Fus'eye : Nouvel outil de phénotypage spectral au champ pour quantifier la Fusariose de l'épi sur céréales

Valérie CADOT [1*], Hadhami GARBOUGE [1&14], Nicolas MASCHER [1], Jorick CELARIER [1], Julien GARNIER [1], Frederic SERRE [2], Martin ECARNOT [3], Pierre ROUMET [3], Sylvie ROCHE [2], Jean Philippe MAIGNIEL [1], Hugo LAMMENS [1], Isabelle SERANDAT [1], Lama AL BASSIT [2], Gabriel BEUDIN [4], Frederic MINARD [4], Camille WABINSKI-DAUCHY [5], Michael COCHARD [5], Patrice SENELLART [6], Sebastien CUVELIER [7], Pascal GIRAUDEAU [8], Carine ANDRE [9], Auberi AVALLE [10], Philippe LEREBOUR [10], Sylvie DUTRIEZ [11], Jérôme AUZANNEAU [12], Stéphane PORREZ [13], Christelle SABLAYROLLES [13], David ROUSSEAU [14]

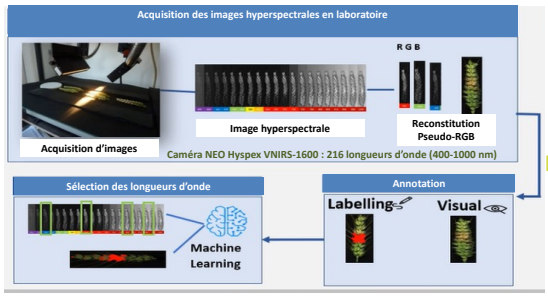
La fusariose de l'épi causée par un complexe d'espèces dont la principale est Fusarium graminearum, est une maladie qui affecte de nombreuses céréales à paille en Europe. Elle entraîne une réduction du rendement de l'ordre de 0.2t/ha mais aussi la contamination des grains en fusariotoxines, se révélant nocive pour la santé humaine et animale.
Pour limiter cette maladie et l'accumulation de ces toxines au champ, **la réglementation CTPS encourage le développement de variétés résistantes à la fusariose de l'épi**, en leur octroyant un bonus afin de faciliter leur inscription au Catalogue français et défavorise les variétés sensibles en délivrant un malus.

Afin d'estimer le niveau de résistance à la fusariose des variétés de blé tendre, blé dur et triticale, lors du processus d'inscription , des estimations visuelles du taux d'épillets fusariés sont actuellement réalisées par les expérimentateurs du réseau CTPS piloté par le GEVES, avec des essais inoculés au champ. Mais ces notations visuelles requièrent des experts qualifiés pour identifier et quantifier les symptômes, et présentent des risques de confusion avec Microdochium spp. **L'objectif du projet FSOV Fus'eye est de développer une nouvelle méthode 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.**

MATERIEL ET METHODES

RESULTATS

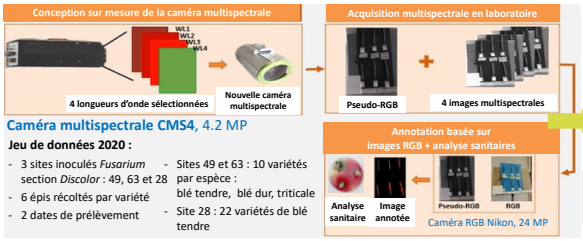
1. Identification des longueurs d'onde discriminantes de la fusariose des épis



Chaque point représente les longueurs d'onde sélectionnées suivant les méthodes de sélection supervisées : ADPP non séquentielle, CovSel et ADPP séquentielle, et à partir des bases d'apprentissage 2016 à 2019.

4 longueurs d'onde discriminantes de la fusariose ont été validées, allant du visible au proche infra-rouge pour les 3 espèces

2. Transfert des longueurs d'onde vers une camera multispectrale en labo



Caméra multispectrale CMS4, 4.2 MP

Jeu de données 2020 :

- 3 sites inoculés *Fusarium* section *Discolor* : 49, 63 et 28
- 6 épis récoltés par variété
- 2 dates de prélèvement
- Sites 49 et 63 : 10 variétés par espèce : blé tendre, blé dur, triticale
- Site 28 : 22 variétés de blé tendre

1. Différenciation des pixels «Fusa/Sains»

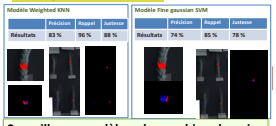
Prédiction de la fusariose de variétés de blé tendre en test, selon le taux de données d'entrainement

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'entrainement représentant 60% des données**

2. Différenciation des pixels « Fusa/Microdochium »

Légende :
- Fusarium
- Microdochium

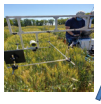


2 meilleurs modèles de machine learning pour **discriminer Fusarium /Microdochium sont : Weighted KNN et Fine Gaussian SVM** ***(données du site 28, sur 14 variétés & 22 épis)***

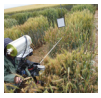
3. Algorithmes pour la segmentation des épis et l'identification & quantification de la fusariose au champ de blé tendre et blé dur

