

Développement d'une méthodologie opérationnelle de suivi des rendements à l'aide de l'imagerie Radarsat-2 dans deux cultures stratégiques pour le Canada : maïs et soja (Télérendement)

Yves Gauthier

Coordonnateur de recherche

Équipe de recherche en Télédétection Environnementale et NORdique (TENOR)
INRS Centre Eau Terre Environnement

Karem Chokmani (directeur), Simon Perreault (chargé de projet), Dominic Thériault et Lucie Vallée (stagiaires)

Réunion de la Commission géomatique et agriculture de précision
Drummondville, 10 février 2017



Financement: Programme de développement d'application en observation de la terre (PDAOT) de l'agence spatiale canadienne

Agence Spatiale Canadienne

- **Pierre Nadeau**, *Autorité du projet*

Agriculture et Agroalimentaire Canada

- **Anna Pacheco**, *Autorité technique*



Partenaires

Coop fédérée

- **Alain Brassard**, *Conseiller spécialisé agriculture de précision et application à forfait*
- **Hicham Bencharki**, *Conseiller spécialisé agroenvironnement*



Contexte

- Suivi des grandes cultures dans un contexte de changement climatiques, d'augmentation de la population mondiale, hausse en demande énergétique et de sécurité agroalimentaire.
- La culture du soya occupe la 2^e place des grandes cultures du Québec derrière le maïs.
- La prédiction du rendement des grandes cultures est un enjeu primordial.
- Le suivi du rendement des grandes cultures est présentement effectué à l'aide d'imagerie optique par la Coop Fédérée.



Objectif du projet

Objectif:

- Développer un outil d'aide à la gestion de la variabilité du rendement au champ pour les agriculteurs, sous forme cartographique à l'aide de l'imagerie RADARSAT-2, pour 2 cultures stratégiques: le **maïs** et le **soja**.

Objectif spécifique :

- Développer une méthode qui permettra aux agriculteurs canadiens de maïs et de soja d'obtenir une prévision du rendement (**potentiel**) durant la saison de croissance.

Hypothèses:

- Le coefficient de rétrodiffusion du signal RADAR est sensible à la biomasse du maïs et du soya.
- La biomasse est un indicateur du rendement à certains stades de croissance (phénologiques).

Questions:

- Quelles conditions d'acquisition (image et champ) permettent une estimation optimale du rendement ?
- Quel est le meilleur moment durant la saison pour estimer le rendement des cultures de maïs et de soya avec le RADAR ?
- Comment déterminer le stade de croissance d'une parcelle au moment de l'acquisition de l'image RADAR sans avoir d'observations terrain ?

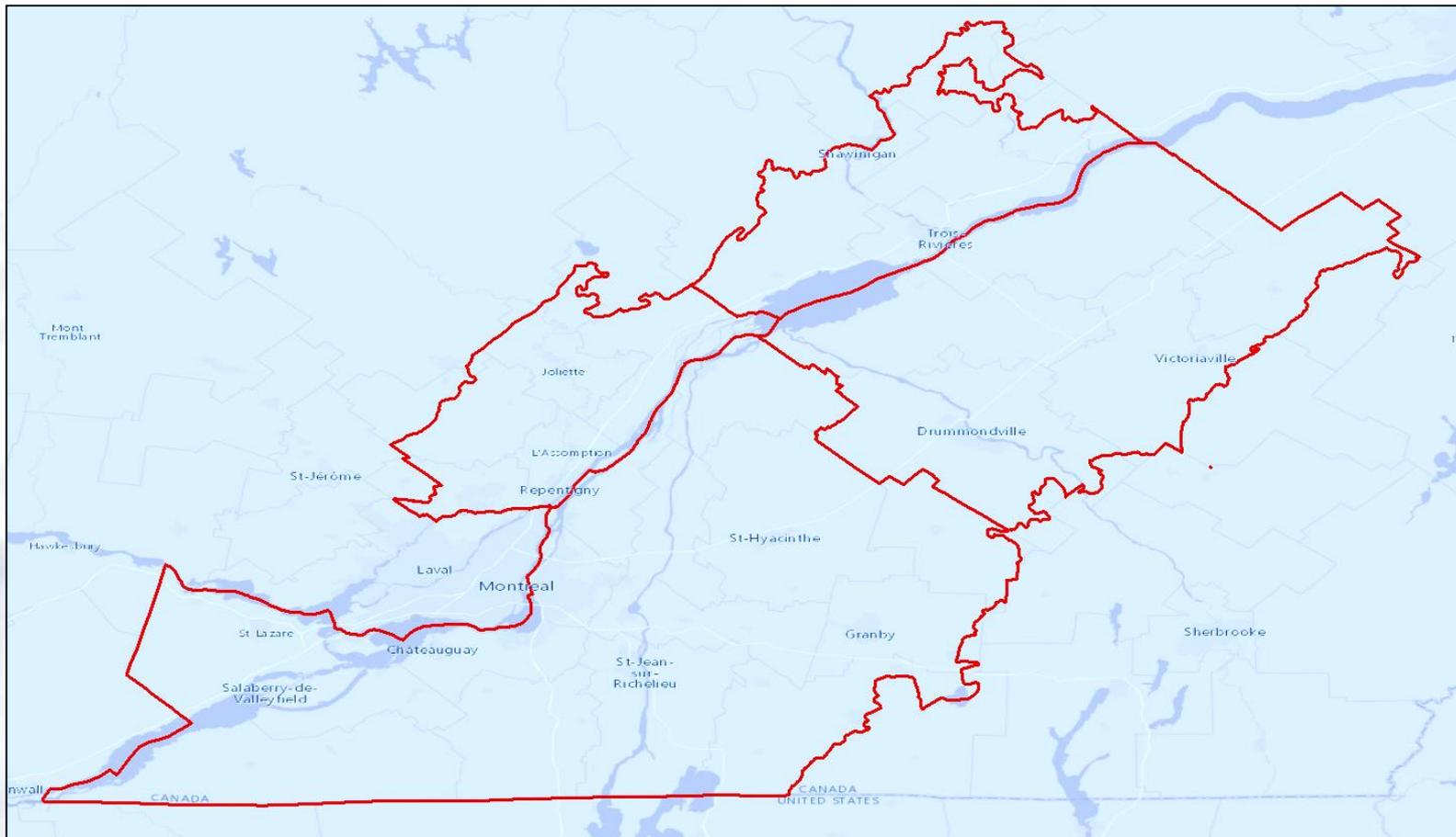
Originalité du projet

Exploiter un jeu de données inédit!



- Échelle parcellaire;
- Couverture de l'ensemble du sud du Québec;
- Milieu non-contrôlé qui représente la réalité des rendements des cultures du maïs et du soya du sud du Québec;
- Pluriannuelle (2008-2013)

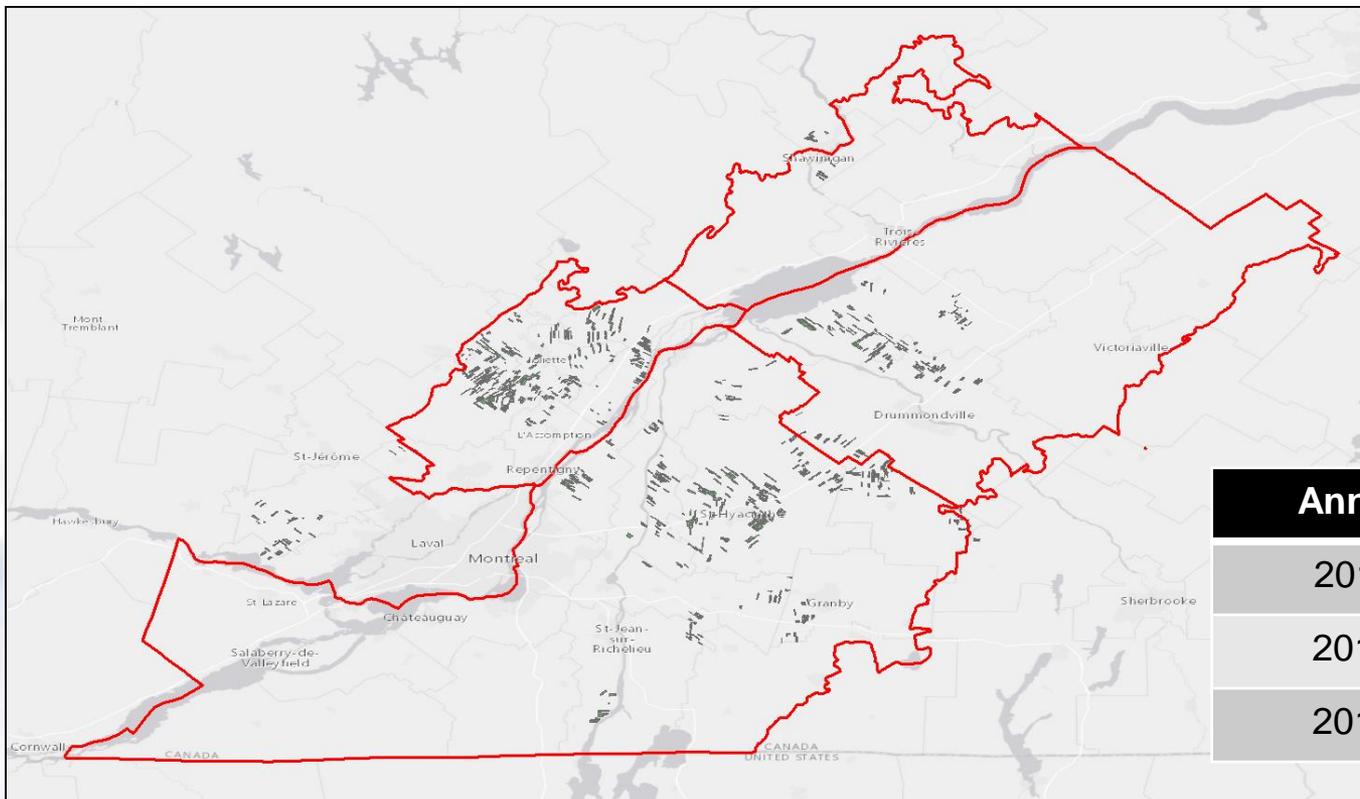
Zone d'étude



Données de rendement (potentiellement disponibles)

Données	Source	Détail	Obtention
Type 1 Rendement moyen à l'hectare (T/Ha)	Calculé (Producteur)	Donnée calculée par le producteur en fonction du volume récolté (poids) et de la taille de la parcelle (superficie)	Après la récolte
Type 2 Rendement à la batteuse (spatialisé sur la parcelle) (T/Ha)	Capteur de rendement sur le tracteur, avec GPS (Producteur)	Donne la variabilité spatiale du rendement dans la parcelle.	À la récolte
Type 3 Rendement à la batteuse (Type 2 moyenné sur la parcelle) (T/Ha)	Capteur de rendement sur le tracteur, avec GPS (Producteur)	Donnée précédente, moyennée sur la parcelle	À la récolte
Type 4 Rendement relatif estimé (spatialisé sur la parcelle) (T/Ha) 2011-2014	Images satellites optiques (Coop Fédérée)	Développement de végétation GLCV qui donne une progression du couvert végétal (juillet-Août) Carte de rendement potentiel pour le maïs et le soya: Spatialisation du rendement moyen dans la parcelle, à partir des cartes de végétation du mois d'août.	Juillet et août (Juin également pour l'année 2013.) Après la récolte

Données de rendement (potentiellement disponibles)

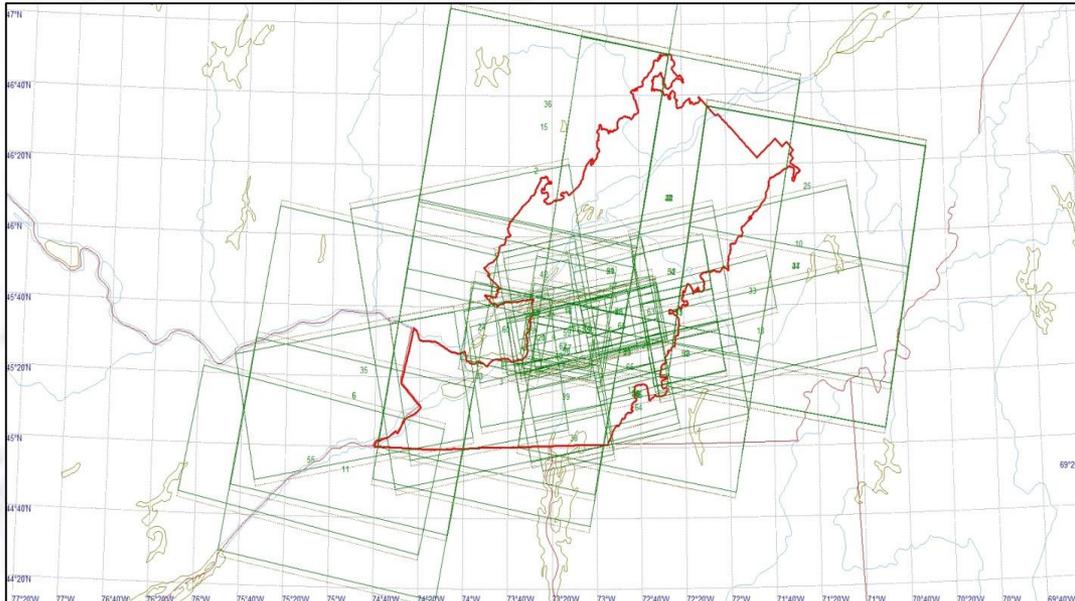


Année	Parcelles
2011	4227
2012	3410
2013	4332

Parcelles 2013

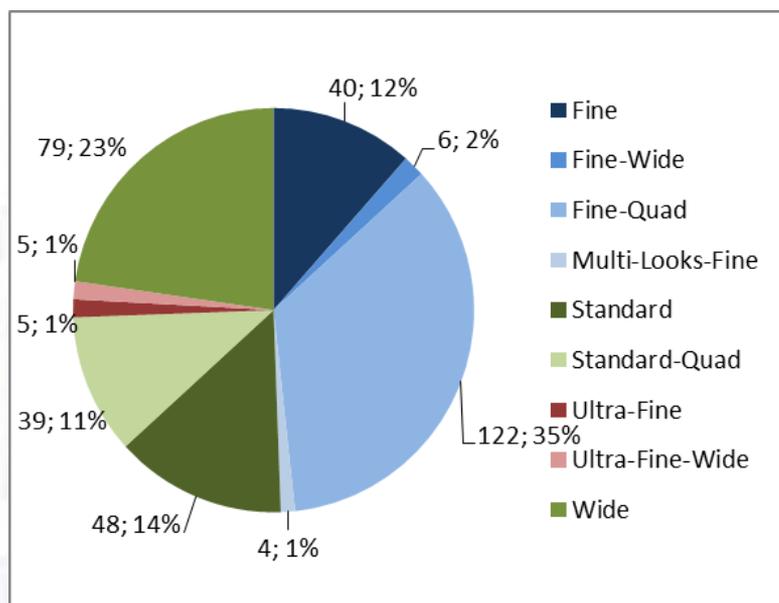
Données radar

Images RADARSAT-2 en **archives** pour la période 2008-2013, couvrant la zone d'étude.



