

Systemtechnik  
Imagerie hyperspectrale pour l'analyse des traits  
fonctionnels des plantes

SYND 2024-2025, Infotronique

Berrut Mathieu  
Professeur : Joseph Moerschell  
03.09.2025

**Hes·so** // VALAIS  
WALLIS



Haute Ecole d'Ingénierie  
Hochschule für Ingenieurwissenschaften

# Contexte global

## Enjeux

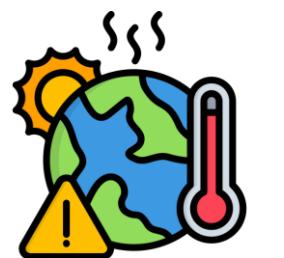
Mesurer l'état physiologique des plantes

→ Suivre l'impact du changement climatique

→ Préserver la biodiversité

→ Optimiser les

rendements/ressources



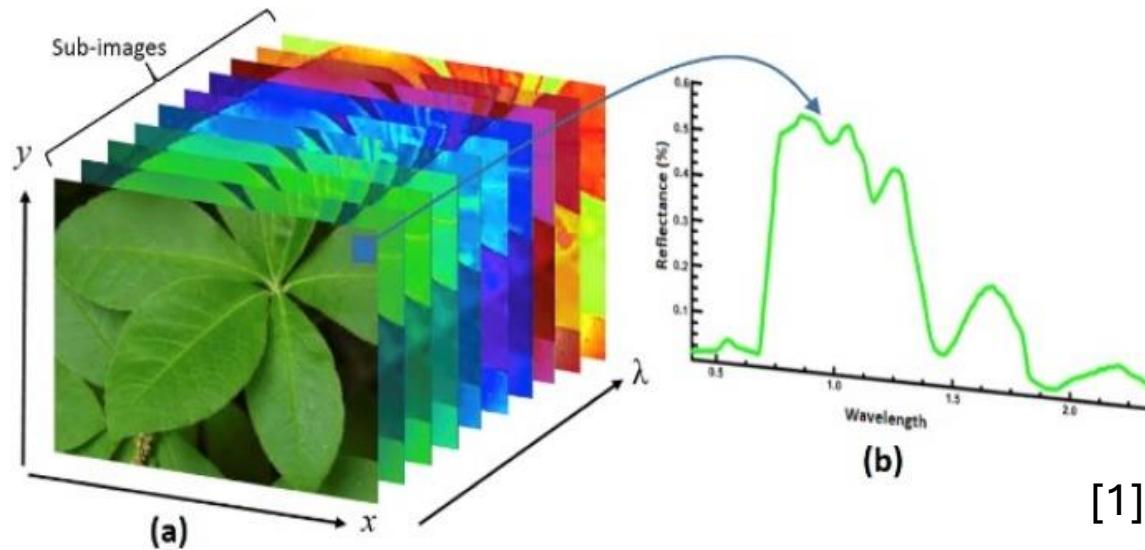
## Problématique actuelle

- Méthodes classiques de mesure de traits fonctionnels limitées

## Besoins

- Mesure rapide
- À grande échelle

# Imagerie hyperspectrale



- Chaque pixel contient un spectre de lumière
- Permet d'identifier des traits fonctionnels

[1]

## Potentiel

- Embarquement sur un drone



## Contrainte

- Coût des caméras professionnelles
- Alternatives low-cost

# Objectif & Contexte du projet

## Objectif

Évaluer le potentiel d'une solution hyperspectrale low-cost

- **Réalisation** d'une caméra hyperspectrale à bas coût
- **Acquisition** d'images hyperspectrales
- **Traitement** des données
- **Organisation** des données
- **Analyse** des données

## Collaboration

- Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR)
- Laboratoire de recherche en environnement
- Intégré à un travail de master



# Caméra hyperspectrale

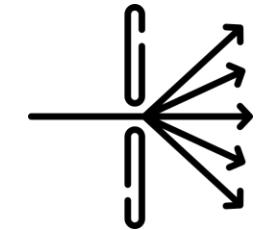
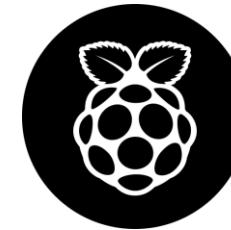
## Provenance

- Projet Open-source  
(J. Salazar et al. (2021) [2])



## Mise en œuvre

- Raspberry Pi 4
- Caméra NoIR
- Réseau diffraction



## Caractéristiques

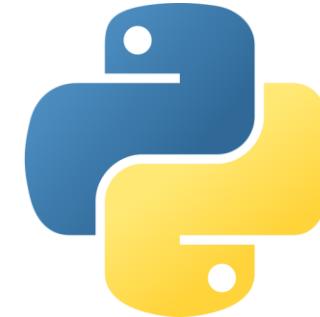
- Coût : ~450 CHF (low-cost)
- Plage spectrale : 400-1050 nm
- Résolution spectrale : 255 bandes ( $\approx 2,55$  nm)
- Résolution spatiale :  $116 \times 110$  pixels

