

Série de webinaires

IA EN PHYTOPROTECTION APPROCHES PRÉDICTIVES ET OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION EN GRANDES CULTURES

Bienvenue

Photo - IRDA

Photo : Gabriel Verret, CEROM



Photo : IRDA

Caractérisation du sol et de la végétation par télédétection pour alimenter des modèles en phytoprotection

Ramata Magagi

Université de Sherbrooke
Département de Géomatique appliquée

Contributeurs: *Elahe Jahan Nejadi, Bhanu Prakash Mookkuthala Erkaramana*

Webinaire innovations en IA et phytoprotection – 09 mars 2026



Ramata Magagi, Professeure

Département de géomatique appliquée



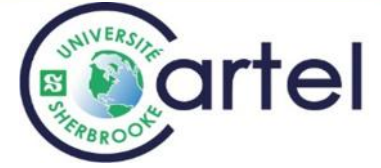
- **Expertises:**

Télédétection micro-onde (active et passive) et optique, mise en place de campagne de terrain, validation de données spatiales.

- **Intérêts de recherche:**

- Modélisation (Physique, semi-empirique et, empirique)
- Développement d'algorithmes d'estimation des caractéristiques de surface
 - Humidité du sol en milieu agricole et forestiers
 - Caractéristique du couvert végétal
 - Phénologie des cultures
- Méthodes de désagrégation

Département de géomatique appliquée



- 12 professeurs
- 100+ étudiants aux 3 cycles
<https://www.usherbrooke.ca/geomatique/>
- Trois axes:
 - Physique de la télédétection
 - Traitement de la donnée
 - Applications thématiques
- Thématiques:
 - Agriculture de précision
 - Milieux nordiques
 - Foresterie
 - Biodiversité
 - Cartographie



Partie 1

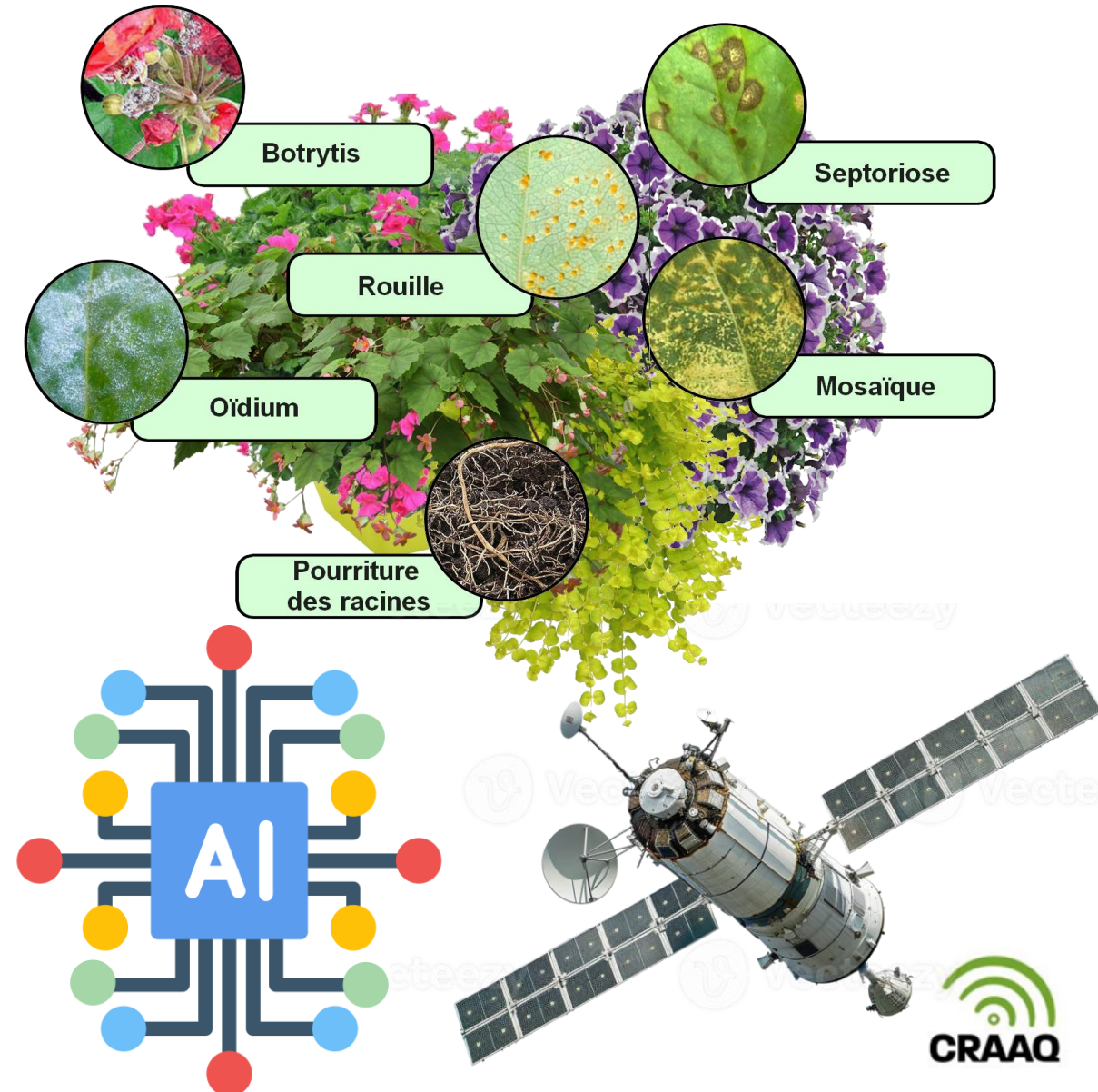
Mise en contexte

Introduction

- Les maladies des cultures:
 - Responsables d'une perte annuelle globale d'environ **220 milliards de dollars US**
 - Menacent directement la productivité et la sécurité alimentaire.

➔ Le développement de **systèmes de détection précoce et précis** est devenu une priorité économique et scientifique urgente, notamment grâce aux **images satellites** combinées ou non à des approches d'intelligence artificielle.

➔ **Suivi des facteurs environnementaux** influençant l'émergence et l'abondance des **ennemis des cultures**.



Ennemis des cultures

- Diverses catégories d'ennemis de culture : maladies, mauvaises herbes, vers, insectes

Catégories d'ennemis de cultures

Maladie - Sclérotiniose du soya



Mauvaises herbes - Chénopode blanc



Vers - Vers fil-de-fer (VFF)



Insectes



Conditions d'apparition/Facteurs déterminants

Conditions humides, sol frais ($< 25^{\circ}\text{C}$), stade de floraison, pluies abondantes et bien distribuées

Température du sol ($T_{5\text{ cm}}$), texture du sol, etc.

Type de sol (sol organique), température, humidité du sol, précipitation, phénologie, etc.

Conditions humides, température $> 15^{\circ}\text{C}$, phénologie, etc.

Mise en contexte

↓ Dépistage repose sur :

- Informations météorologiques
- Un travail de terrain intensif et coûteux

↓ Problème réside dans:

- La détection précoce des maladies ou des ravageurs des plantes.
(En général, ce n'est que lorsque les dégâts sont importants que les ennemis des cultures peuvent être détectés.)

↓ Difficile de déterminer:

- La cause exacte du stress à partir des modèles et données de télédétection (réflectance, coefficient de rétrodiffusion, etc.)

→ Combinaison de:

- Capteurs au sol
- Drones
- Satellites
- Modèles



→ Prédire les conditions favorables à l'apparition des ennemis des cultures à partir d'indices spectraux, et de données optique, thermique et radar.

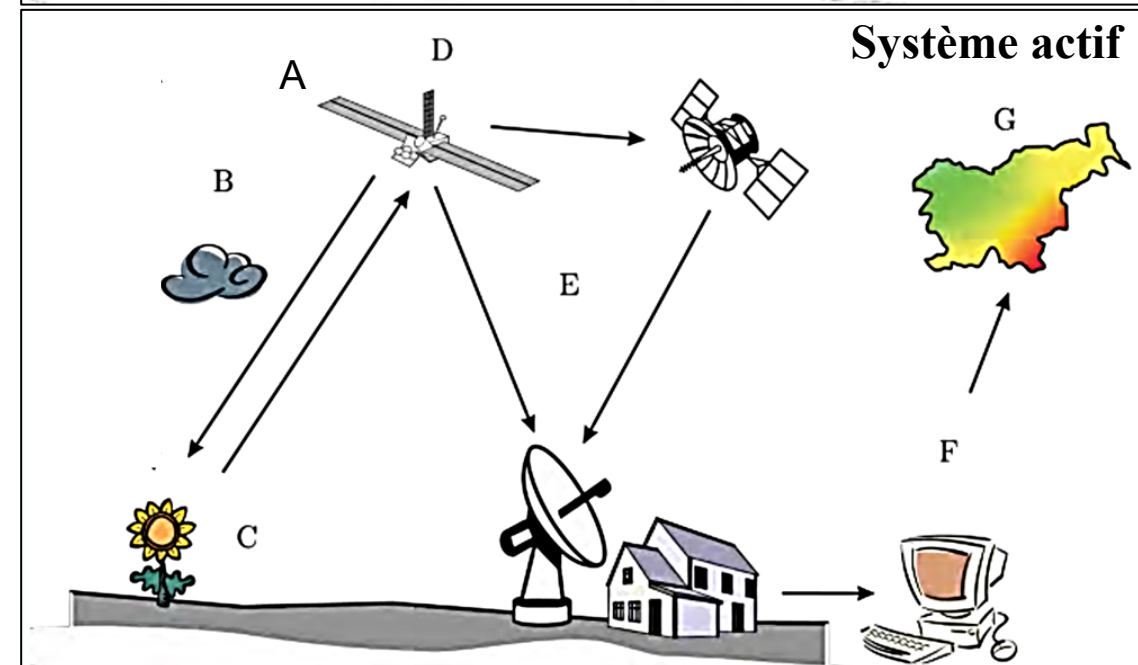
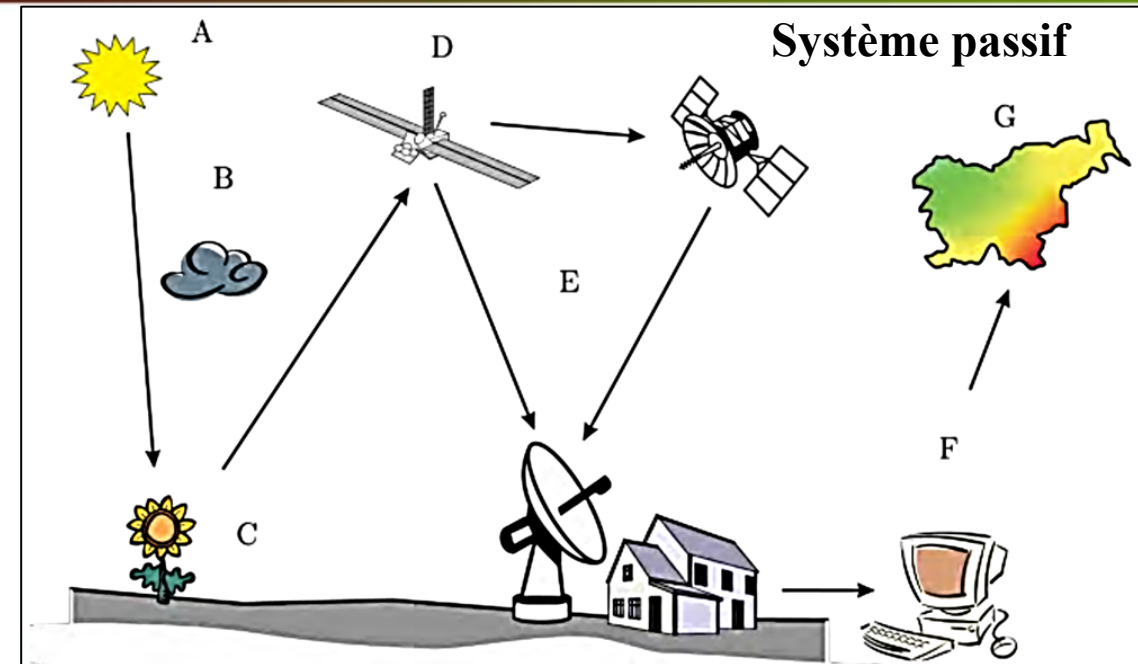
Télédétection

- La télédétection permet d'acquérir à distance, l'information d'une cible à partir du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi.

- (A) Source d'énergie ou d'illumination
(B) Interaction avec l'atmosphère
(C) Interaction avec la cible
(D) Enregistrement du signal par le capteur
(E) Station de réception au sol où l'information est transmise puis traitée
(F) Interprétation et analyse
(G) Applications

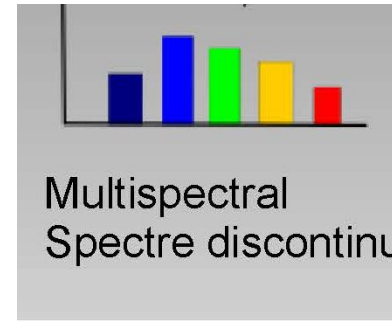
➡ Les ondes électromagnétiques réfléchies ou émises sont détectées et enregistrées. Celles-ci sont traitées, analysées puis utilisées dans différentes applications.