Année	Nombre d'images
2008	35
2009	78
2010	37
2011	69
2012	62
2013	67
Total	348

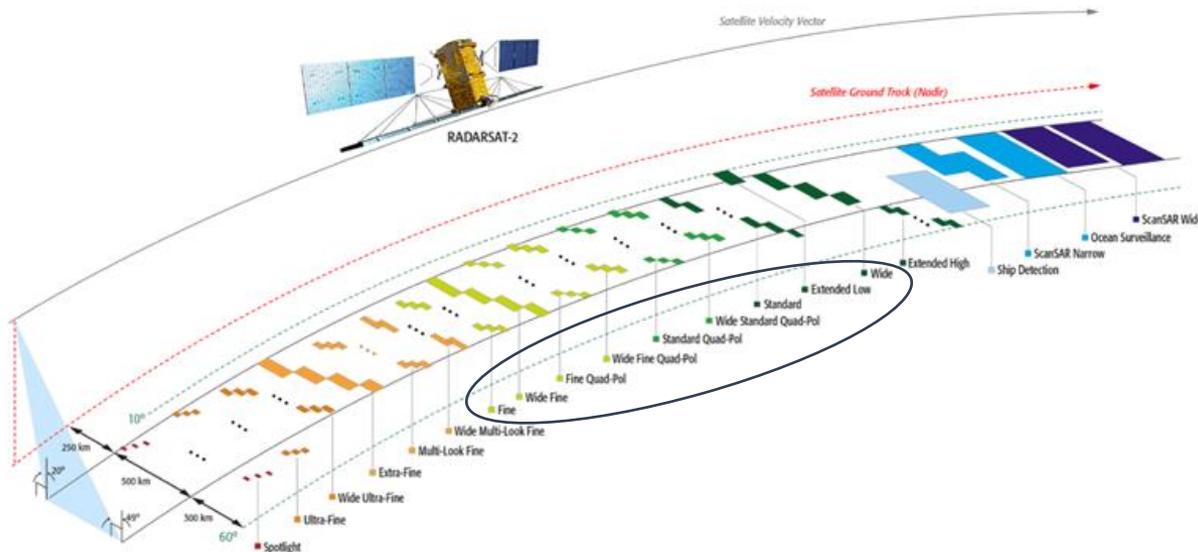
Données radar



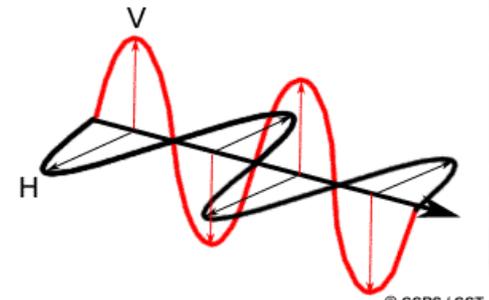
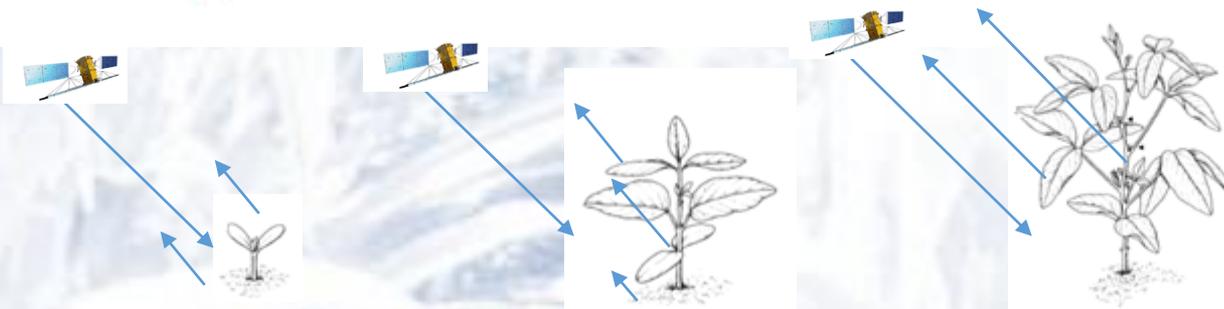
Nbre d'images avant le 15 juillet	Nbre d'images du 16 juillet au 15 septembre	Nbre d'images après le 15 septembre
5	9	21
15	34	29
5	17	15
21	33	15
16	26	20
17	30	20
79	149	120

Principalement avec une résolution spatiale de 10m à 30m

Quelques notions sur le RADAR ...

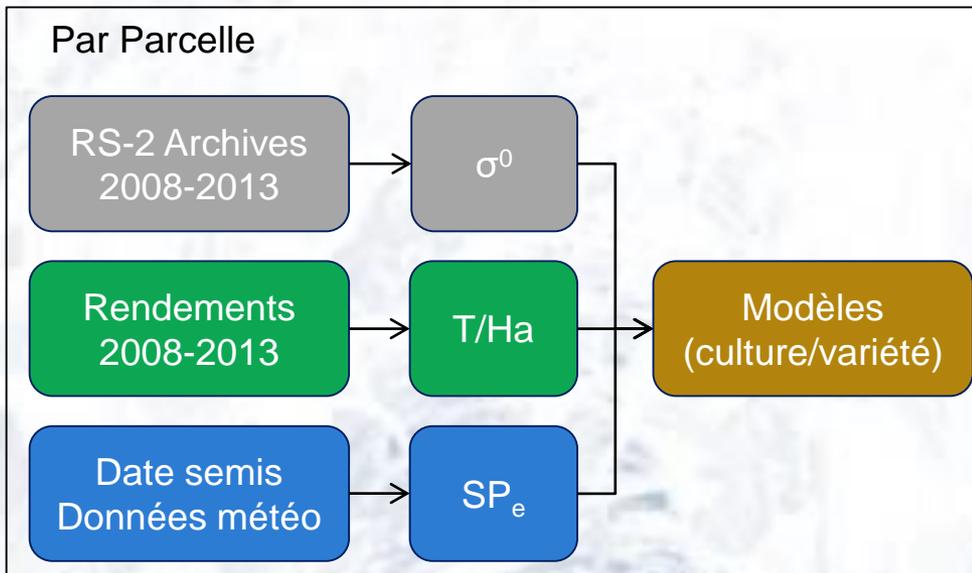


- Capteur micro-onde actif
- Bande C Fréquence 5,405 Ghz
- $\lambda \approx 5$ cm.
- Polarisations VV, VH, HV, HH
- Orbite Descendante (Matin)
- Orbite Ascendante (Soir)
- Plusieurs resolutions
- Traverse le couvert nuageux
- Dépend pas de l'éclaircement

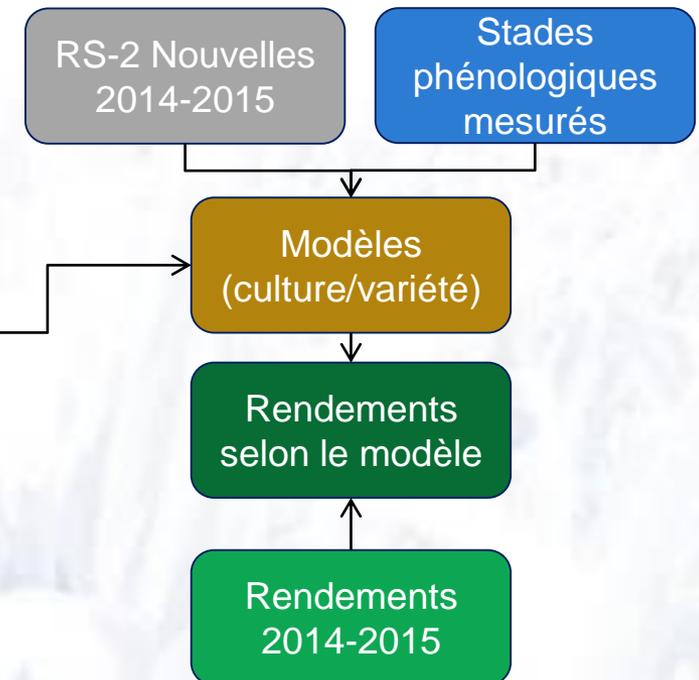


Méthodologie

Volet Développement (Zone d'étude)

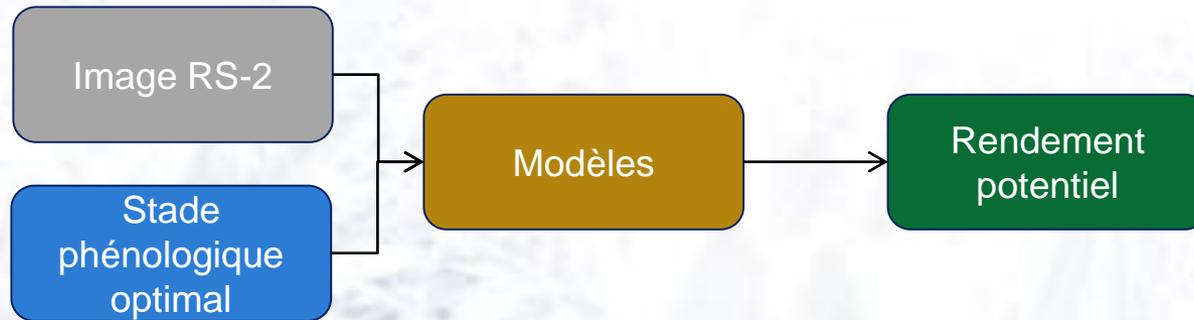


Volet Validation (20 parcelles)

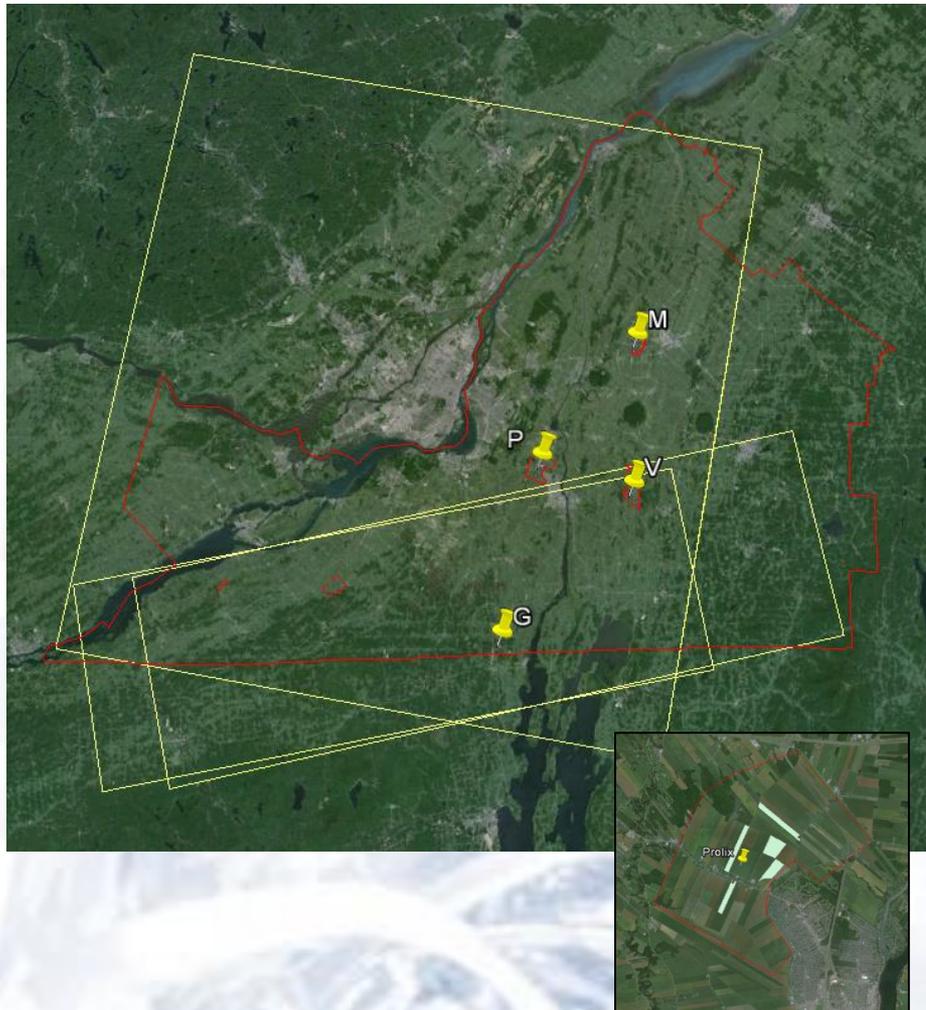


Finalité

Maïs et Soja (différentes variétés)



Validation



Images Radarsat-2 (2015)

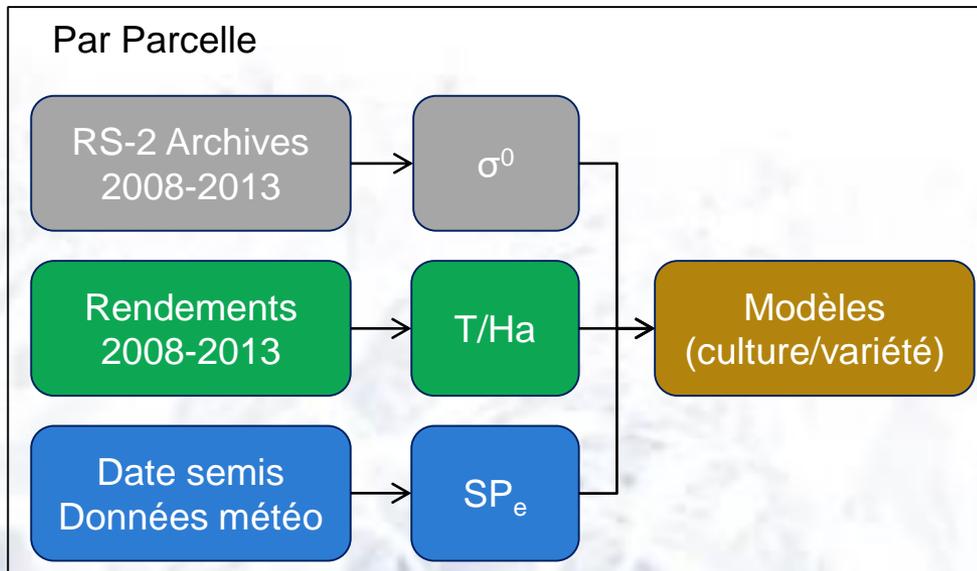
Scénario 2 (Résolution moyenne, orbite du soir)			
M	P	V	G
		08-juil	08-juil
		14-juil	17-juil
		18-juil	18-juil
31-juil	29-juil	28-juil	30-juil
07-août	06-août	05-août	10-août
11-août	11-août	11-août	11-août
19-août	21-août	17-août	24-août
		25-août	25-août
		25-août	
31-août	03-sept	03-sept	04-sept
04-sept	04-sept	04-sept	04-sept
16-sept	16-sept	16-sept	21-sept
28-sept	28-sept	28-sept	28-sept
	22-oct	22-oct	22-oct

Vert: Présence sur le terrain (Coop Fédérée)

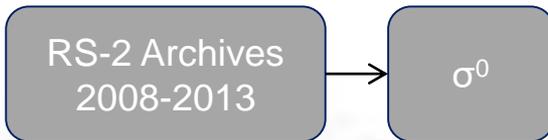
Terrain

Nom de ferme	Date	Heure	# champs	Type culture	Waypoints zone	Latitude	Longitude							
Ferme M	20 août 2015	10 h 30	#41	Soya	on-41-1	45,62081999	-73,04257094							
					on-41-2	45,62328092	-73,04428697							
					on-41-3	45,61658696	-73,04244194							
	20 août 2015	11 h 30	#52	Soya	on-52-1	45,62021599	-73,02140093							
					on-52-2	45,62140094	-73,02218397							
					on-52-3	45,62288194	-73,02201893							
						on-1-1	45,61606197					-73,05528002		
	Stade de croissance	% de recouvrement	Hauteur des plants (moyenne) en cm		Humidité du sol	Mouillure du feuillage	% mauvaises herbes					Population plants/ac fèves/ha	# Photos	Commentaires générales
	Stade 7:77	100%	111,4		Humide	Absence de rosée	2%						Nord	Le soya est tout versé avec une forte densité de slérotinia dans le champs.
		100%	101,0				2%							
		100%	122,6				2%							
	Stade 7:77	100%	103,8		Humide	Absence de rosée	2%							Il y a un peu de sclérotinia au bout des tiges et légèrement versé.
100%		105,4		2%										
100%		103,6		2%										
Stade 7:79	2 pouces	287,2		Humide	Absence de rosée	15%			Il n'y a presque pas de carence d'azote très beau plant. Par contre, un peu plus de rouille.					
	2pouces	277,9				2%								
	3 pouces	280,0				2%								
Stade 7:79	3 pouces	282,6		Humide	Absence de rosée	8%			On peut apercevoir un début de carence en azote. Par contre, une plus forte apparition de Kabatiellose.					
	3 pouces	286,7				2%								
	3 pouces	299,5				5%								
Stade 7:79	3 pouces	287,2		Humide	Absence de rosée	8%			Le maïs possède une carence en azote plus élevée que les autres champs soit de 2. De plus, on peut observer de la rouille.					
	4 pouces	279,0				5%								
	3 pouces	287,7				33%								