# Outils utilisés

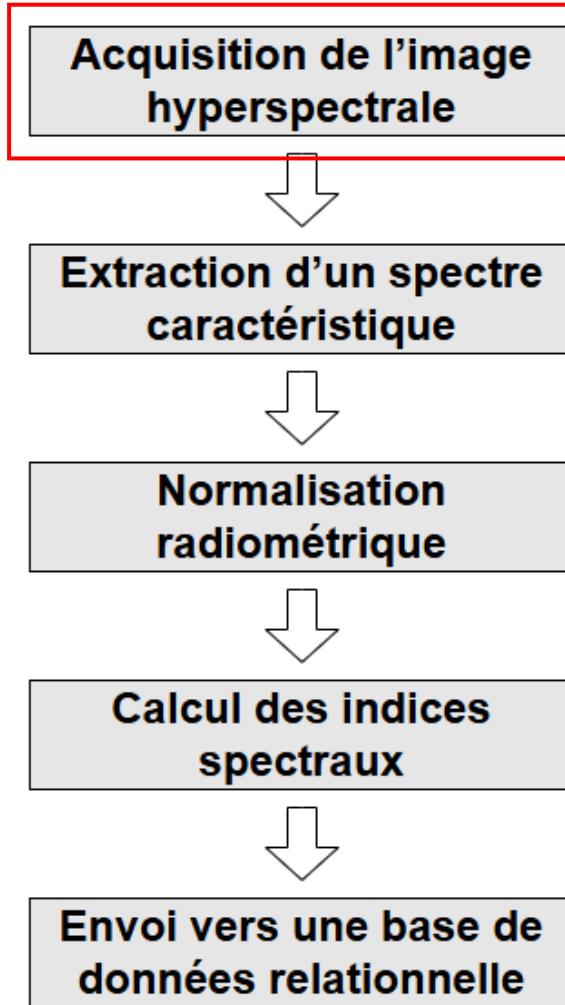
## Environnement



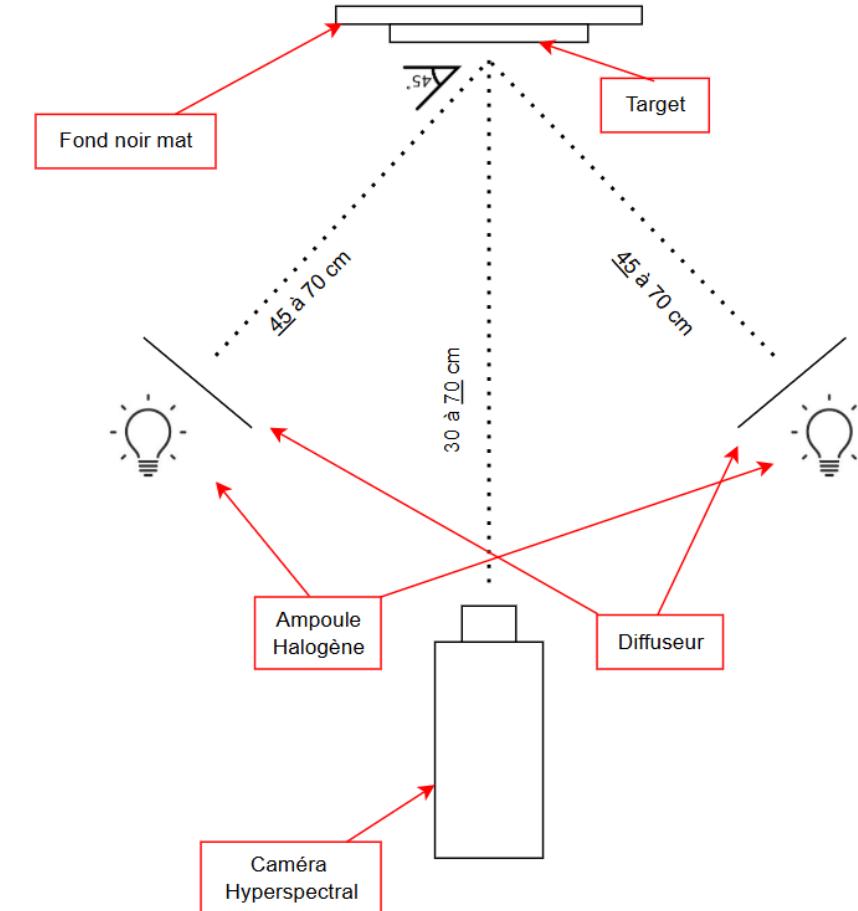
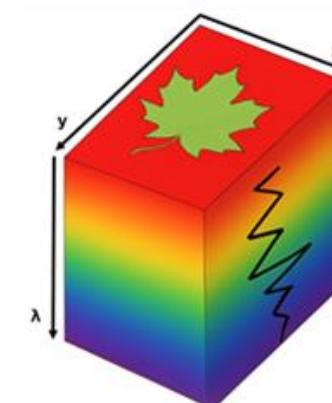
## Langage