Mise en contexte

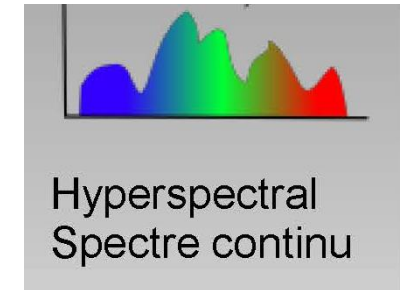


Caractéristiques spectrales des plateformes de télédétection

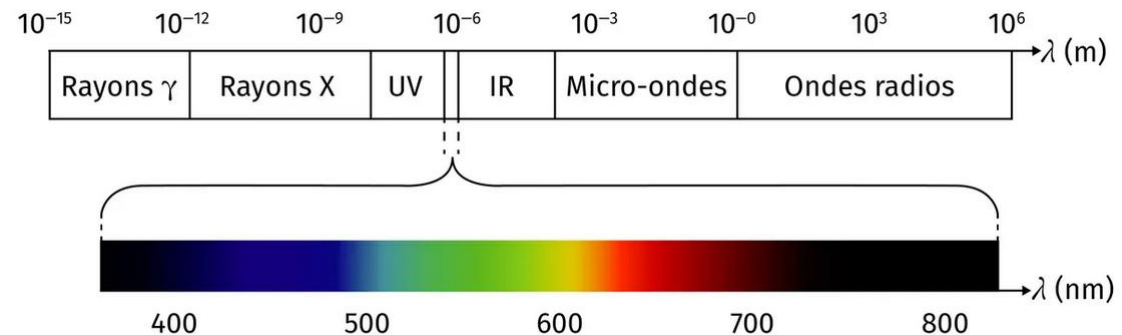
- **Optiques** (0.38 à 3 μm)
 - Multispectraux (Landsat, Sentinel-2)
 - Hautes résolutions (Pleiades, etc.)
 - Hyperspectaux (PRISMA, EnMAP)
- **Infra rouge thermique** (3 à 15 μm)
 - Série Landsat
 - Terra
- **Radar** (mm au 1 m)
 - Fréquences L, S, C, X
 - Angles d'incidence
 - Polarisation
 - Capteur multifréquence NISAR (L,S)

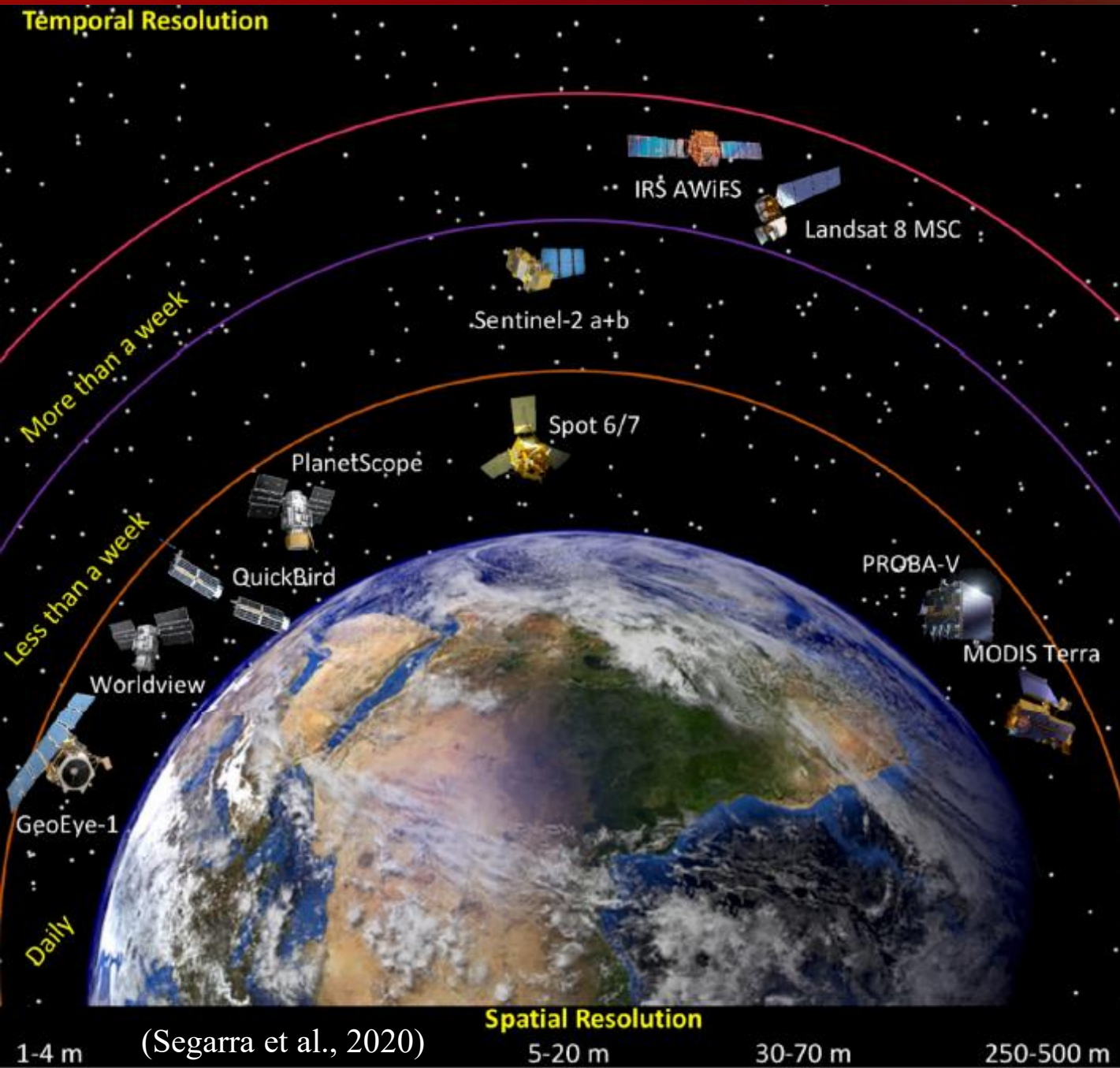


État de santé **général**
Capacité de détection
précoce **MODÉRÉE**



Changement **subtil**
Capacité de détection
précoce **ÉLEVÉE**





Caractéristiques spatiales et temporelles des plateformes satellitaires

Constellations de satellites (Sentinel-2, RapidEye, Pléiades, Setinel-1, RCM, *etc.*)

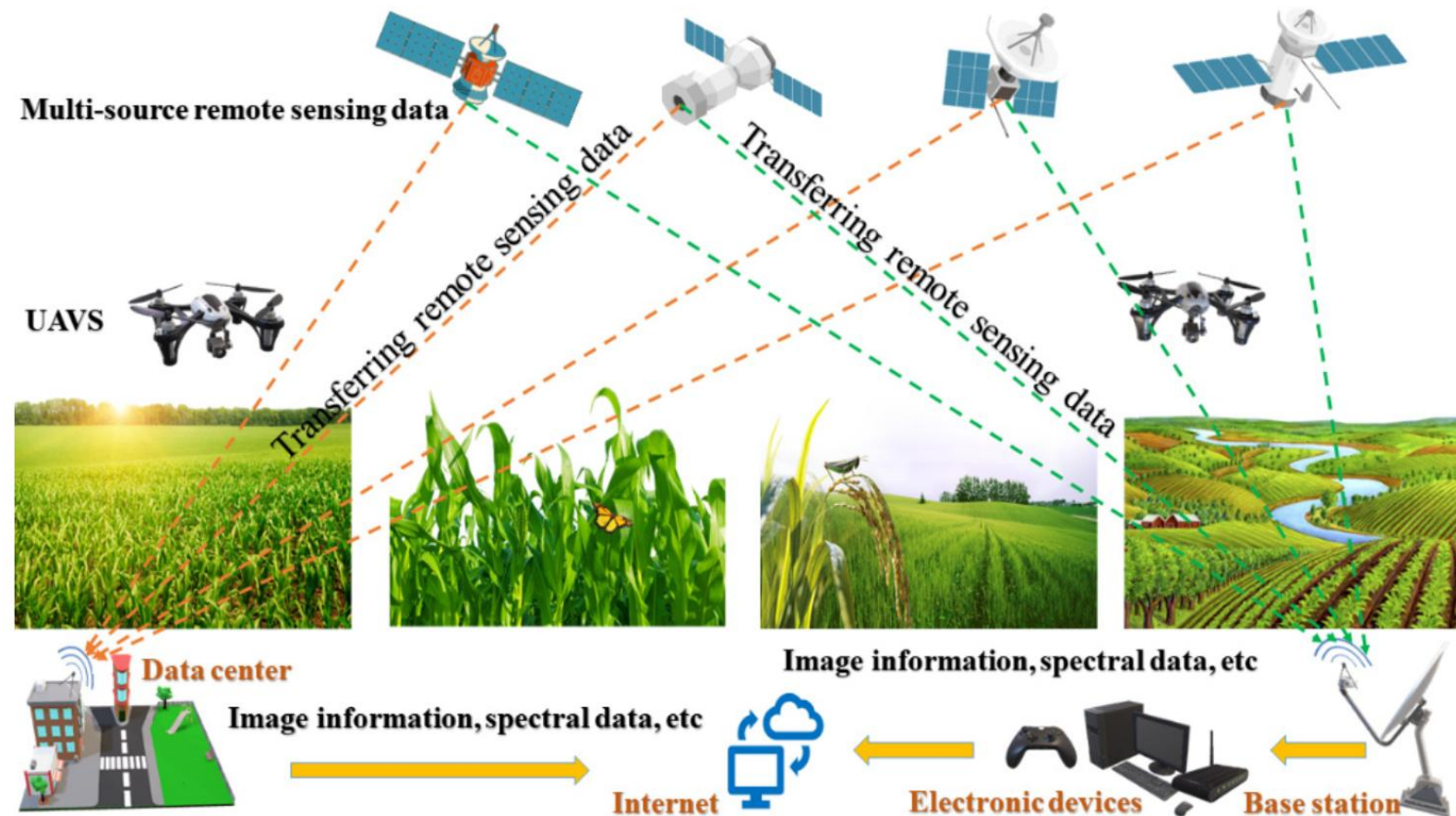


Meilleure résolution temporelle, particulièrement pertinente pour la surveillance et la gestion des cultures.

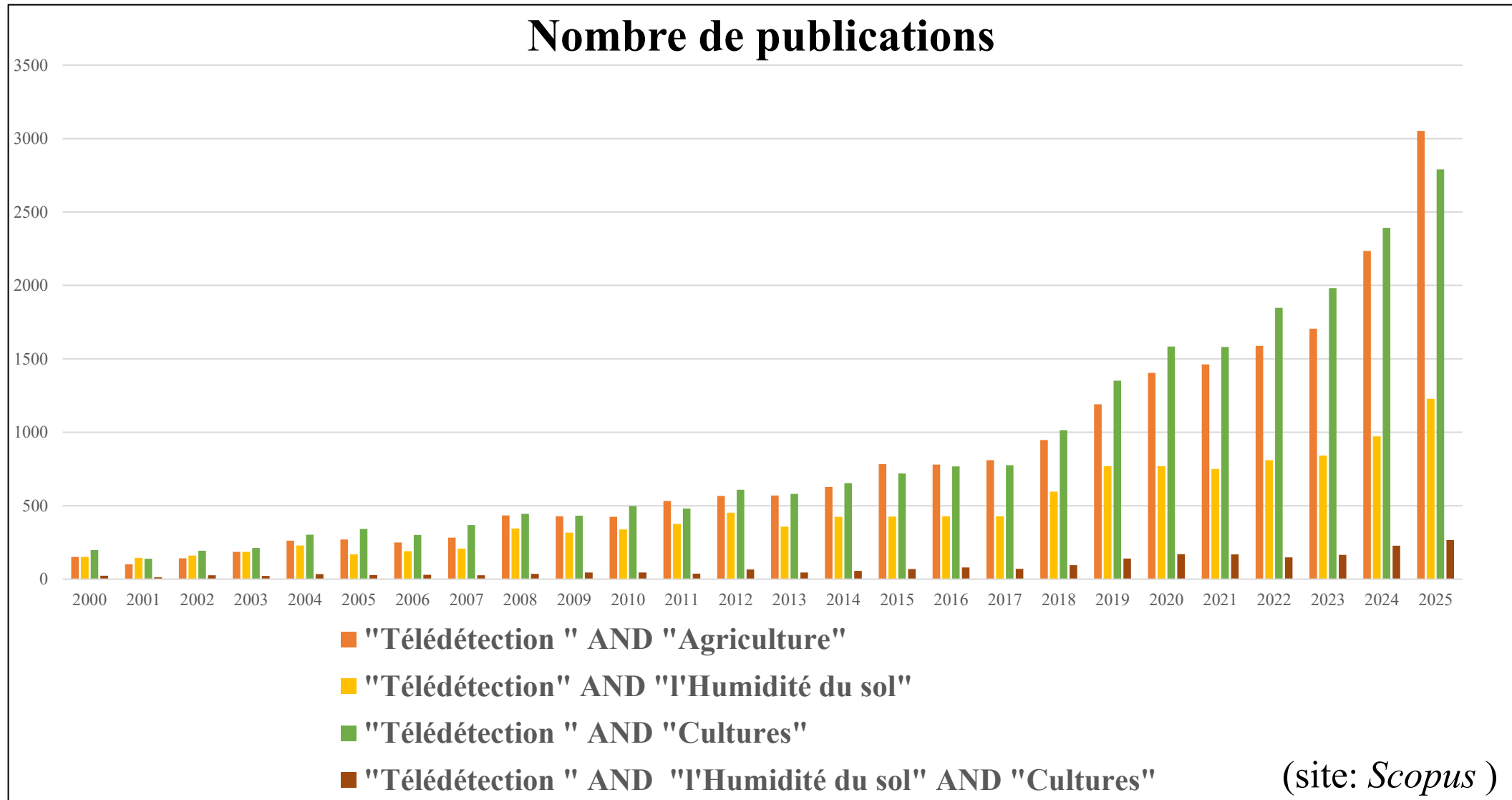
Mise en contexte

Télédétection et phytoprotection: Les questions principales

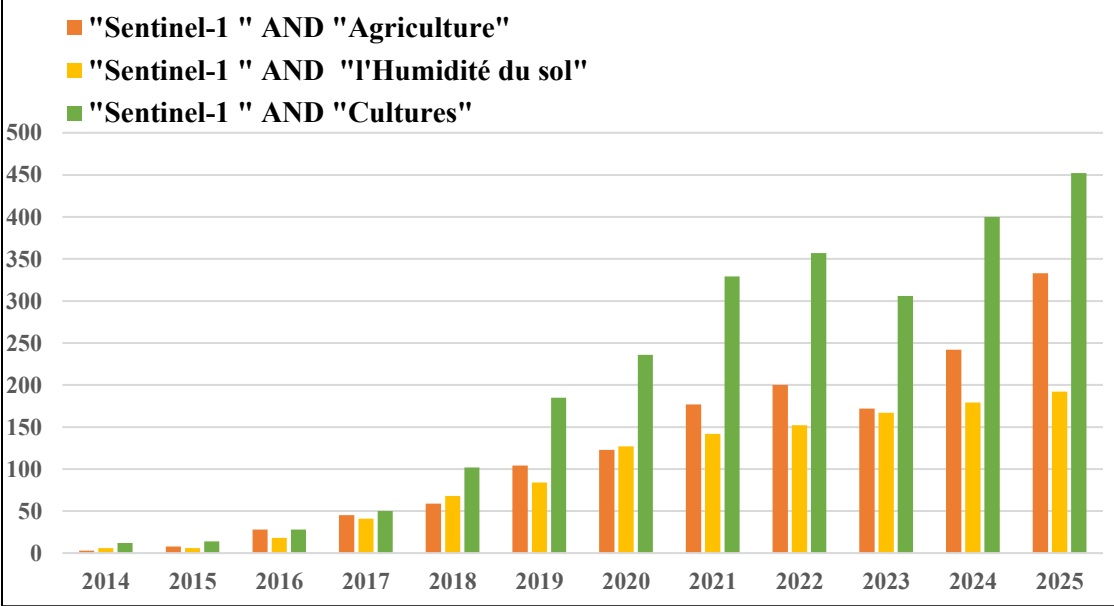
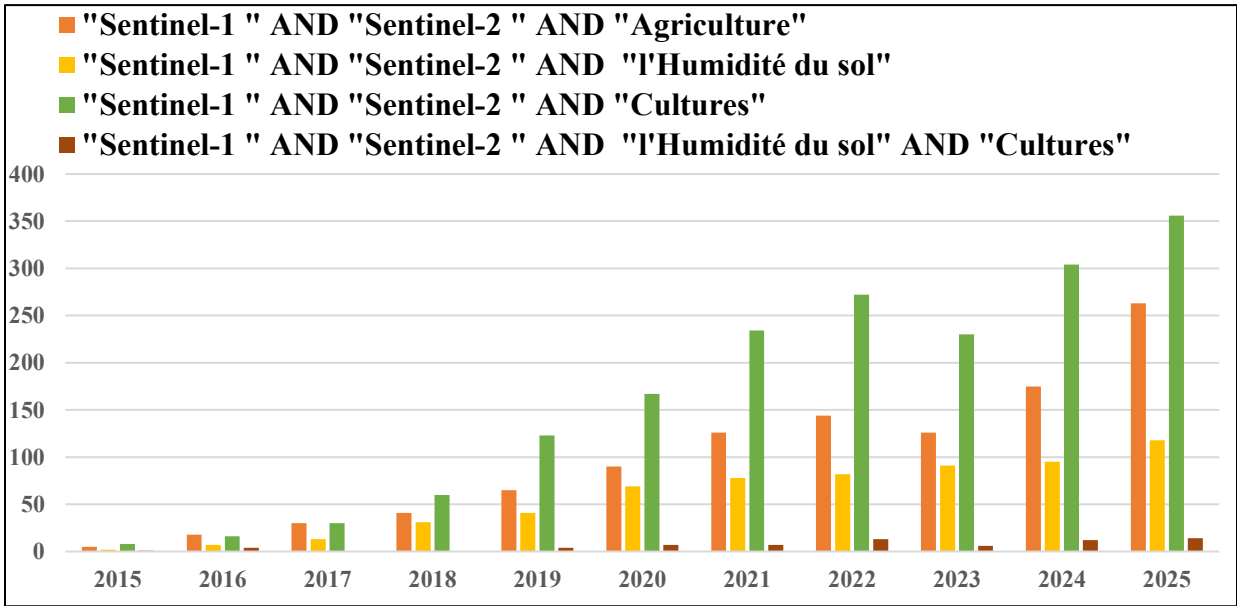
- Comment la télédétection peut améliorer les capacités de prévention en phytoprotection?
- Comment la télédétection peut aider à alimenter des modèles en phytoprotection?
- Comment peut-on caractériser les conditions du sol et de la végétation en lien avec l'émergence des ennemis de cultures?



