

WP3 - Finalisation du capteur d'humidité des sols avec la technologie radar

Développement instrumental et évolution vers une plateforme drone	1
Calibration du système radar et intégration drone–antenne.....	2
Validation scientifique et démonstration sur une parcelle de référence.....	2
Évolution vers les versions 1.0.0 et 1.1.0.....	4
Évaluation du potentiel économique de la cartographie radar et de l'irrigation à dose variable	5
Interprétation des résultats	5
Deux leviers majeurs : économie d'eau et productivité	6
Conditions de mise en œuvre et limites	6
Approche pragmatique basée sur la capacité au champ.....	6
Conclusion	7
Intérêt pour l'agriculture de précision en Wallonie	7
Vers une irrigation réellement intelligente	8

Personne de contact :

Sébastien Lambot ; sebastien.lambot@uclouvain.be

Introduction

Dans le cadre du projet DuraTechFarm, l'UCLouvain a contribué aux travaux de recherche relatifs à la cartographie spatiale de l'humidité des sols, notamment au travers des travaux de thèse et de post-doctorat de Dr. Kaijun Wu. Le capteur radar utilisé, commercialisé sous le nom gprSense®, a été développé par Sensar Consulting (Sébastien Lambot), en interaction étroite avec les besoins scientifiques et agronomiques identifiés dans le projet. Cette dynamique conjointe entre développement instrumental et validation scientifique a permis d'adapter progressivement le radar aux contraintes spécifiques de l'agriculture de précision, tout en assurant un haut niveau de rigueur méthodologique.

Développement instrumental et évolution vers une plateforme drone

Au démarrage du projet, les premières campagnes ont été réalisées avec un prototype précoce de gprSense®, équipé d'une antenne log-périodique ultra-large bande de grande dimension, montée à l'avant d'un quad (Gator du CRA-W). Cette configuration, fonctionnelle mais relativement encombrante, a permis les premières validations en conditions réelles sur les parcelles du partenaire agricole du projet, Mr. Jadin.

En 2022, l'acquisition par l'UCLouvain d'un drone Tundra (Hexadrone), combinée à une nouvelle génération du radar équipée d'une antenne dipôle opérant dans la gamme 110–120 MHz et intégrée dans un boîtier allégé imprimé en 3D, a marqué une étape déterminante. Cette évolution a permis :

- Une réduction significative de l'encombrement et du poids ($\approx 2,4$ kg pour le système complet),
- Une intégration sur plateforme aérienne sans perturbation du sol ni des cultures,
- Une automatisation complète des vols et du traitement des données.

Le drone opère typiquement à une vitesse de 10–12 km/h, avec des lignes de vol espacées d'environ 6 m (par exemple) et une cadence d'acquisition d'environ 7–8 Hz, correspondant à une mesure tous les 0,5 à 1 m le long des transects. Avec une autonomie de 30 à 35 minutes par batterie, plusieurs hectares peuvent être couverts par vol, générant plusieurs milliers de points de mesure par campagne. Cette capacité opérationnelle constitue un atout majeur pour la cartographie intra-parcellaire à haute résolution.

La Figure 1 illustre la configuration drone du système gprSense®, utilisée pour les campagnes réalisées dans le cadre du projet. Le drone vole à environ 2 m au-dessus du sol.



Figure 1. Système radar gprSense® monté sur drone pour la cartographie de l'humidité de la zone racinaire dans le cadre du projet DuraTechFarm. Le radar, opérant dans la gamme 110–120 MHz, est intégré sous un drone Tundra (Hexadrone) et permet des acquisitions automatisées sans contact avec le sol ni perturbation des cultures. Photographie : Sébastien Lambot.

Calibration du système radar et intégration drone–antenne

Le traitement des données repose sur l'équation radar en champ lointain développée par Lambot *et al.* (2004), permettant une modélisation complète des interactions électromagnétiques entre l'antenne et le milieu. Dans cette approche, l'ensemble radar–drone est calibré comme un système unique, afin de prendre en compte les interactions électromagnétiques liées à la plateforme.

La calibration est réalisée au-dessus d'un plan d'eau profond (lac de Grand-Leez dans le cadre du projet), à différentes hauteurs et conditions thermiques, afin d'estimer les fonctions de transfert du système. Les expérimentations menées dans le cadre du projet ont mis en évidence une sensibilité de la calibration aux variations de température du radar. En conséquence, un modèle de calibration dépendant de la température a été intégré dans les versions ultérieures du logiciel gprSense®, rendant la calibration indépendante des conditions extérieures. En pratique, le radar ne doit être calibré qu'une seule fois, sauf modification matérielle majeure.