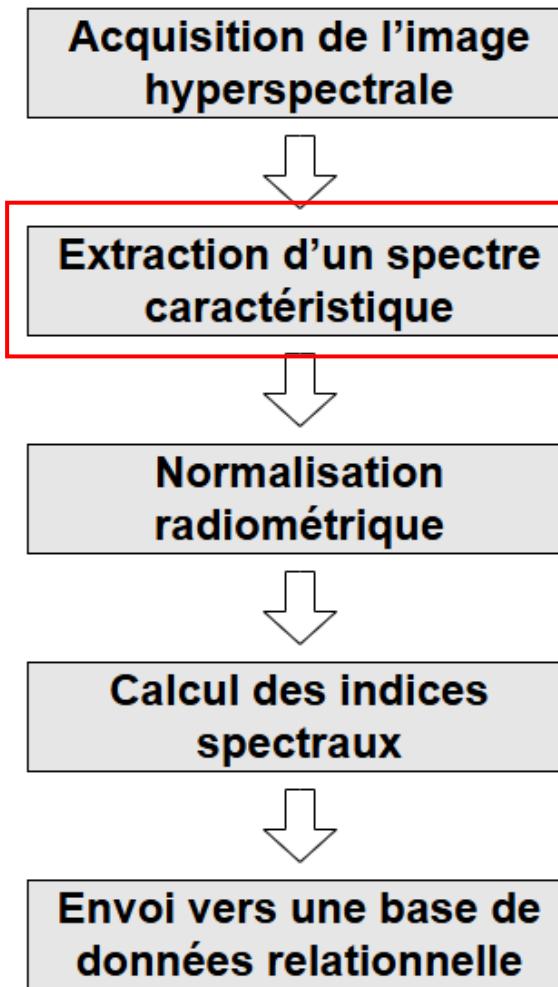
# Séquence de traitement des données



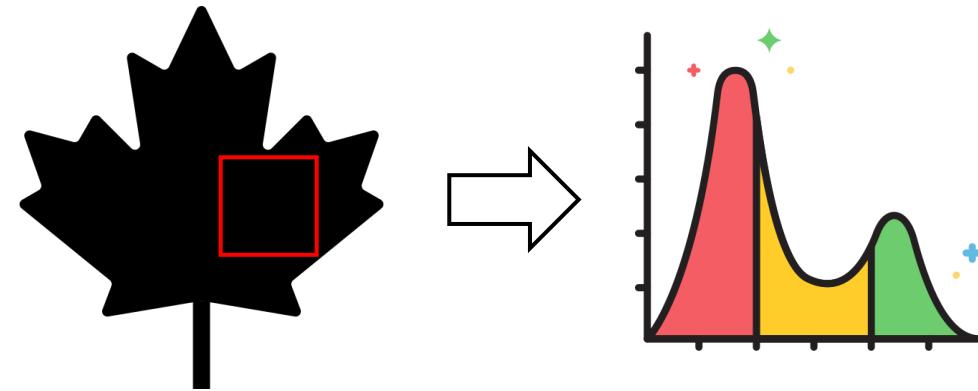
- Lieu : laboratoire
- 500 acquisitions



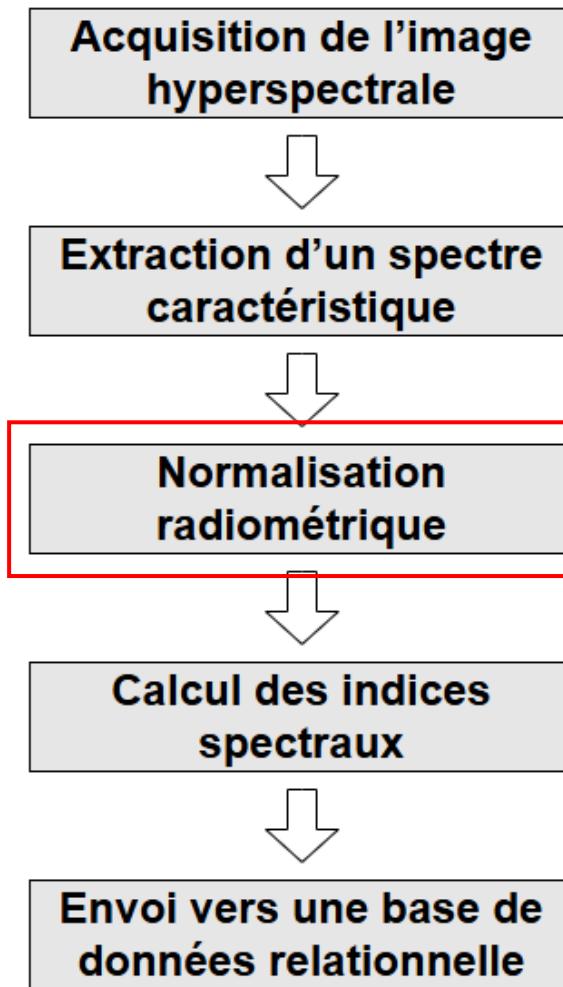
# Séquence de traitement des données



- Moyennage des spectres dans une zone sans nervure

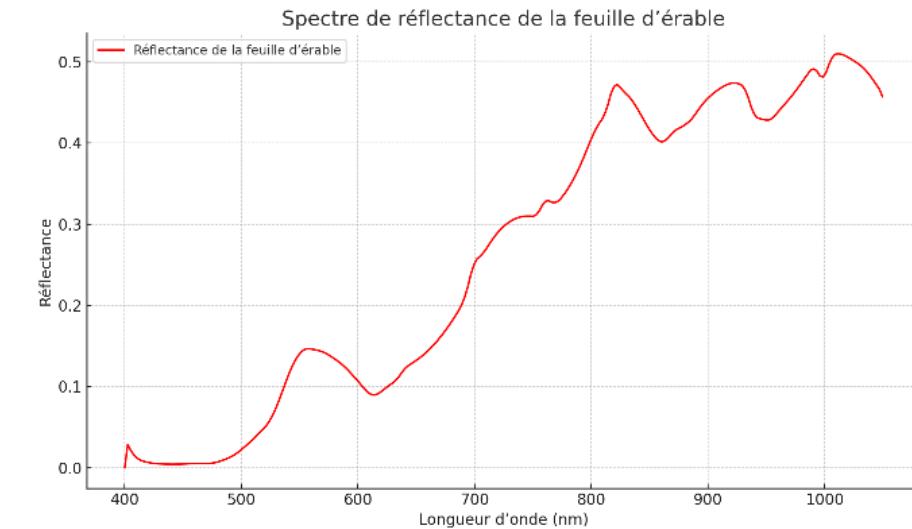
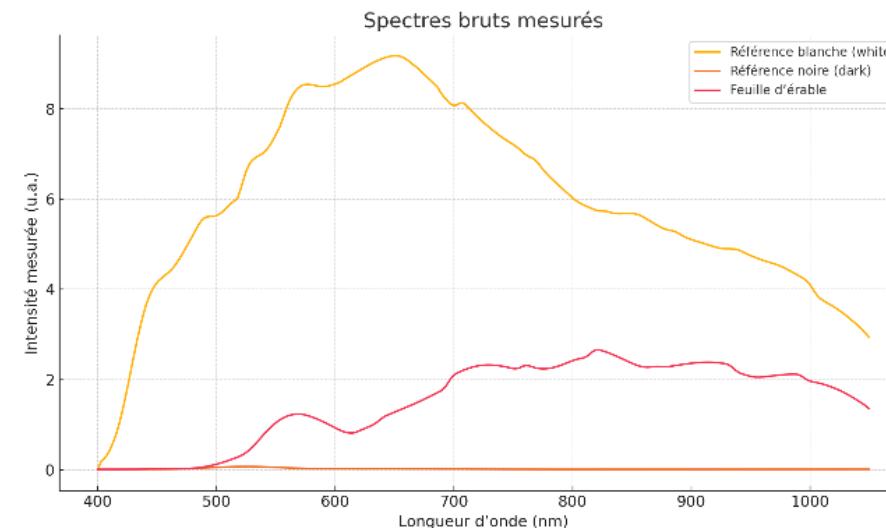


# Séquence de traitement des données

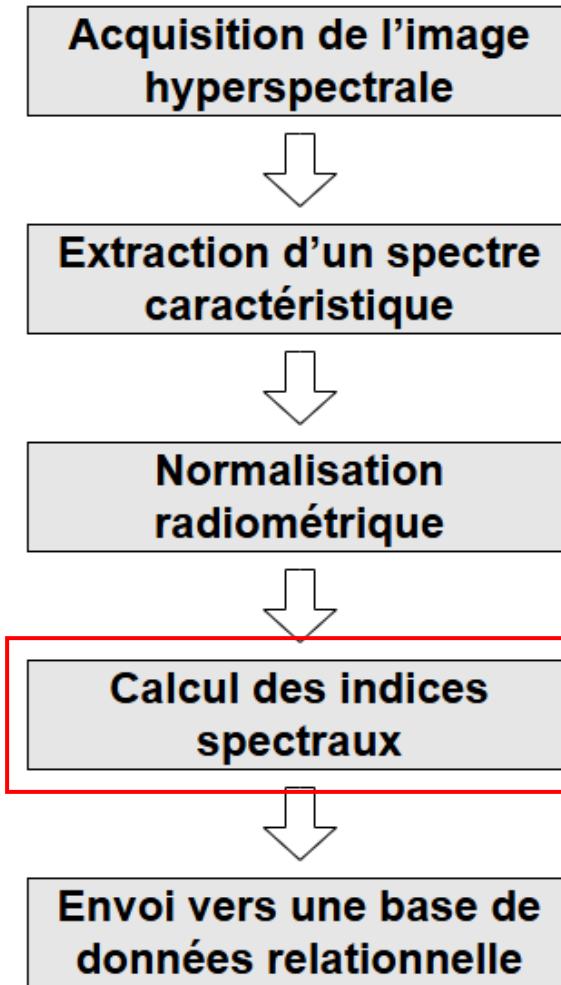


- **But :** Rendre les spectres indépendants des conditions de prise de vue
- Obtention de la **réflectance** [0;1]

$$R(\lambda) = \frac{I_{\text{échantillon}} - I_{\text{noir}}}{I_{\text{blanc}} - I_{\text{noir}}} \quad [3]$$