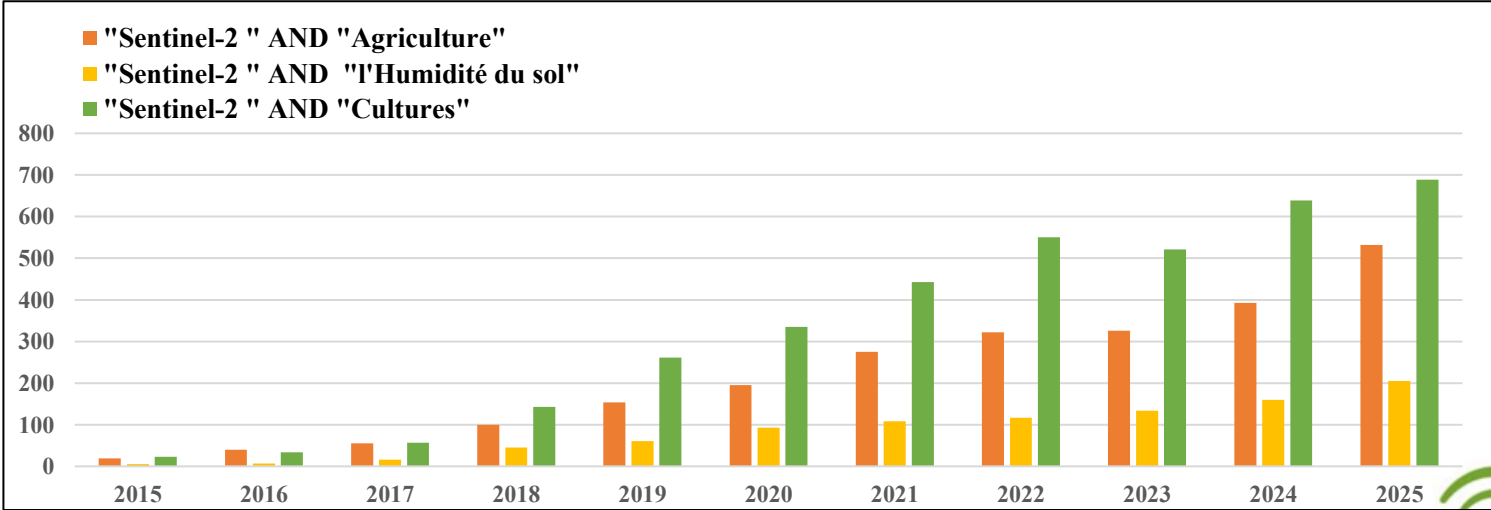
Télédétection, Agriculture, Humidité du sol, Cultures



Sentinel-1 et Sentinel-2 pour les cultures



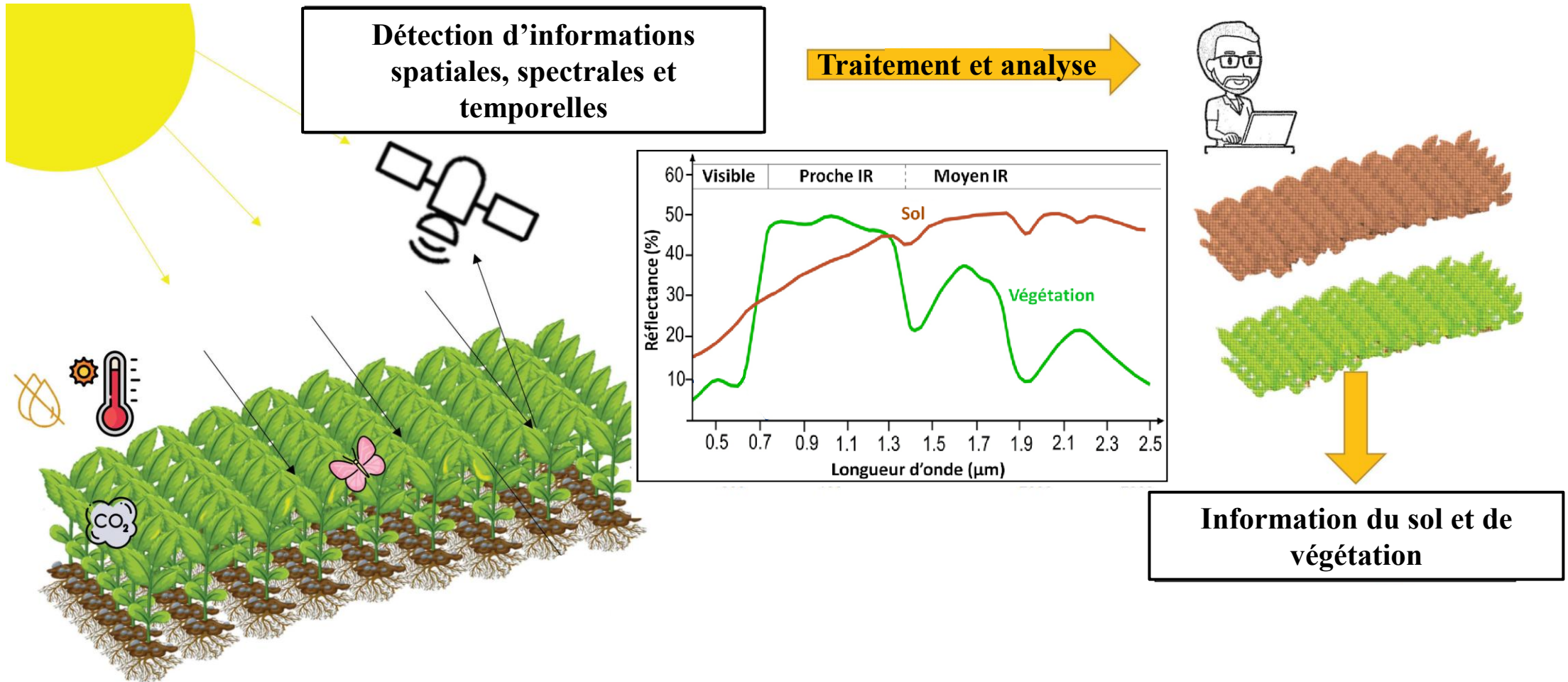
Nombre de publications annuelles liées à l'utilisation de Sentinel-1 (Radar) et Sentinel-2 (Optique) dans le domaine d'agriculture (site: *Scopus*)



Partie 2

Caractérisation de la végétation

Sentinel-2 pour la surveillance agricole



Indices de végétation: Optique

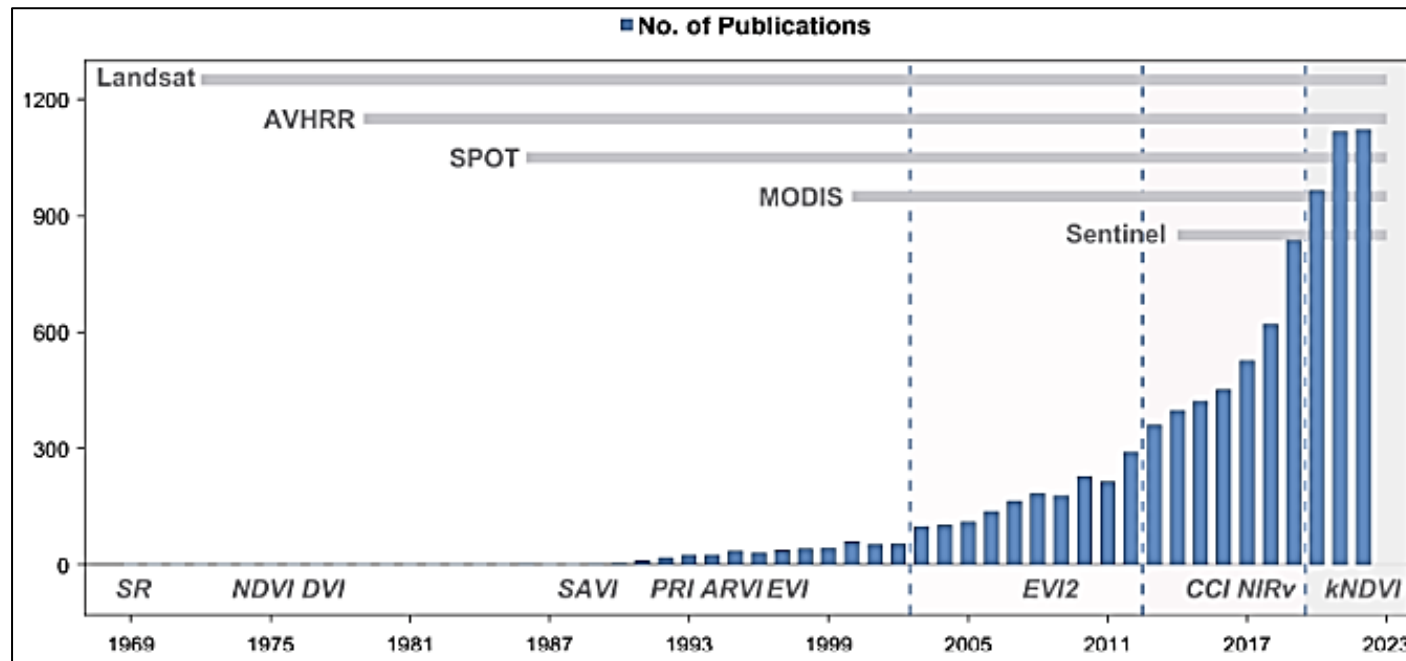
- En 2017, Xue et Su répertoriaient ~ **118 indices de végétation optiques**

Basés sur des **rapports de bandes Rouge, PIR et parfois MIR**



Forte utilisation :

- Santé de la végétation verte
- Couverture végétale
- Phénologie
- Phytoprotection
- *etc.*



Nombre de publications annuelles liées aux indices de végétation
(site: *web of science* (WOS))
Yan et al. (2025)

Indices de végétation: Optique

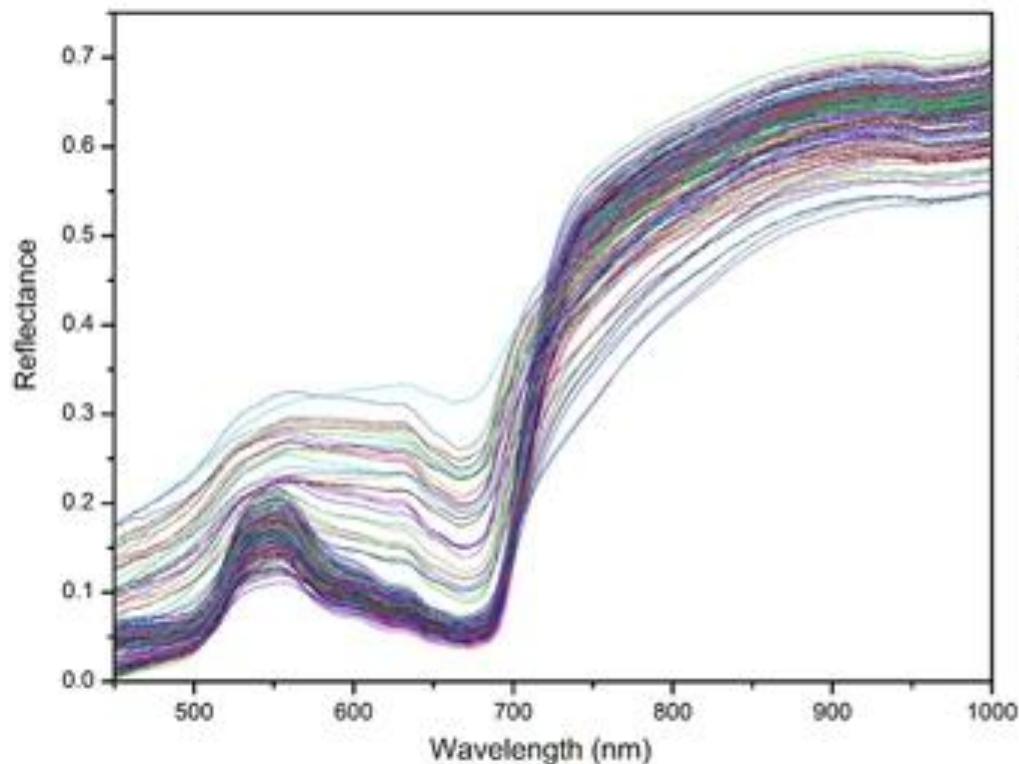
Les indices de végétation utilisés pour détecter ou surveiller les maladies des plantes ou les ravageurs

VI	Formule	Caractéristiques	Ennemis des cultures (Hôte)
NDVI	$(R_{RED} - R_{NIR}) / (R_{RED} + R_{NIR})$	Associé à plusieurs paramètres de la plante (p. ex., LAI, biomasse) et à la vigueur générale	Maladie virale (Betterave sucrière) ; Pourriture blanche (Blé) ; vers et champignon (Betterave sucrière) ; insectes (Coton)
GNDVI	$(R_{NIR} - R_{Green}) / (R_{NIR} + R_{Green})$		Pourriture blanche (Blé) ; puceron (Blé) ; insectes (Coton)
TVI	$0.5 [120(R_{750} - R_{550}) + 200(R_{670} - R_{550})]$		Pourriture blanche (Blé)
OSAVI	$1.16(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$		Insectes (Coton)
IWB	R_{950} / R_{900}	Sensible à la teneur en eau de la plante	Larves d'insectes (Tomate)
WI	R_{900} / R_{970}		Puceron (Vigne)
RVSI	$[(R_{712} - R_{752})/2] = R_{732}$	Reflète le stress des plantes	Puceron (Vigne) ; puceron (Blé)
AI	$(R_{740} - R_{887}) / (R_{691} + R_{698})$	Indices développés pour détecter des maladies ou ravageurs spécifiques	Puceron (Blé)
DSWI	R_{800} / R_{1660}		Rouille orange (Canne à sucre)

