

FSOV



INRAE



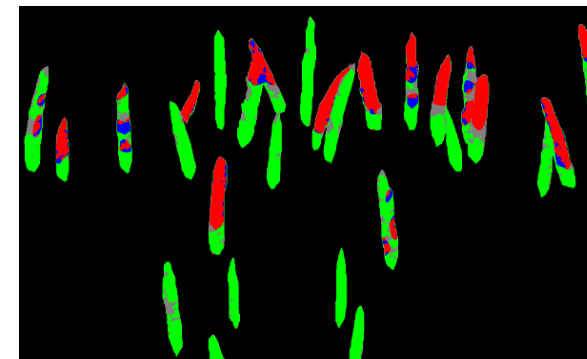
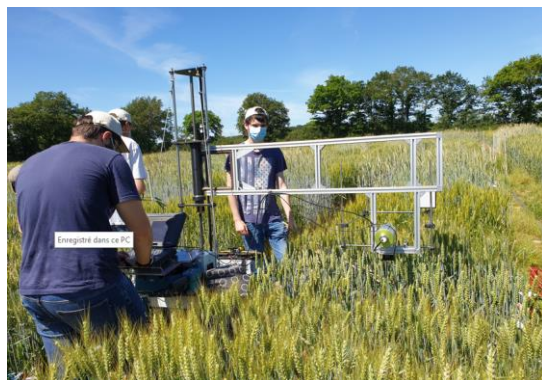
9 semenciers :



Fus'Eye: Nouvel outil de phénotypage spectral au champ pour quantifier la fusariose de l'épi sur céréales (2018-2022)



Cadot Valérie



Sommaire

1. Contexte et objectif
2. Identification des longueurs d'onde discriminantes de la fusariose des épis
3. Validation du transfert des longueurs d'onde vers une caméra multispectrale en labo
4. Etudes spectrales en labo pour discriminer Fusariose de Microdochium
5. Passage au champ :
 - a) Modèles de Deep learning pour la segmentation des épis au champ
 - b) Modèles de Machine learning pour la discrimination de la fusariose au champ
6. Conclusions - Perspectives



1. Contexte et objectif

- ❑ *Fusarium graminearum* : perte de rdt et fusariotoxines
- ❑ Inscription de variétés résistantes au Catalogue français en blé tendre, blé dur, triticales, évaluées par notations visuelles dans réseau d'essais CTPS inoculés
- ❑ Risque de confusion avec *Microdochium* spp sur épis



Objectif : Création d'un nouvel outil de phénotypage basé sur l'imagerie multispectrale pour quantifier spécifiquement la fusariose sur épis des céréales à paille, dans le cadre de l'évaluation de la résistance variétale au champ

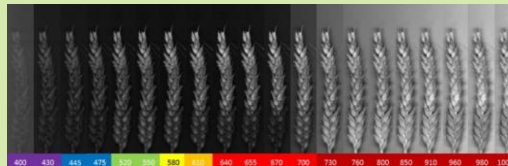


2. Identification des longueurs d'onde discriminantes de la fusariose des épis

Objectif : Identifier les longueurs d'onde les plus pertinentes pour quantifier la fusariose sur épi, à l'aide d'une caméra hyperspectrale

CRÉATION DES DONNÉES

- Données hyperspectrales
- Données de références



Reconstitution RGB

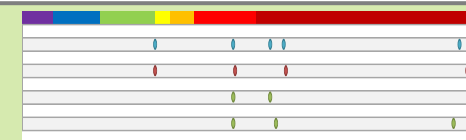
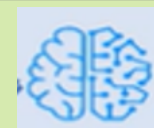


Annotation



SÉLECTION DES LONGUEURS D'ONDE

- Les plus pertinentes pour détecter la fusariose sur épi



VALIDATION DES LONGUEURS D'ONDE SÉLECTIONNÉES

- Création du modèle de classification utilisant uniquement les longueurs d'onde sélectionnées

- Evaluation du modèle créé :



Modèle



Comparaison avec les données de références

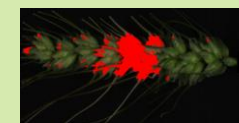


Image hyperspectrale d'un nouvel épi

% de pixels appartenant à la classe fusa



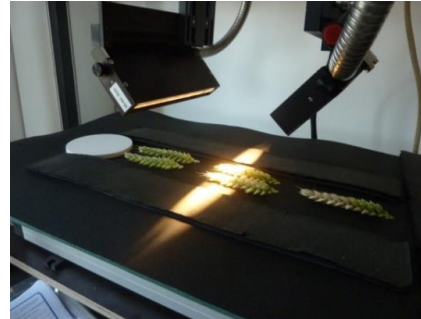
A. ACQUISITION DES DONNEES

Matériel végétal



- Essais inoculés par *Fusarium graminearum*
- 4 années : 2016 à 2019
- 2 sites : 49 et 63
- 5 épis récoltés par variété
- Pour 2016-2018 (CASDAR IRIGAM) :
 - 20 variétés de blé tendre/site
- Pour 2019 :
 - 10 variétés de blé tendre
 - 10 variétés blé dur
 - 10 variétés triticale

Données hyperspectrales



- Caméra hyperspectrale : Neo Hypspx:
216 longueurs d'onde de 400nm à 1000nm,
2,7 nm, 2048 pixels

- Base hyperspectrale :
1506 images :
240°C/j à 570°C/j

2016 : 1 date d'acquisition
189 épis => **189 images**

2017 : 3 dates d'acquisition
589 épis => **589 images**

2018 : 1 date d'acquisition
189 épis => **189 images**

2019 : 2 dates d'acquisition
532 épis => **532 images**

Données de références

- **Notes visuelles** données par 3 experts,
à partir des images RGB reconstruites,
(532 épis en 2019)