# Séquence de traitement des données

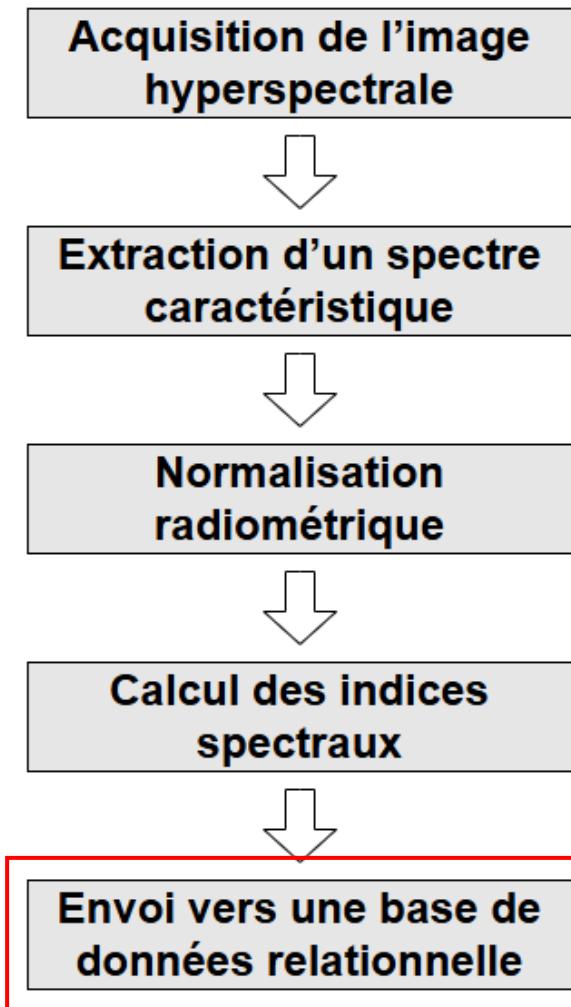


- **But :** Calculer des indicateurs liés à la physiologie des plantes
- Rapport entre longueurs d'ondes spécifiques

Acronyme	Nom complet	Formule
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(R860 - R650) / (R860 + R650)$
PRI	Photochemical Reflectance Index	$(R531 - R570) / (R531 + R570)$
WBI	Water Band Index	$R970 / R900$
CRI	Carotenoid Reflectance Index	$(1 / R510) - (1 / R550)$
PSRI	Plant Senescence Reflectance Index	$(R680 - R500) / R750$
NDRE	Normalized Difference Red-Edge Index	$(R790 - R720) / (R790 + R720)$
SIPI	Structure Insensitive Pigment Index	$(R800 - R445) / (R680 - R445)$
CARI	Chlorophyll Absorption Reflectance Index	$(R700 - R670) - 0.2 \times (R700 - R550)$
RVSI	Red-Edge Vegetation Stress Index	$((R714 + R752)/2) - R733$

[4]

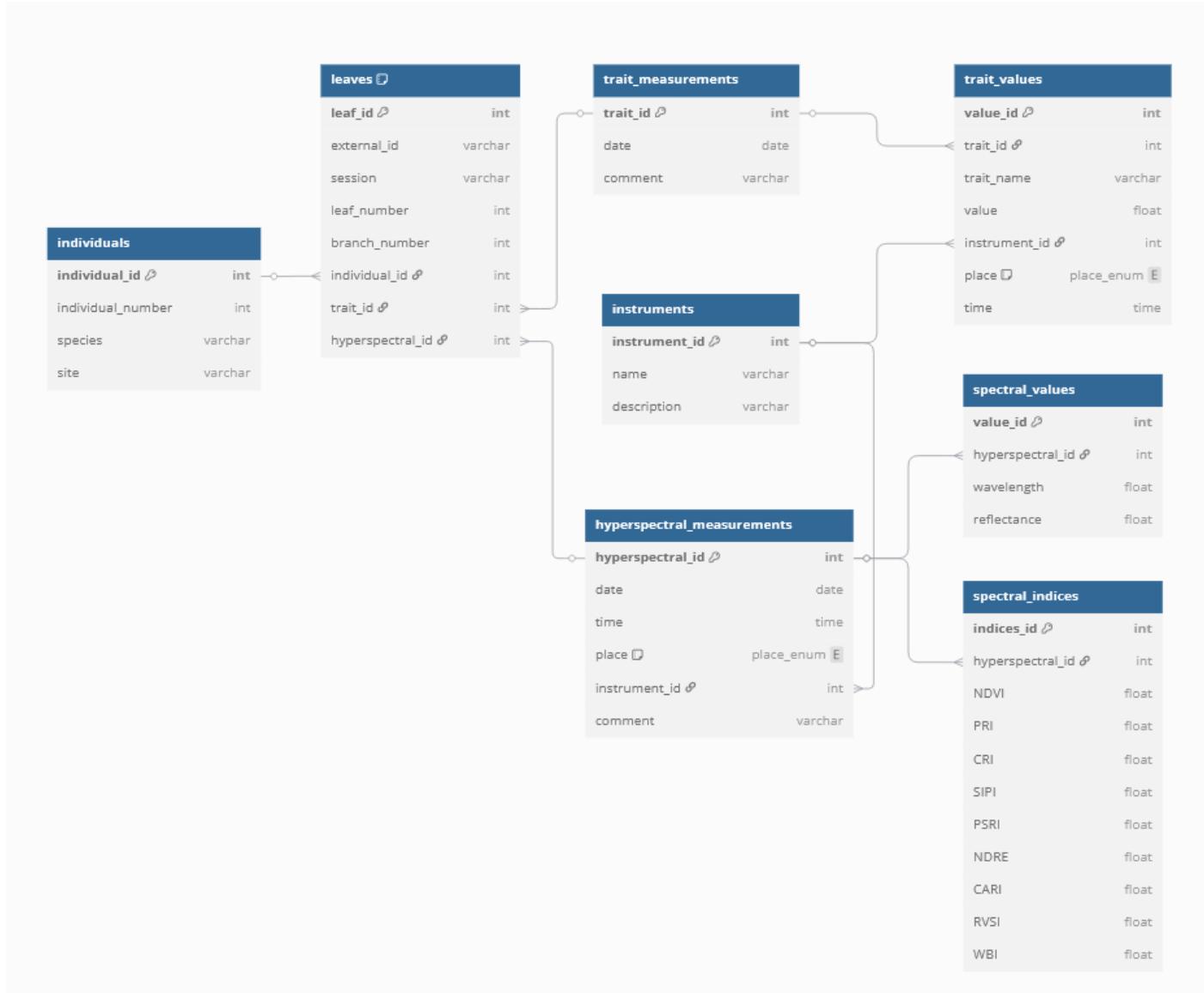
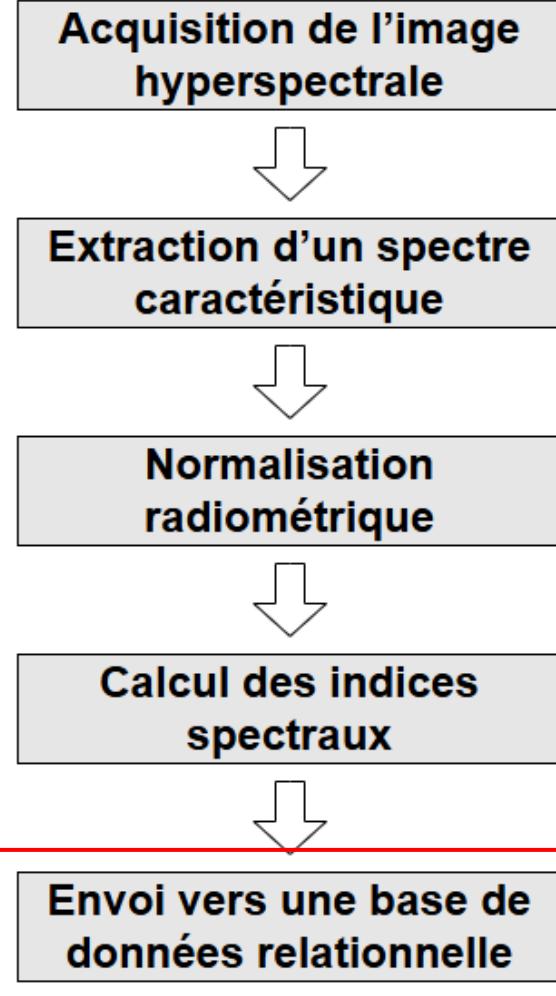
# Séquence de traitement des données