L'inversion est effectuée dans le domaine temporel à partir de mesures fréquentielles discrètes, en se focalisant sur la réflexion de surface. La permittivité relative du sol est estimée par inversion du signal complet, puis convertie en teneur en eau volumique à l'aide d'un modèle pétrophysique (équation de Topp). Cette approche, validée antérieurement en conditions contrôlées et en champ, est implémentée de manière entièrement automatisée dans le logiciel gprSense®.

Validation scientifique et démonstration sur une parcelle de référence

Parmi les différentes parcelles cartographiées dans le cadre de DuraTechFarm, une parcelle de 5,72 ha située en région limoneuse a fait l'objet d'un suivi temporel approfondi. Huit campagnes drone ont été réalisées au cours de la saison culturale (épinards), permettant d'établir une série temporelle de cartes d'humidité du sol dans la zone racinaire ($\approx 0\text{--}35/40$ cm). Ces travaux ont donné lieu à une publication dans *Remote Sensing of Environment* (Wu et al., 2026), démontrant la cartographie temporelle automatisée de l'humidité de la zone racinaire par radar drone-borne avec inversion complète en temps réel.

Les résultats mettent en évidence :

- Une profondeur effective de caractérisation d'environ 35-40 cm, déterminée expérimentalement par bilan hydrique ;
- Une forte corrélation avec les mesures TDR à 30 cm ($r \approx 0,77$), cohérente avec la profondeur de sensibilité du radar ;
- Une cohérence spatiale marquée avec la topographie (talweg naturellement plus humide) ;
- Une correspondance élevée ($r \approx 0,78$) entre la carte d'humidité du 15 septembre et les apports d'eau mesurés par pluviomètres et irrigation.

La Figure 2 illustre de manière particulièrement démonstrative la capacité du radar à distinguer les bandes irriguées (« a » et « b ») de la bande non irriguée (« c »), ainsi que la zone du talweg. Le recouvrement partiel des bandes d'irrigation se traduit par des teneurs en eau plus élevées, en parfaite cohérence avec les volumes appliqués. La dérive due au vent est aussi observable.

Ces résultats confirment que le radar fournit une mesure intégrée et spatialement continue de l'humidité de la zone racinaire, à une échelle pertinente pour la gestion intra-parcellaire de l'irrigation.

