scientifique publié sur celle-ci (Mavrovic *et al.*, 2018, soumis à la revue scientifique Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems).

Un réflectomètre est requis pour communiquer avec la sonde coaxiale (figure 19). Le réflectomètre permet de mesurer les coefficients de réflexion captés par la sonde coaxiale à l'interface sonde/milieu sondé (figure 20). La permittivité du milieu sondé est obtenue via une calibration par standards. Deux calibrations doivent être effectuées au début de chaque séance de mesures, celle du réflectomètre puis celle de la sonde coaxiale. Suite à ces calibrations, la prise de mesure peut débuter. Le traitement de la calibration de la sonde coaxiale et des données peut être effectué sur le terrain ou ultérieurement.

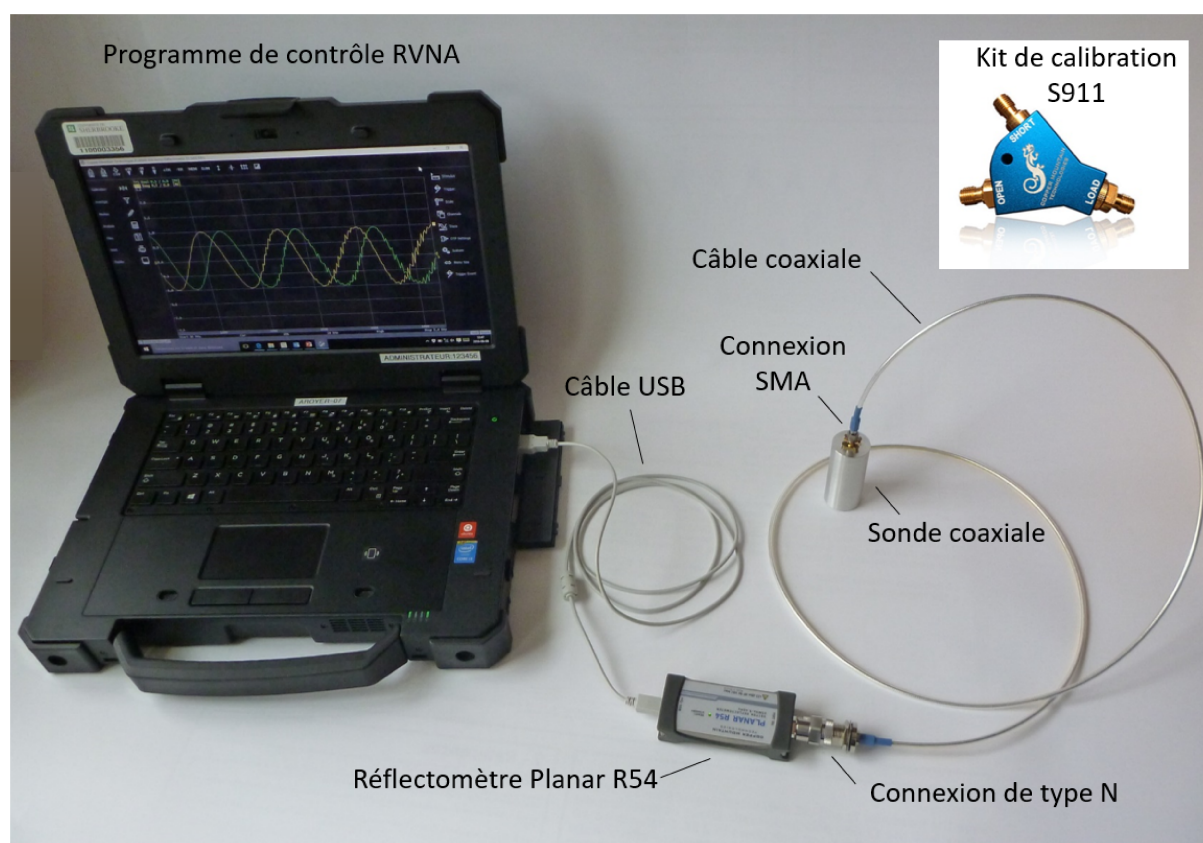


FIGURE 19 – Montage permettant de communiquer avec la sonde coaxiale à terminaison ouverte via un réflectomètre. Le programme de contrôle *RVNA* est détaillé à la figure 21.