Nom de l'image	Site de provenance (nombre)	Expert 1	Expert 2	Expert 3
Adagio_49_1.png	49	5	5	5
Adagio_49_2.png	49	10	10	22
Adagio_49_3.png	49	36	36	36
Adagio_49_4.png	49	22	82,7	82,7
Adagio_49_5.png	49	50	95	95
Adagio_63_1.png	63	0	0	0
Adagio_63_2.png	63	10	10	10
Adagio_63_3.png	63	22	22	22
Adagio_63_4.png	63	36	50	67

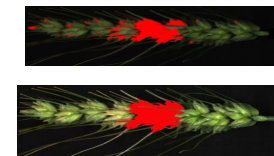
- **Zones fusariées annotées visuellement**
(532 épis en 2019)



- **Analyses sanitaires :**
Fusa/Microdochium



Pour chaque épi, comparaison de la **zone fusariée** prédite par les 4 méthodes avec la référence
- *Référence : annotations sur image de la zone fusariée par un expert*



⇒ **Bonne prédiction pour les 4 méthodes du positionnement de la zone fusariée par rapport à l'expertise visuelle**

⇒ **Taux moyen de bonne classification > 88%**

ADPP séquentielle (Saisir) : 5λ			
Analyse visuelle	Sain	Analyse Multispectrale	
		Sain	Fusa
	Fusa	71,78%	10,11%
		1,28%	16,82%
% moyen de bonne classification :		88,60%	
Précision	0,81		
Sensibilité	0,93		
Spécificité	0,88		

Covsel (Saisir) : 4λ			
Analyse visuelle	Sain	Analyse Multispectrale	
		Sain	Fusa
	Fusa	71,72%	10,18%
		1,34%	16,76%
% moyen de bonne classification :		88,40%	
Précision	0,81		
Sensibilité	0,93		
Spécificité	0,88		

ADPP non séquentielle : 2λ			
Analyse visuelle	Sain	Analyse Multispectrale	
Sain	Fusa		
Fusa	73,17%	8,73%	
		1,75%	16,34%
% moyen de bonne classification :		88,44 %	
Précision	0,81		
Sensibilité	0,90		
Spécificité	0,87		
ADPP non séquentielle : 3λ			
Analyse visuelle	Sain	Analyse Multispectrale	
Sain	Fusa		
Fusa	71,78%	10,12%	
		1,44%	16,66%
% moyen de bonne classification :		88,44 %	
Précision	0,81		
Sensibilité	0,92		
Spécificité	0,88		


Pour chaque épi et chaque année, comparaison entre :

- Le taux de surface fusariée obtenu par les différentes méthodes de sélection
- Les notations de référence par expertise visuelle

Effet stade des épis ?

Longueurs d'onde 2019 → Test sur les données 2019

⇒ Bonne prédiction de la
fusariose entre 300°C/j et
500°C/j

R ²	Variables	ADPP Saisir	Covsel	ADPP 3 A	ADPP 2 A
250°C/J: 12 images	Expert 1 :S	0,62	0,76	0,68	0,72
	Expert 2: G	0,39	0,47	0,50	0,53
	Expert 3 :M	0,72	0,83	0,78	0,80
	Moy Experts	0,58	0,69	0,65	0,68
300°C/J: 44 images	Expert 1 :S	0,88	0,89	0,91	0,92
	Expert 2: G	0,73	0,73	0,76	0,77
	Expert 3 :M	0,82	0,83	0,84	0,85
	Moy Experts	0,81	0,82	0,84	0,85
350°C/J: 17 images	Expert 1 :S	0,83	0,82	0,86	0,87
	Expert 2: G	0,93	0,93	0,93	0,93
	Expert 3 :M	0,70	0,70	0,72	0,73
	Moy Experts	0,82	0,82	0,84	0,85
400°C/J: 52 images	Expert 1 :S	0,76	0,74	0,78	0,80
	Expert 2: G	0,86	0,85	0,86	0,87
	Expert 3 :M	0,79	0,77	0,81	0,84
	Moy Experts	0,80	0,79	0,81	0,84
450°C/J: 19 images	Expert 1 :S	0,77	0,78	0,77	0,78
	Expert 2: G	0,79	0,81	0,87	0,84
	Expert 3 :M	0,85	0,87	0,87	0,88
	Moy Experts	0,81	0,82	0,84	0,83
500°C/J: 24 images	Expert 1 :S	0,87	0,86	0,85	0,89
	Expert 2: G	0,90	0,89	0,90	0,92
	Expert 3 :M	0,90	0,89	0,88	0,91
	Moy Experts	0,89	0,88	0,88	0,91



2. Identification des longueurs d'onde discriminantes de la fusariose des épis

4 longueurs d'onde discriminantes de la fusariose validées pour BTH, BDH et triticales

- allant du visible au proche infra-rouge
- qq soit la méthode de sélection



3. Validation du transfert des longueurs d'onde vers une caméra multispectrale en labo

Matériel végétal



- Essais inoculés avec *Fusarium graminearum*
- 1 année : **2020**
- 3 sites : GEVES **49**, INRAE **63** et RAGT2n **28**
- 2 dates de prélèvement des épis
- 6 épis prélevés/variété
- Dans sites 49 et 63 :
 - 10 variétés blé tendre
 - 10 variétés blé dur
 - 10 variétés triticales
- Dans site 28 :
 - 22 variétés blé tendre

Données multispectrales



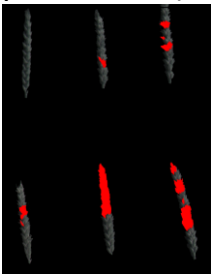
- **Caméra multispectrale : CMS4 Silios 4.2 MP**
- **Caméra RGB Nikon Reflex, 24 MP**