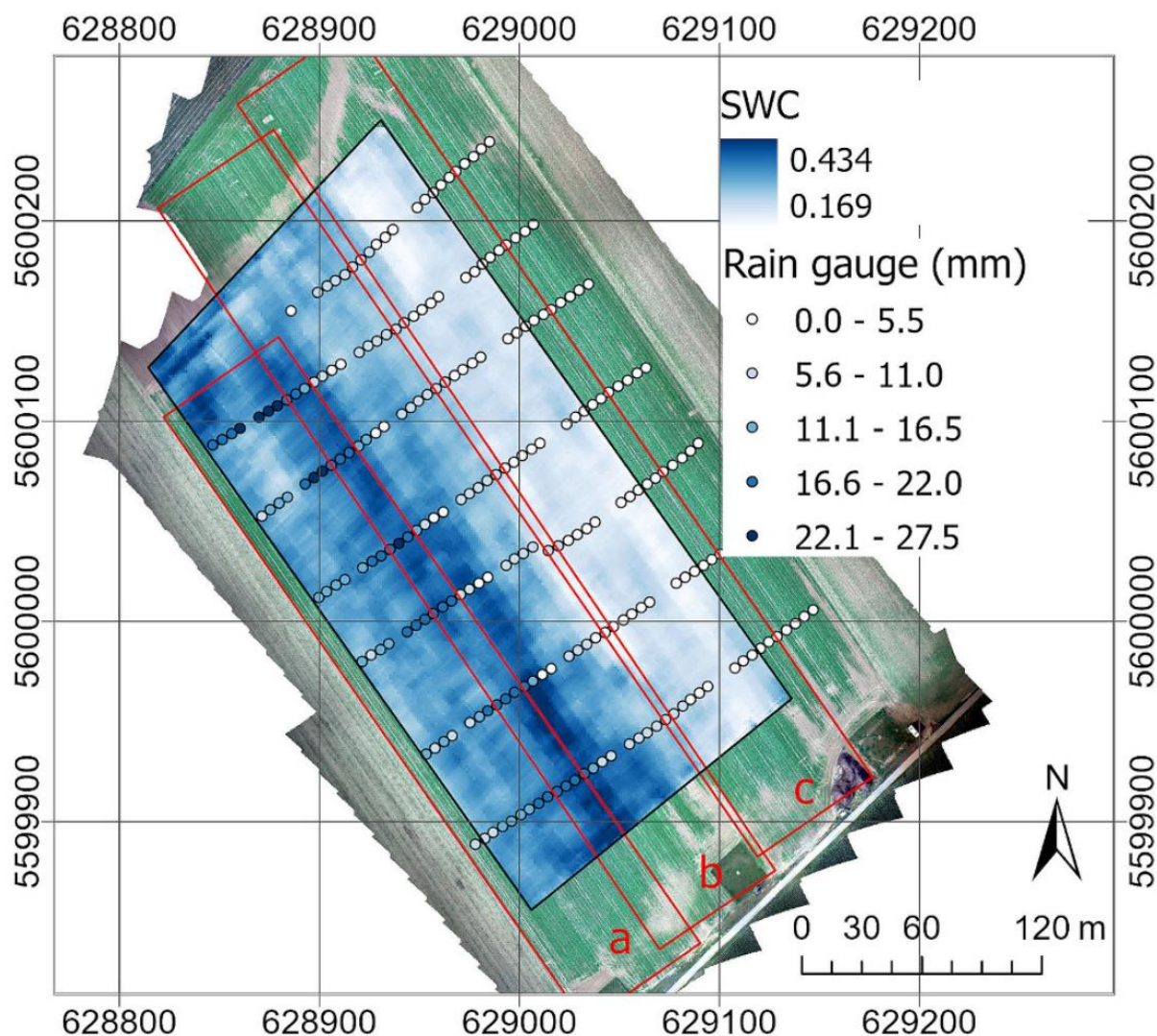


Figure 2. Carte de teneur en eau volumique du sol (zone racinaire, ~0–35/40 cm) mesurée avec gprSense® monté sur un drone le 15 septembre 2023, superposée aux volumes de pluie et d'irrigation collectés les 14 et 15 septembre. Les rectangles « a », « b » et « c » correspondent aux bandes d'irrigation enregistrées par le système Raindancer : les bandes « a » et « b » avaient été irriguées avant la mesure radar, contrairement à la bande « c ». Les teneurs en eau plus élevées observées dans les zones irriguées et dans la zone du talweg (bande au nord-ouest de la parcelle) illustrent la capacité du radar à détecter les variations spatiales d'humidité en cohérence avec les apports d'eau et la topographie.

Évolution vers les versions 1.0.0 et 1.1.0

Les versions utilisées durant DuraTechFarm étaient des prototypes avancés. Les développements réalisés dans le cadre du projet ont néanmoins contribué à l'atteinte des versions matérielles et logicielles 1.0.0 puis 1.1.0 de gprSense®, intégrant notamment :

- Une calibration automatisée avec correction thermique ;
- Des outils de krigeage avec choix de résolution spatiale ;

- Des fonctions de clustering spatial ;
- La génération de cartes d'irrigation basées sur la capacité au champ, considérée homogène ou cartographiée après drainage.

Ces avancées traduisent la maturation progressive du système vers un outil opérationnel dédié à l'agriculture de précision, tout en conservant un socle scientifique fondé sur une modélisation électromagnétique complète.

Références

Lambot, S., Slob, E. C., van den Bosch, I., Stockbroeckx, B., & Vanclooster, M. (2004). Modeling of ground-penetrating radar for accurate characterization of subsurface electric properties. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11), 2555–2568.

Wu, K., Artois, J., Tourneur, D., Mareschal, M., Henrion, M., Pathirana, S., Galagedara, L., Limbourg, Q., & Lambot, S. (2026). Automated drone-borne GPR mapping of root-zone soil moisture for precision irrigation. *Remote Sensing of Environment*, 333, 115110. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115110> (publication DuraTechFarm).