Le réflectomètre utilisé est un *Planar R54* de *Copper Mountain Technologies*. Le logiciel de contrôle *RVNA* du réflectomètre est fourni avec celui-ci (figure 21). Le câble

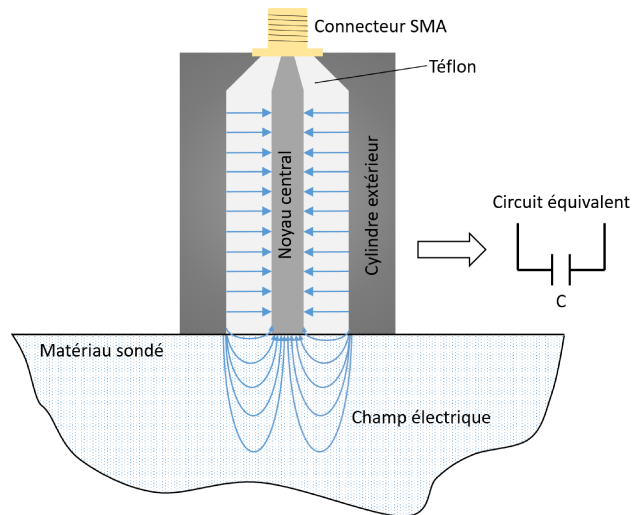


FIGURE 20 – Schéma du champ électrique généré par la sonde coaxiale à terminaison ouverte.

coaxial permettant de relier la sonde et le réflectomètre est un câble *SMA Male to N Female Bulkhead Precision Cable 60 Inch Length Using 150 Series Coax, RoHS* de *Pasternack Enterprises*. Ce câble peut être remplacé par un adaptateur SMA/N. Pour ne pas endommager les connecteurs de type N et SMA, référez-vous à la section 7.7.

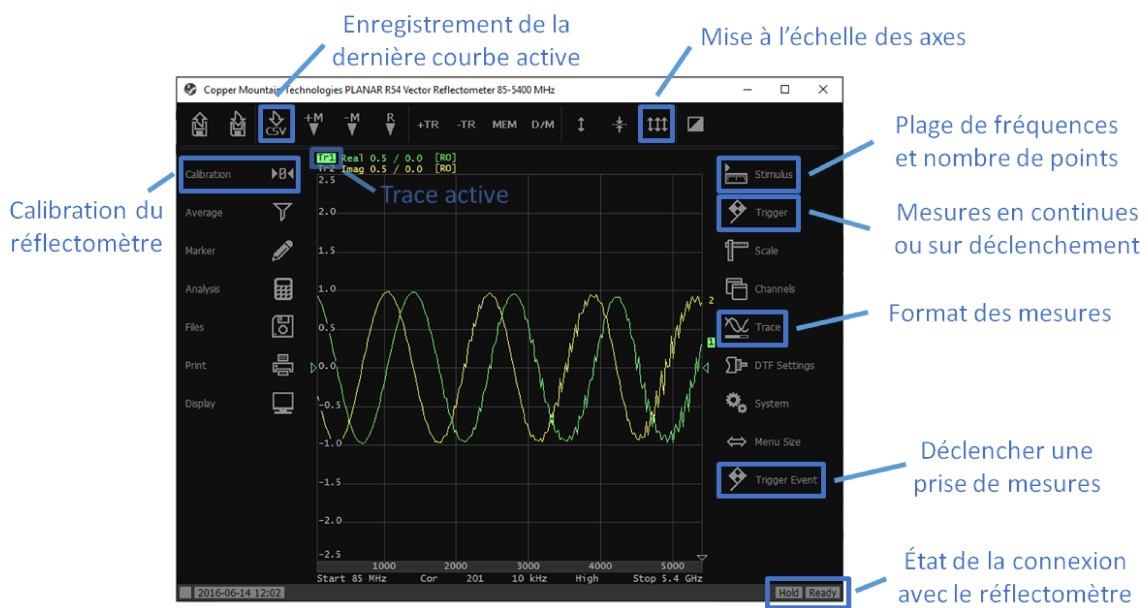


FIGURE 21 – Panneau de contrôle du logiciel *RVNA* pour le réflectomètre *Planar R54* de *Copper Mountain Technologies*. Les principales fonctions utiles pour contrôler la sonde coaxiale sont encadrées en bleu.