- **But :** Centraliser les données et faciliter l'accès
- Facilement exploitable par un tiers, portable



# Séquence de traitement des données



# Analyse des données hyperspectrales

## Approche 1

### Analyse de la variabilité inter- et intraspécifique

- 4 espèces
- 4 individus par espèce
- 2 rameaux par individu
- 5 échantillons par rameau
- **160** échantillons

## Approche 2

### Modélisation et prédition des traits fonctionnels

- Suivi de terrain (28 individus)
- 7 espèces
- 4 campagnes
- 3 échantillons par individus
- **336** échantillons

## Approche 3

### Modélisation des traits fonctionnels archivés

- Moyenne par individus
- **28** échantillons

# Analyse des données hyperspectrales



Approche 1 - Analyse de la variabilité inter- et intra-spécifique

## Analyse de la variance (ANOVA)

- **But :** Vérifier si les différences entre groupes sont statistiquement significatives
- Calculer pour chaque bande spectrale au niveau inter-espèce/intraespèce/intra-individu

→ Différences significatives entre les espèces sur tout le spectre

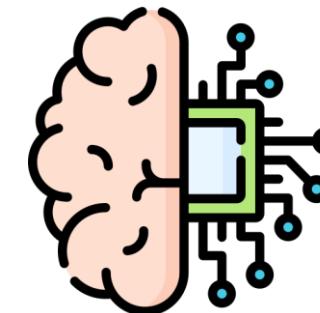
→ Différences plus ou moins significatives selon l'espèce entre les individus

→ Pas de différence significative entre les rameaux

Approche 1 - Analyse de la variabilité inter- et intra-spécifique

## Apprentissage automatique classification (Machine learning)

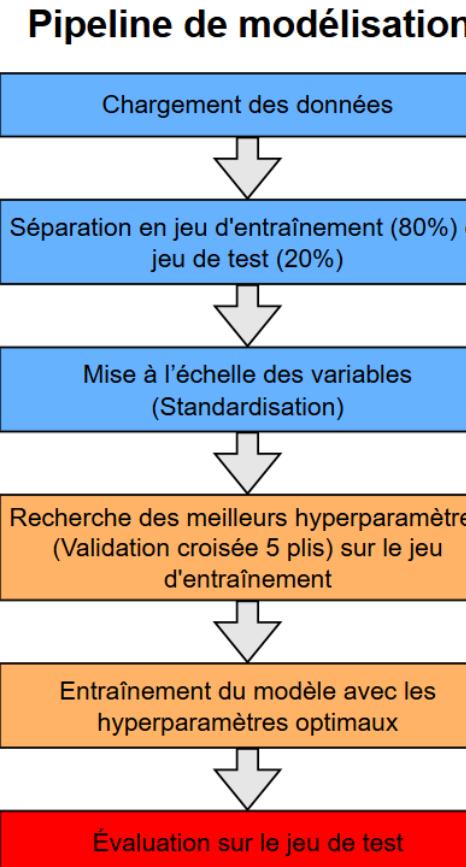
- **But** : Evaluer la capacité prédictive des données hyperspectrales vis-à-vis de l'espèce
- Modèles
  - K-Nearest Neighbors (**KNN**) : proximité entre les échantillons
  - Random Forest (**RF**) : ensemble d'arbres de décision
  - Support Vector Machine (**SVM**) : séparation des classes par hyperplan optimal



# Analyse des données hyperspectrales

Approche 1 - Analyse de la variabilité inter- et intra-spécifique

## Apprentissage automatique classification (Machine learning)



Prédicteurs	Modèle	Performances	
		Accuracy	F1
PC1 à PC7	KNN	0.750	0.745
	RandomForest	0.781	0.781
	SVM	0.843	0.841
Toutes les bandes spectrales	KNN	0.750	0.756
	RandomForest	<b>0.875</b>	<b>0.874</b>
	SVM	0.843	0.844
Indices spectraux	KNN	0.781	0.780
	RandomForest	<b>0.843</b>	<b>0.843</b>
	SVM	0.781	0.783
PC1 à PC7 + Indices spectraux	KNN	0.750	0.745
	RandomForest	<b>0.906</b>	<b>0.905</b>
	SVM	0.750	0.742

# Analyse des données hyperspectrales

Approche 2 - Modélisation et prédiction des traits fonctionnels

## Traits fonctionnels de références étudiés

- Définis par l'équipe encadrante
- Mesurés par méthodes classiques sur chaque feuille au moment de l'acquisition hyperspectrale

Acronyme	Nom complet	Unité	Type
PhiPS2	Rendement quantique du photosystème II	-	Physiologique
ETR	Taux de transport des électrons de la photosynthèse	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Physiologique
gsw	Conductance stomatique de l'eau	$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Physiologique
ChlM	Teneur foliaire en chlorophylle	Unit	Chimique
FlvM	Teneur foliaire en flavonoïde	Unit	Chimique
AnthM	Teneur foliaire en anthocyanine	Unit	Chimique
psi_midday	Potentiel hydrique de mi-journée	MPa	Physiologique

## Approche 2 - Modélisation et prédition des traits fonctionnels

### Régression linéaire multiple

- **But** : Évaluer la part de variance des traits pouvant être expliquée par les variables spectrales
- Coefficient de **détermination ( $R^2$ )** : proportion de variance expliquée [0 ; 1]
- Variables explicatives testées
  - Indices spectraux
  - Composantes principales (PCA)
  - Composantes latentes (PLS)
  - Combinaison indices + PCA
  - Combinaison indices + PLS