Base multispectrale :

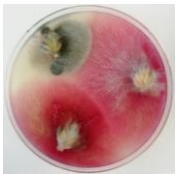
**2020 : 2 dates d'acquisition
546 épis => 91 images**

Données de références

1 ° Annotation des zones fusariées par un expert sur images (546 épis en 2020)



2° Annotation d'après analyse sanitaire



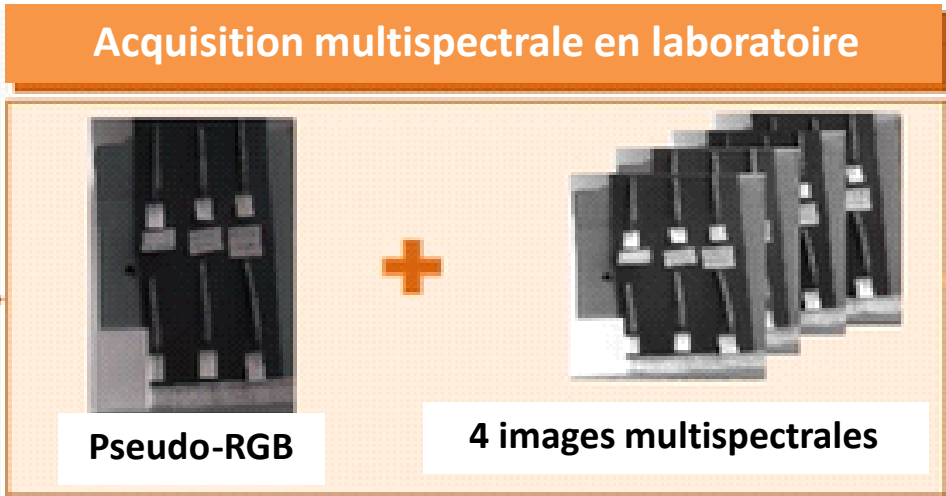
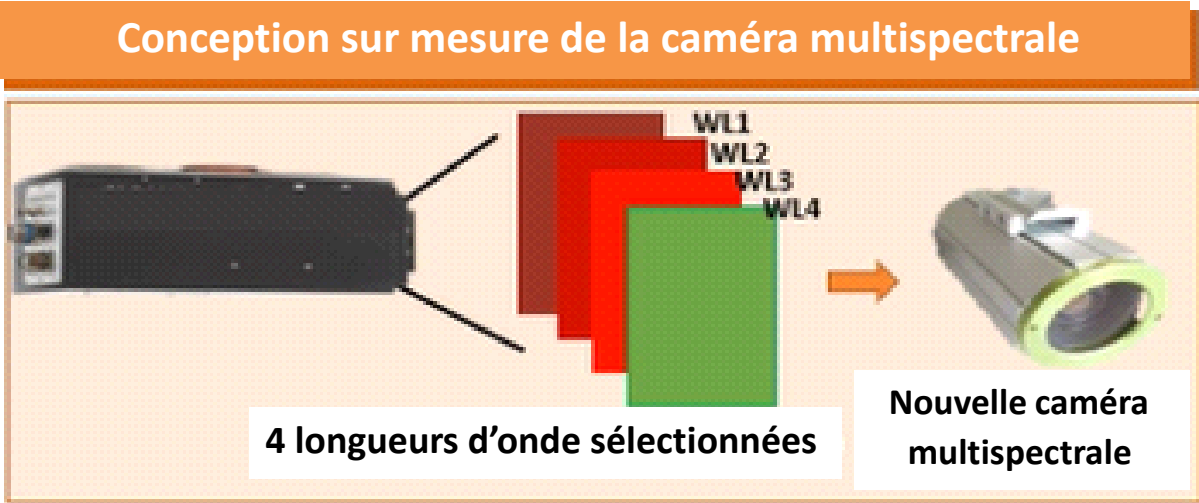
Résultat AS	Couleur associée
Fusariose section Discolor	Rouge (255, 0, 0)
Microdochium	Bleu (0, 0, 255)
Fusariose + Microdochium	Magenta (255, 0, 255)
Sain	Vert (0, 255, 0)

3° Estimation visuelle du taux d'épillets fusariés
par 1 expert sur images (546 épis en 2020)

Var	Loc	CollectDate	umero Da	Temp. Sum in Obs Fusa
Bermude	Anjouère 49- FR	16/06/2020	D1	463 10
Bermude	Anjouère 49- FR	16/06/2020	D1	463 0
Bermude	Anjouère 49- FR	16/06/2020	D1	463 5
Bermude	Anjouère 49- FR	16/06/2020	D1	463 95

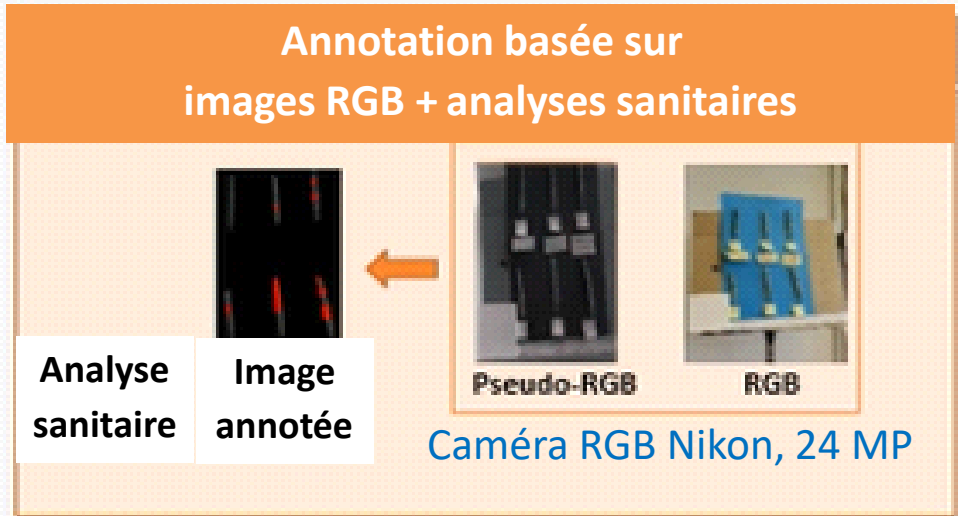
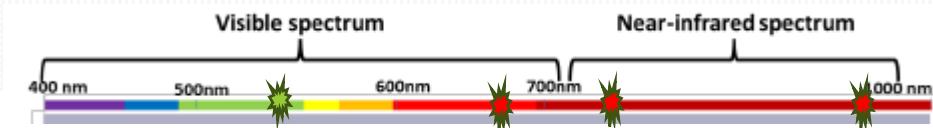