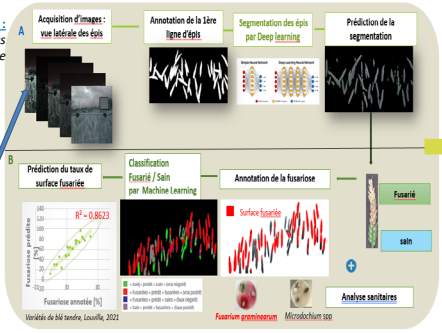
Conception de 2 vecteurs piétons : *supportant caméras RGB + multispectrale + spectralon à 75 cm*

1. Brouette Makita



2. Vecteur trépied (Panel 2022)



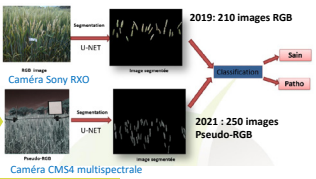


Evaluation des algorithmes sur un grand panel en 2022

Nb d'images multispectrales et RGB acquises dans 7 sites en 2022

Semenciers	Sites (Dpt)	BTH	BDH	TRITI	Nb d'images
KWS Momont	Allonnes 28	58	20	20	98
Syngenta	Chartres 28	68	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

1. Modèle de segmentation des épis



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

- **Utilisation du réseau de neurones convolutionnel U-NET pour segmenter les épis.**
- **Meilleur modèle de segmentation par Fine Tuning** *(utilisant le poids des images RGB pour segmenter les épis des images multispectrales)*

2. Modèle fusariose

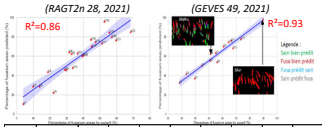
2021 : Panel restreint à 2 sites

- **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*

2022 : Panel élargi à 7 sites

- Comparaison de nouveaux modèles avec les données 2021-2022. Sélection du modèle Fine Gaussian SVM 2021 pour le blé tendre , et du modèle Fine Gaussian SVM 2021-2022 pour le triticale et blé dur .
- Variabilité des performances avec les annotations selon les lieux. Meilleure corrélation dans les sites à plus forte pression fusariose *(Lectoure, Chartes, Allonnes)*

Blé tendre *(RAGT2n 28, 2021)* — Blé dur *(GEVES 49, 2021)*



Espèces	Sites	VP en %	FN en %	FP en %	VN en %	Précision	Rappel	Justesse	R² annotation
Blé dur	Allonnes (28)	3%	2%	8%	87%	30%	43%	90%	0.37
	Chartres	2%	5%	6%	87%	28%	21%	87%	0.02
	Lectoure (32)	38%	8%	30%	12%	55%	43%	50%	0.34
	Maule (78)	16%	15%	27%	42%	31%	49%	58%	0.35
	Terminiers (28)	9%	6%	30%	50%	35%	63%	57%	0.54
Blé tendre	Allonnes (28)	4%	3%	6%	87%	30%	48%	91%	0.70
	Chartres	2%	2%	10%	85%	37%	47%	87%	0.85
	Froissy (60)	2%	4%	9%	84%	18%	36%	85%	0.18
	Lectoure (32)	28%	7%	34%	42%	45%	72%	69%	0.89
	Louville (28)	17%	10%	23%	50%	40%	60%	68%	0.49
	Maule (78)	18%	10%	29%	42%	37%	64%	60%	0.38
	Terminiers (28)	7%	5%	31%	58%	18%	58%	63%	0.31

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

- Le projet **FSOV Fus'eye a permis d'avancer sur la mise à disposition d'un nouvel outil de phénotypage, en utilisant l'imagerie multispectrale** sur un vecteur piéton pour évaluer le comportement de la résistance variétale à la fusariose du blé tendre, blé dur et triticale.
- Des analyses chimiométriques basées sur des méthodes de discrimination supervisée des images hyperspectrales ont permis **d'identifier quatre longueurs d'ondes dans le visible et le proche - infra-rouge, permettant de discriminer les pixels sains des pixels fusariés**.
- Ces longueurs d'onde ont été transférées dans une **caméra multispectrale conçue sur mesure**, CMS4, dans le but de développer des **algorithmes d'intelligence artificielle discriminant les zones fusariées sur épis segmentés**. L'étude en labo pour discriminer Fusarium de Microdochium semble encourageante mais demande une confirmation sur un plus grand nombre d'épis.
- Sur le **panel de variétés 2021, des corrélations élevées** ont été obtenues entre annotations sur images et prédictions de la fusariose avec le modèle de machine learning Fine Gaussian SVM pour le blé tendre et le blé dur.
- Sur le **panel élargi de 2022, les performances des modèles de segmentation des épis et de discrimination de la fusariose sont variables** selon les sites, pouvant s'expliquer par une pression fusariose trop faible dans certains sites, rendant les annotations sur images moins fiables et, une moins bonne standardisation des images pour le vecteur trépied, avec des images trop surplombantes. Pour obtenir de meilleures performances, il sera important de bien respecter le protocole d'acquisition.
- **Cette étude se poursuit au niveau européen**, en développant des annotations semi-automatiques, et en testant d'autres méthodes d'intelligence artificielle et d'autres capteurs.

FSOV 1 GEVES Expertise & Performance — INRAE 2 — agap institut 3 — RAGT 4 — Florimond Desprez 5 — KWS 6 — DSV 7 — Secobra recherches 8 — syngenta 9 — UNISIGMA 10 — Lidea 11 — ao 12 — ARVALIS 13 — université angers, IMHORPHEN 14