Évaluation du potentiel économique de la cartographie radar et de l'irrigation à dose variable

Dans le cadre du projet DuraTechFarm, une analyse quantitative a été réalisée afin d'évaluer le potentiel du géoradar gprSense® pour l'optimisation de l'irrigation à l'échelle intraparcellaire. L'objectif était de comparer différentes stratégies d'irrigation basées sur des cartes d'humidité du sol à haute résolution (4 m), à résolution dégradée (8 m et 16 m) et sur une approche homogène classique, reposant sur une humidité moyenne de la parcelle. Les cartes de référence ont été obtenues par interpolation (krigeage) des mesures radar, avec une résolution spatiale de 4 m. Les résolutions plus grossières ont ensuite été simulées par agrégation statistique, en considérant deux hypothèses :

- $n = 0$, correspondant à une irrigation basée sur l'humidité moyenne de la zone ;
- $n = 2$, correspondant à une irrigation plus conservatrice (moyenne – 2 écarts-types), visant à limiter au maximum les zones sous-irriguées.

Une teneur en eau cible de $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ a été fixée, pour une profondeur représentative de la zone racinaire (0,4 m).

Interprétation des résultats

Les résultats montrent que :

- Lorsque $n = 0$, l'irrigation homogène conduit à une situation où environ 50 % de la parcelle reste sous la teneur cible (« zone assoiffée »), quelle que soit la parcelle considérée. Dans ce cas, aucune économie d'eau significative n'est observée avec les cartes à haute résolution. Cette configuration illustre les limites d'une approche basée uniquement sur la moyenne : elle ne permet ni d'optimiser la ressource en eau, ni de garantir l'absence de stress hydrique localisé.

- Lorsque $n = 2$, l'approche homogène conduit à une irrigation plus abondante afin d'éviter toute zone déficitaire. Dans ce cas, les cartes à haute résolution permettent de réduire significativement les volumes apportés tout en maintenant une proportion très faible de zones sous-irriguées. Selon les parcelles analysées (7 à 12 ha), des économies d'eau supérieures à 10 %, et pouvant dépasser 40 % selon les hypothèses, ont été obtenues par rapport à l'irrigation homogène.

Ces résultats confirment que plus la résolution spatiale de la carte est fine, plus la capacité d'optimisation est élevée, en particulier lorsque la variabilité intraparcellaire est structurée (présence de zones plus sèches ou plus humides spatialement corrélées).

Deux leviers majeurs : économie d'eau et productivité

L'intérêt du géoradar ne se limite pas à l'économie d'eau. Deux bénéfices complémentaires doivent être soulignés :

1. Réduction des volumes irrigués lorsque l'irrigation homogène est volontairement surdimensionnée pour éviter le stress hydrique.
2. Optimisation de la productivité, en limitant simultanément le stress hydrique (sous-irrigation) et les excès d'eau, ces derniers pouvant pénaliser le développement racinaire, favoriser certaines maladies et réduire l'efficacité d'utilisation des nutriments.

Dans des contextes où la ressource en eau est contrainte, situation rencontrée sur certaines parcelles partenaires du projet, la capacité à allouer précisément l'eau disponible devient un facteur déterminant pour maintenir les rendements.

Conditions de mise en œuvre et limites

Il convient toutefois de rester prudent quant à l'extrapolation directe de ces résultats. Les économies estimées reposent sur des hypothèses de calcul simplifiées et sur des simulations d'irrigation idéalisées. En pratique, le bénéfice réel dépend :

- de la capacité du système d'irrigation à moduler la dose d'eau longitudinalement et latéralement ;
- de la structure spatiale de l'humidité du sol (degré de corrélation et présence de zones homogènes ou contrastées) ;
- de la qualité de l'estimation de l'humidité moyenne de la parcelle, qui reste difficile à connaître précisément en l'absence de cartographie complète.

En situation réelle, sans cartographie radar, seuls quelques capteurs ponctuels sont généralement disponibles, ce qui ne permet pas de caractériser la distribution complète de l'humidité.

Approche pragmatique basée sur la capacité au champ

Un atout important de gprSense® réside dans la possibilité d'intégrer la capacité au champ comme référence opérationnelle. Celle-ci peut être mesurée au printemps après épisodes pluvieux (carte de la capacité au champ), puis utilisée pour définir une cible d'irrigation exprimée en pourcentage de cette capacité (par exemple 90 % ou 100 % de la capacité au champ). Cette approche, physiquement cohérente et pragmatique, permet de déterminer directement les volumes à apporter sans recourir à

des modèles agronomiques complexes et incertains. Les outils intégrés de krigeage, de clustering et de génération de cartes d'irrigation facilitent en outre l'analyse de la structure spatiale de la variabilité et l'élaboration de recommandations adaptées à la résolution réellement exploitable par le matériel d'irrigation.