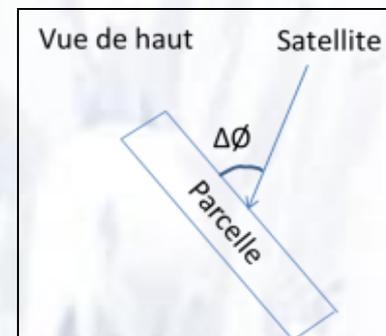
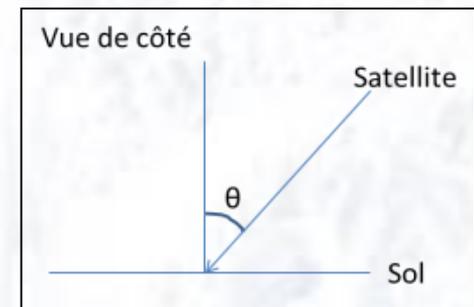
Développement



Développement



- Orthorectification
- Calcul de l'angle d'incidence et de la direction de visée
- Intercalibration
- Extraction de la rétrodiffusion moyenne à la parcelle

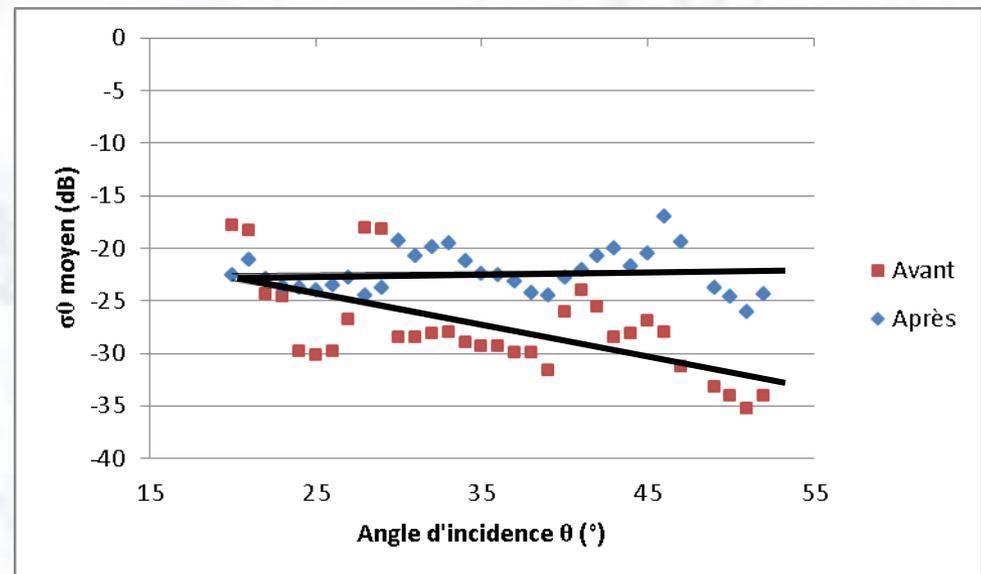
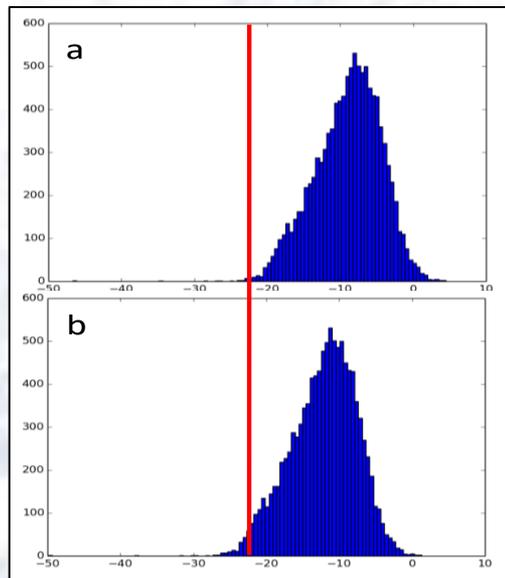


Intercalibration

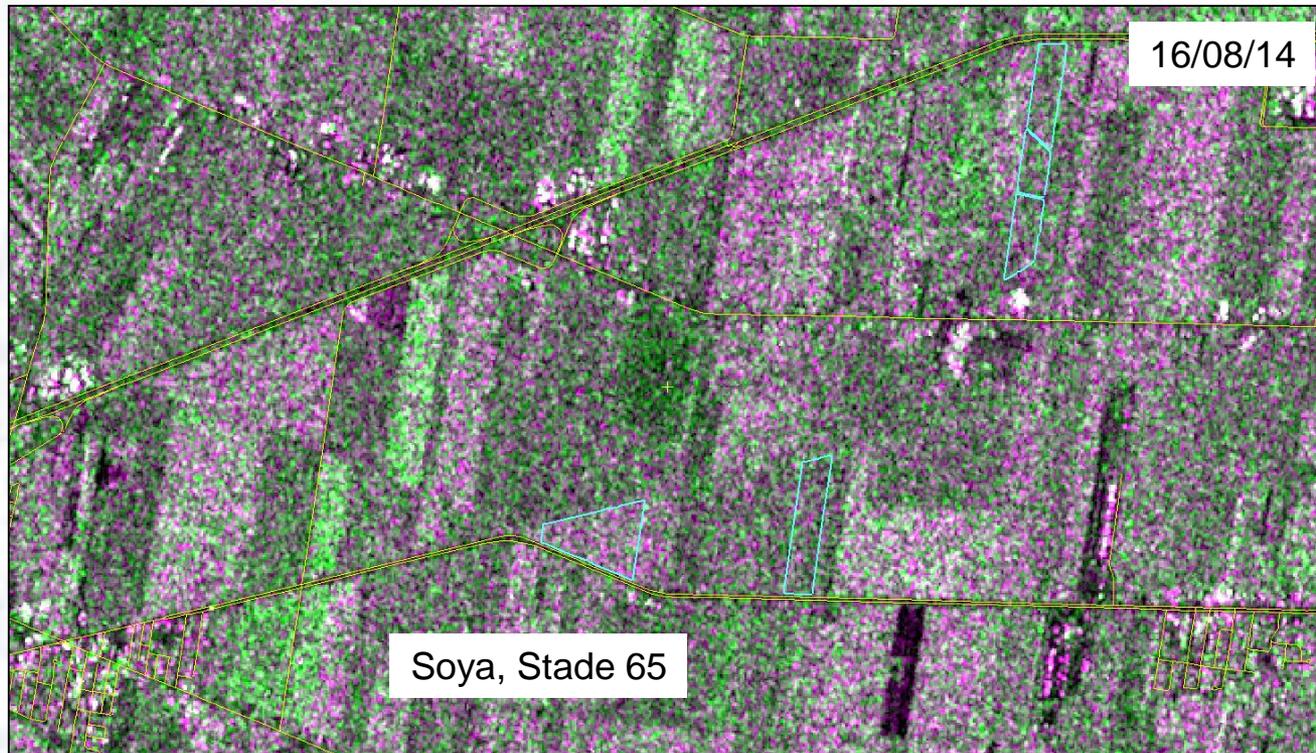
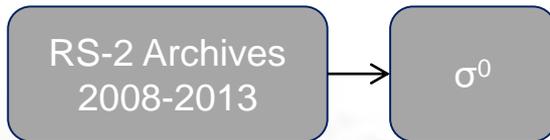
Problème: Archives = images acquises selon diverses configurations = variation du signal

Solution: Application d'une approche d'intercalibration

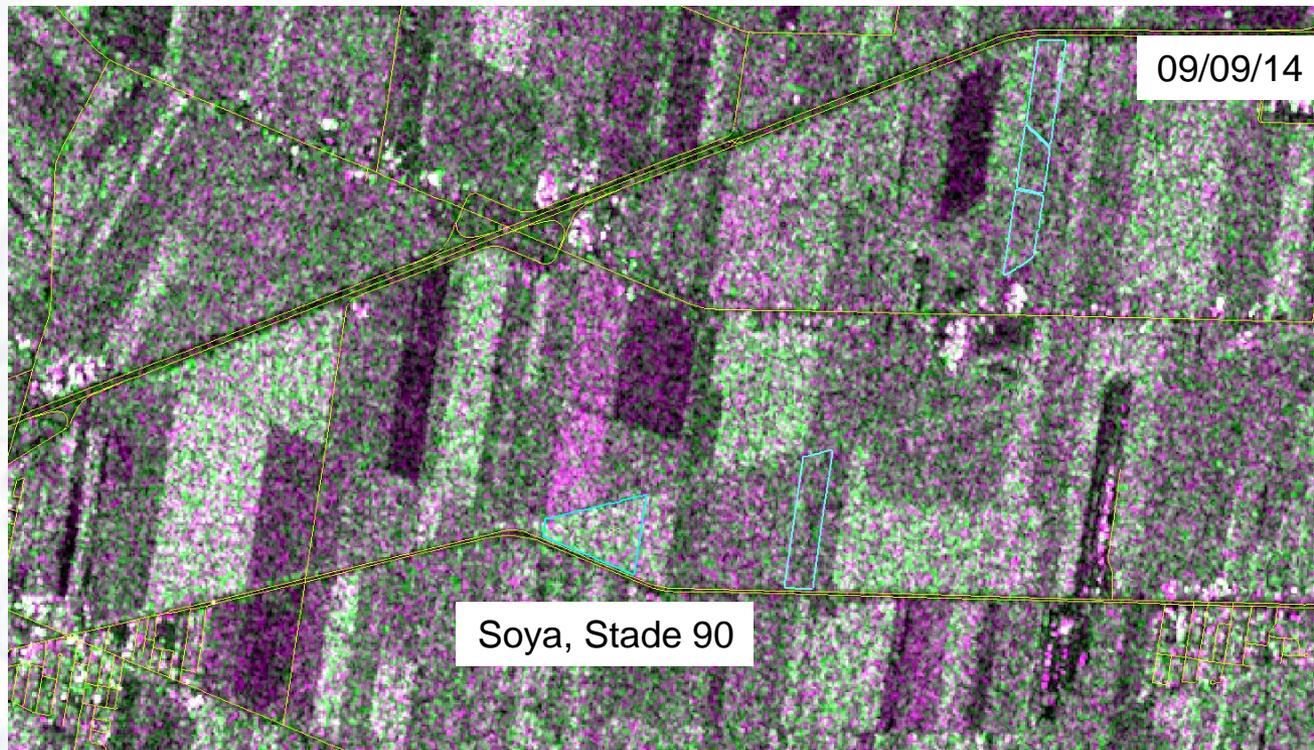
- Extraction pour chacune des images, des signatures radar de l'eau
- Moyenne de rétrodiffusion et coefficient de variation par polygone
- Histogramme des pixels d'eau des polygones avec un faible coefficient de variation
- Translation de l'histogramme de l'eau dans l'espace dB



Extraction de la rétrodiffusion moyenne par parcelle



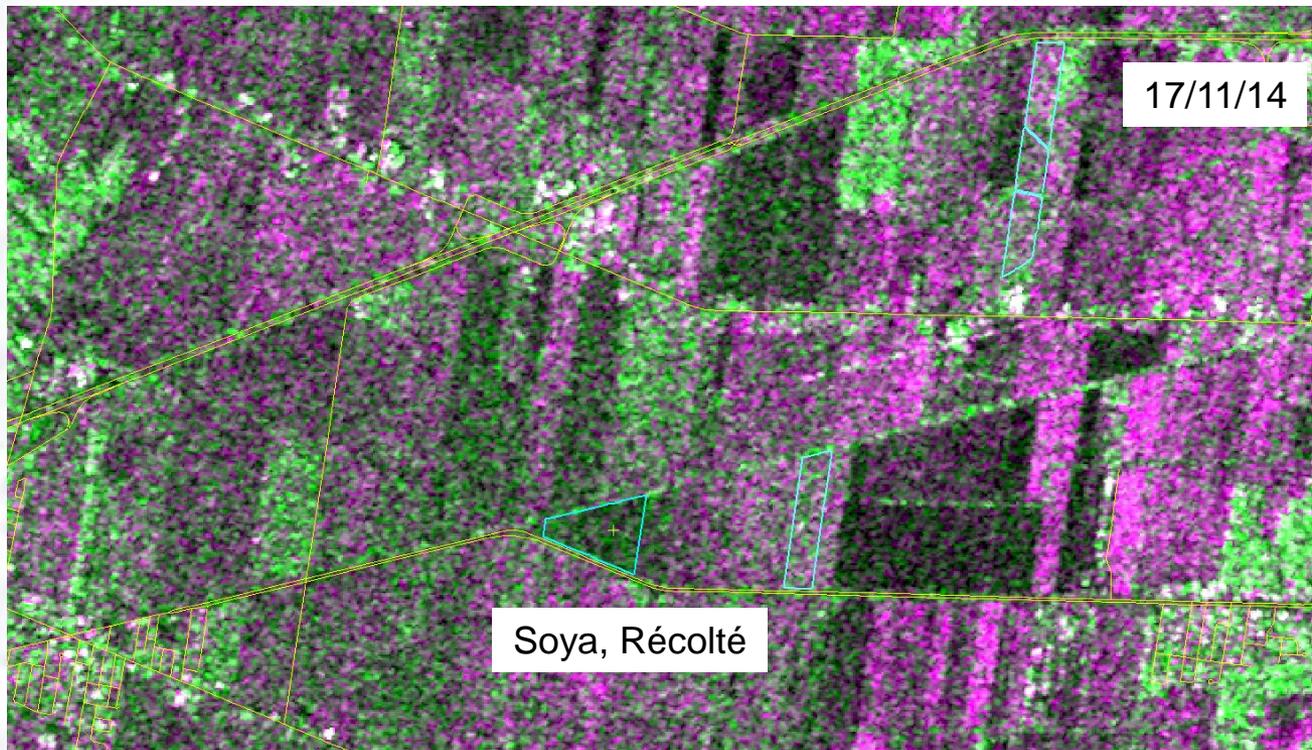
Extraction de la rétrodiffusion moyenne par parcelle