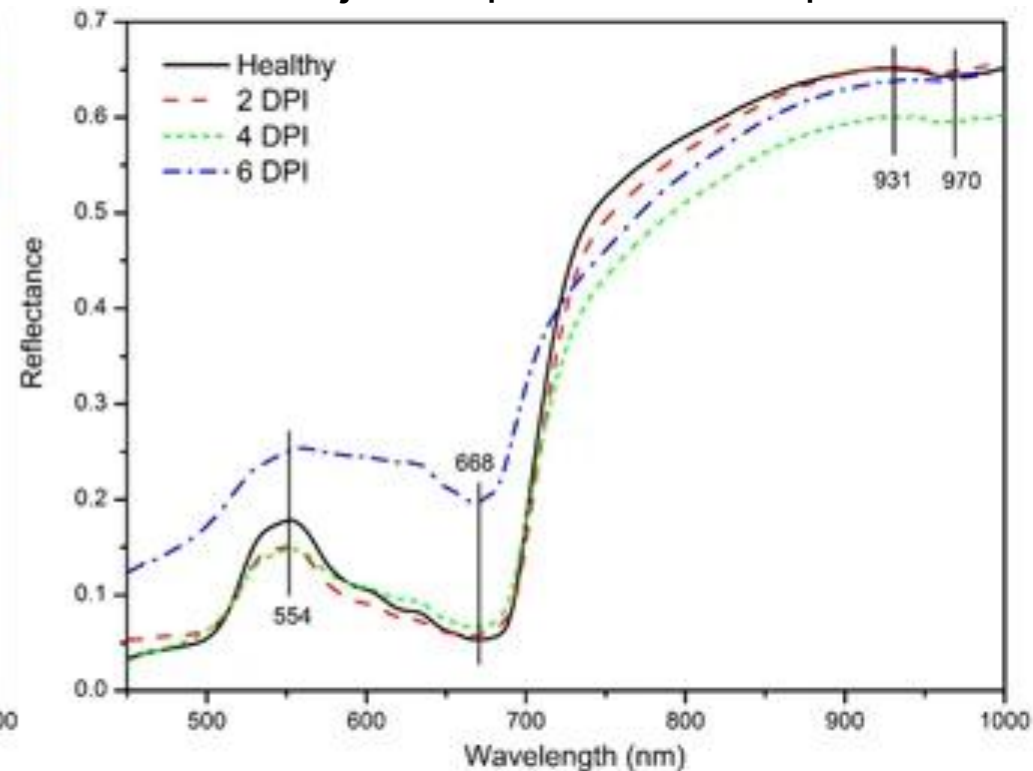
DVI, GVI, EVI, NDWI, PVI, IPVI, ARVI, SAVI, OSAVI, TSAVI, MSAVI2, SR, PSRI, GEMI, AFVI, etc.

Maladie des cultures - Apport de l'hyperspectrale

Spectres d'échantillons
de feuilles de tabac



Feuille de tabac saine et feuilles de tabac
2, 4 et 6 jours après l'infection par le TMV

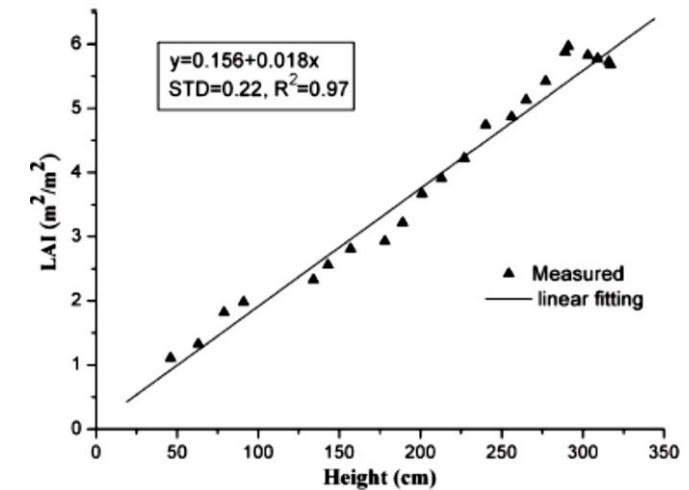
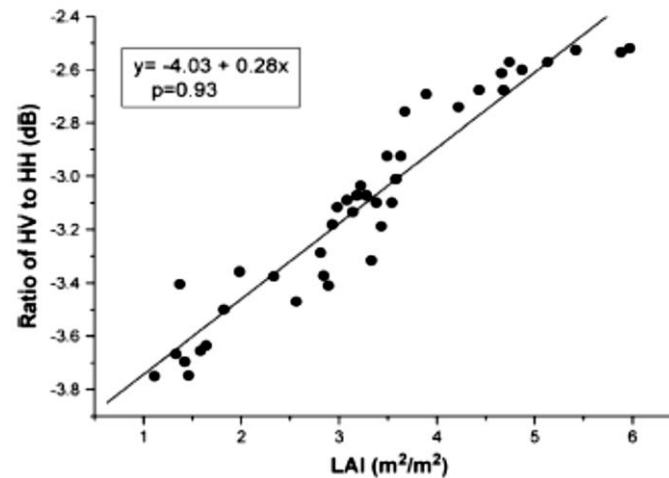
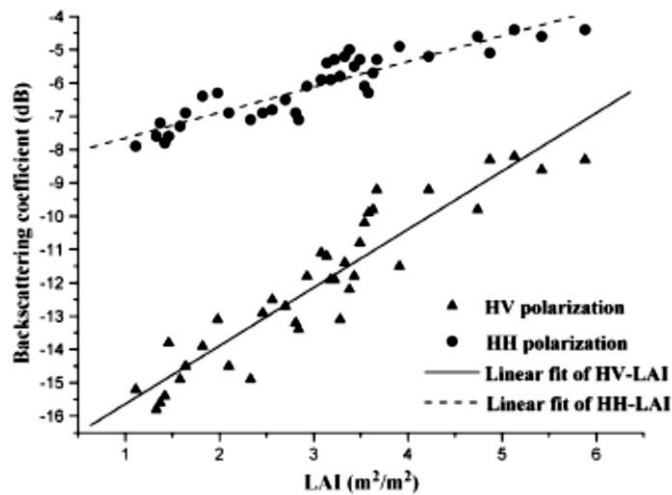


Symptômes observables :
6 jours après l'infection dans le VIS
4 jours après l'infection dans le PIR

Zhu et al., 2017

Indices de végétation radar pour le suivi de la végétation

- En 2024, Hu et al. répertoriaient ~ **vingtaine d'indices de végétation radar**
- LAI et hauteur des cultures à partir du radar (Lin et al., 2009)

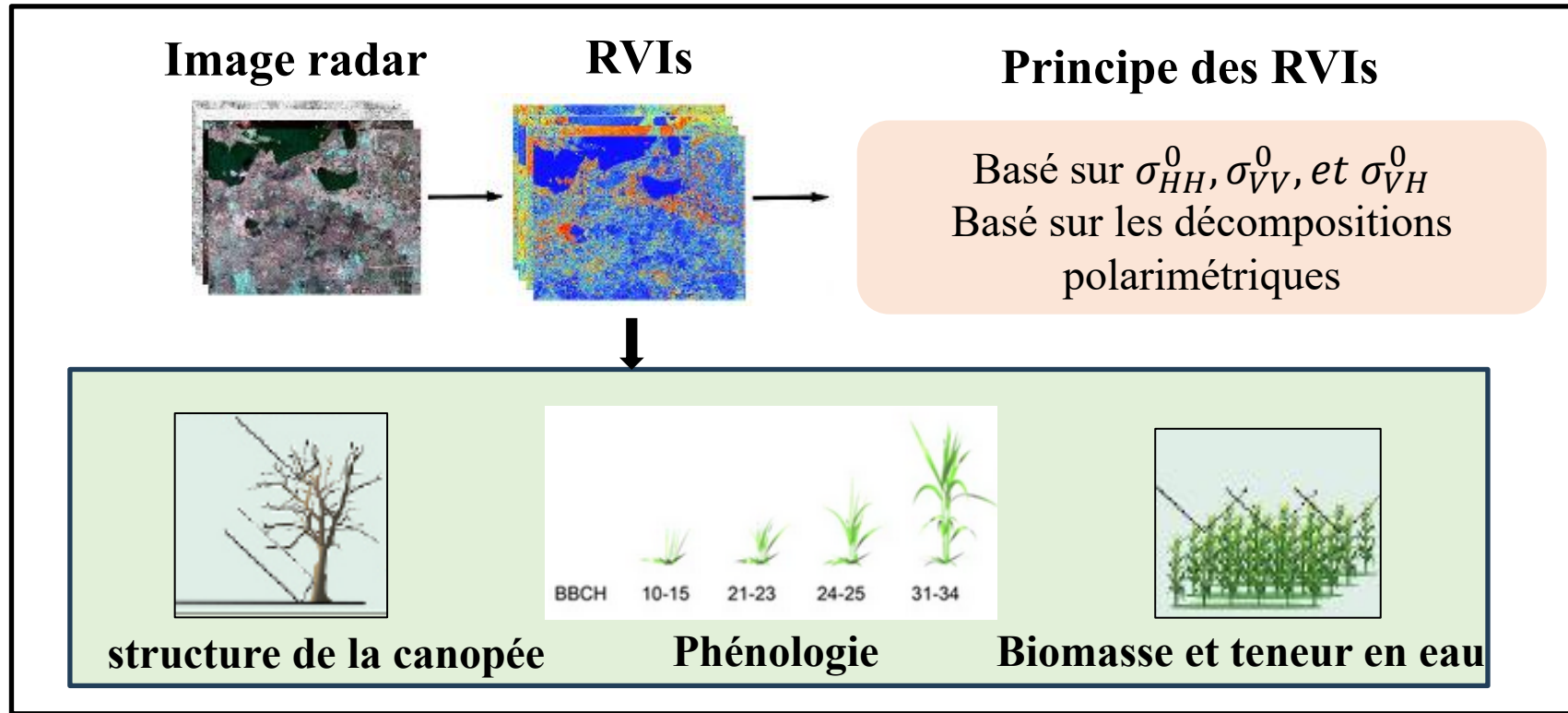


➡ Combinaison de différentes polarisations pour suivre la végétation

L'indice **RVI** = $\frac{8\sigma_{HV}^0}{\sigma_{HH}^0 + \sigma_{VV}^0 + 2\sigma_{HV}^0}$ est à l'origine du développement de plusieurs indices

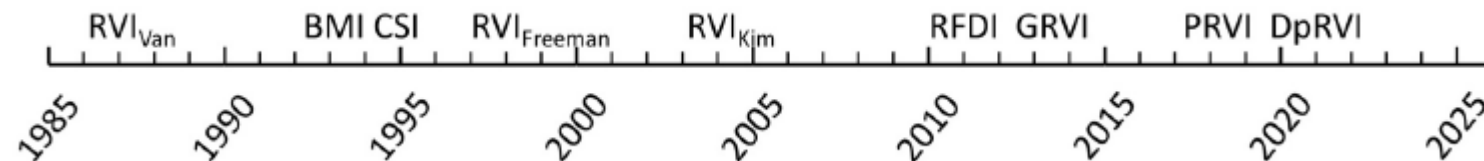
Indices de végétation radar pour le suivi de la végétation

- Structure, phénologie et teneur en eau de la végétation



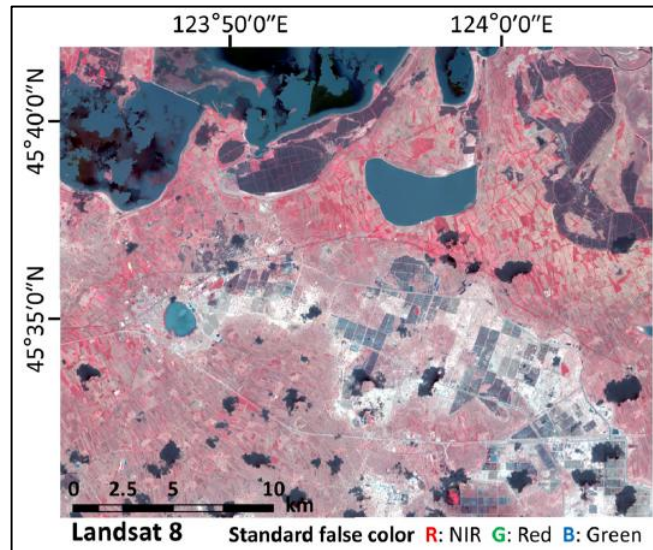
Hu et al. (2024)

- Évolution dans le développement des indices de végétation radar

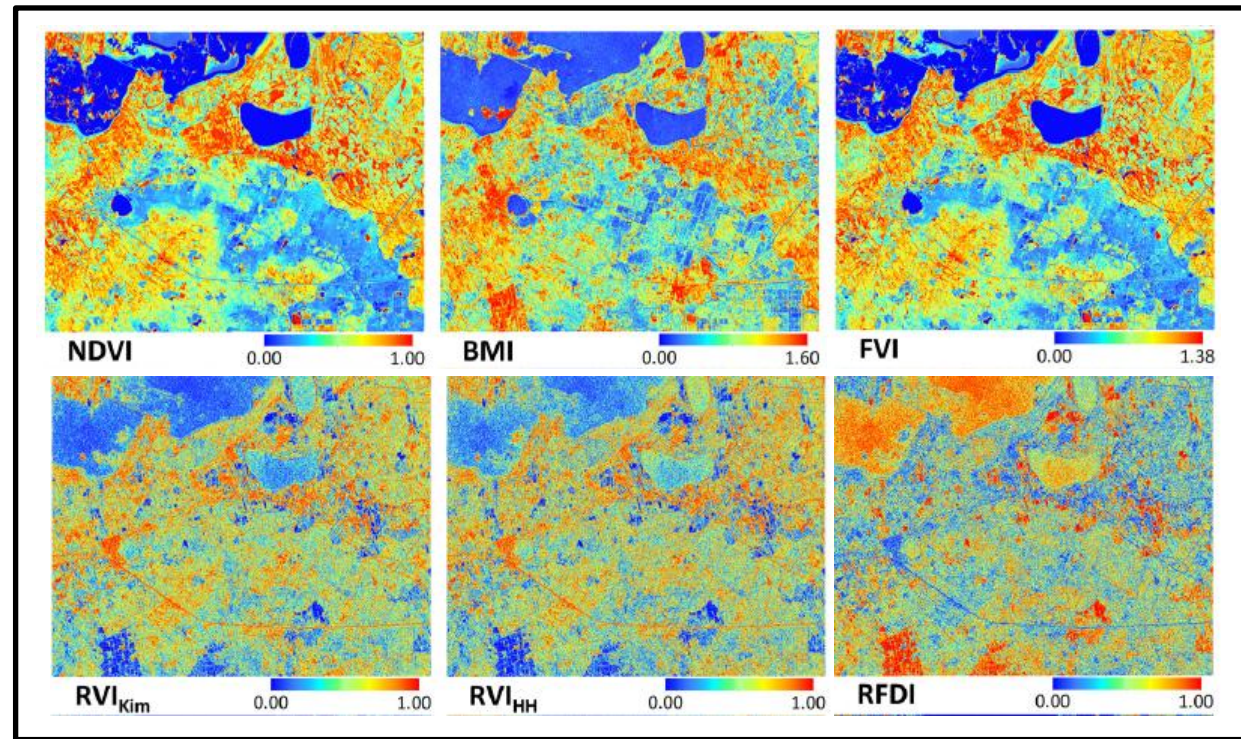


Indices de végétation radar pour le suivi de la végétation

- Comparaison avec le NDVI (Hu et al., 2024)