Les résultats obtenus dans le cadre du projet démontrent que gprSense® constitue un outil opérationnel innovant permettant la cartographie à haute résolution de l'humidité du sol dans la zone racinaire, avec une couverture spatiale rapide et non destructive. Cette capacité représente une avancée majeure par rapport aux approches ponctuelles traditionnelles (sondes TDR, capacitives), qui ne permettent qu'une caractérisation locale et souvent insuffisante de l'hétérogénéité hydrique intra-parcellaire. Grâce à l'utilisation d'un radar à pénétration de sol basse fréquence ($\approx 110\text{--}130$ MHz) et d'un algorithme d'inversion électromagnétique en ondes complètes, gprSense® permet d'estimer la permittivité effective du sol sur une profondeur d'environ 30–40 cm, correspondant précisément à la zone racinaire active pour de nombreuses cultures. Cette information est ensuite convertie en teneur en eau volumique, fournissant une cartographie continue de l'état hydrique du sol.

Conclusion

L'originalité du système repose sur trois piliers complémentaires :

1. Une mesure physique robuste et intégrée spatialement, sensible à l'ensemble du volume racinaire et non à un point isolé ;
2. Un logiciel avancé mais ergonomique, permettant à la fois une exploitation scientifique (paramétrage avancé, inversion, analyse spatiale, krigeage, clustering) et une utilisation simplifiée pour les agriculteurs ou conseillers techniques ;
3. Une compatibilité avec différentes plateformes mobiles (drone, quad, tracteur, robot d'irrigation), facilitant l'intégration dans des systèmes agricoles existants.

Les cartes produites révèlent clairement les hétérogénéités intra-parcellaires liées à la texture, à la topographie (talwegs, zones de ruissellement), ou à la distribution des apports d'eau (chevauchement des canons d'irrigation, dérive due au vent). Cette information permet d'identifier les zones sur-irriguées et sous-irriguées, ouvrant la voie à une gestion différenciée de l'eau.

Intérêt pour l'agriculture de précision en Wallonie

Dans un contexte de changement climatique marqué par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de sécheresse, la gestion raisonnée de l'eau devient un enjeu stratégique pour la Région wallonne. L'optimisation spatiale de l'irrigation permet :

- Une réduction des volumes d'eau utilisés,
- Une amélioration de l'efficacité hydrique,
- Une limitation du lessivage des nutriments,
- Et une stabilisation ou augmentation des rendements.

Les résultats du projet montrent que l'utilisation de cartes d'humidité racinaire permet de raisonner les apports non plus à l'échelle de la parcelle entière, mais à l'échelle intra-parcellaire, en tenant compte des gradients hydriques naturels. Cette approche est pleinement alignée avec les principes de l'agriculture de précision et de la transition agroécologique.

Pour la Wallonie, le développement et l'industrialisation d'une technologie telle que gprSense® présentent un double intérêt :

1. Un intérêt agricole et environnemental, en contribuant à la résilience des exploitations face au stress hydrique ;

2. Un intérêt économique et stratégique, en positionnant la Région comme acteur innovant dans le domaine des technologies agro-environnementales avancées.

La maîtrise locale d'une technologie radar appliquée à l'agriculture représente également un atout en matière de souveraineté technologique et d'innovation exportable. Le produit développé combine instrumentation de pointe, traitement avancé du signal et cartographie géospatiale, constituant une chaîne technologique complète développée en Région wallonne.

Au-delà des résultats scientifiques du projet, la maturité de gprSense® est confirmée par la vente de deux systèmes HF pour des applications de déminage, témoignant de son niveau d'aboutissement technologique.

Vers une irrigation réellement intelligente

Au-delà de la simple cartographie, l'intégration des données gprSense® dans des outils d'aide à la décision ouvre la voie à des systèmes d'irrigation intelligents. En combinant :

- cartes d'humidité actuelles,
- estimation de la capacité au champ,
- prévisions météorologiques,
- et contraintes culturales,

Il devient possible de générer des cartes de prescription d'irrigation adaptées spatialement et temporellement.

Ainsi, l'irrigation n'est plus pilotée uniquement sur base d'un calendrier ou d'une moyenne parcellaire, mais sur base de l'état hydrique réel de la zone racinaire. Cette approche permet de passer d'une irrigation uniforme à une irrigation optimisée dans l'espace, maximisant l'efficacité de chaque apport.