3. Validation du transfert des longueurs d'onde vers une caméra multispectrale en labo



Caméra multispectrale CMS4-GEVES/INRAE 4,2 MP

CMOS SENSOR SPECIFICATIONS	
Array type	CMOS (Si)
Spectral band	400 to 1000 nm
Resolution	2048 (H) x 2048 (V)
Pixel pitch	5.5 µm



Indicateurs de performance des modèles et visualisation sur image en 4 couleurs

❑ **Précision** = $VP / (VP + FP)$

$VP = \text{Fusa}$ et $VN = \text{sain}$

Quantification du taux de vrais pixels fusariés par rapport à l'ensemble des pixels fusariés prédits par le modèle

❑ **Rappel (Recall)** = $VP / (VP + FN)$

Quantification du taux de vrais pixels fusariés par rapport à l'ensemble des pixels fusariés de référence

❑ **Justesse (Accuracy)** = $(VP + VN) / (VP + FP + VN + FN)$

Taux de bonne identification des classes fusa et sain.

Référence expert

Prédiction

Matrice de confusion	Prédiction	
	Classe 1	Classe 2
	Classe 1	Classe 2
Classe 1	VP	FN
Classe 2	FP	VN

Matlab: reconstruction image avec les VP, VN, FP, FN en 4 couleurs:

- Rouge : pixels "Fusariés" prédits "Fusariés" = VP (Vrai Positif)
- Gris : pixels "Sains" prédits "Fusariés" = FP (Faux Positif)
- Bleu : pixels "Fusariés" prédits "Sains" = FN (Faux Négatif)
- Vert : pixels "Sains" prédits "Sains" = VN (Vrai Négatif)

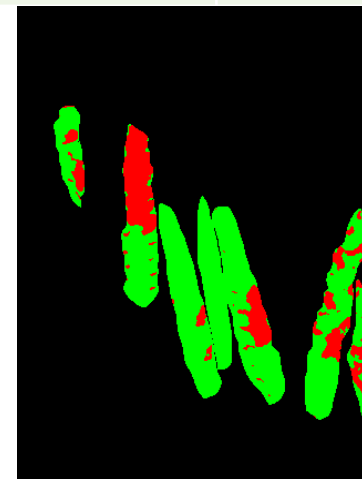


Image de prédiction

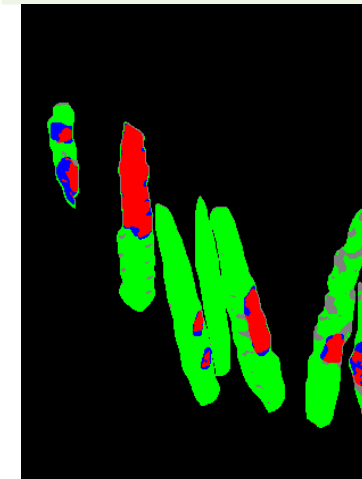


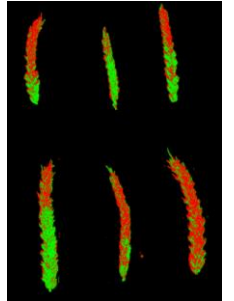
Image de différenciation



3. Validation du transfert des longueurs d'onde vers une caméra multispectrale en labo

Différenciation des pixels «Fusa/Sains»

Prédiction de la fusariose de variétés de blé tendre en test,
selon le taux de données d'entraînement



- Données de ref : **annotation visuelle + analyse sanitaire**
- Normalisation de la caméra
- Réalisation du test sur **50 tirages aléatoires de données équilibrées**
- Comparaison de différents modèles de classification avec l'application **Classification Learner** de Matlab.

Quantité de données de l'entraînement	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
Précision	64 % ± 4%	67 % ± 4%	73 % ± 4%	63 % ± 4%	70 % ± 4%	66 % ± 4%	70 % ± 4%
Rappel	65 % ± 5%	72 % ± 5%	71 % ± 3%	65 % ± 5%	71 % ± 3%	67 % ± 3%	72 % ± 3%
Justesse	65 % ± 2%	69 % ± 2%	69 % ± 3%	66 % ± 2%	70 % ± 2%	68 % ± 2%	70 % ± 3%

- Meilleur modèle de machine learning : **Fine Gaussian SVM**
- Meilleure prédiction de la fusariose en test pour le **jeu d'entraînement représentant 60% des données**

4. Etudes spectrales pour discriminer Fusariose de Microdochium

a) avec la camera CMS4

Différenciation des pixels « Fusa/Microdochium »

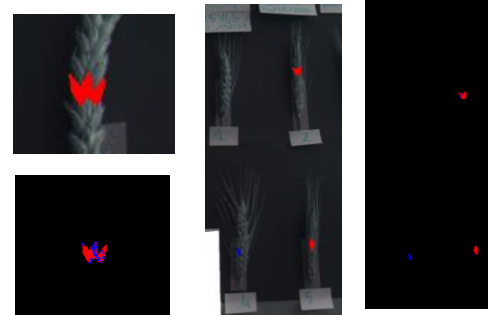
Légende :

- Fusarium
- Microdochium

- **Données de référence** sur **annotations sanitaires**
- Normalisation par rapport au spectralon
- Flou gaussien de taille 7
- Test sur **50 tirages aléatoires de données équilibrées** représentant 60% du jeu de données entier
- Comparaison de différents modèles de classification avec l'application **Classification Learner de Matlab**.