Extraction de la rétrodiffusion moyenne par parcelle

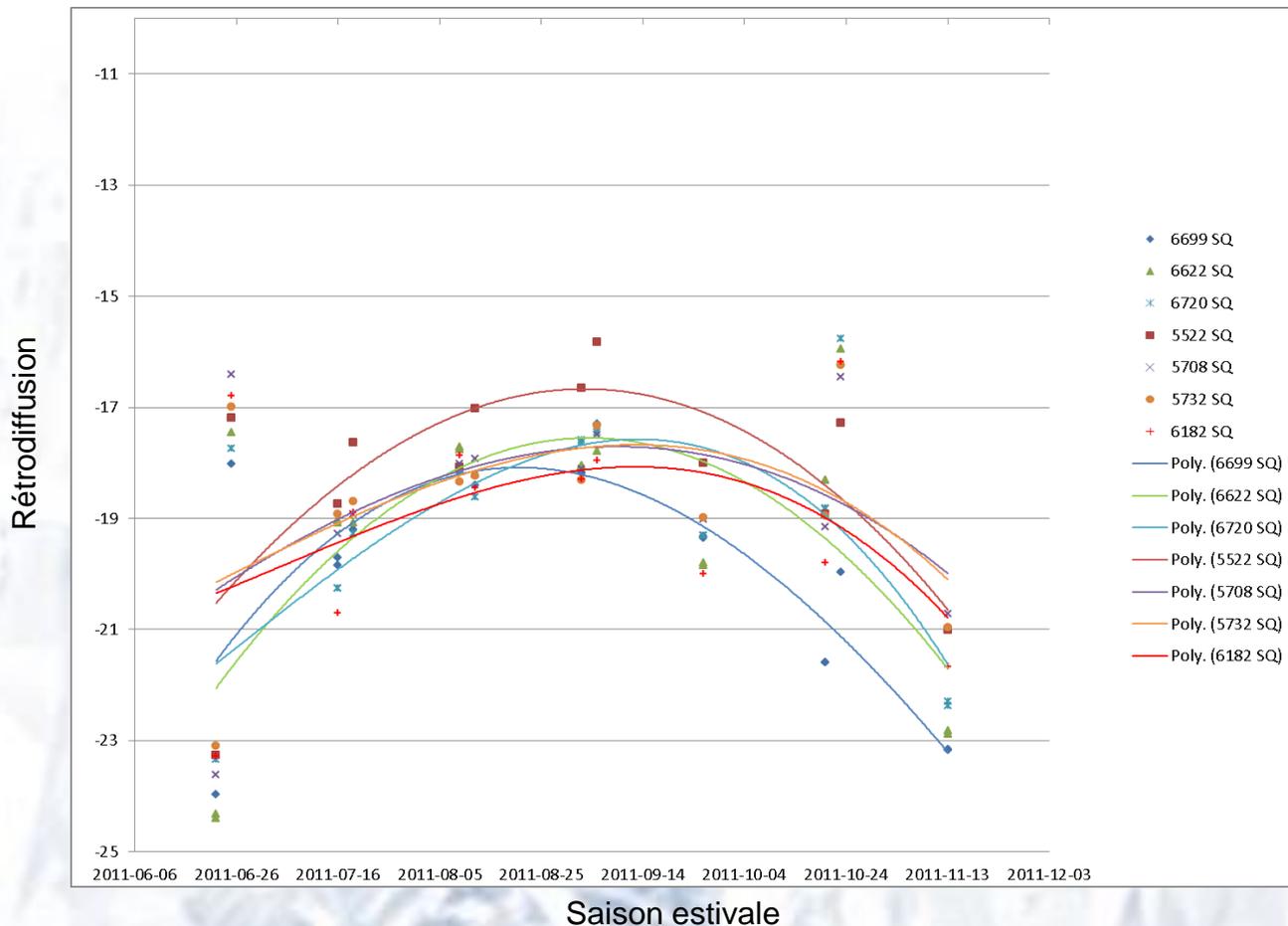
RS-2 Archives
2008-2013

σ^0

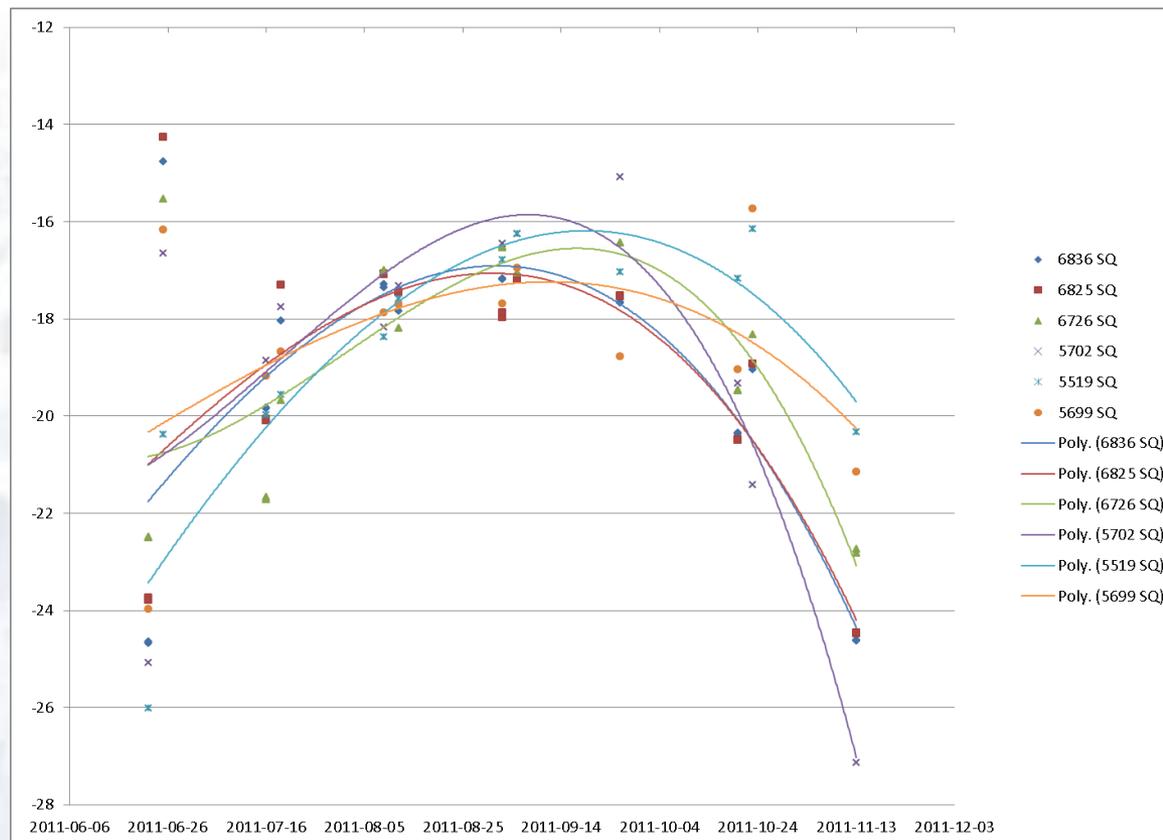


Comportement de la rétrodiffusion d'une parcelle de maïs au cours de la saison

Maïs - 2011
SQ- VH



Comportement de la rétrodiffusion d'une parcelle de Soya au cours de la saison



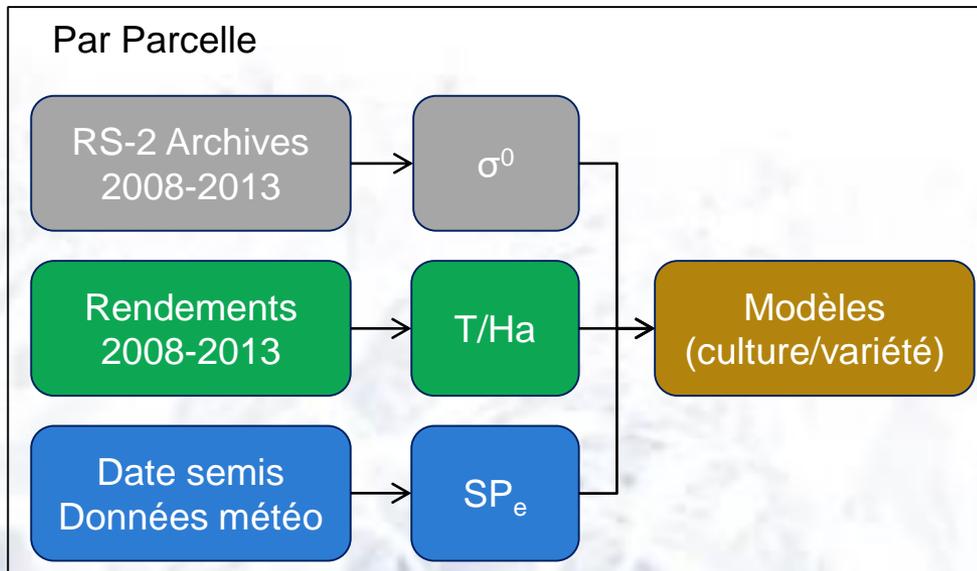
Soya - 2011
SQ- VH

Développement



- Tenir compte de la mouillure du feuillage
 - Jours de pluie
 - Rosée (orbite descendante, 6h du matin)

Développement

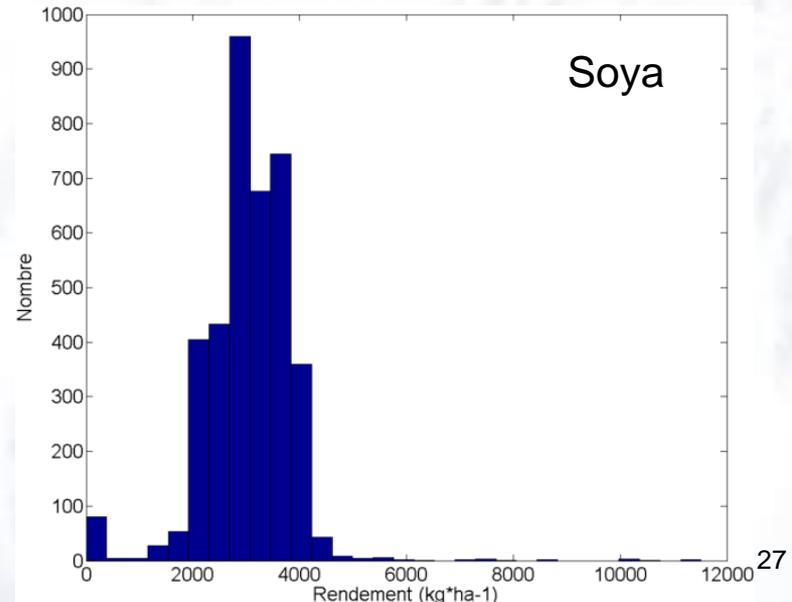
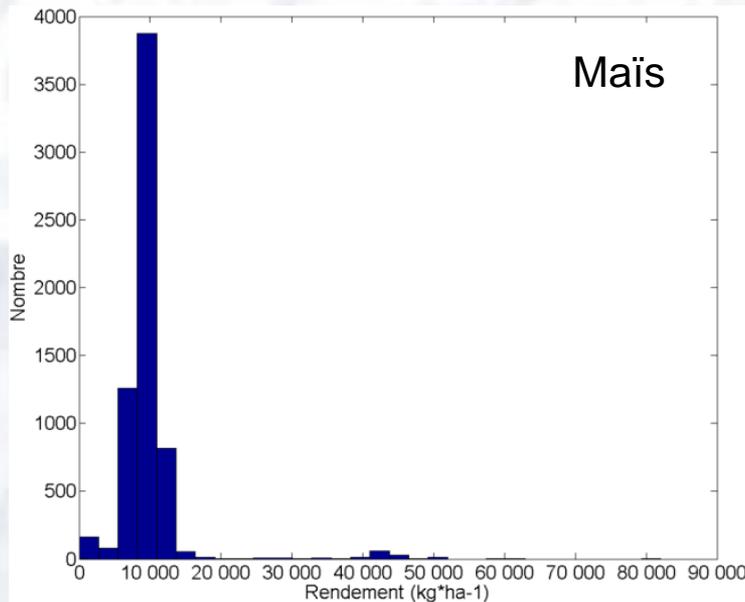


Développement

Rendements
2008-2013

Incertitude sur les données de rendement 2011-2013

- Réexaminer systématiquement la distribution des rendements pour chacune des cultures et pour chaque année
- Éliminer les rendements nuls
- Retirer les données incluses dans les premiers et derniers percentiles



Développement

Rendements
2008-2013

Incertitude sur les données de rendement 2008-2010

- Proviennent des capteurs de rendement
- Malgré tous les efforts investis, les données de rendement 2008-2010 présentent encore beaucoup d'anomalies, telles que d'importantes discontinuités spatiales des valeurs des points de mesures.
- Ces données requièrent des opérations additionnelles de nettoyage et de validation. Pour cette raison, elles ont finalement été écartées à la fois des jeux de données de calibration et de ceux de validation.

Développement

Rendements
2008-2013

Récupération des données de rendement 2014-2015

- Proviennent de capteurs de rendement
- Pas de discontinuité spatiale présente
- Les premiers et derniers percentiles ont été utilisés comme seuils de nettoyage
- Seulement 26 des 39 parcelles disponibles

Développement

Rendements
2008-2013

➤ Cultivar

Maïs: Nommé sur 1249 des 6533 parcelles (19%) → 165 noms différents

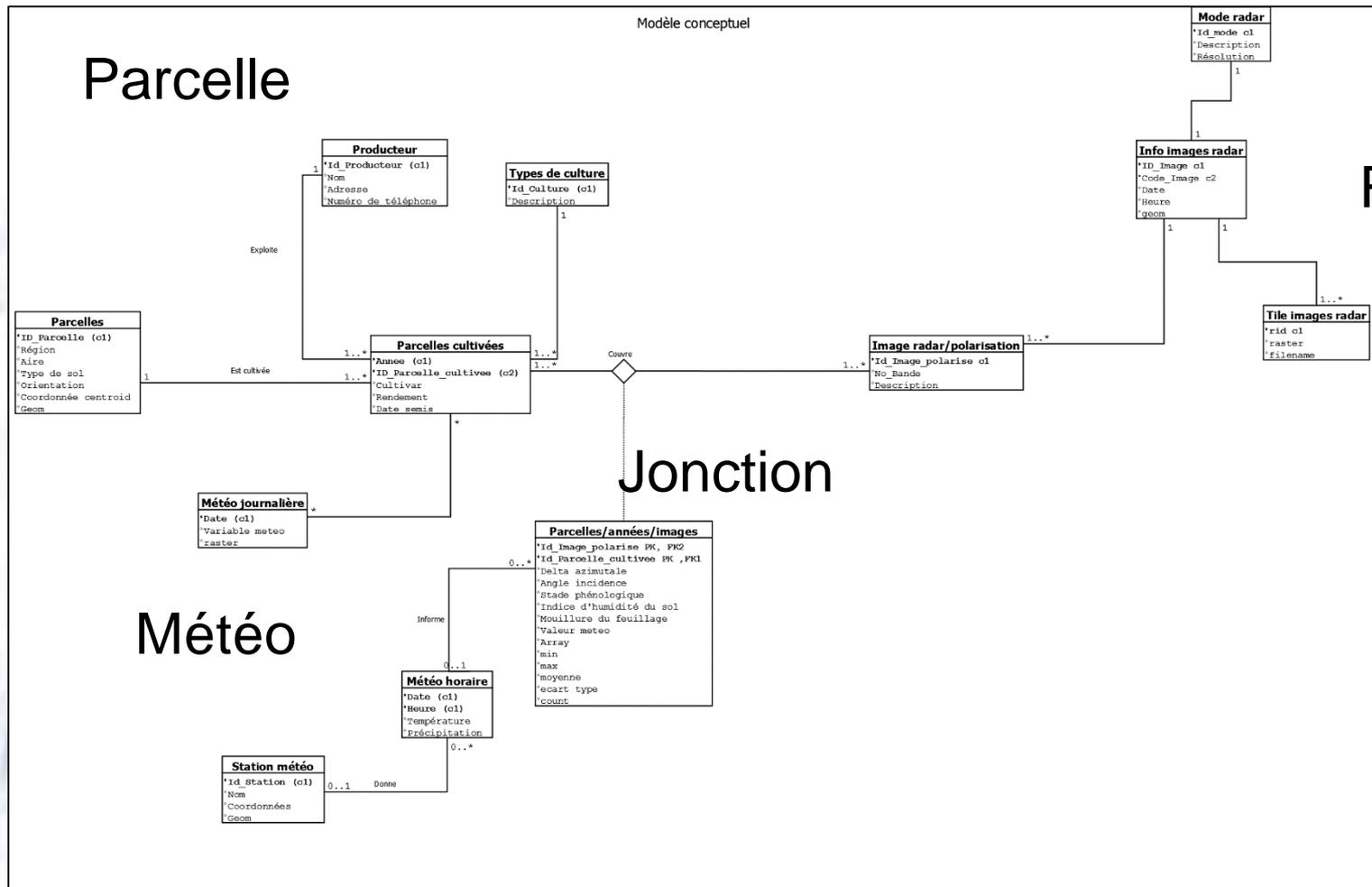
Soya: Nommé sur 679 des 3888 parcelles (17%) → 82 noms différents

Variétés calibrées pour l'Est du Canada (Jego et al., 2010; 2011)

Fichier de variété	UTM
CanMaisSE	> 3000
CanMaisNE	entre 2500 et 3000
CanMaisNE2	< 2500
CansoyEst	

- Liste des municipalités et leur UTM pour l'assurance récolte 2015 (FADQ, 2015).
- Attribuer à chaque parcelle la valeur d'UTM moyenne de la municipalité la plus près de la parcelle.