## 7.2 Calibration du réflectomètre

La calibration du réflectomètre jusqu'au plan de prise de mesure (dans ce cas-ci, le branchement de la sonde) est une étape cruciale afin de limiter le bruit et obtenir des mesures reproductibles. Le programme de contrôle *RVNA* du réflectomètre possède des options de calibrations permettant d'effectuer la calibration rapidement, directement à partir du logiciel. La calibration doit être effectuée à chaque fois que le montage est mis en place. La position du câble coaxial influence la calibration puisque celle-ci modifie légèrement la longueur du câble en le tordant. Cet effet est très faible sur l'atténuation du signal de retour, mais notable sur la phase du signal. Pour limiter cet effet indésirable, le câble devrait être placé dans la même position pour la calibration que pour la prise de mesure. Dans le cas où le câble coaxial est substitué par un adaptateur SMA/N, la position de ce dernier n'est pas aussi critique.

La calibration effectuée avec le programme *RVNA* n'est applicable que pour la plage de fréquence et le nombre de points pour lesquels elle est effectuée. Si l'un de ces deux paramètres est modifié, une nouvelle calibration sera requise. La plage de fréquence suggérée est de 500 MHz à 2.5 GHz pour bien couvrir la bande L. Il est peu utile d'aller plus haut ou plus bas en fréquence, d'autant plus que la sonde perd rapidement de la précision au-delà de cette limite. Le nombre de points voulus pour un balayage est plus flexible. Un grand nombre de points permet d'obtenir plus de détails sur la courbe. On peut ainsi mieux évaluer les fluctuations et le bruit, mais l'augmentation de ce paramètre se paye en temps de calcul lors de l'exécution du programme de calibration et de traitement des mesures. Lorsque le nombre de points est limité à environ 201, le traitement des données peut être effectué en quelques secondes sur le terrain avec une précision suffisante sur les résultats.

La calibration au plan de mesure est effectuée avec l'ensemble de calibration *S911* de *Copper Mountain Technologies* comprenant trois standards avec connecteur SMA : un circuit ouvert (open), un court-circuit (short) et une résistance connue (load). En mesurant successivement chacun de ces standards à l'aide de l'option de calibration du programme *RVNA*, il est possible d'effectuer une calibration fiable au plan de mesure.

### Procédure

- 1) Ouvrir le programme de contrôle *RVNA* du réflectomètre vectoriel *Planar R54* et brancher le réflectomètre au port USB

- 2) Brancher le connecteur N du câble coaxial (ou de l'adaptateur SMA/N) au réflectomètre<sup>3</sup>
- 3) Établir la plage de fréquence et le nombre de points par balayage sur le programme de contrôle (option **Stimulus** dans le menu de droite)
- 4) S'assurer que la *Trace* active soit sous format *Smith Chart* (option **Trace** dans le menu de droite)
- 5) Placer le programme de contrôle en mode calibration de la circuiterie. La sonde coaxiale ne devrait pas encore être branchée à cette étape. Sélectionner le kit de calibration *S911* sous option **Calibration** du menu de gauche
- 6) Brancher le connecteur SMA du câble coaxial (ou de l'adaptateur SMA/N) à l'entrée *SHORT* du kit de calibration *S911* puis appuyer sur le bouton *SHORT* du mode de calibration du programme de contrôle
- 7) Répéter l'étape précédente pour l'entrée *OPEN* du kit de calibration *S911*
- 8) Répéter l'étape précédente pour l'entrée *LOAD* du kit de calibration *S911*
- 9) Appliquer la calibration en appuyant sur le bouton *Apply* du mode de calibration du programme de contrôle
- 10) Voilà! La circuiterie du réflectomètre est maintenant calibrée, vous pouvez brancher le connecteur SMA du câble coaxial (ou de l'adaptateur SMA/N) à la sonde coaxiale<sup>4</sup>