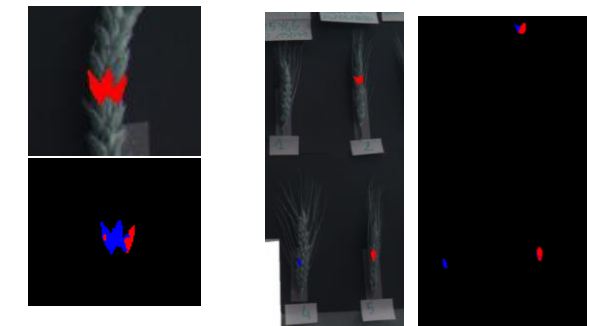
Modèle Weighted KNN

	Précision	Rappel	Justesse
Résultats	83 %	96 %	88 %



Modèle Fine gaussian SVM

	Précision	Rappel	Justesse
Résultats	74 %	85 %	78 %



2 meilleurs modèles de machine learning pour discriminer Fusarium /Microdochium sont **Weighted KNN et Fine Gaussian SVM**



Faible nb données : 14 variétés & 22 épillets de 22 épis, site 28
A confirmer sur jeu plus important



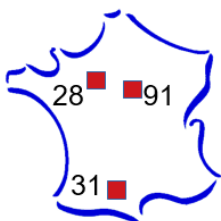
4. Etudes spectrales pour discriminer Fusariose de Microdochium

b) par Spectrometrie Proche Infra Rouge (SPIR) & Caméra HyperSpectrale (CHS)

3 espèces :

- Blé tendre : 34 var.
- Blé dur : 20 variétés
- Triticale 20 variétés

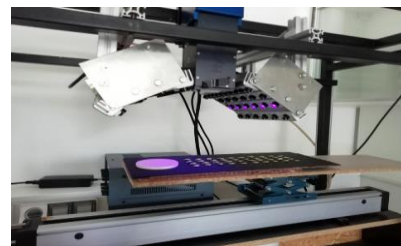
3 sites



SPIR (ASD)



Caméra hyperspectrale (Neo-Hypex)



Echantillons :

- 6 épis/variété, 2 épillets/épi
- SPIR : 400-2500 nm ; 2 spectres /épillets ; 1170 spectres : 82% Fusa/18% Micro
- Caméra HS : 400-1000nm ; 40 épillets/plaque ; 962 spectres : 83%Fusa/17% Micro
- Analyse sanitaire SNES sur épillets

Conclusion sur Erreur Fusa/micro :

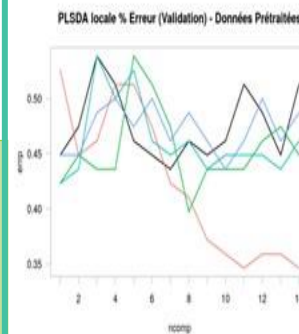
- SPIR: erreur ~ 30 % < CHS : erreur ~ 38 %
- SPIR & CHS efficace si Micro. ++ → err. ~ 22 %
- Gamme 1000-2500 nm (**26.9%**) serait + discriminante que 400-1000 nm (**32,8%**), mais meilleur modèle sur la gamme complète 400-2500 nm
- Erreur + faible en SPIR pour BTH (28%) / BDH (33%) et triticale (36%) mais pas en CHR

Analyses des données spectrales

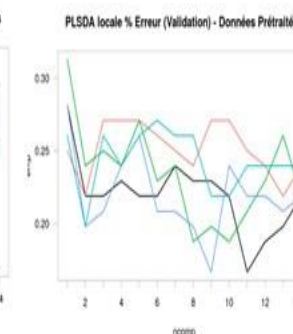
- R (package rnirs)
- Prétraitements : Normalisation SNV + dérivée
- Discrimination Fusarium / Microdochium :
 - ❖ Équilibrage des effectifs
 - ❖ PLSDA/ PLSDA locale
 - ❖ Validation croisée (avec répétitions)