Structuration de la base de données

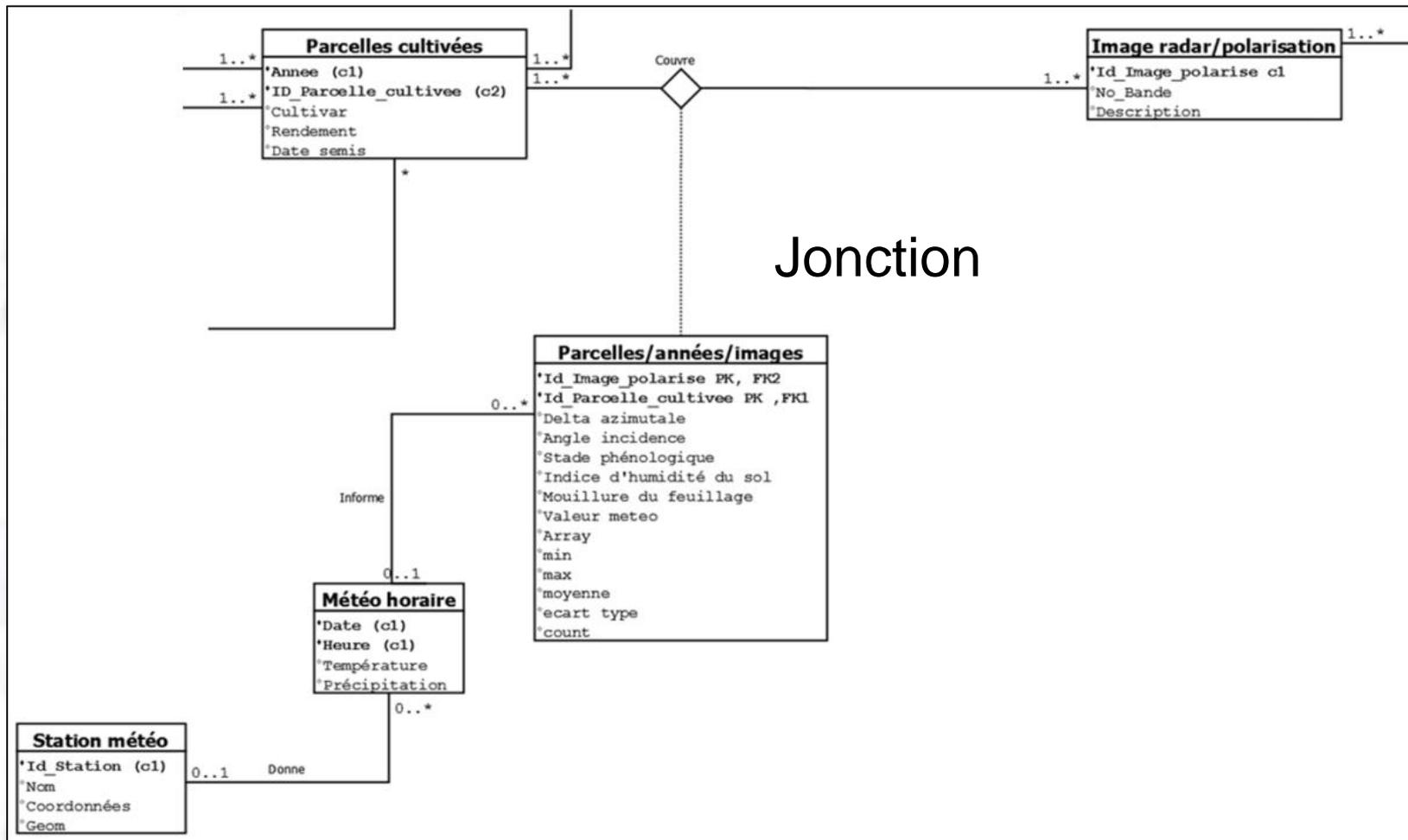


Radar

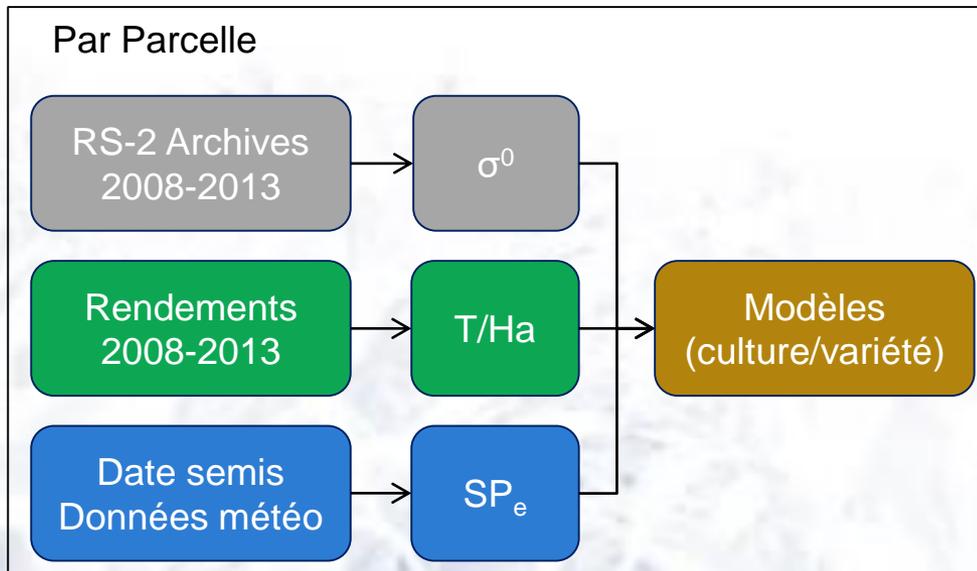
Jonction

Météo

Structuration de la base de données - Parcelle



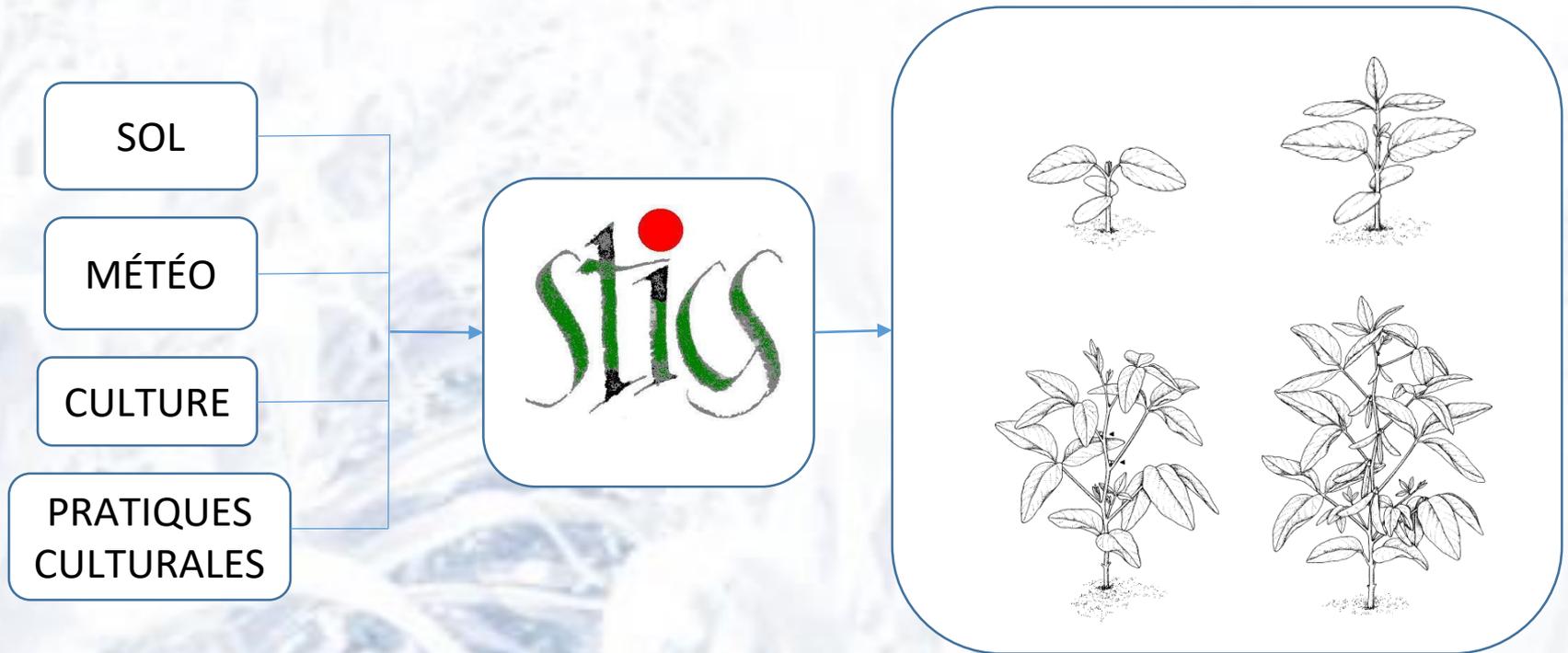
Développement



Développement

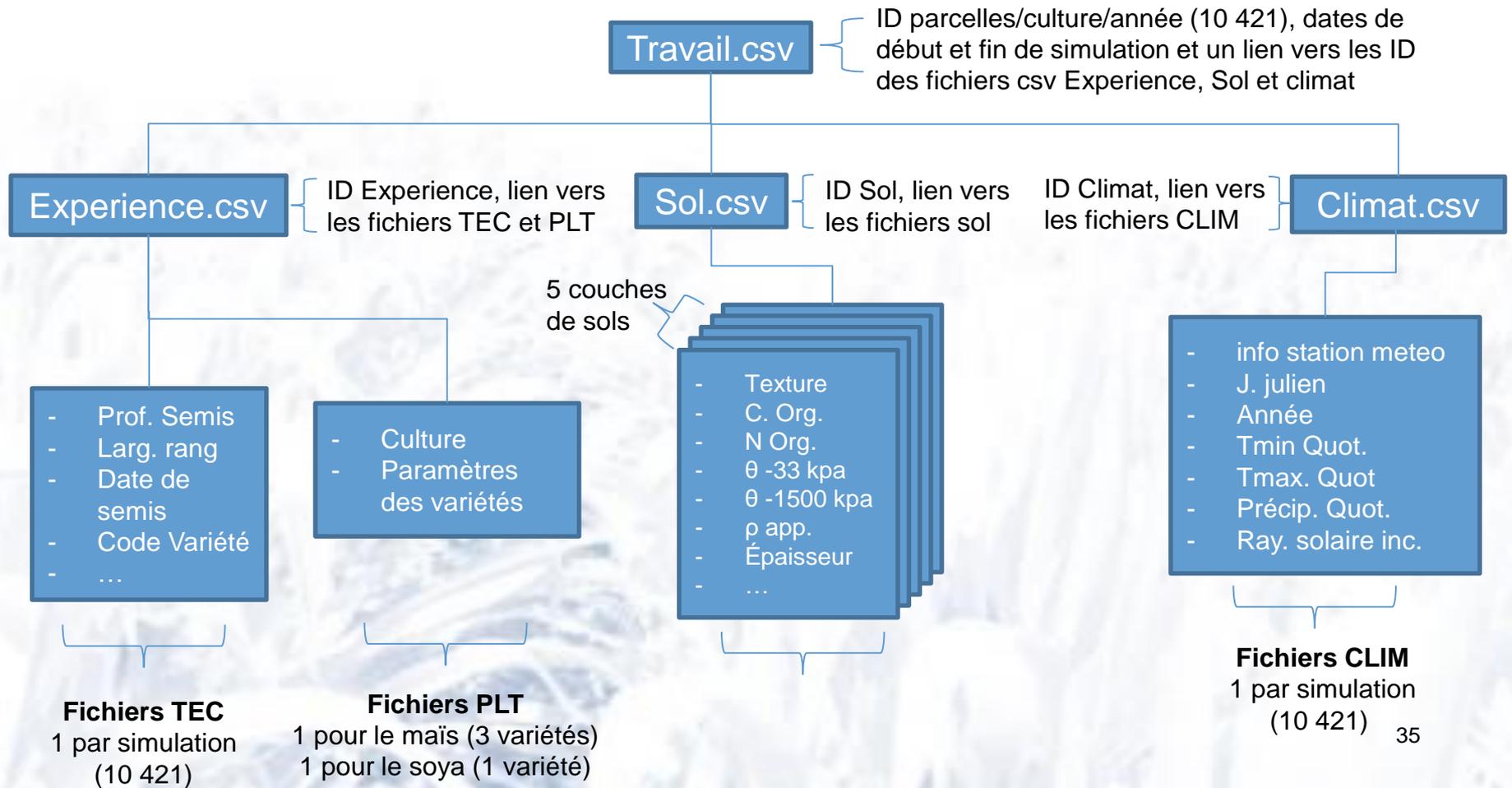
Estimation du stade
phénologique

STICS: Simulateur interdisciplinaire des cultures standards



Développement du modèle

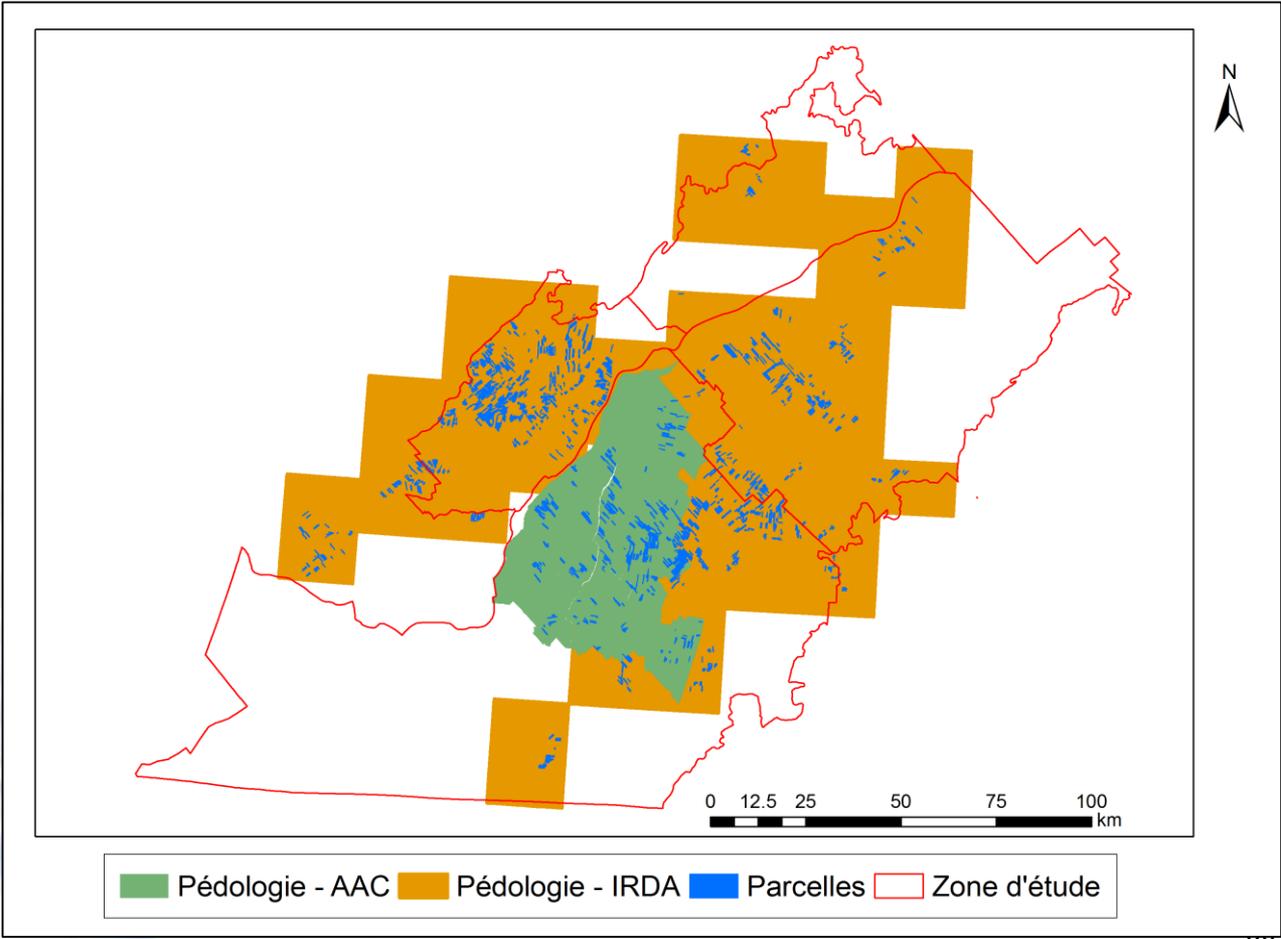
Formatage des fichiers pour l'exécution avec Matlab