### 7.3 Calibration de la sonde coaxiale

La calibration de la sonde coaxiale permet d'obtenir des valeurs de permittivités électriques à partir de mesures de coefficients de réflexion. Cette calibration se base sur trois (ou plus) standards connus. Ces standards sont une mesure d'un circuit ouvert, un circuit fermé et une solution saline de permittivité électrique connue. Nous suggérons des concentrations de 10 ppt, 15 ppt, 20 ppt, 25 ppt et 30 ppt pour les solutions salines.

---

3. Suivre les instructions de la section 7.7 lors du branchement des connecteurs SMA ou de type N.

4. Il est à noter que toutes ces étapes de calibration peuvent être omises en important une calibration antérieure si et seulement si l'utilisateur a de bonnes raisons d'être confiant que la calibration importée est toujours valide.

Il est suggéré d'effectuer cette calibration à chaque fois que la sonde coaxiale est déployée. Cette calibration peut être omise si l'utilisateur est confiant que l'une de ses calibrations antérieures est toujours valide. Il est également suggéré de placer la sonde coaxiale approximativement dans sa position de prise de mesure pour la calibration. Dans le cas où le câble coaxial est substitué par un adaptateur SMA/N, la position de ce dernier n'est pas aussi critique.

ATTENTION ! S'assurer que la *Trace* active soit sous format *Smith Chart* (option **Trace** dans le menu de droite). Si ce n'est pas le cas, il sera impossible de traiter cette calibration.

### Procédure

- 1) Placer la sonde dans l'air de façon à ce qu'aucun milieu solide ou liquide ne soit à proximité de la terminaison ouverte
- 2) Enregistrer une mesure de l'air sous le nom de OPEN.csv (option **CSV** dans le menu du haut)
- 3) Placer la sonde sur une plaque de métal lisse (ou tout bon conducteur) de façon à effectuer un court-circuit entre le noyau du câble coaxial et le cylindre externe
- 4) Appliquer une pression suffisante sur la sonde pour que la mesure soit stable
- 5) Enregistrer une mesure de la plaque conductrice sous le nom de SHORT.csv
- 6) Placer la sonde dans une solution saline de concentration connue jusqu'au tiers de sa hauteur<sup>5</sup>
- 7) Enregistrer une mesure de la solution saline (ex : 15ppt.csv)
- 8) Répéter les étapes 6 et 7 pour chaque solution saline disponible en s'assurant de bien essuyer la sonde coaxiale entre chaque mesure
- 9) Noter la température des solutions salines

Le programme *Sonde\_Coax\_Alex\_cal\_moy\_planar.m* permet de traiter les données de calibration pour obtenir les paramètres de calibration  $S_{ii}$  ( $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  et  $S_{22}$ ). Un schéma du traitement des données lors de la calibration est présenté à la figure 25. Les seuls pa-

---

5. Assurez-vous que le volume de solution saline entourant la sonde est suffisant pour que le récipient n'interfère pas avec la mesure. Quelques centimètres de dégagement devraient suffire.

paramètres d'entrées nécessaires sont soulignés. Les paramètres de calibration peuvent être obtenus à partir d'une seule solution saline. Si plus d'une solution saline a été utilisée, le programme effectue une moyenne sur les calibrations obtenues à partir de chacune des solutions salines. Les paramètres de calibration ne sont applicables que pour la plage de fréquence et le nombre de points pour lesquels ils ont été effectués. Si l'un de ces deux paramètres est modifié, une nouvelle calibration sera requise. Il est donc important de déterminer la plage de fréquence sondée lors des mesures sur le terrain ainsi que le nombre de points désirés sur cette plage avant d'effectuer la calibration. La calibration de la sonde coaxiale peut être effectuée directement sur le terrain ou ultérieurement.