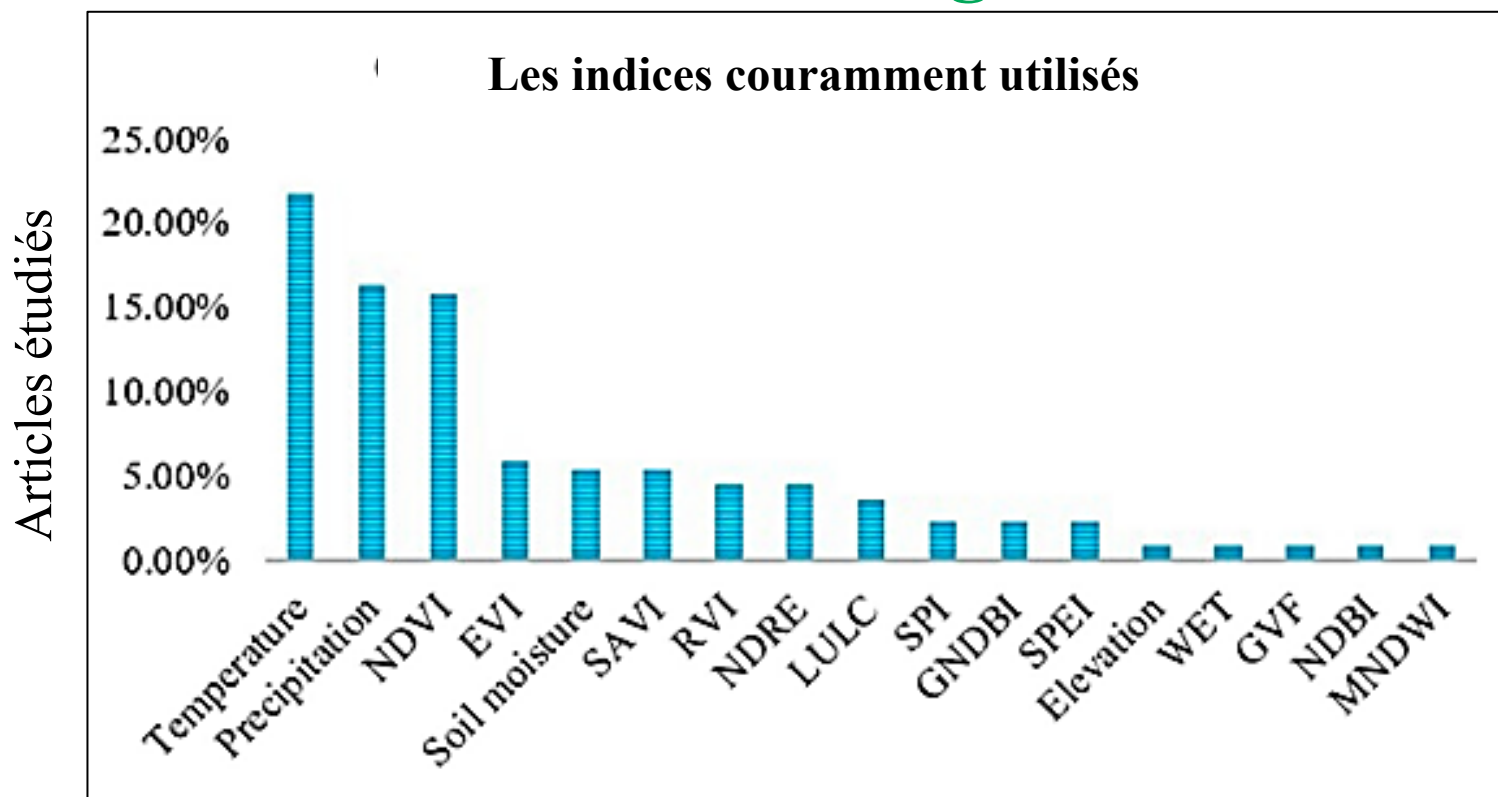


Zone agricole en Chine



➡ Sensibilités différentes des indices de végétation optique et radar

Place des indices de végétation optique et radar pour la surveillance des insectes en agriculture

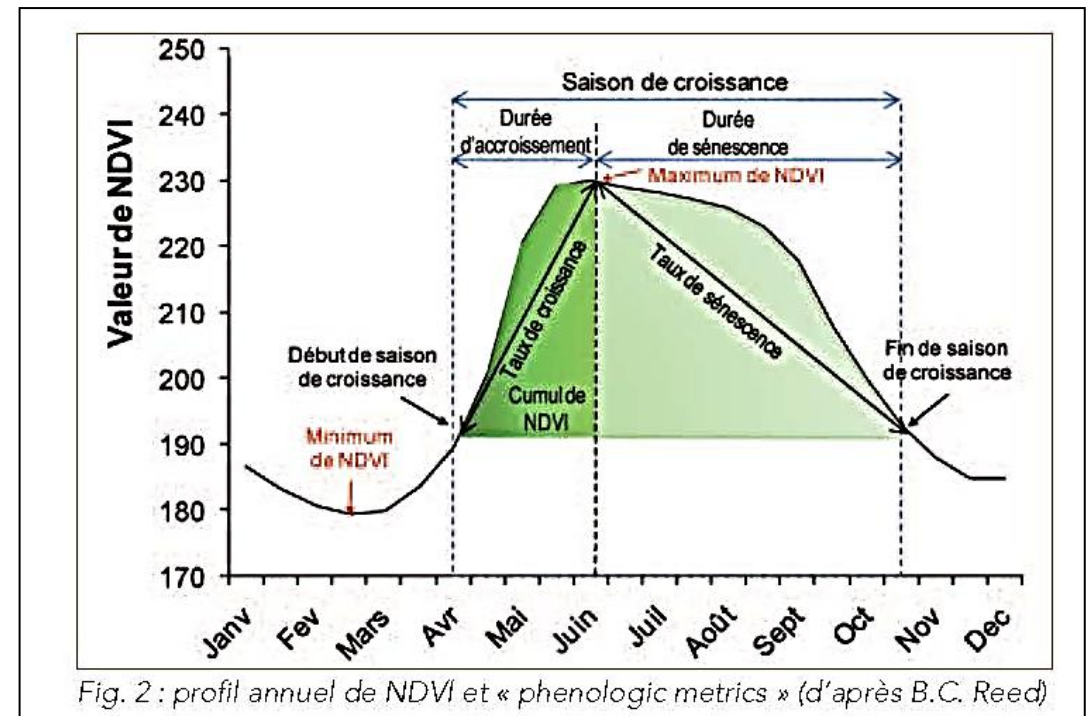


Mpisane et al. (2025)

Variables utilisées pour la surveillance des insectes ravageurs en agriculture : enseignements tirés de la lutte contre le criquet migrateur (*Locustana pardalina*) en Afrique du Sud

Phénologie des cultures

- La phénologie des cultures est le calendrier des principales étapes de leur croissance : début et fin de croissance, floraison, maturation, sénescence, etc. Ces étapes varient selon les types de cultures et les variétés au sein d'une même espèce.
- Trois approches utilisées en télédétection pour déterminer la phénologie des cultures :
 - ❖ **Séries temporelles d'indices de végétation (optique, radar)**
 - ❖ **Indices de végétation + Modèle de cultures**
 - ❖ **Apprentissage machine**
- Plusieurs métriques utilisés dont l'échelle BBCH*

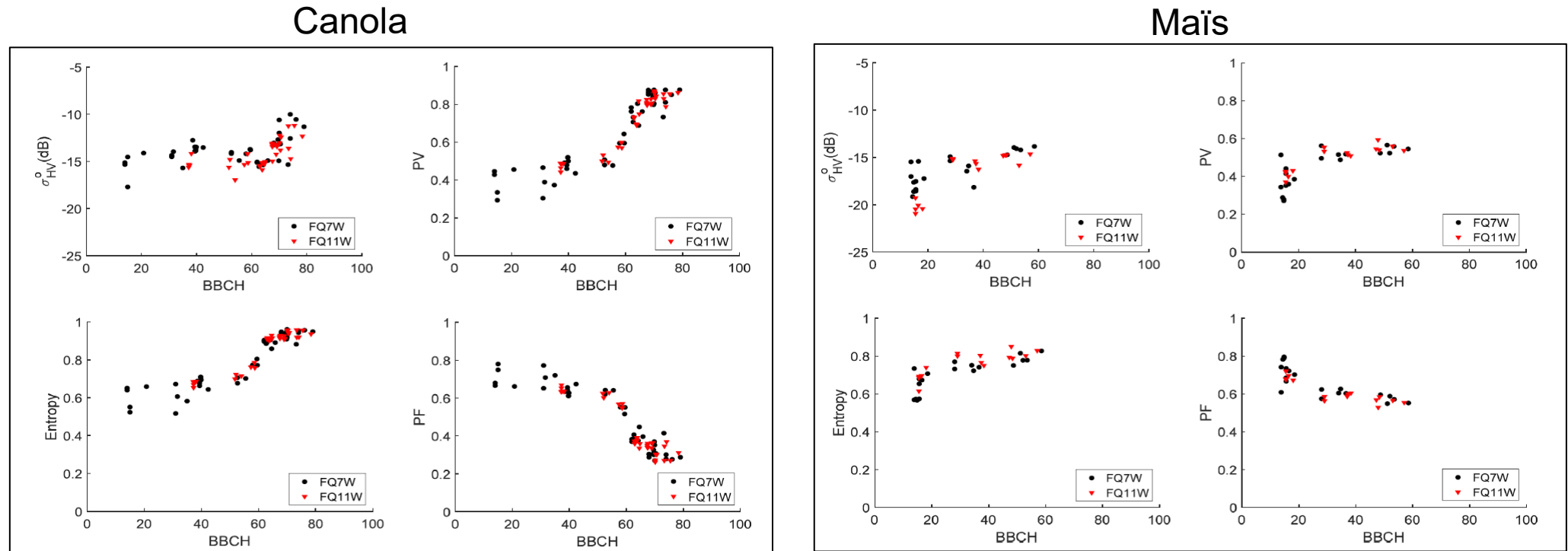


(Cheret et al., 2017)

* Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie

Phénologie des cultures

- Réponses de 4 paramètres polarimétriques issus de RADARSAT-2 au BBCH



Corrélation entre BBCH mesurés et estimés

Culture	RF	ANN	SVMR	KNN
Canola	0.93**	0.81	0.85*	0.88*
Maïs	0.90**	0.62	0.64	0.75
Soja	0.85**	0.82	0.75	0.82
Blé	0.91**	0.87**	0.82*	0.90**

- Estimation de la phénologie par les algorithmes: RF, ANN, SVMR, KNN

Partie 3

Caractérisation du sol

Température dans l'infrarouge thermique

- Plusieurs indices pour évaluer :
Les conditions d'humidité

Index	Equation
Thermal Indices	
Standard deviation of canopy temperature index	$CSTD = \sqrt{(T_{c1} - T_c)^2 + (T_{c2} - T_c)^2 + (T_{cn} - T_c)^2} / n$
Coefficients variance of canopy temperature	$CTCV = \frac{CSTD}{T_c}$
Degrees above critical temperature	$DACT = \max[0, T_c(h) - T_{critical}]$
Degrees above non-stressed canopy	$DANS = T_c(h) - T_{cNS}(h)$
ΔT canopy-air	$\Delta T_{canopy-air} = T_{canopy} - T_{air}$
Index of relative stomatal conductance	$IG = \frac{T_{dry} - T_{canopy}}{T_{canopy} - T_{wet}}$
Second formulation of the stomatal conductance index	$IB = \frac{T_{canopy} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{canopy}}$
Normalized relative canopy temperature	$NRCT = \frac{T_{canopy} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$
Standardized canopy temperature index	$SCTI = \frac{T_{canopy} - \text{mean} T_{canopy}}{\text{Standard deviation}}$
Temperature condition index	$TCI = \frac{T_{canopy\ max} - T_{canopy}}{T_{canopy\ max} - T_{canopy\ min}} \times 100$
Temperature vegetation drought Index	$TVDI = \frac{T_s - T_{s\ min}}{a + b(T_{s\ max} - T_{s\ min})}$
Water deficit index	$WDI = 1 - \frac{\lambda E_{act}}{\lambda E_{pot}} = \frac{(T_s - T_a)_{min} - (T_s - T_a)_{mes}}{(T_s - T_a)_{min} - (T_s - T_a)_{max}}$
Crop water stress index	$CWSI = \frac{T_{canopy} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}}$

L'état de la végétation

VHI (indice de santé de la végétation), ESI (indice de stress évaporatif), etc.