# Analyse des données hyperspectrales

Approche 2 - Modélisation et prédiction des traits fonctionnels

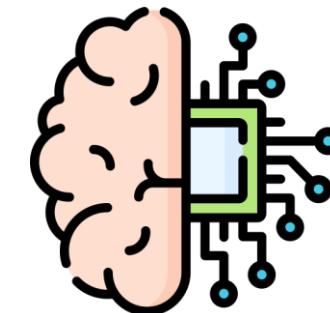
## Modélisation linéaire multivariée des traits

Trait	R <sup>2</sup>	nRMSE	Variables explicatives
<b>FlvM</b>	0.575	0.339	Indices + PLS
<b>AnthM</b>	0.520	0.316	Indices + PLS
<b>ChlM</b>	0.486	0.221	Indices + PLS
<b>gsw</b>	0.346	0.370	Indices + PLS
<b>psi_midday</b>	0.205	0.314	Indices + PLS
<b>ETR</b>	0.189	0.170	Indices + PLS
<b>PhiPS2</b>	0.173	0.099	Indices + PLS

Approche 2 - Modélisation et prédiction des traits fonctionnels

## Apprentissage automatique régression (Machine learning)

- **But** : Evaluer la capacité prédictive des données hyperspectrales par rapport aux traits fonctionnels
- **Modèles**
  - Gaussian Process Regressor (**GPR**) : approche probabiliste basée sur la loi normale
  - Random Forest Regressor (**RFR**) : ensemble d'arbres de décision
  - Support Vector Regressor (**SVR**) : fonction prédictive avec une marge d'erreur tolérée
- **Prédicteurs testés**
  - Indices spectraux
  - Composantes principales (PCA)
  - Spectre complet
  - Différentes combinaisons en intégrant l'espèce



# Analyse des données hyperspectrales

Approche 2 - Modélisation et prédiction des traits fonctionnels

## Apprentissage automatique régression (Machine learning)

Trait	Modèle	Prédicteurs	nRMSE [%]	R2
<b>PhiPS2</b>	RFR	Indices + Espèce	12.3	0.174
<b>ETR</b>	SVR	PCA + Indices + Espèce	16.9	0.384
<b>ChlM</b>	SVR	PCA + Indices + Espèce	23.6	0.445
<b>gsw</b>	GPR	Spectre + Espèce	29.2	0.189
<b>psi_midday</b>	GPR	Spectre + Indices + Espèce	29.6	0.269
<b>FlvM</b>	SVR	Indices + Espèce	30.1	0.670
<b>AnthM</b>	RFR	PCA + Indices + Espèce	33.2	0.522

# Limites

- Faible variabilité dans les traits mesurés → Diversifier les conditions environnementales
- Nombre d'échantillons limité → Collecter plus de données
- Temps d'exposition de la caméra long
- Plage spectrale restreinte



# Conclusion

## Travail réalisé

- Réalisation de la caméra
- Collecte des données
- Préparation des données
- Analyses statistiques
- Test de plusieurs modèles (RF, GPR...)

## Bilan

- Certains modèles atteignent des  $R^2 > 50\%$
- Erreurs de prédiction **modérées** (12 à 30 %)
- **Fort potentiel de l'imagerie hyperspectrale, y compris avec des caméras à bas coût**

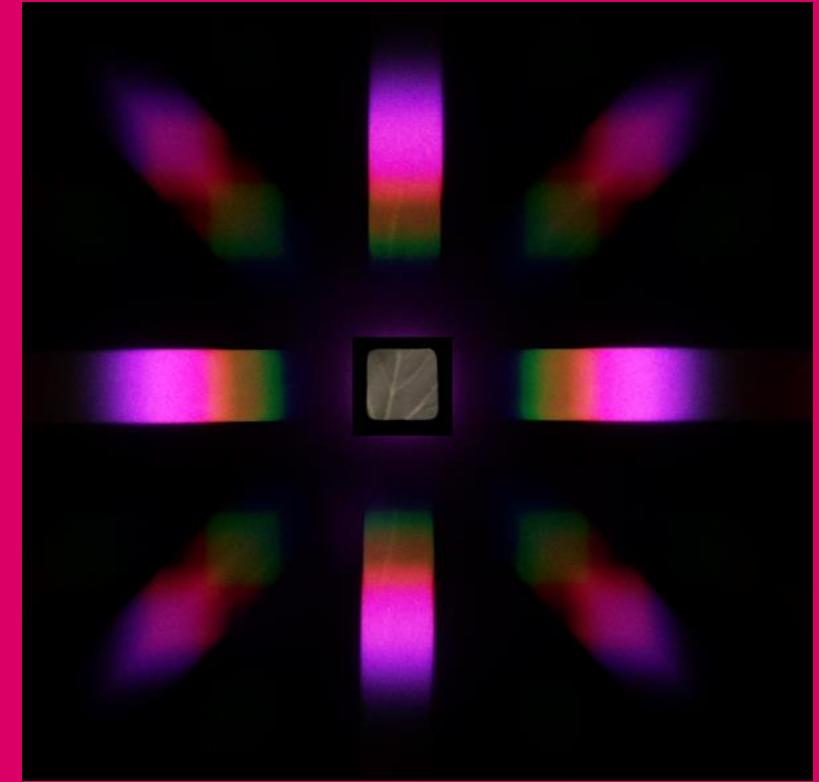
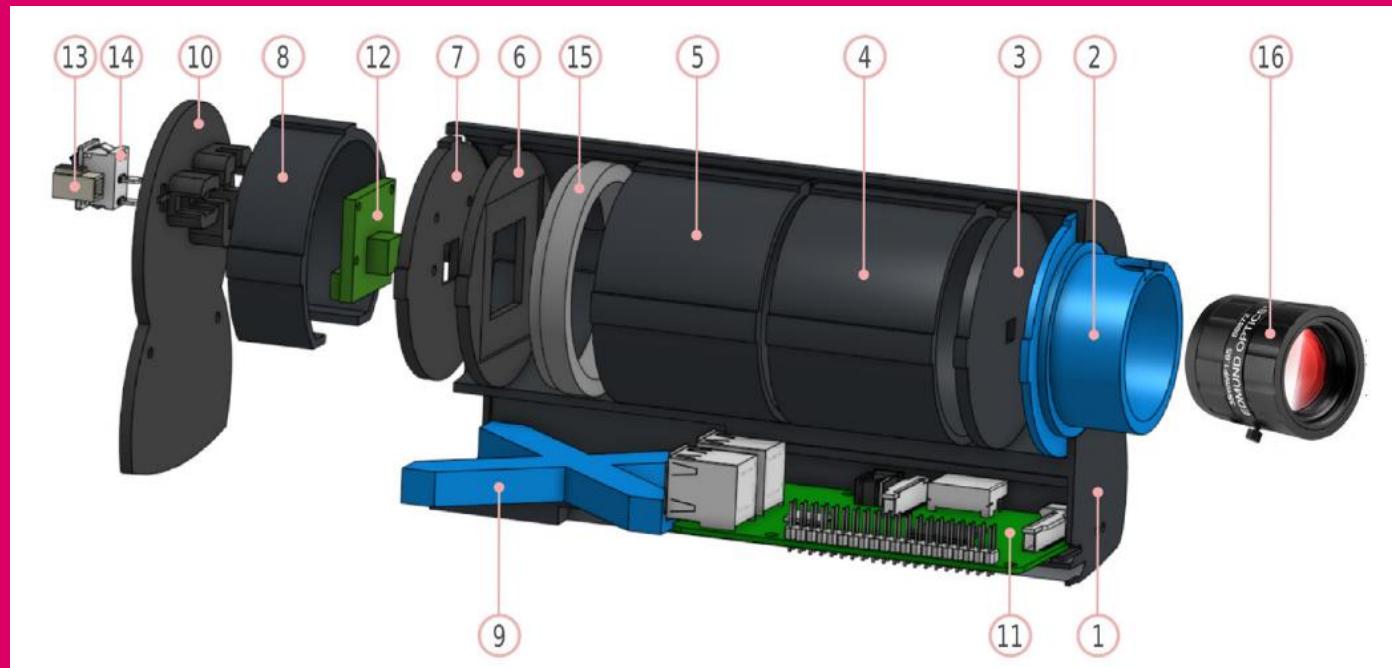