## 7.4 Prise de mesure

ATTENTION! S'assurer que la *Trace* active soit sous format *Smith Chart* (option **Trace** dans le menu de droite). Si ce n'est pas le cas, il sera impossible de traiter ces mesures.

### Procédure

- 1) Poser la sonde coaxiale bien à plat sur la surface du milieu sondé (figure 22)
- 2) Appliquer une pression suffisante sur la sonde pour que la mesure soit stable et qu'aucun interstice d'air ne se trouve entre la sonde coaxiale et le milieu sondé
- 3) Lancer une mesure (option **Trigger** dans le menu de droite)
- 4) Enregistrer la mesure (option **CSV** dans le menu du haut)
- 5) Appliquer le programme *Sonde\_Coax\_Alex\_field.m* sur les données obtenues (coefficients de réflexion) pour obtenir la permittivité électrique mesurée. L'option *'last'* du programme permet de traiter la dernière mesure collectée. Ce traitement peut être fait sur le traitement ou ultérieurement avec le programme *Post\_traitement\_Sonde\_coax.m* puis *List\_LBand\_permittivity.m*

Il est à noter que des mesures en continu peuvent également être effectuées en utilisant le programme *VNA.m*. En lançant le programme, sélectionner *R54* comme instrument, *S11* comme paramètre à mesurer et *Smith chart format (R+jX)* comme format de données. Pour les mesures en continues sur les arbres, une sangle a été fabriquée par Patrick Cliche pour maintenir la sonde en place.



FIGURE 22 – Prise de mesure sur tronc d'arbre avec la sonde coaxiale à terminaison ouverte.

## 7.5 Préparation de la surface de contact pour mesure sur tronc d'arbre

Dans le cas de mesures sur les troncs d'arbre, une préparation de la surface de contact est requise. Avant chaque mesure, la procédure suivante devrait être suivie.

### Procédure

- 1) Si nécessaire, percez l'arbre avec une mèche forstner conventionnelle juste assez creux pour guider la mèche forstner sans pointe centrale (voir figure 23a), sinon passer directement à l'étape 2
- 2) Percer l'arbre avec une mèche forstner sans pointe centrale jusqu'à la profondeur souhaitée pour la mesure (voir figure 23b)
- 3) Polir la surface au fond de la cavité à l'aide d'une meule cylindrique à bout plat jusqu'à l'obtention d'une surface lisse. Porter une attention particulière à bien faire disparaître la protubérance centrale laissée par la mèche forstner sans pointe centrale (voir figure 23c)
- 4) Mesurer la profondeur de la cavité