Développement

Estimation du stade
phénologique

SOL

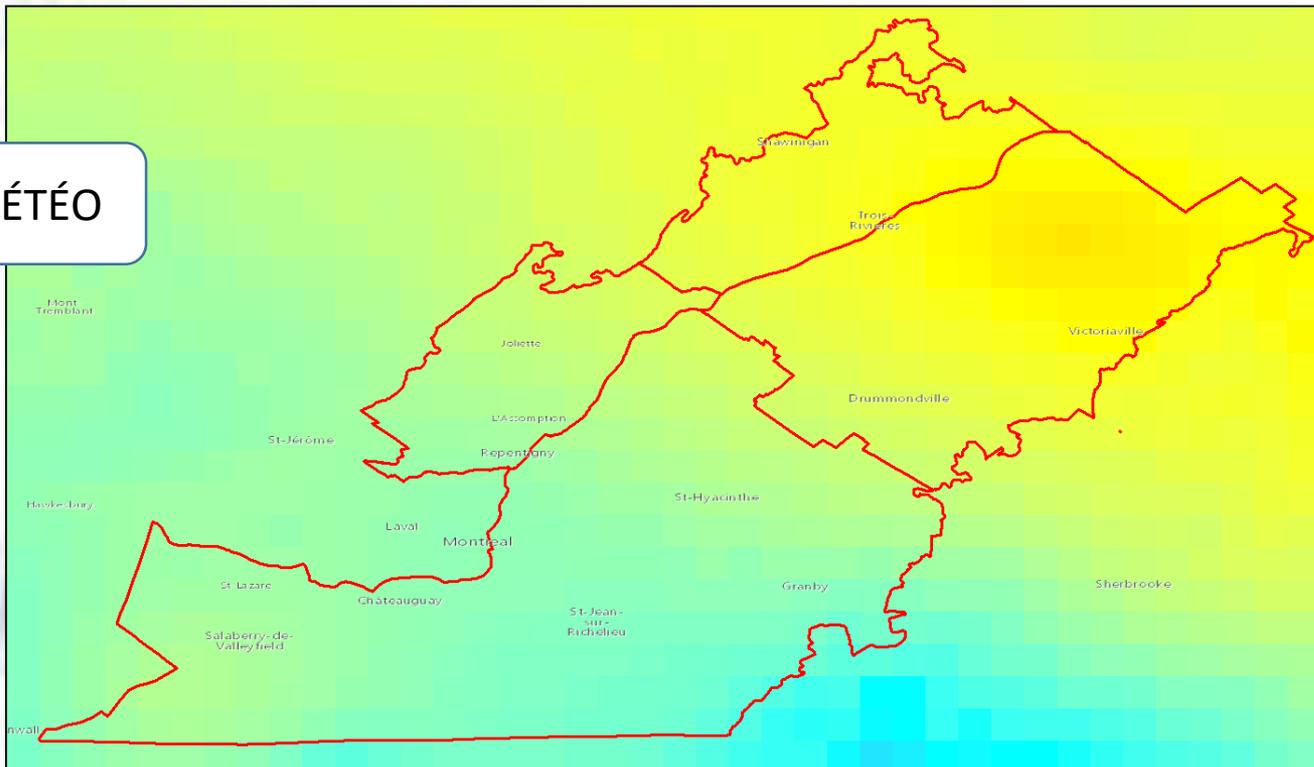


Développement

Estimation du stade
phénologique

Données météorologiques (NCEP North American Regional Reanalysis: NARR)

MÉTÉO



Moyennes
quotidiennes

Précipitations ou
température
min/max

Développement

Estimation du stade
phénologique

CULTURE

- 3 variétés de maïs et une variété de soya

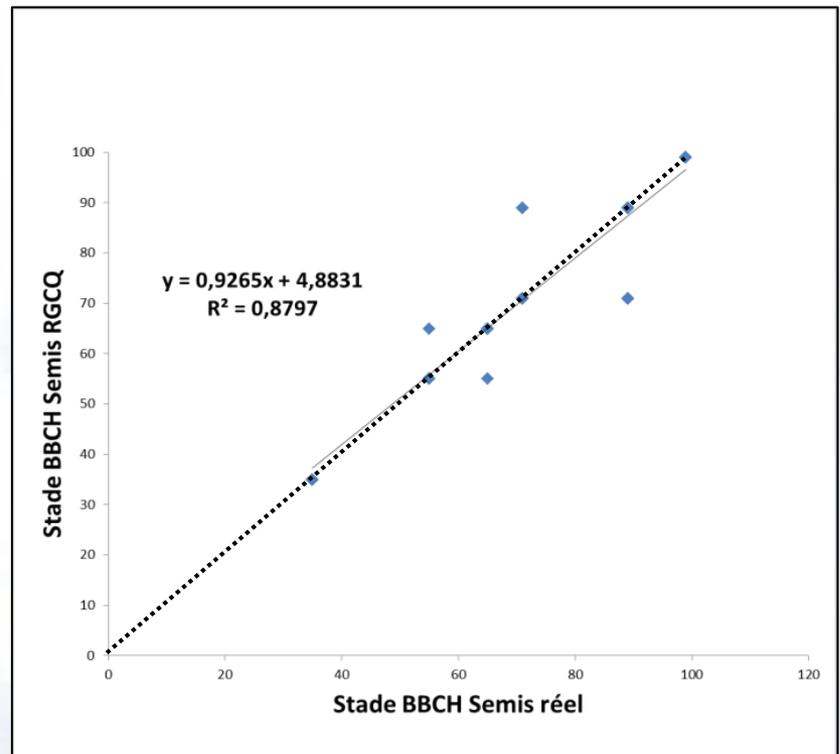
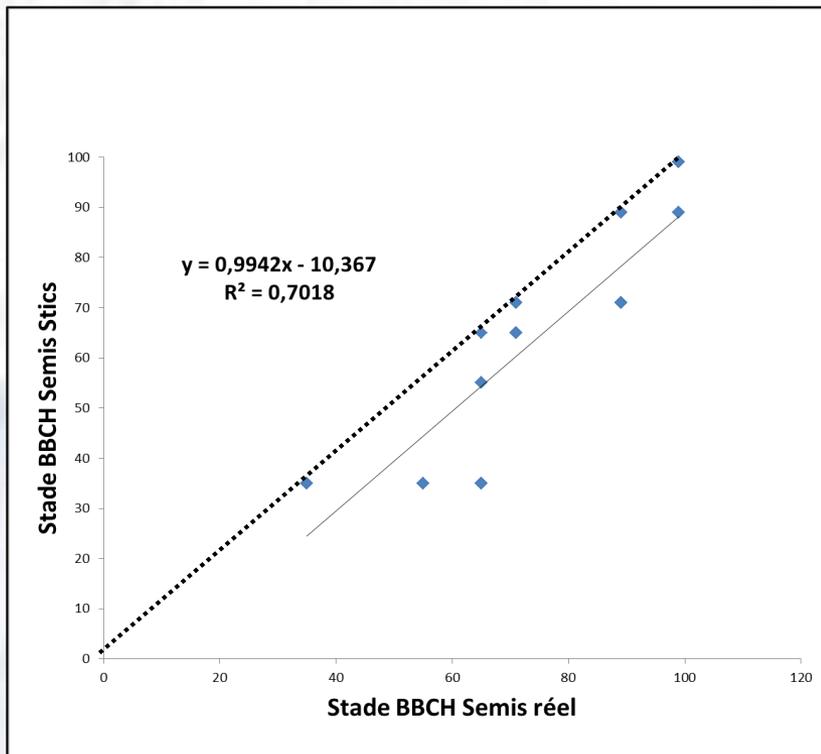
PRATIQUES
CULTURALES

- Date de semis réelle généralement manquante
- La date de semis estimée par STICS causait un délai important de démarrage de la croissance des plantes
- Déterminer un moyen d'améliorer la qualité de l'approximation de la date de semis. Plusieurs stratégies tentées
- Solution retenue: rapports annuels des Réseaux des Grandes Cultures du Québec (RGCCQ)

Développement

Estimation du stade phénologique

Corrélation entre les stades phénologiques (BBCH) simulés à partir des dates réelles de semis pour les parcelles 2015, à partir des dates de semis estimées par STICS et à partir de celles établies au moyen des données historiques du RGCQ pour le maïs

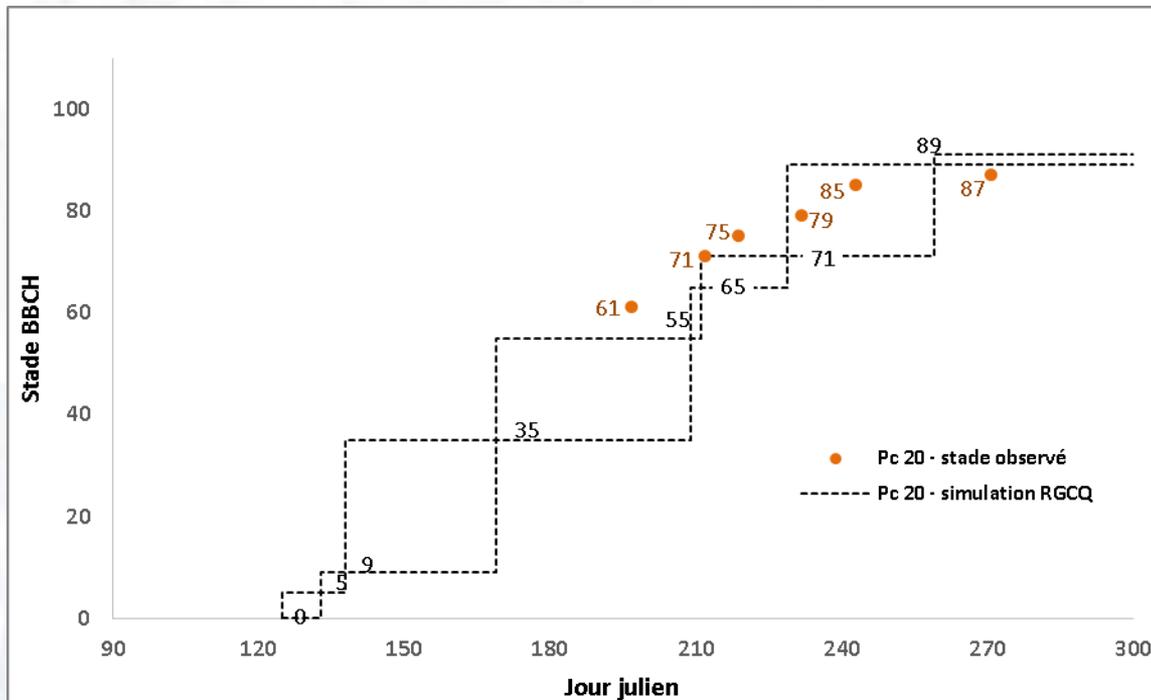


Développement

Estimation du stade phénologique

Validation de STICS pour l'estimation des stades phénologiques

- Résultats de STICS comparés avec les mesures recueillies sur le terrain en 2014 et 2015.



Maïs

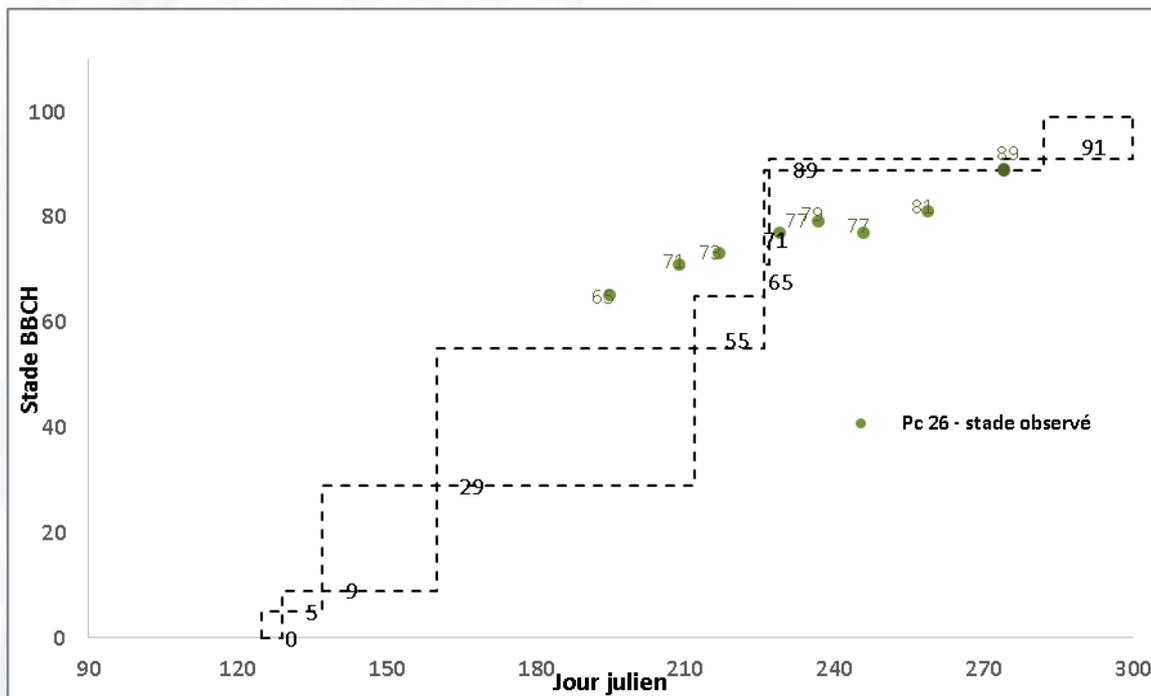
- *STICS estime des dates de début de stade*
- *L'observation terrain correspond au stade observé spécifiquement le jour de la visite (et plus détaillé)*

Développement

Estimation du stade phénologique

Validation de STICS pour l'estimation des stades phénologiques

- Résultats de STICS comparés avec les mesures recueillies sur le terrain en 2014 et 2015.