Température dans l'infrarouge thermique

- Température à la surface du sol
- Profil de température
- Température de la végétation

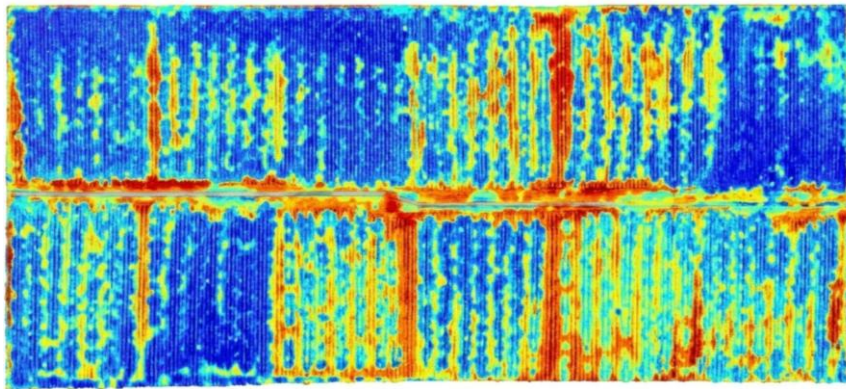
Résolutions spatiales plus faibles qu'en optique

Alternative  Drones

Utilisation :

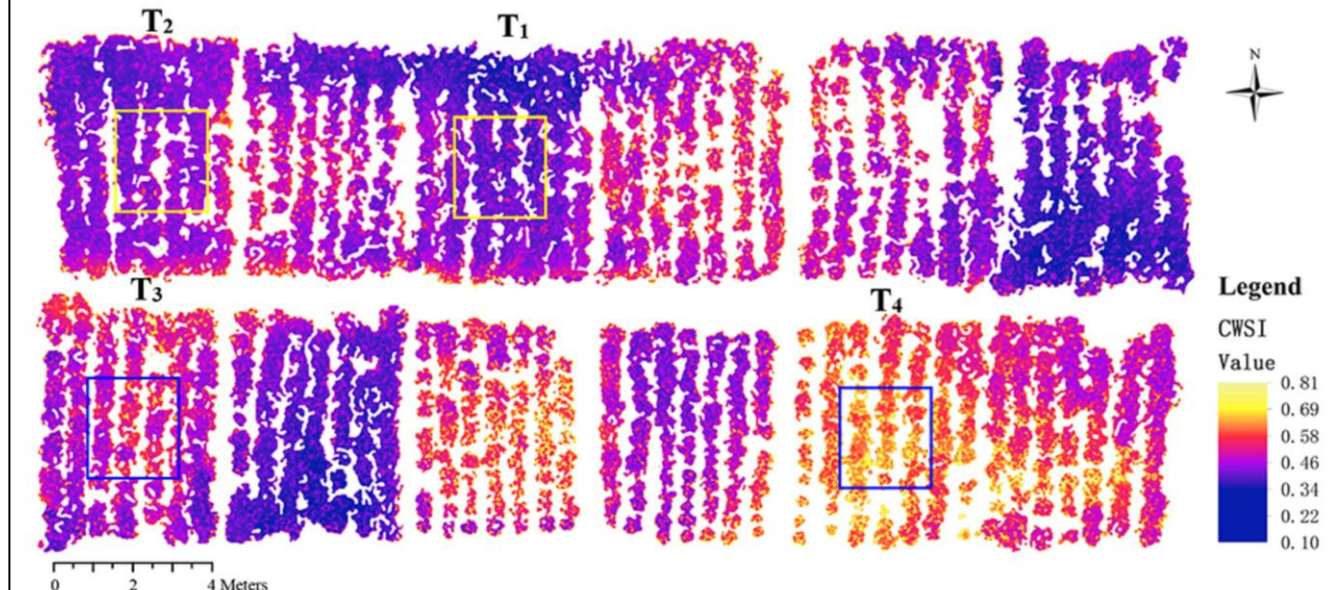
- Stress de la végétation (sécheresse, humidité du sol)
- Phytoprotection, *etc.*

Télédétection infrarouge thermique par drone



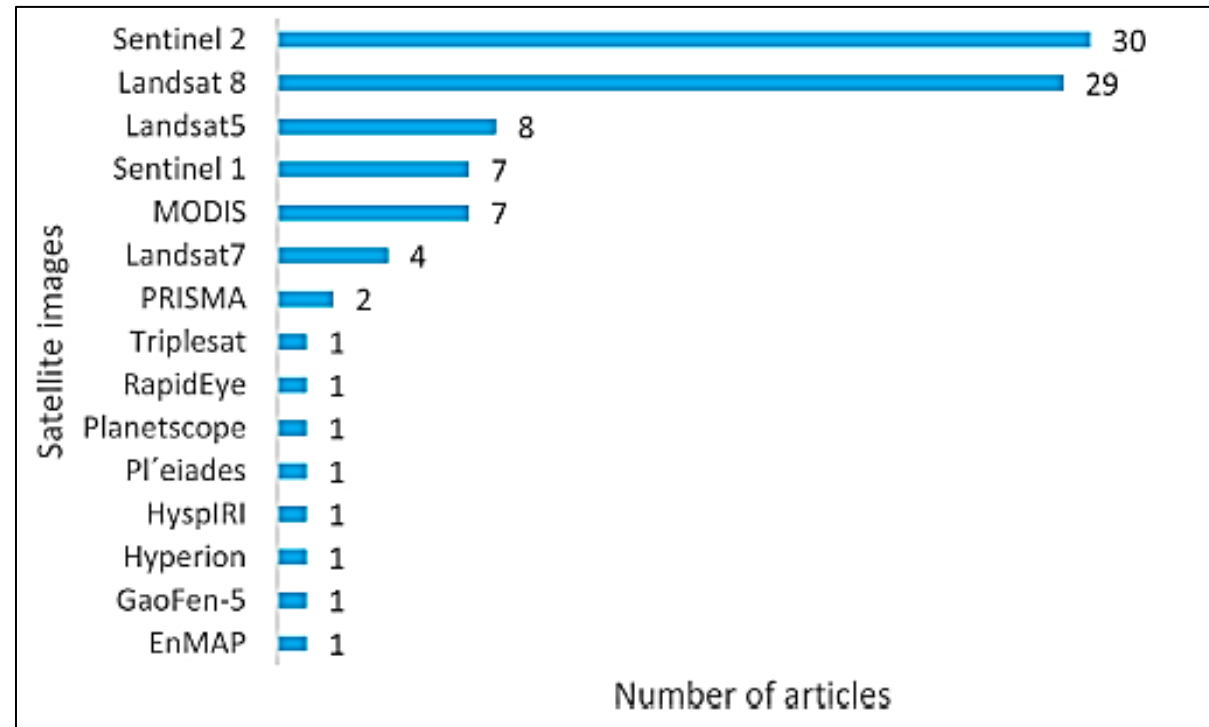
Température (°C)
42
25

Carte d'indice de stress hydrique (CWSI)



Texture du sol

- Satellites utilisés les 10 dernières années pour déterminer le pourcentage de sable, d'argile et de limon (Mgohele et al., 2024)



- Méthodes
 - Rapports de bande
 - Dérivées spectrales
 - Modélisation (modèles statistiques, apprentissage machine)

Texture du sol

- Texture du sol à partir des données PRISMA, Sentinel-2 et Landsat 8 (Mzid et al., 2022).

PRISMA

Sentinel-2

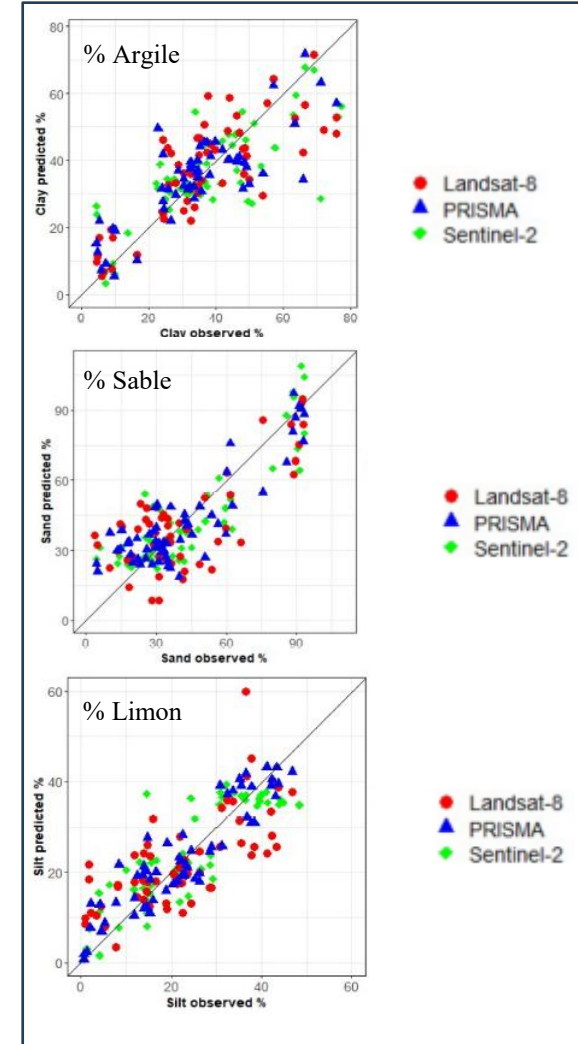
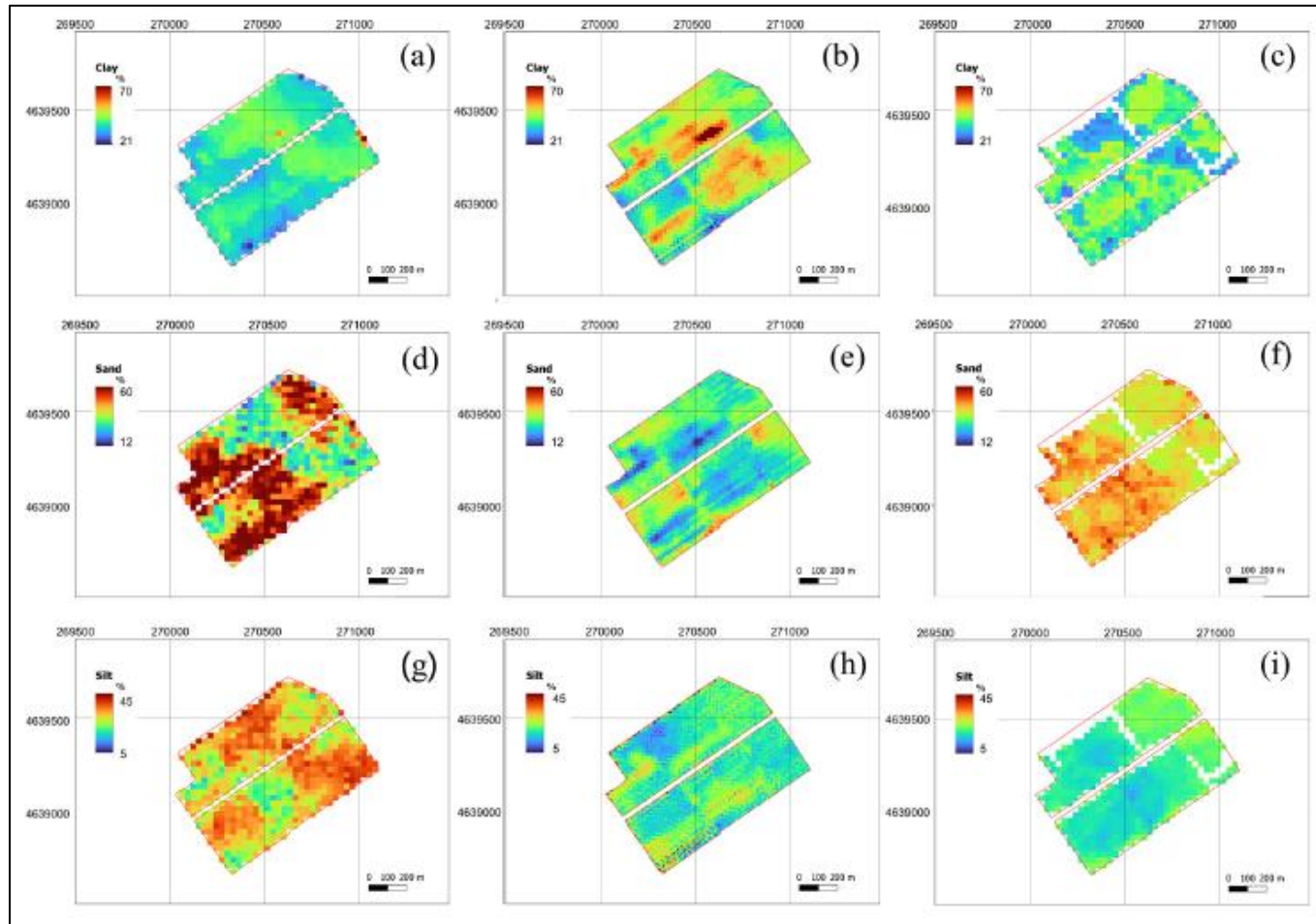
Landsat 8