Tx d'erreur en f° du nbre de composantes PLS

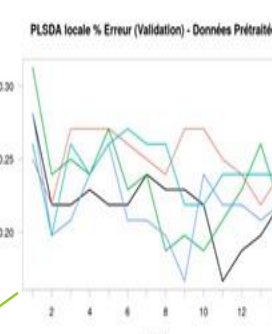
Site 31 : faible pression micro



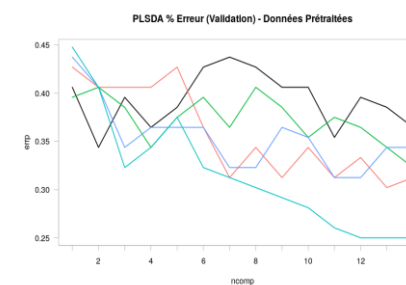
Site 91: moy. pression micro



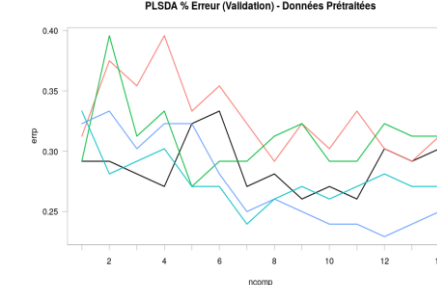
Site 28 : forte pression micro



λ 400 à 1000nm



λ 1000 à 2500nm

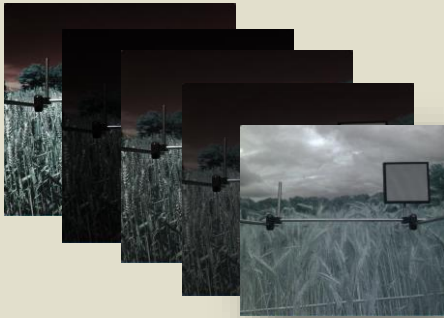


5. Passage au champ

Stratégie mise en place pour discriminer la fusariose

A

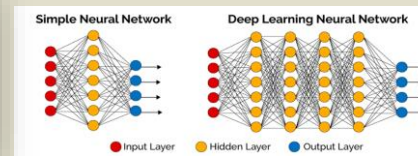
Acquisition d'images :
vue latérale des épis



Annotation de la 1ère
ligne d'épis



Segmentation des épis
par Deep learning

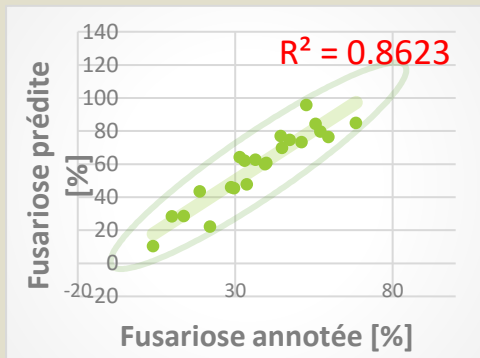


Prédiction de la
segmentation



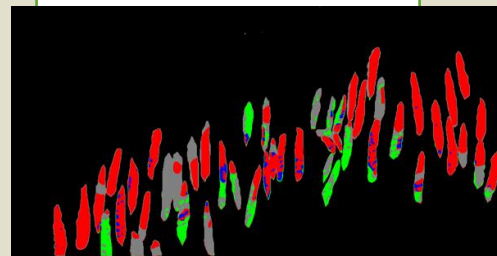
B

Prédiction du taux de
surface fusariée



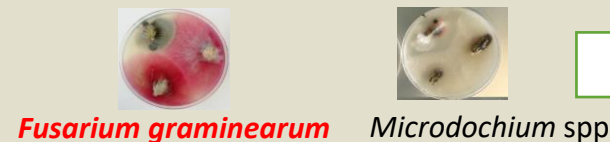
Variétés de blé tendre, Louville, 2021

Classification
Fusarié / Sain
par Machine Learning



- « Sain » prédit « sain » (vrai négatif)
- « Fusariées » prédit « fusariées » (vrai positif)
- « Fusariées » prédit « sains » (faux négatif)
- « Sain » prédit « fusariées » (faux positif)

Annotation de la fusariose



Fusarié

sain



Analyse sanitaires



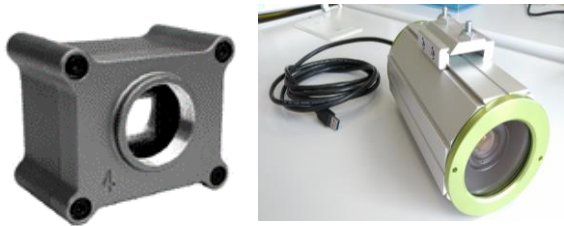
Prototype : vecteur & caméra multispectrale & RGB

Prise de vue latérale :

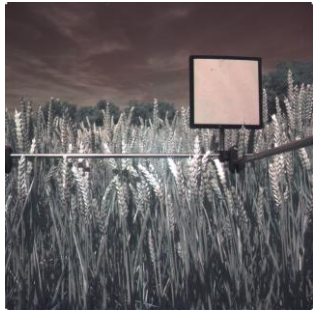
Distance : caméra/épis : 75 cm

2 caméras : multispectrale CMS4 4MP et RGB Sony RXO

Caméra CMS4 4MP



Pseudo RGB



Sony RGB 15.3 MP

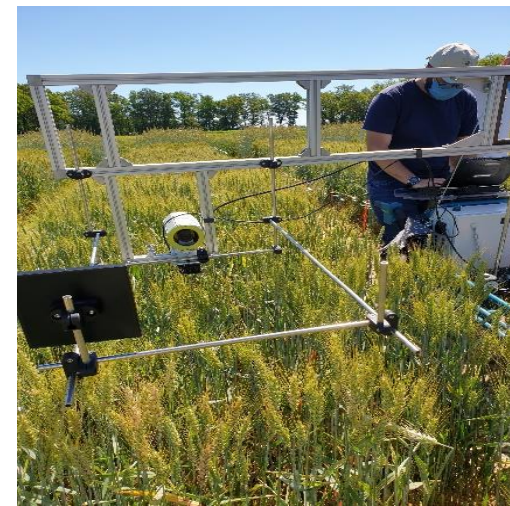


RGB



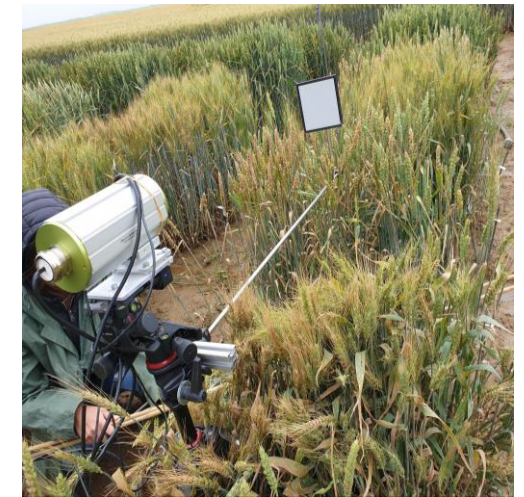
2 vecteurs piétons :