Soya

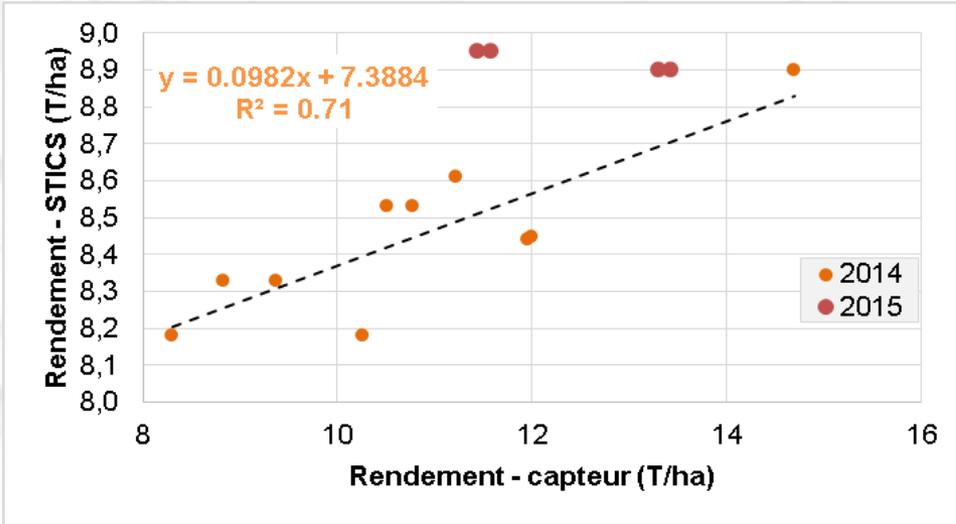
- Pour le stade 55-65 (inflorescence et floraison)
- Simulation 1 à 10 jours en retard

Développement

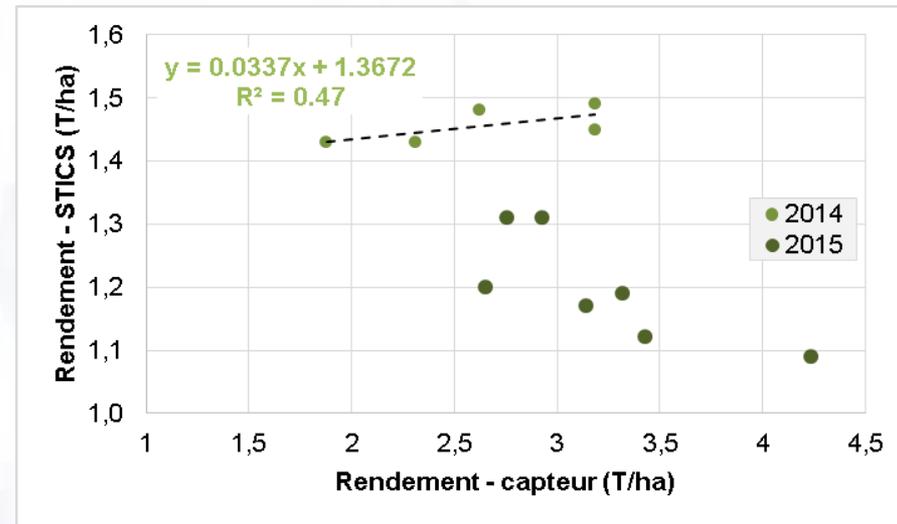
Estimation du stade
phénologique

Validation de STICS pour l'estimation des rendements

- Résultats de STICS comparés avec les rendements réels en 2014 et 2015 (quelques parcelles).

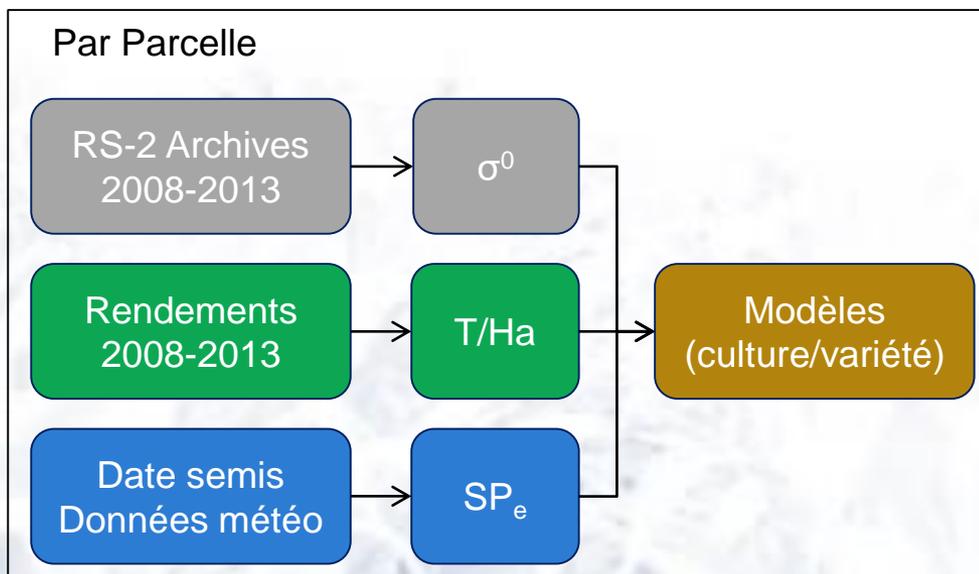


Maïs



Soya

Développement



Développement

Développement des modèles

- Modèles de rendement par régression linéaire « Stepwise »
- Défi: déterminer des relations significatives, tout en conservant un nombre de couples « parcelle/rétrodiffusion/rendement » statistiquement représentatif.

Validation des modèles

- Couples des données 2014-2015 trop peu nombreux (ajoutés à la calibration)
- Procédure de validation croisée

Automatisation des procédures

- Interface graphique usager

Résultats

Développement
des modèles

- Regroupement des couples selon:
 - la culture
 - l'intervalle de stades phénologiques estimé par STICS
 - la polarisation (HV-VH et VV, VV/VH)
 - l'orbite (ascendante et descendante)
 - la résolution spatiale
- Processus itératif
- Corrélations significatives avec:
 - Jours de pluie (pas de pluie le jour de l'acquisition)
 - Orbite (Ascendante - soir)
 - Stade phénologique (Entre 55 et 65) correspondant à la sortie de l'inflorescence ou épiaison jusqu'à la floraison et anthèse
 - Nombre de pixels par parcelle (>400 ou >200)
 - Coefficient de variation de l'intercalibration (<25% ou <30%)

Résultats

Quelles conditions d'acquisition permettent une estimation optimale du rendement ?



Images sans pluie le jour de l'acquisition

Orbite: ascendante

Polarisations VV et VV/VH

>200 ou >400 pixels par parcelle

Quel est le meilleur moment durant la saison pour estimer le rendement des cultures de soya avec le RADAR ?



Stade phénologique (entre 55 et 65) correspondant au début de l'inflorescence jusqu'à la floraison.



Résultats

Développement
des modèles

- Soya: Relations significatives

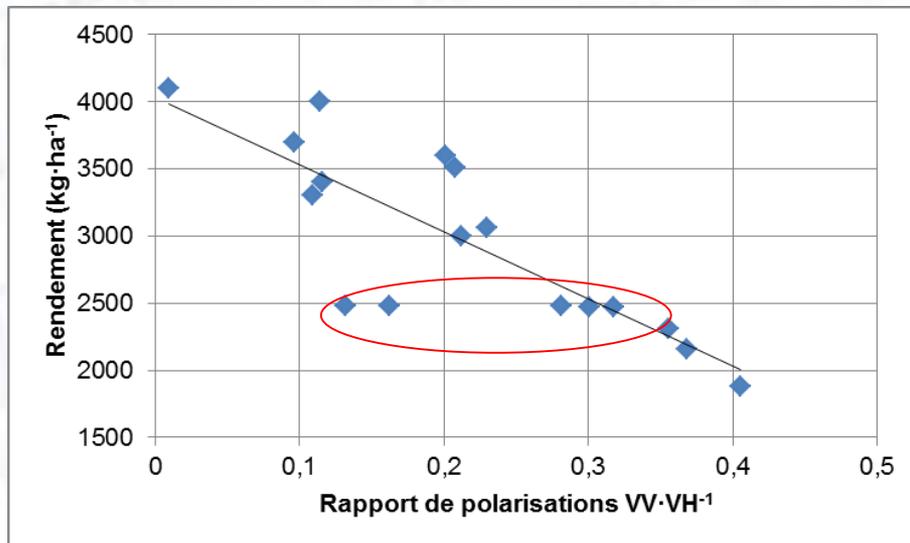
Nom du modèle	Nb minimum de pixels par parcelle	Coefficient de variation	Nombre de couples	R ² Calibration	RMSE (kg/ha)
Soya-1-VV	400	<25%	17	0,62	430
Soya-1-VV-n	400	<25%	12	0,68	399
Soya-2-VV	200	<25%	37	0,42	456
Soya-2-VV-n	200	<25%	28	0,47	436
Soya-1-VVVH	400	<25%	17	0,80	335
Soya-1-VVVH-n	400	<25%	12	0,88	266
Soya-2-VVVH	200	<25%	37	0,54	400
Soya-2-VVVH-n	200	<25%	28	0,62	364

Résultats

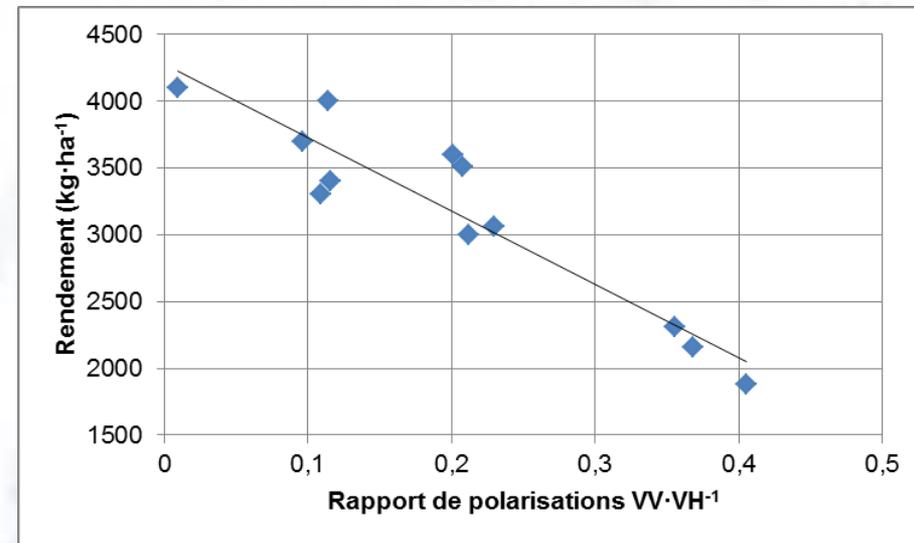
Développement
des modèles

- Rapport VV/VH, parcelles de 400 pixels minimum
- Élimination des valeurs de rendements douteuses (rendement identique au kg près, pour des parcelles différentes)

Soya-1-VVVH



Soya-1-VVVH-n

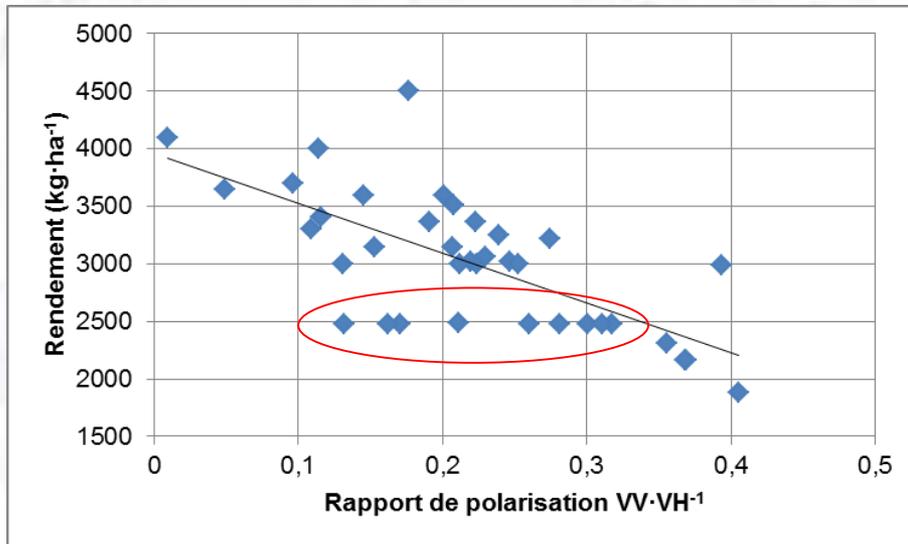


Résultats

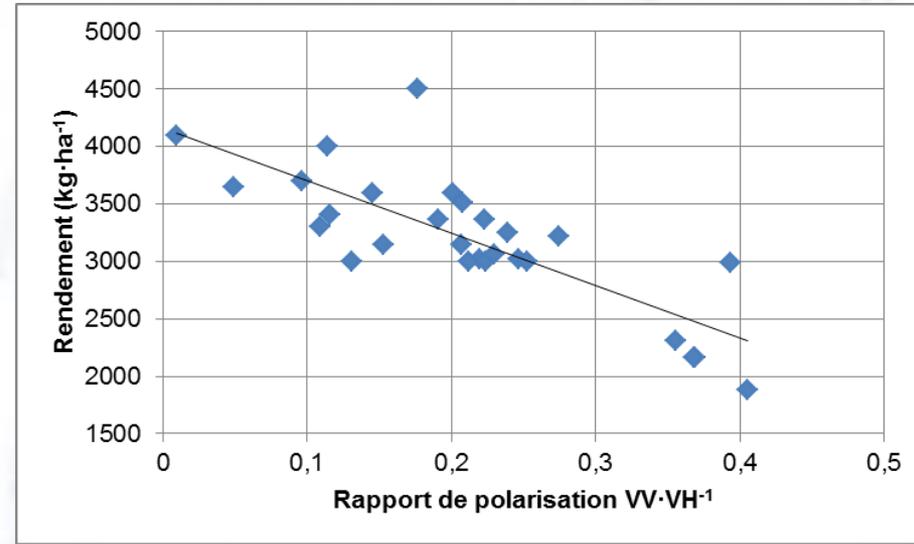
Développement
des modèles

- **Soya-2:** Si on accepte les parcelles jusqu'à 200 pixels.