Validation

% Argile

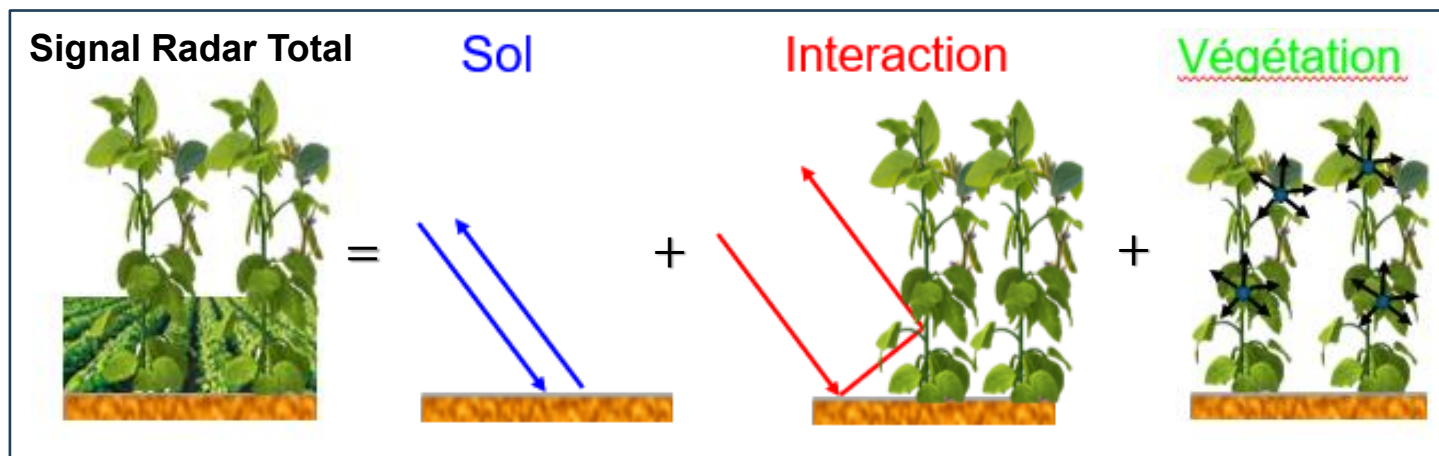
% Sable

% Limon

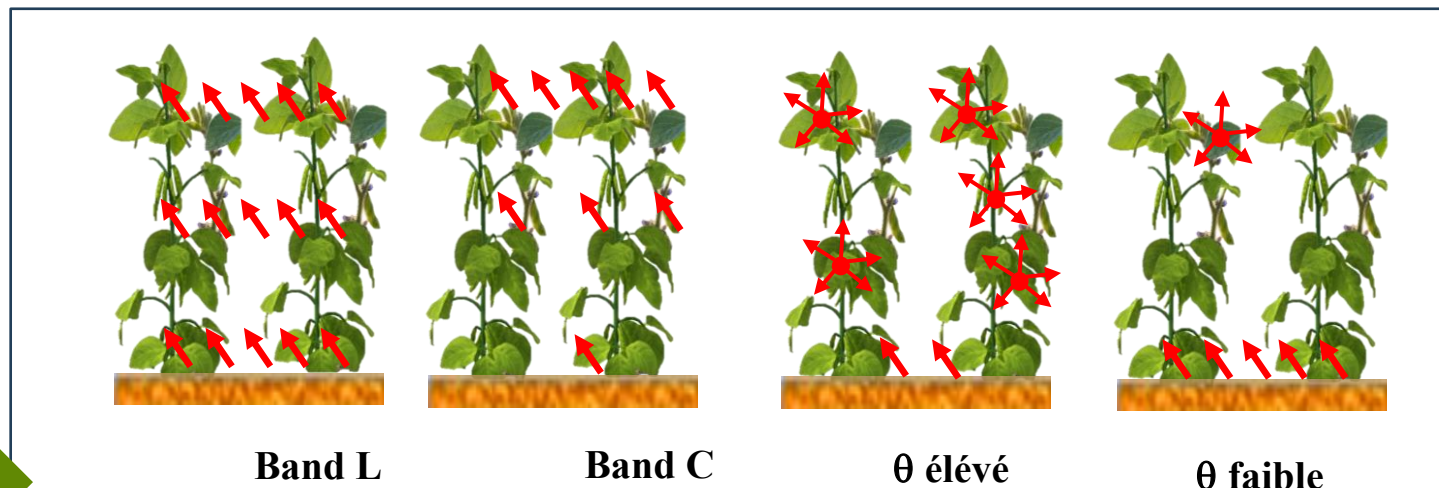


Humidité du sol sur une surface couverte de végétation

Composantes du signal rétrodiffusé

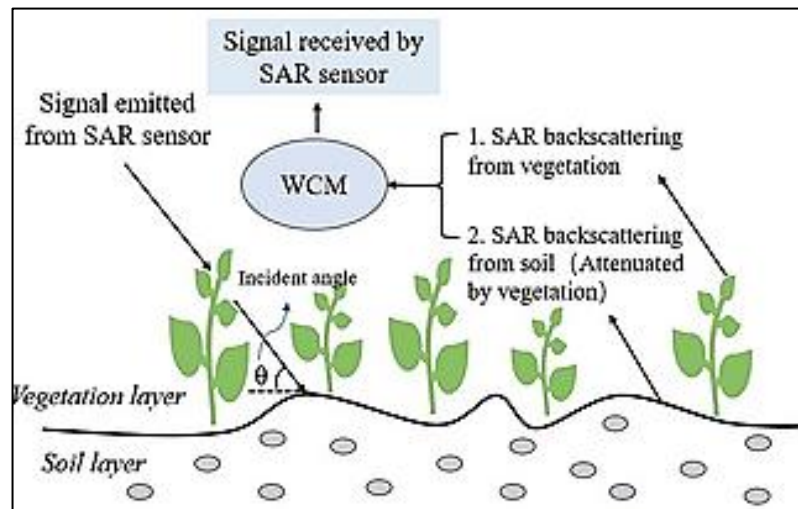


Effet de la fréquence et de l'angle d'incidence



Modélisation radar pour l'humidité du sol et la biomasse

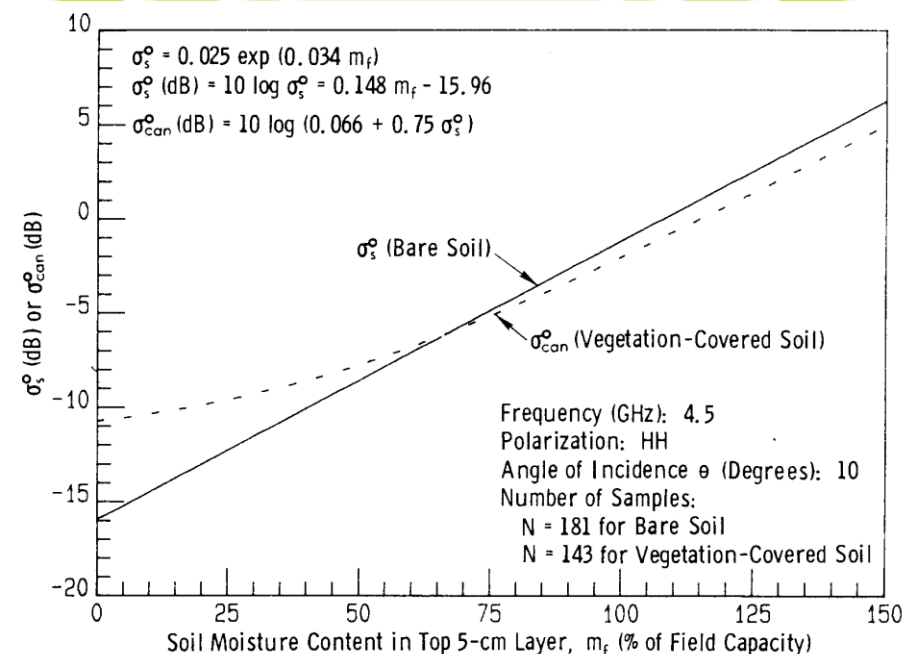
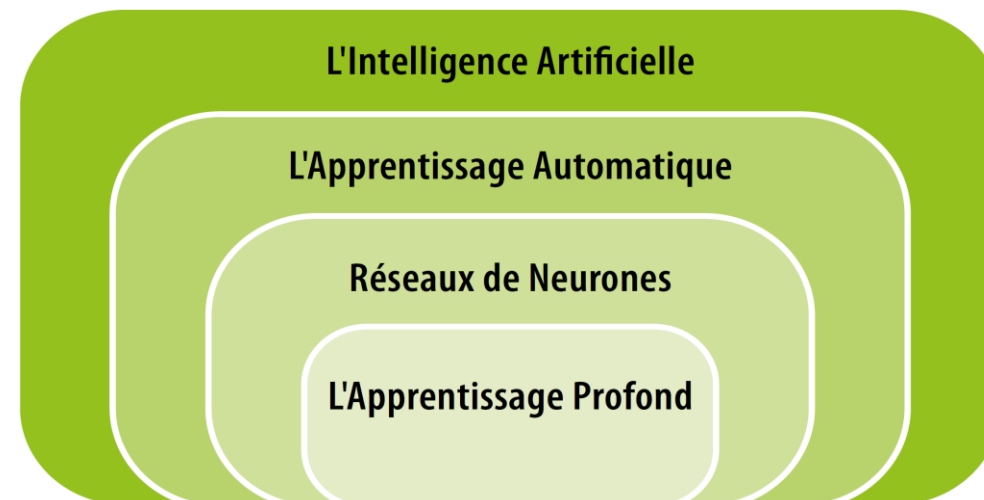
Les modèles radar



Défis

- **Trouver la bonne image** radar en termes de fréquence, polarisation et angle d'incidence
- Tenir compte de l'influence d'un paramètre sur la réponse d'un autre
- **Découpler le signal total** radar

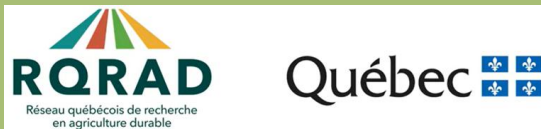
Les modèles combinant l'optique et le radar



Partie 4

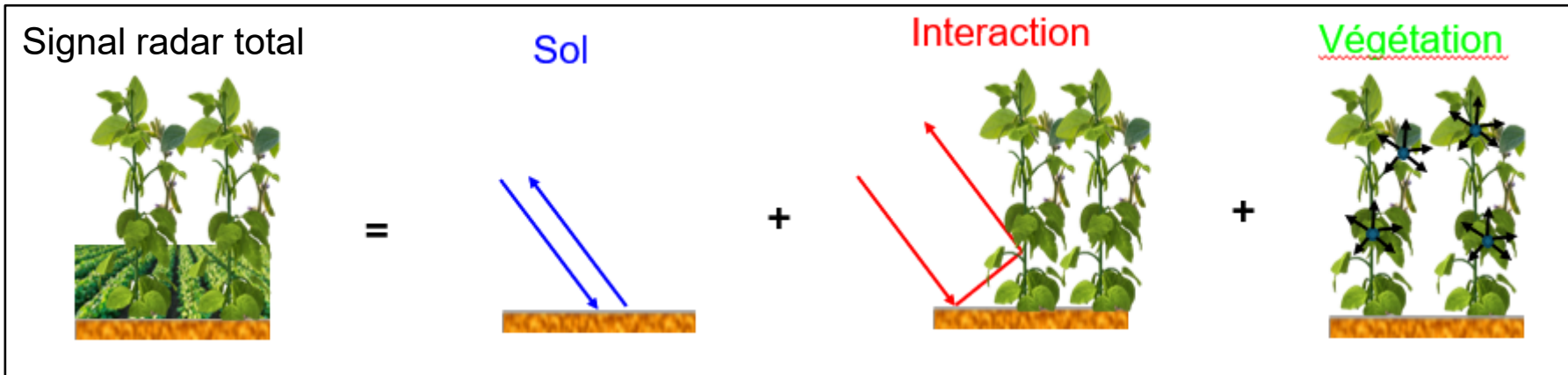
Résultats préliminaires dans le cadre du projet

Développement d'une infrastructure numérique
intelligente et d'approches préventives en
phytoprotection



Développement de nouveaux modèles de rétrodiffusion

- En radar polarimétrie compact



- Développement de nouveaux modèles pour la contribution du sol et de la végétation
- Inversion des modèles pour estimer l'humidité du sol

IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 64, 2026

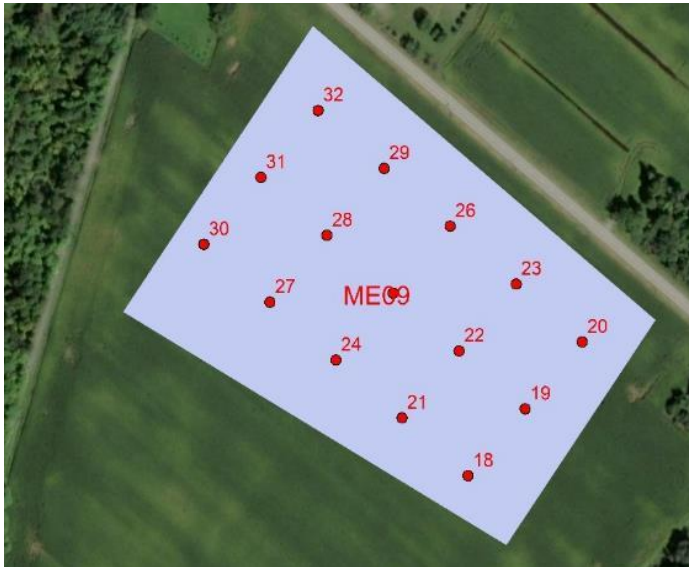
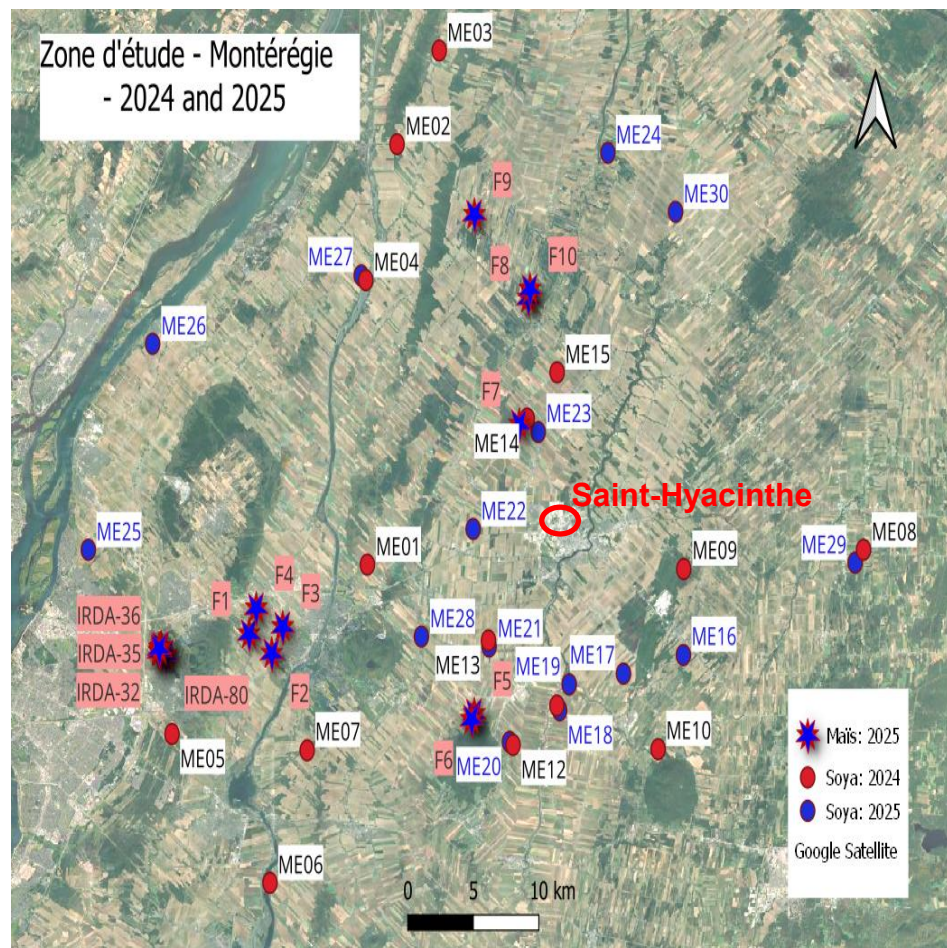
5203714

Development and Comparison of Bare Soil Moisture Retrieval Methods for Compact Polarimetric Data

Bhanu Prakash Mookkuthala Erkaramana^{ID}, Graduate Student Member, IEEE,
Thomas Jagdhuber^{ID}, Senior Member, IEEE, Kalifa Goïta^{ID}, Ramata Magagi, Anke Fluhrer^{ID}, Member, IEEE,
Florian Hellwig, Hongquan Wang, and G. G. Ponnurangam^{ID}

Campagnes de terrain 2024 et 2025 (champs soya et maïs)

- **Station de mesures** (humidité et température du sol, précipitation) **en continue**
- **Mesures hebdomadaires** des caractéristiques du sol et de la végétation
- **Dépistage** de la Sclérotiniose du soya et du Chénopode blanc