supportant caméras RGB + multispectrale + spectralon à distance fixe de 75 cm



Brouette Makita

+ : Cadre normalisé
- : pas facilement déplaçable hors site GEVES

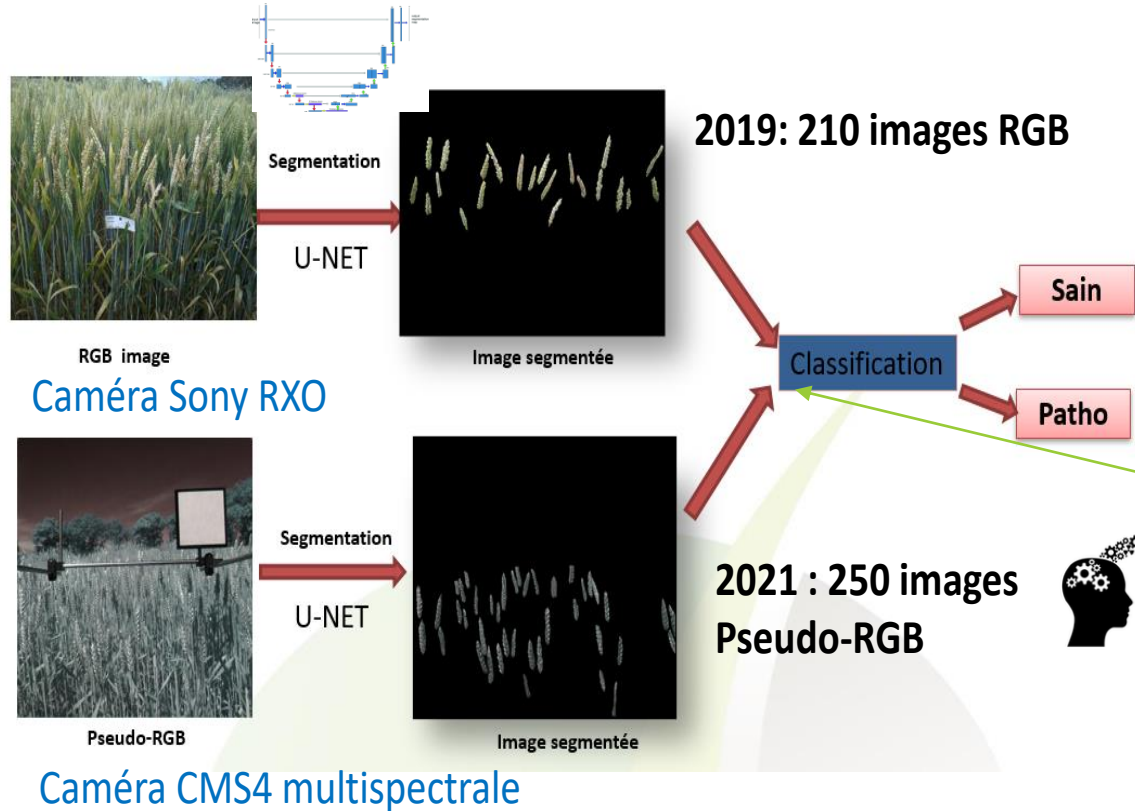


Trépied

+ : facilement déplaçable
- : entrée dans le parcelles, cadre plus fluctuant



5 a) Segmentation des épis au champ par Deep learning (U-NET)



Modèles de segmentation des épis de blé au champ, évalués selon l'indice de Dice

	Training	Validation	Test
RGB	0.83 ± 0.03	0.79 ± 0.02	0.75 ± 0.02
Pseudo-RGB	0.78 ± 0.01	0.75 ± 0.02	0.71 ± 0.02
Fine tuning	0.88 ± 0.03	0.84 ± 0.02	0.79 ± 0.03



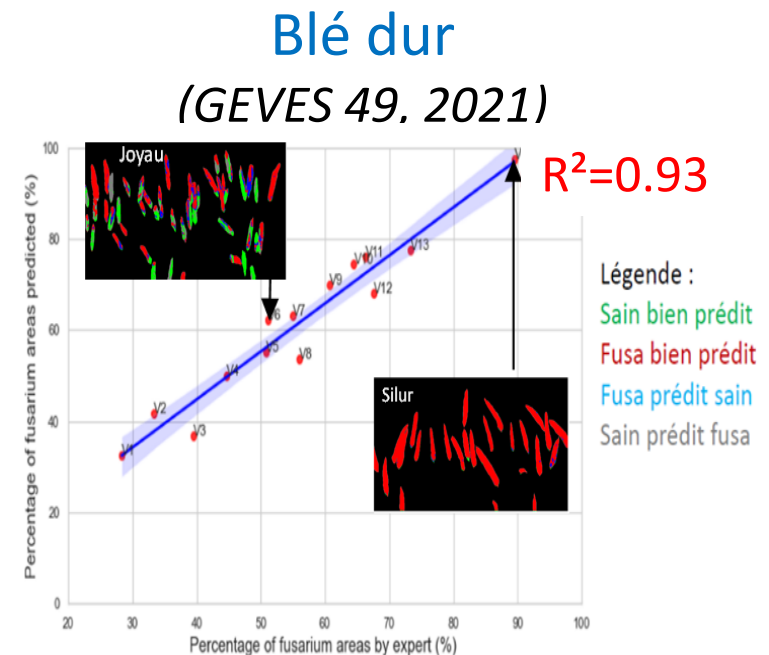
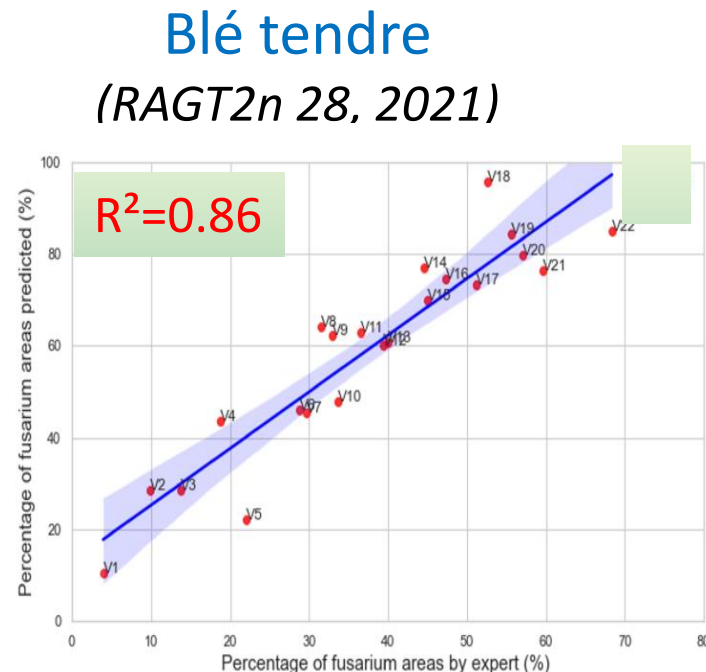
Fine tuning : transfert de poids du modèle RGB vers multispectral