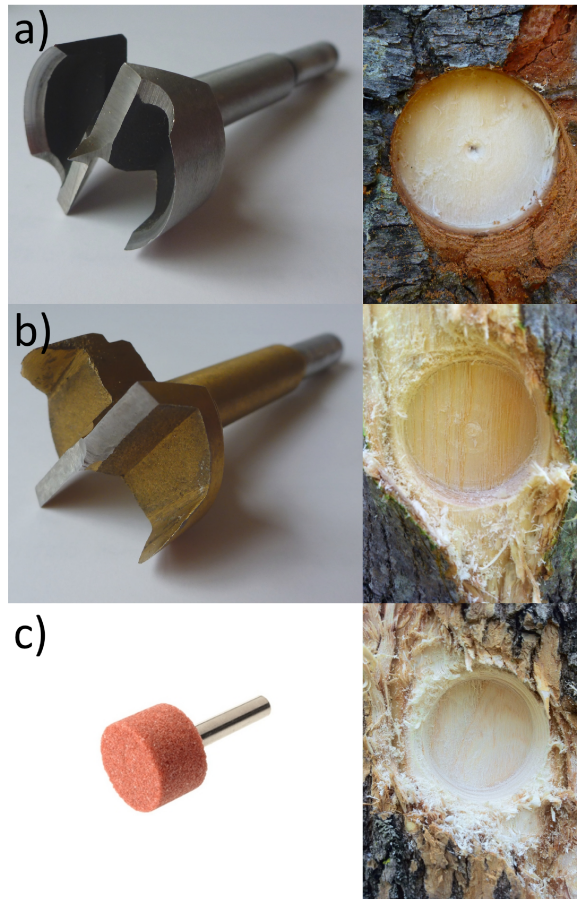


FIGURE 23 – a) Mèche forstner conventionnelle de 35 mm de diamètre avec pointe de 5 mm. b) Mèche forstner de 35 mm sans pointe. Cette mèche a été usinée à partir d’une mèche conventionnelle avec pointe à l’atelier du département de génie mécanique de l’Université de Sherbrooke. c) Meule cylindrique à bout plat de 1” de diamètre. Chaque outil est accompagné du résultat escompté lors de son utilisation.

## 7.6 Liste du matériel nécessaire

- Sonde coaxiale
- Câble coaxial
- Adaptateur SMA/N
- Réflectomètre
- Câble USB du réflectomètre
- Kit de calibration *S911*
- Ordinateur de terrain avec le programme *RVNA* installé
- Clé dynamométrique de type N et SMA (2 clés)
- Plaque de métal lisse (ou tout bon conducteur)
- Solutions salines de concentration bien connue
- Thermomètre
- Tissu ou papier pour essuyer la sonde

## Si mesure sur tronc d'arbre

- Perceuse électrique (plus efficace à deux)
- Mèche forstner conventionnelle<sup>6</sup>
- Mèche forstner sans pointe centrale
- Mèche en forme de meule cylindrique à bout plat
- Vernier

## 7.7 Comment manipuler les connecteurs de type N et SMA

Les connecteurs de câbles coaxiaux comme les SMA et les types N sont très fragiles. Le connecteur mâle est particulièrement à risque d'être endommagé puisque la pointe est peu résistante à la flexion et s'endommage rapidement à la friction. Afin de protéger les connecteurs, s'assurant ainsi de la qualité des mesures et de la durabilité des appareils, il est important de les manipuler avec soin. On retrouve un connecteur SMA standard à la figure 24. Lors de la connexion, il est très important que les composantes en bleu soient complètement stationnaires (qu'elles ne tournent pas). Après avoir délicatement joint les connecteurs, il suffit de les viser ensemble en faisant tourner l'anneau en orange. Un connecteur trop serré risque d'écraser le connecteur femelle, alors qu'un connecteur trop peu serré risque de torde le connecteur mâle en plus de l'effriter. Pour s'assurer que le contact entre les connecteurs soit convenable, il suffit de serrer l'anneau en orange à l'aide d'une clé dynamométrique<sup>7</sup> jusqu'à ce que celle-ci produise un déclic. En l'absence d'une clé dynamométrique, la connexion devrait être suffisamment serrée pour l'empêcher de bouger, mais sans plus. Pour séparer les connecteurs, les mêmes consignes s'appliquent.

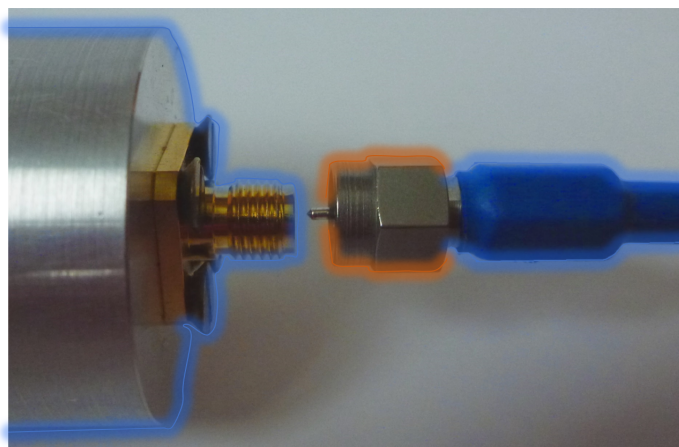


FIGURE 24 – Connecteurs SMA mâle et femelle. Les composantes en orange doivent rester stationnaires en tout temps lors de la connexion. Seulement la composante orange peut tourner. Les connecteurs de type N fonctionnent exactement de la même façon.