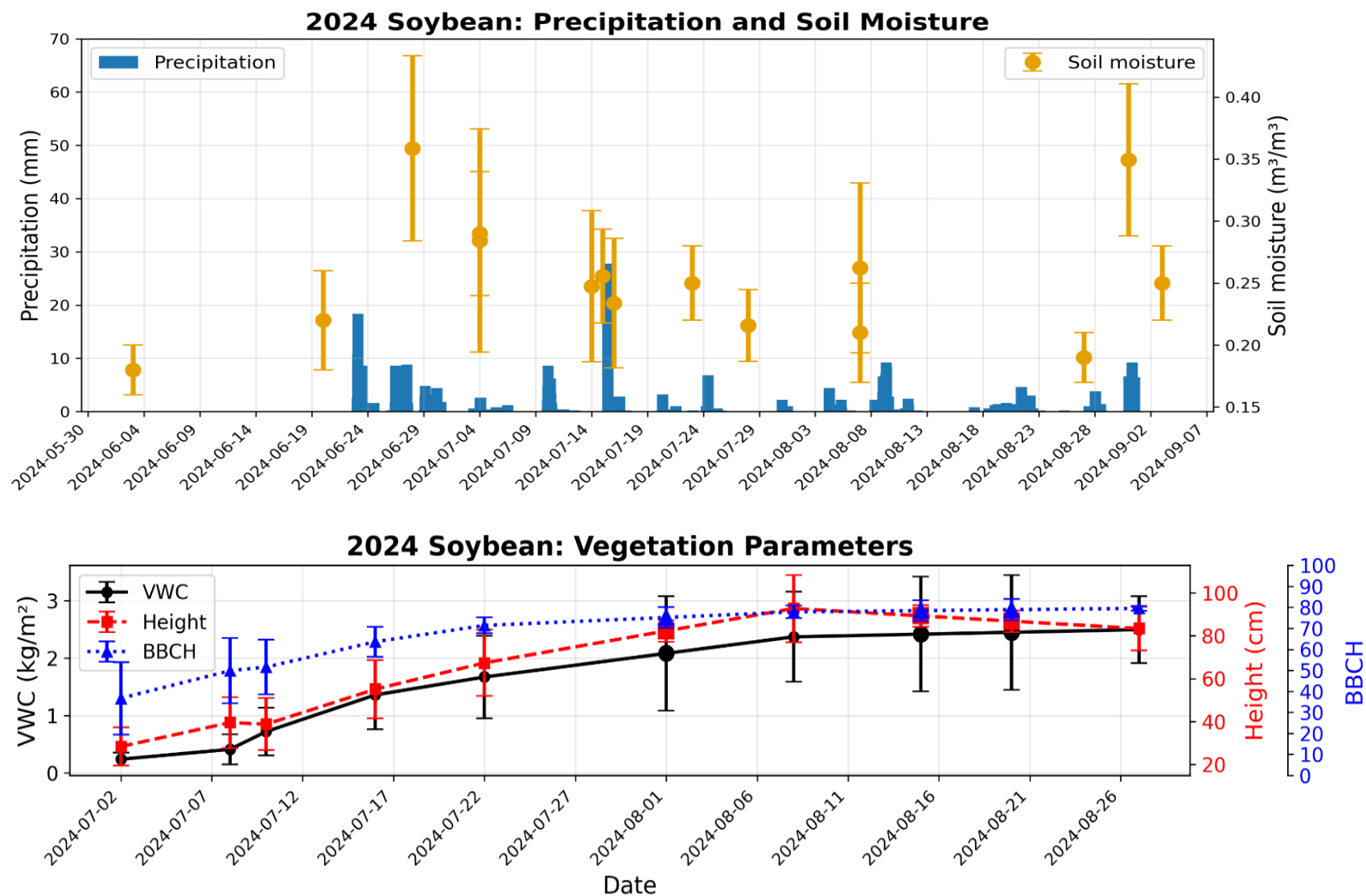
Laboratoire : Sol et Végétation

- Analyse d'échantillons de sol et végétation au laboratoire



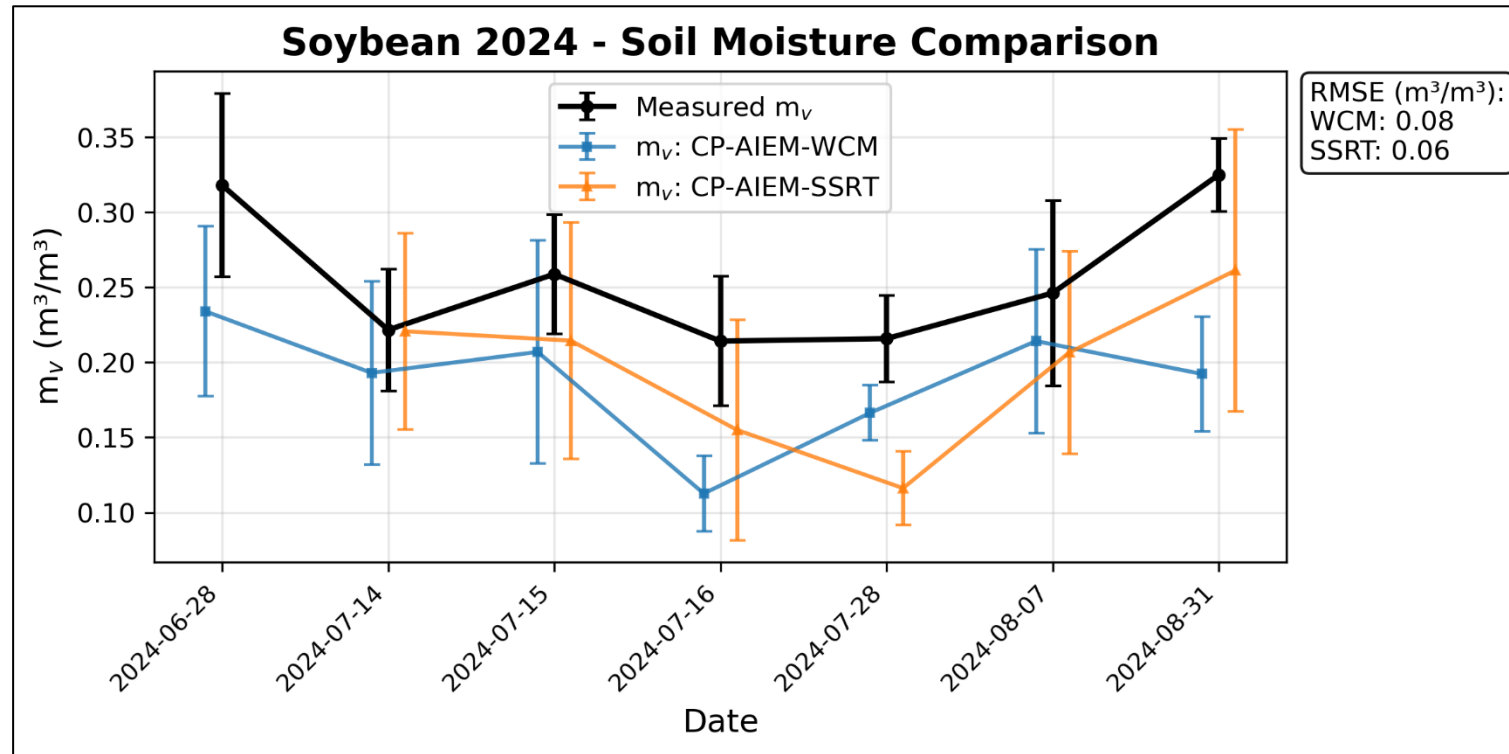
➔ Extraction des caractéristiques du sol (densité, texture, type de sol) et de végétation

Exemple de données collectées sur le terrain en 2024



Humidité du sol estimée à partir des données radar

- Champs de soya 2024



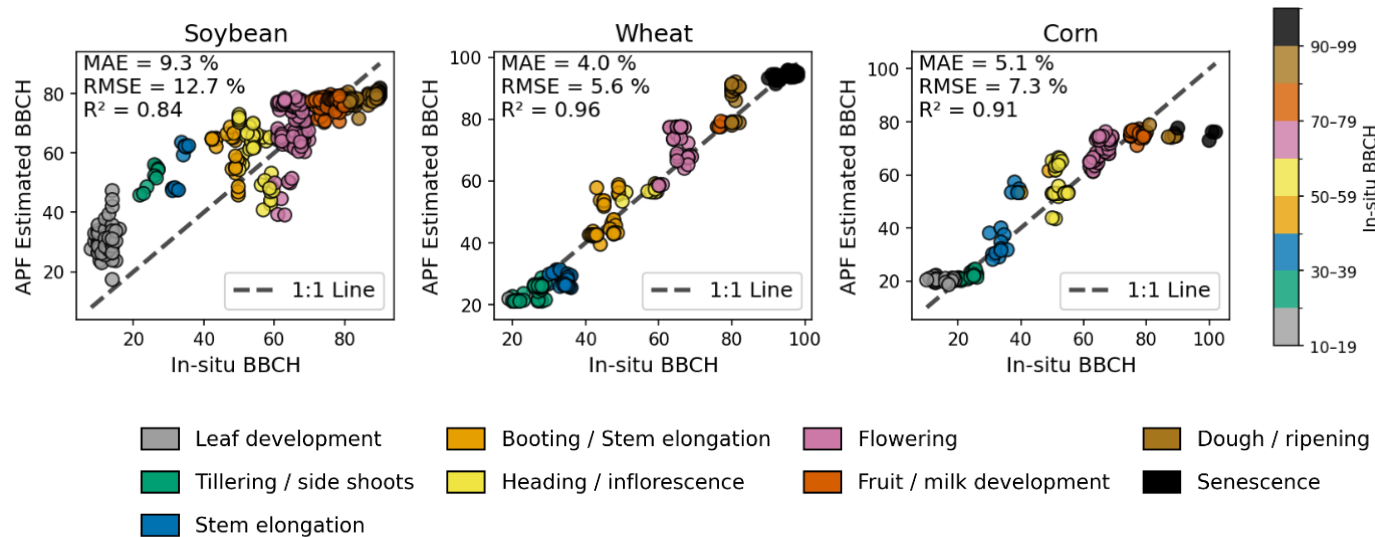
Transférabilité du modèle testé sur d'autres sites

Phénologie de cultures estimée à partir des données radar

Développement du modèle

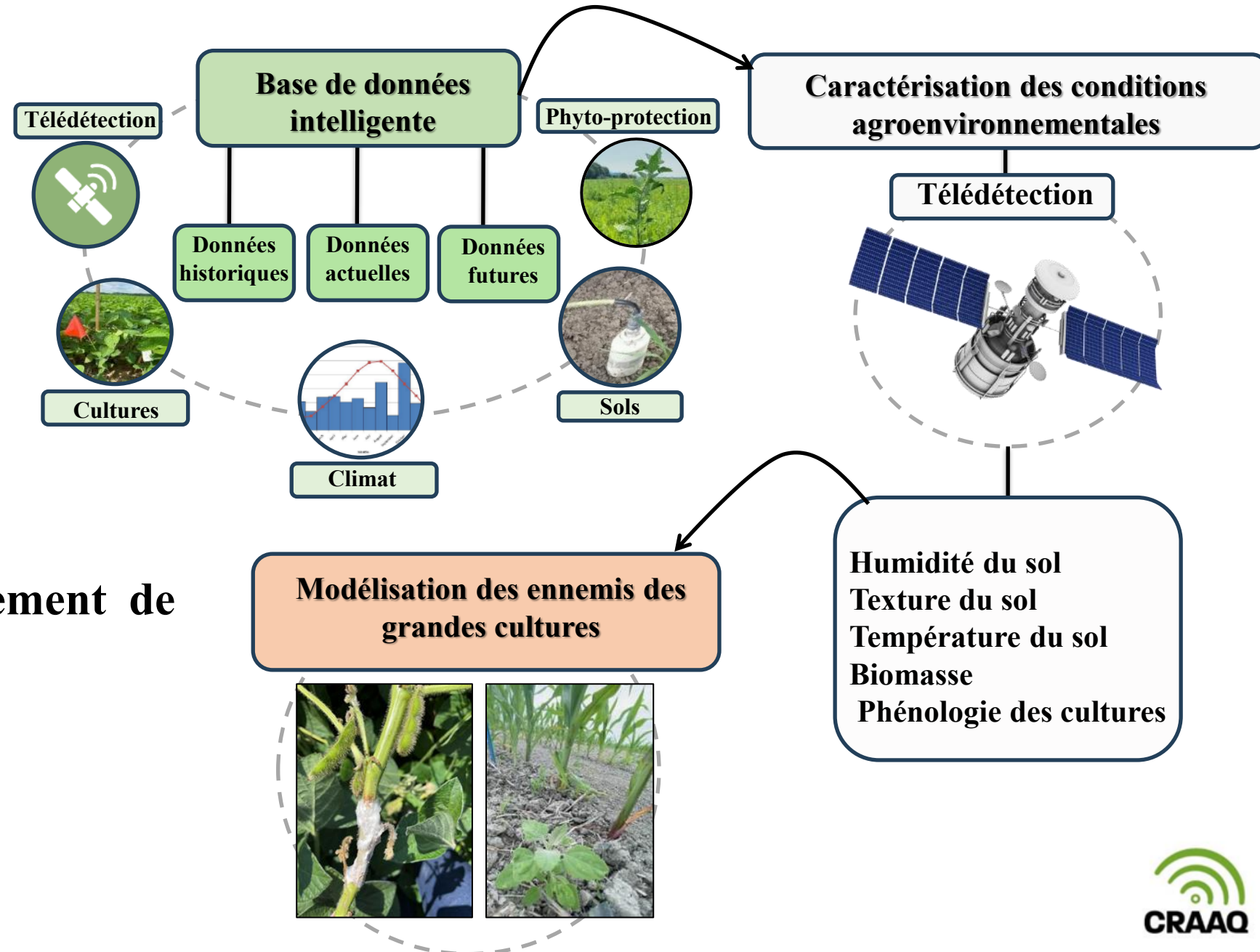
→ Combinaison indices de végétation radar et modèle de croissance logistique

Meilleurs résultats avec un poids logistique $\alpha = 0.5$



Phytoprotection

Amélioration et développement de modèles prévisionnels.



Références

- Bian et al., 2019. Simplified Evaluation of Cotton Water Stress Using High Resolution Unmanned Aerial Vehicle Thermal Imagery. Remote Sensing, 11(3). <https://doi.org/10.3390/rs11030267>
- Cheret et al., 2017. Utilisation de séries temporelles d'images satellitales pour cartographier le dépérissement des boisements. Rendez-vous Techniques de l'ONF (n° 31). pp. 55-62. ISSN 1763-6442.
- Hu et al. (2024) Radar vegetation indices for monitoring surface vegetation: Developments, challenges, and trends. Science of the Total Environment 945 (2024) 173974. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173974>
- Lin et al. (2009). Monitoring sugarcane growth using ENVISAT ASAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8), 2572-2580.
- Mgohele et al. (2024). Prediction of soil texture using remote sensing data. A systematic review. Frontiers in Remote Sensing, 10.3389/frsen.2024.1461537.
- Mpisane et al. (2025). A systematic review of remote sensing technologies and techniques for agricultural insect pest monitoring: lessons for locustana pardalina (Brown Locust) control in South Africa. Front. Remote Sens. 6:1571149. doi: 10.3389/frsen.2025.1571149.
- Mzid et al. (2022). Evaluation of Agricultural Bare Soil Properties Retrieval from Landsat 8, Sentinel-2 and PRISMA Satellite Data. Remote Sens. 2022, 14, 714. <https://doi.org/10.3390/rs14030714>.
- Ndlovu et al. (2024). A systematic review on the application of UAVbased thermal remote sensing for assessing and monitoring crop water status in crop farming systems. International Journal of Remote Sensing. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2368933>.
- Wang et al. (2019). Crop phenology retrieval via polarimetric SAR decomposition and Random Forest algorithm. Remote Sensing of Environment 231 (2019) 111234.
- Xue and Su (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. Journal of sensors, <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>.
- Yan et al. (2019). A global systematic review of the remote sensing vegetation indices. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 139 (2025) 104560. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104560>.
- Zhang et al. (2019). Monitoring plant diseases and pests through remote sensing technology: A review. Computers and Electronics in Agriculture 165 (2019) 104943.
- Zhu, H., Chu, B., Zhang, C., Liu, F., Jiang, L., & He, Y. (2017). Hyperspectral imaging for presymptomatic detection of tobacco disease with successive projections algorithm and machine-learning classifiers. Scientific reports, 7(1), 1-12.

Ce projet est financé par le ministère de l'Agriculture, des
Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) et le Fonds de
recherche du Québec (FRQ)



Nous remercions tous nos collaborateurs



Agriculture and
Agri-Food Canada



UNIVERSITÉ
LAVAL



CÉROM
Centre de recherche sur les grains



INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT
EN AGROENVIRONNEMENT



**Solutions
Mesonet**

*La Financière
agricole*

Québec 