- Utilisation du réseau de neurones convolutionnel U-NET pour segmenter les épis.
- Meilleur modèle de segmentation par Fine Tuning
- Qualité de la segmentation fonction du respect du protocole d'acquisition & vecteur

5 b) Modèles de machine learning pour la discrimination de la fusariose au champ

2021 : Panel restreint à 2 sites

- Comparaison de différents modèles de machine learning pour discriminer la fusariose
- ➡ **Meilleur modèle : Fine Gaussian SVM pour classifier pixels fusariés/sains,**
- à partir de 105 images acquises sur 2 sites (GEVES 49 et RAGT2n 28) sur blé tendre, blé dur et triticale



5 b) Modèles de machine learning pour la discrimination de la fusariose au champ

2022 : Panel élargi à 7 sites avec 603 images

Comparaison des modèles 2021/ 2021-22 avec les données 2021-2022.

Semenciers	Sites (Dpt)	BTH	BDH	TRITI	Nb d'images
KWS Momont	Allonnes 28	58	20	20	98
Syngenta	Chartres 28	98	22	20	140
Unisigma	Froissy 60 essai Fusa	21	0	0	21
Unisigma	Froissy 60 essai Rouille Jaune	25	0	6	31
Florimond Desprez	Lectoure 32	63	20	20	103
Ragt2n	Louville 28	50	0	0	50
Secobra	Maule 78	62	21	0	83
DSV	Terminiers 28	38	19	20	77
Nb images/espèce		415	102	86	603

- **Blé tendre** : modèle retenu
Fine Gaussian SVM 2021
- **Triticale et blé dur** : modèle
Fine Gaussian SVM 2021-2022
- **Variabilité des performances selon les lieux**
- Meilleure corrélation dans les sites à plus forte pression fusariose

Espèces	Sites	VP en %	FN en %	FP en %	VN en %	Précision	Rappel	Justesse	R ² (annotations)
Blé dur	Allonnes (28)	3%	2%	8%	87%	16%	43%	90%	0.97
	Chartres	2%	5%	6%	87%	18%	21%	87%	0.90
	Lectoure (32)	38%	9%	36%	17%	52%	82%	56%	0.34
	Maule (78)	16%	15%	27%	42%	35%	49%	58%	0.35
	Terminiers (28)	9%	6%	36%	50%	16%	63%	57%	0.54
Blé tendre	Allonnes (28)	4%	3%	6%	87%	36%	48%	91%	0.70
	Chartres	2%	2%	10%	85%	17%	47%	87%	0.85
	Froissy (60)	2%	4%	9%	84%	18%	38%	85%	0.18
	Lectoure (32)	28%	7%	24%	42%	46%	72%	69%	0.89
	Louville (28)	17%	10%	23%	50%	40%	60%	68%	0.49
	Maule (78)	18%	10%	29%	42%	37%	63%	60%	0.16
	Terminiers (28)	7%	5%	31%	58%	18%	58%	63%	0.31



- **Avancement sur la mise à disposition d'un nouvel outil de phénotypage, en utilisant l'imagerie multispectrale**, porté par un vecteur piéton pour évaluer le comportement de la résistance variétale à la fusariose
 - **Identification de 4 longueurs d'ondes dans le visible et le proche -infra-rouge, permettant de discriminer les pixels sains des pixels fusariés.**
 - **Transfert dans la caméra CMS4 multispectrale, avec validation de la spécificité**
 - **Performances variables des algorithmes au champ par deep learning pour segmenter les épis et par machine learning pour discriminer la fusariose, avec le modèle Fine Gaussian SVM.**
 - **Meilleures prédictions dans les essais à forte pression fusariose.**
 - **Annotations moins fiables pour les faibles pressions ?**
- **Poursuite du phénotypage des maladies des céréales par IA dans des projets UE en cours (H2020 Invite & Phenet)**



- Valérie Cadot, Nicolas Mascher, Jean-Philippe Maigniel
- Stagiaires ESIR Rennes : Duncan Sourdin, Jorick Célerier, Hugo Lammens
- CDD : Hadhami Garbougé, Julien Garnier

**Et tous les
semenciers :**



INRAE



Frederic Serre,
Sylvie Roche,
Pierre Desray



Pierre Roumet,
Martin Ecarnot



David
Rousseau



Christelle Sablayrolle,
Stéphane Porrez,



merci