# Références

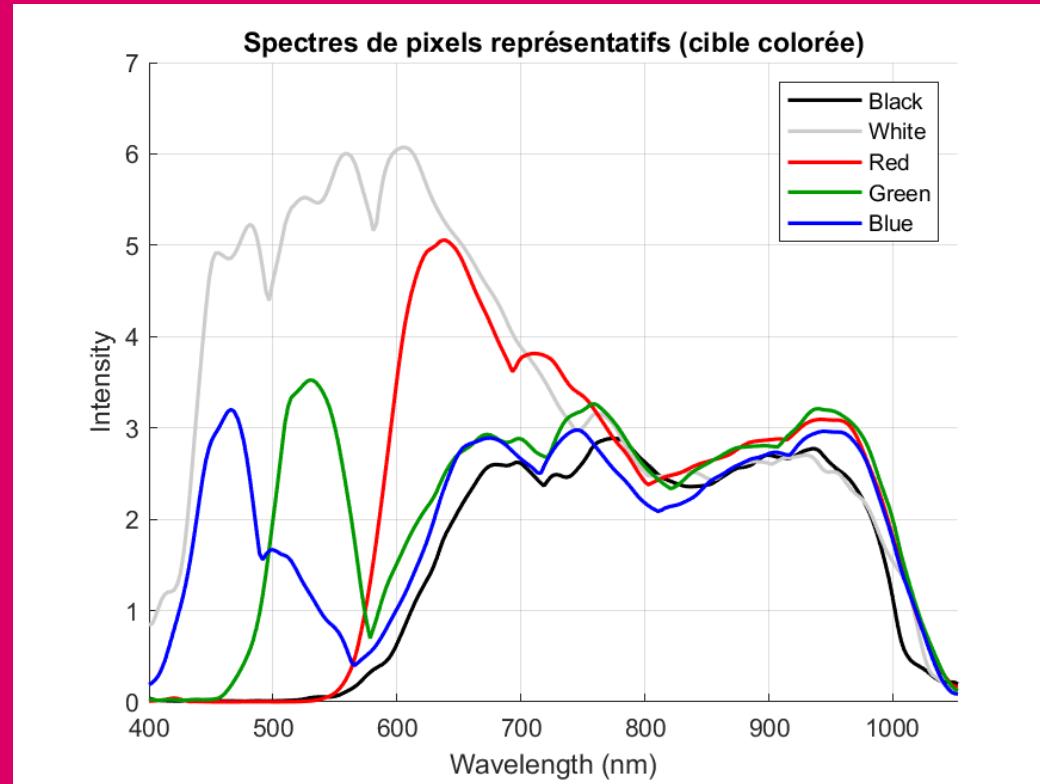
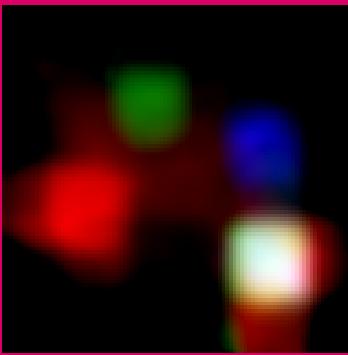
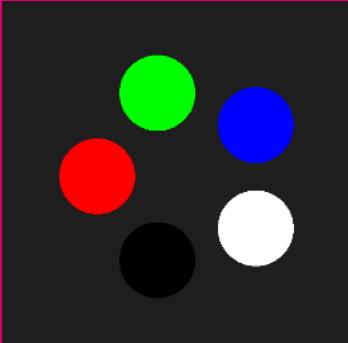
- [1] P. Mishra et al. déc. 2017, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.09.009.
- [2] J. Salazar-Vazquez et al. avr. 2020, doi: 10.1016/j.ohx.2019.e00087.
- [3] G. ElMasry et al. juill. 2007, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.10.016.
- [4] M. H. Sellami et al. doi: 10.3390/agronomy12020489.