6. Choisir une mèche forstner avec la plus petite pointe centrale possible.

7. Les clés dynamométriques permettent de générer un couple de serrage prédéterminé.

## 7.8 Schéma de fonctionnement des codes MATLAB

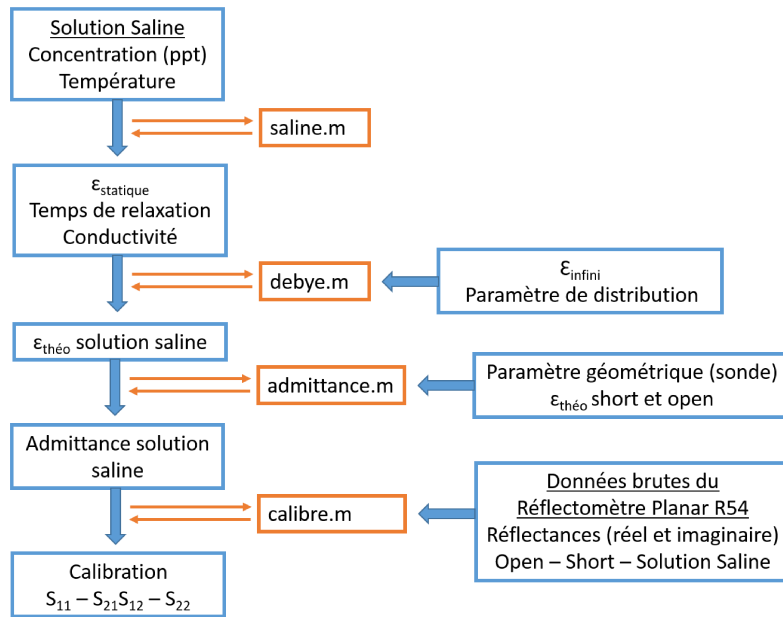


FIGURE 25 – Schéma du traitement des données par le programme *Sonde\_Coax\_Alex\_cal\_moy\_planar.m* pour la calibration de la sonde coaxiale. Requièrre une version de MATLAB postérieure à R2007b et la toolbox *Symbolic Math Toolbox* pour l'utilisation de la fonction *syms* dans *calibre.m*. Les paramètres de calibration peuvent être obtenus à partir d'une seule solution saline, si plus d'une solution saline a été utilisée, le programme effectue une moyenne sur les calibrations obtenues à partir de chacune des solutions salines. Crédit pour le programme : Bilal Filali et Alex Mavrovic.

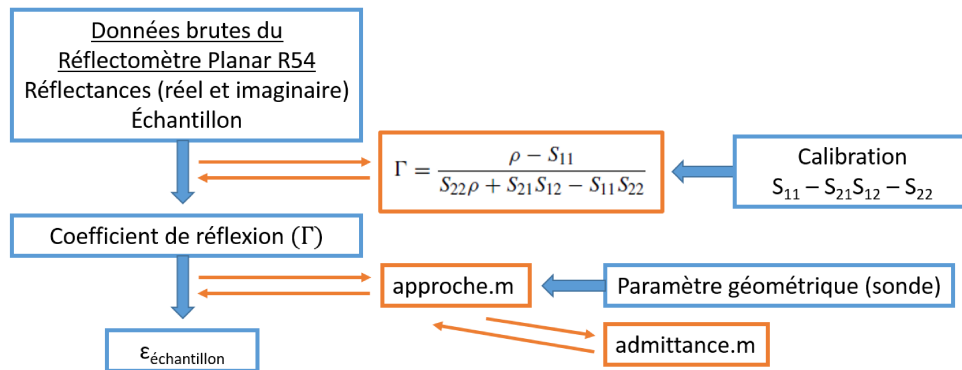


FIGURE 26 – Schéma du traitement des données par le programme *Sonde\_Coax\_Alex\_field.m* pour obtenir la permittivité électrique mesurée par la sonde coaxiale à partir des données brutes prises avec le réflectomètre. Crédit pour le programme : Bilal Filali et Alex Mavrovic.