Soya-2-VVVH



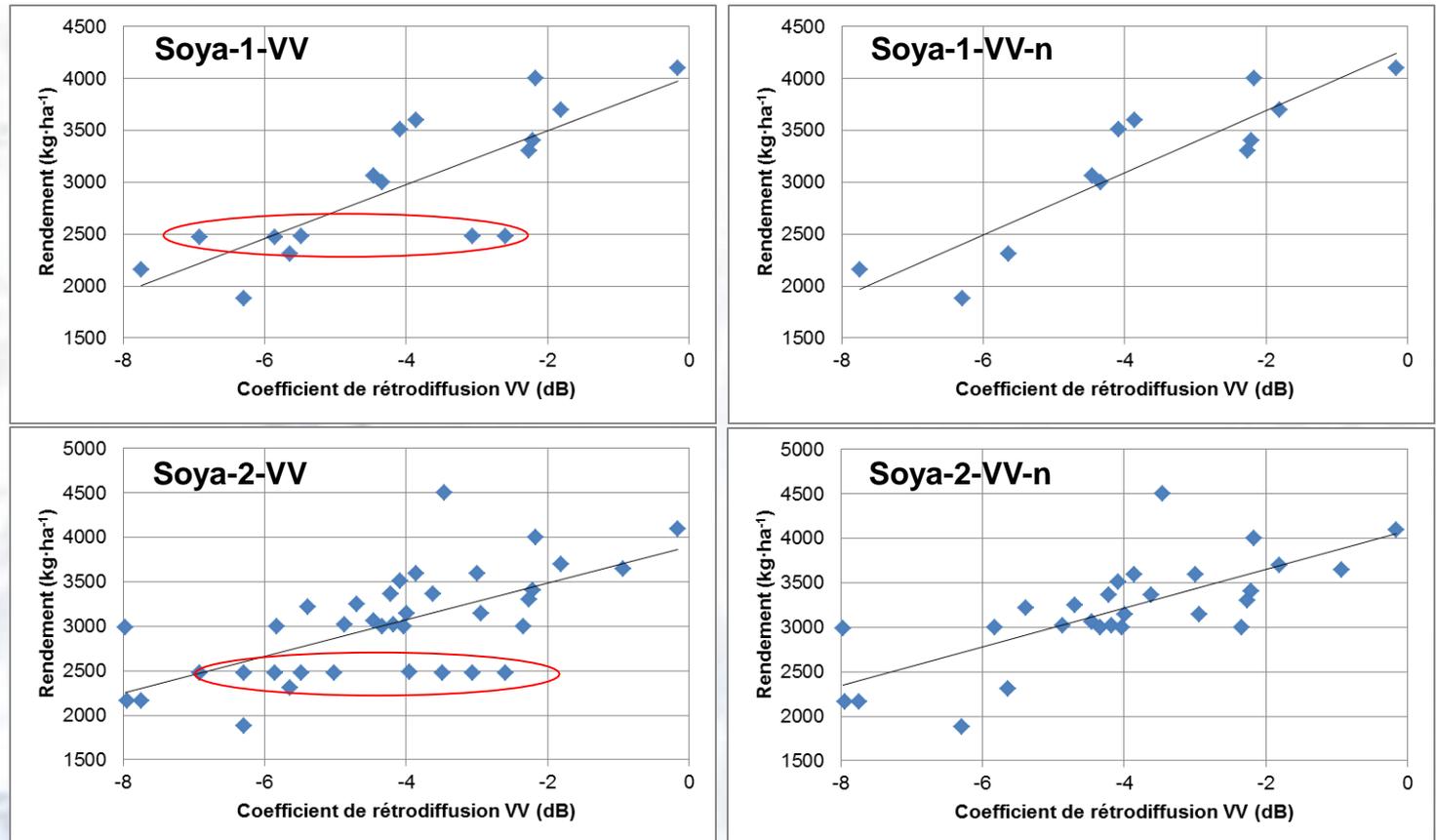
Soya-2-VVVH-n



Résultats

Développement
des modèles

- Avec la polarisation VV

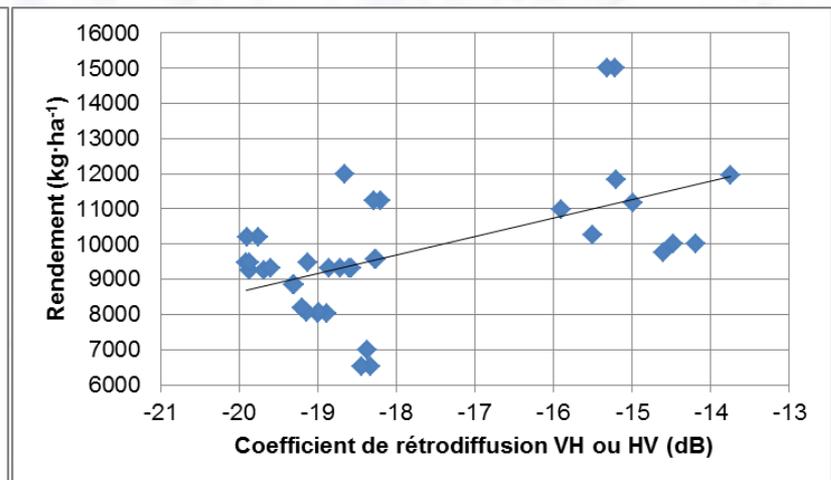
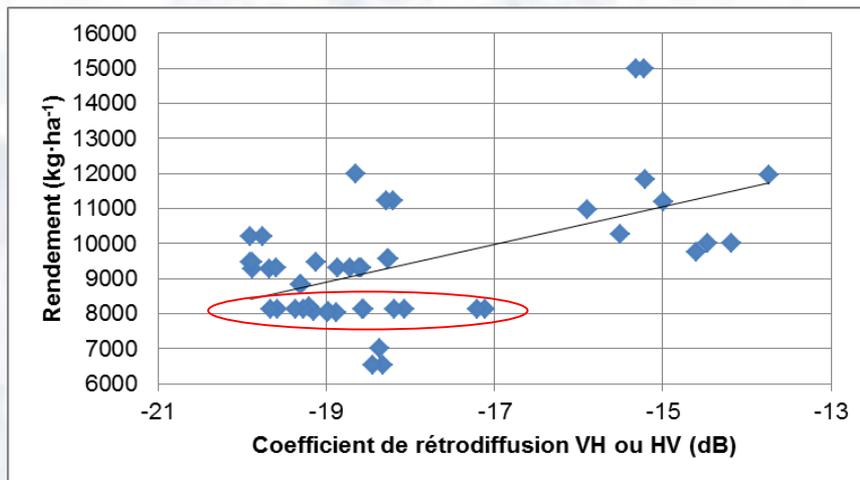


Résultats

Développement
des modèles

- Maïs: Relations non-significatives

Nom du modèle	Nb minimum de pixels par parcelle	Coefficient de variation	Nombre de couples	R ² Calibration	RMSE (kg/ha)
Maïs-1-HVVH	400	<30%	48	0,29	1499
Maïs-1-HVVH-n	400	<30%	38	0,30	1570

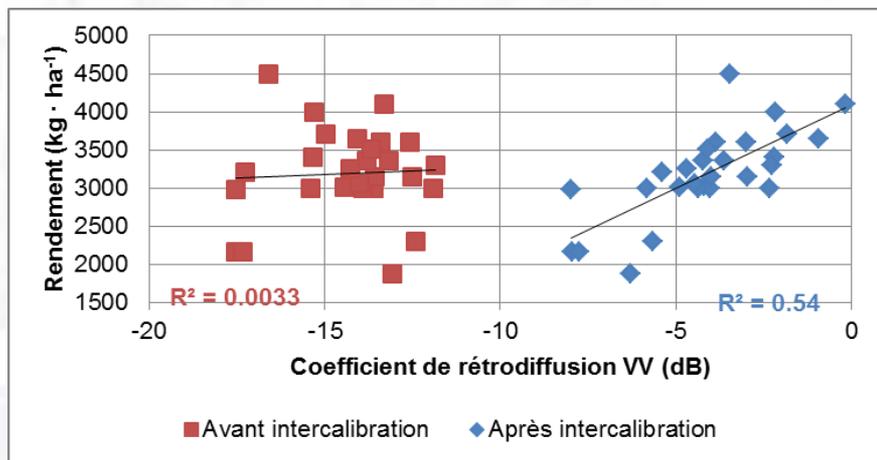


Résultats

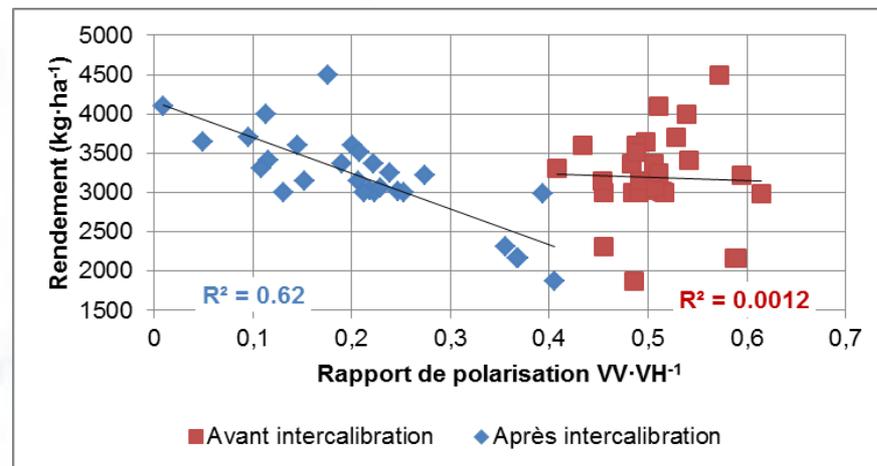
Développement
des modèles

- Apport de l'intercalibration

Soya-2-VV-n



Soya-2-VVnH-n



Résultats

Validation des
modèles

- Résultats de la validation croisée

Nom du modèle	Nombre de couples	R ² Validation	RMSE (kg/ha)	Biais (kg/ha)
Soya-1-VV	17	0,33	462	-21
Soya-1-VV-n	12	0,52	332	-57
Soya-1-VVVH	17	0,44	433	1
Soya-1-VVVH-n	12	0,74	289	-24
Soya-2-VV	37	0,40	387	56
Soya-2-VV-n	28	0,52	284	44
Soya-2-VVVH	37	0,37	395	34
Soya-2-VVVH-n	28	0,56	307	36
Maïs-1-HVVH	48	0,17	1394	71
Maïs-1-HVVH-n	38	0,17	1462	54

Résultats

Validation des modèles

- Indice Nash-Sutcliffe
- Qualité des relations établies entre la rétrodiffusion et le rendement agricole
- > 0.4 = acceptable ; >0.6 = souhaitable

$$E = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$$

Modèle	Indice Nash-Sutcliffe Validation croisée
Maïs-1-HVVH	0.13
Maïs-1-HVVH-n	0.13
Soya-1-VV	0.31
Soya-1 -VVVH	0.43
Soya-1-VV-n	0.48
Soya-1 -VVVH-n	0.73
Soya-2-VV	0.39
Soya-2-VVVH	0.32
Soya-2-VV-n	0.60
Soya-2-VVVH-n	0.52

Résultats

Validation des modèles

- Erreur relative (RMSEr)
- Précision des rendements agricoles estimés
- < 20% = acceptable ; <10% = souhaitable

$$\text{RMSEr} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right)^2}$$

$$\text{BIAS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)$$

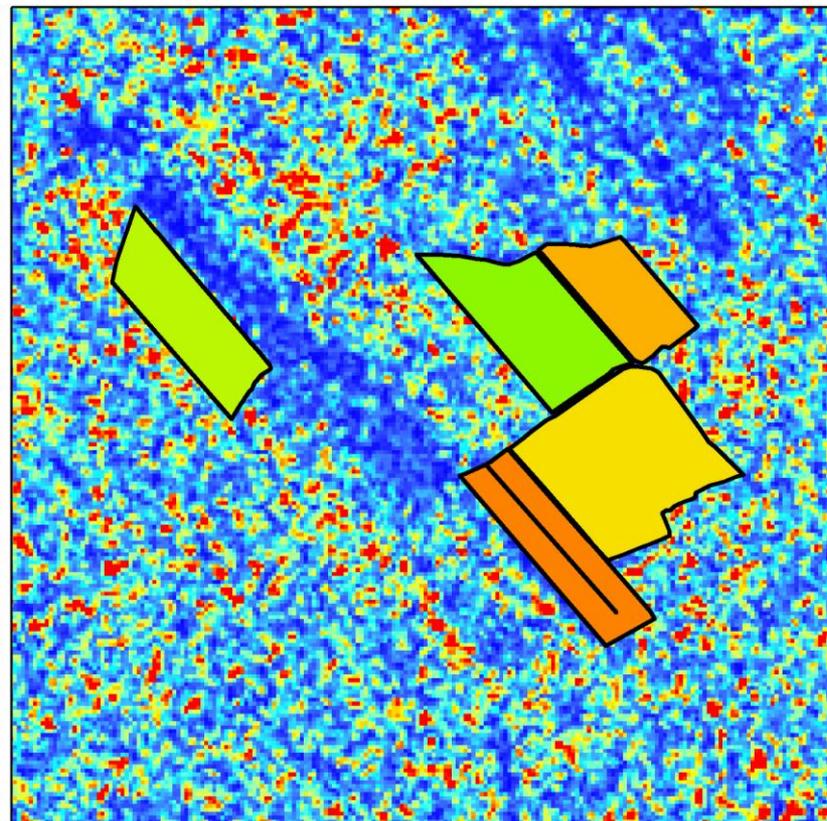
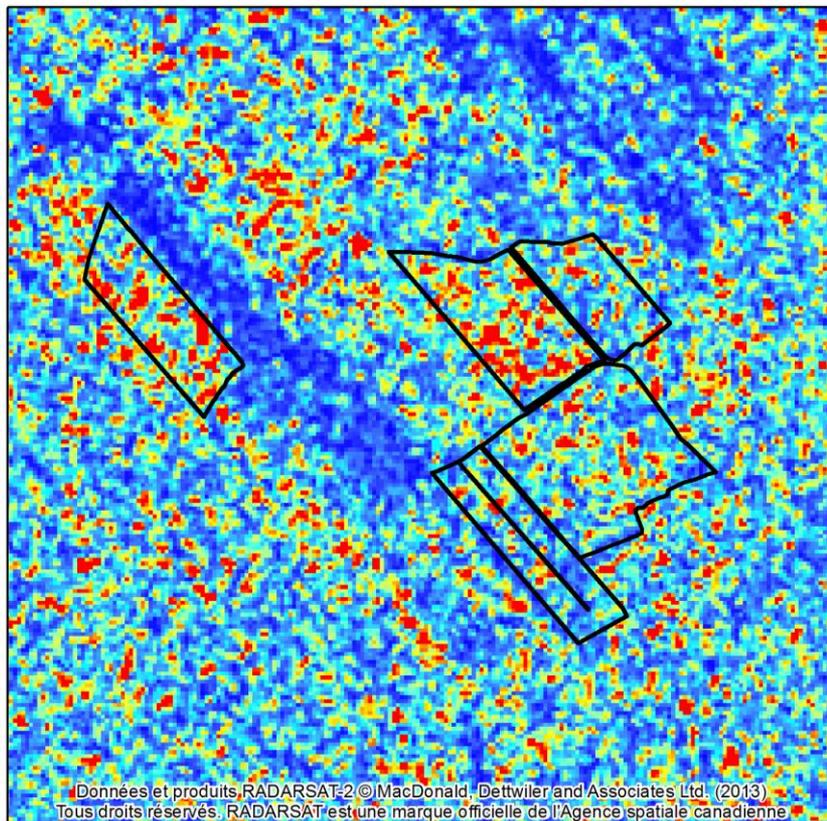
Modèle	RMSEr (%)	BIAS
Maïs-1-HVVH	14.7	2.6
Maïs-1-HVVH-n	15.6	2.6
Soya-1-VV	16.3	1.3
Soya-1 -VVVH	15.5	1.8
Soya-1 -VV-n	10.1	-0.8
Soya-1 -VVVH-n	8.4	-0.4
Soya-2-VV	14.1	3.5
Soya-2-VVVH	14.5	2.8
Soya-2-VV-n	9.8	2.5
Soya-2-VVVH-n	10.3	1.7

Résultats

Automatisation
des procédures

- Interfaces graphiques
 - Version 1: s'intégrant dans une boîte à outils dans ArcGIS
 - Version 2: s'exécutant à l'extérieur d'ArcGIS (*Standalone*) mais qui fait quand même appel aux bibliothèques de ce SIG.
- Prérequis
 - les images RADARSAT-2 doivent être corrigées géométriquement
 - l'utilisateur doit posséder les polygones des limites des parcelles cultivées en maïs ou soya
 - l'utilisateur doit pouvoir identifier la fenêtre de stade phénologique des parcelles cultivées au moment de l'acquisition de l'image

Modèle prévisionnel du rendement à la récolte pour la culture du soya avec Radarsat-2



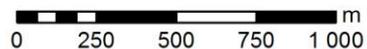
Modèle appliqué : Soya-2-VV

Culture : Soya

Fenêtre phénologique : 55-65

Image Radarsat-2 :

- Mode : W2
- Polarisation : VV
- Passage : Ascendant
- Date de l'image Radarsat-2 : 11 août 2013



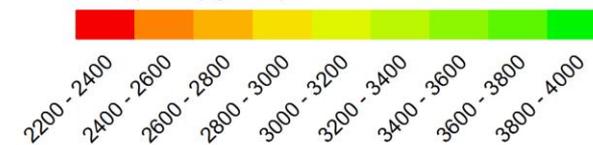
Parcelles soya

Rétrodiffusion

Élevée

Basse

Rendement prédit (kg*ha⁻¹)



Réalisation : Équipe de recherche en Télédétection Environnementale et NORdique (TENOR)

© INRS 2016

Conclusion

Accomplissements

1. Structuration de la base de données
2. Paramétrage du modèle STICS
3. Application d'une approche d'intercalibration
4. Développement de modèles significatifs
5. Automatisation de la procédure

Conclusion

- Recommandations
 - Meilleur contrôle au niveau de la qualité des données de rendements
 - Accroître le nombre de couples « rétrodiffusion/rendement » par parcelle et par culture, dans les modèles.
 - Tester l'approche en mode opérationnel
 - Tester les simulations de STICS avec le forçage par le LAI pour améliorer l'estimation de la phénologie

Conclusion

- Actions

- Poursuivre le travail avec la COOP Fédérée afin de réduire l'incertitude sur les données de rendement en archive et de mettre en place des moyens de contrôler cette incertitude sur les données de rendement des années à venir;
- Ajouter à la base de données et à l'analyse, les données de 2014 et de 2015, dès que les rendements moyens à la parcelle pour toute la zone d'étude seront récupérés par la Coop Fédérée;
- Poursuivre ces acquisitions radar systématiques pour encore quelques saisons, en gardant les paramètres le plus homogènes possible (orbite ascendante, angles d'incidence constants), sachant que les données de rendement seront éventuellement disponibles;
- Tester durant au moins une saison et en mode opérationnel, l'application des modèles développés
- Reprendre les simulations de STICS en intégrant un forçage du LAI

➤ Dédier un étudiant au doctorat pour ce travail

MERCI!

QUESTIONS?

Yves.Gauthier@ete.inrs.ca