Ce PowerPoint a été conçu à l'aide d'icônes provenant de Flaticon.com

# Principe de fonctionnement de la caméra



# Validation de la caméra

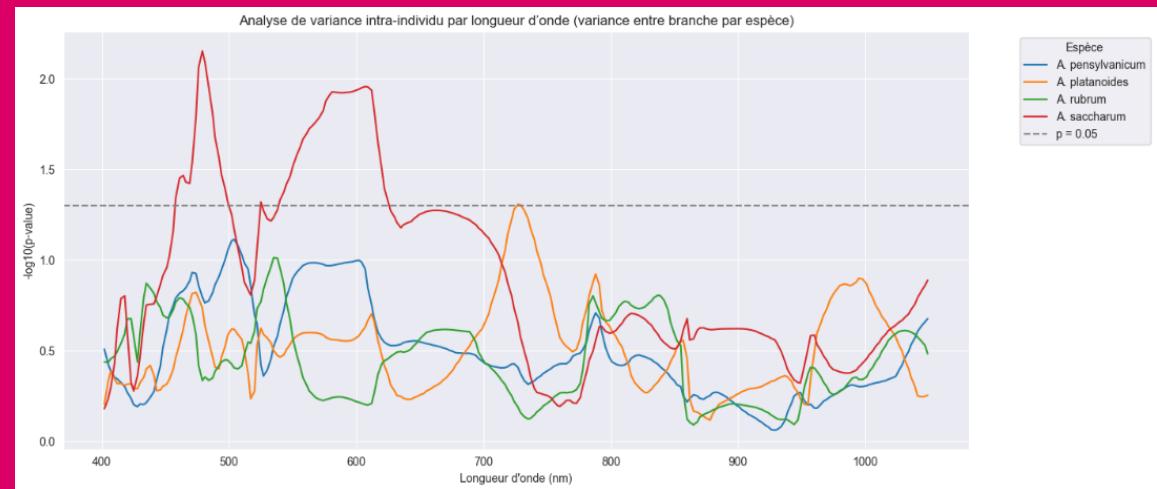
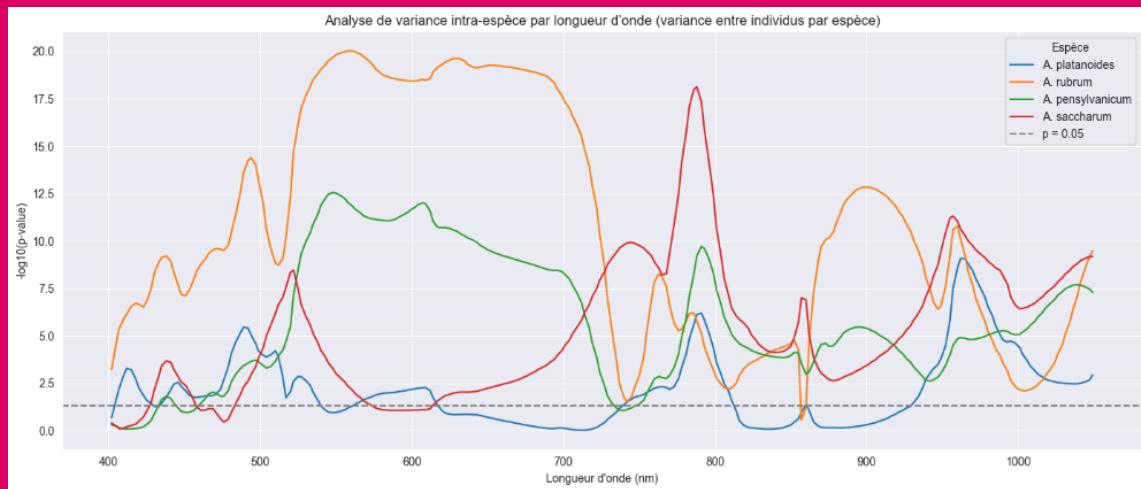
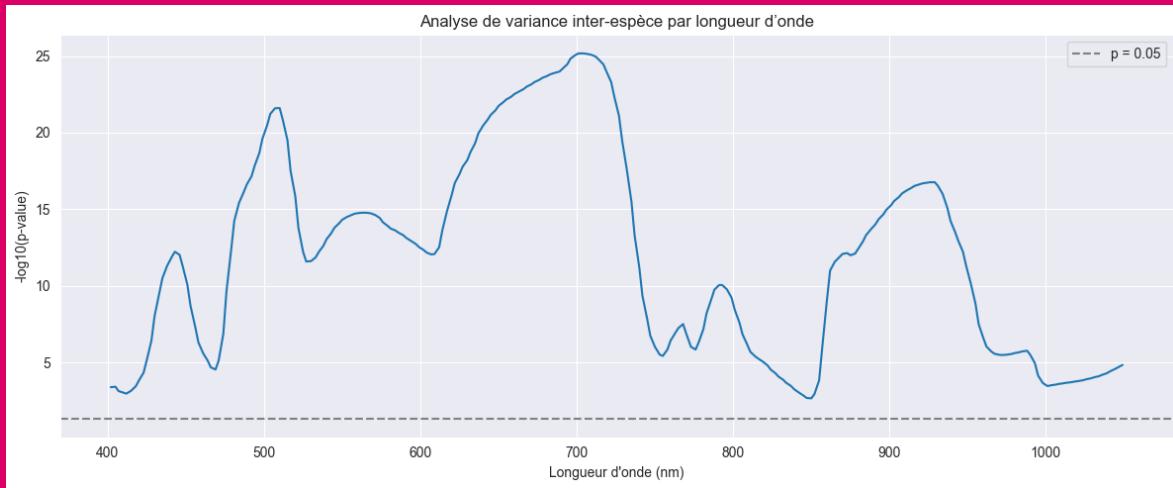


# Composants de la caméra

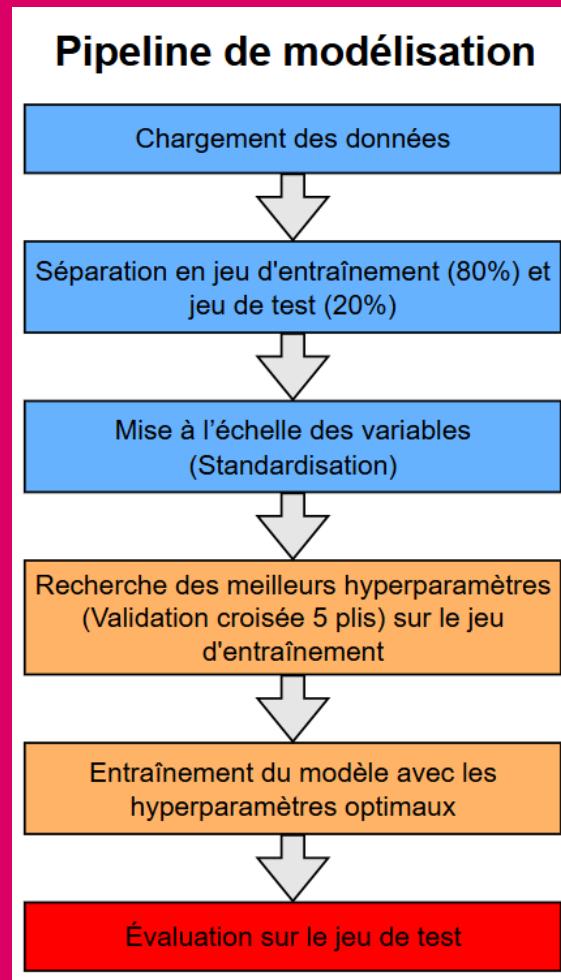
Dénomination	Fournisseur	N° Référence	Prix CHF (sans TVA)
Raspberry Pi 4	DigiKey	2648-SC0195(9)-ND	67.50
PI NoIR Camera	DigiKey	2648-SC0024-ND	22.50
Micro-SD	DigiKey	3247-USDCOEM-32GB-ND	10.59
Front Camera	EdmundOptics	59-872	280.00
Macro Lens	Galaxus	22453538	51.90
Réseau de diffraction	Ebay	313366264746	15.00
Total :			447.49

Tableau 2 : Composants utilisés, fournisseurs et prix associés.

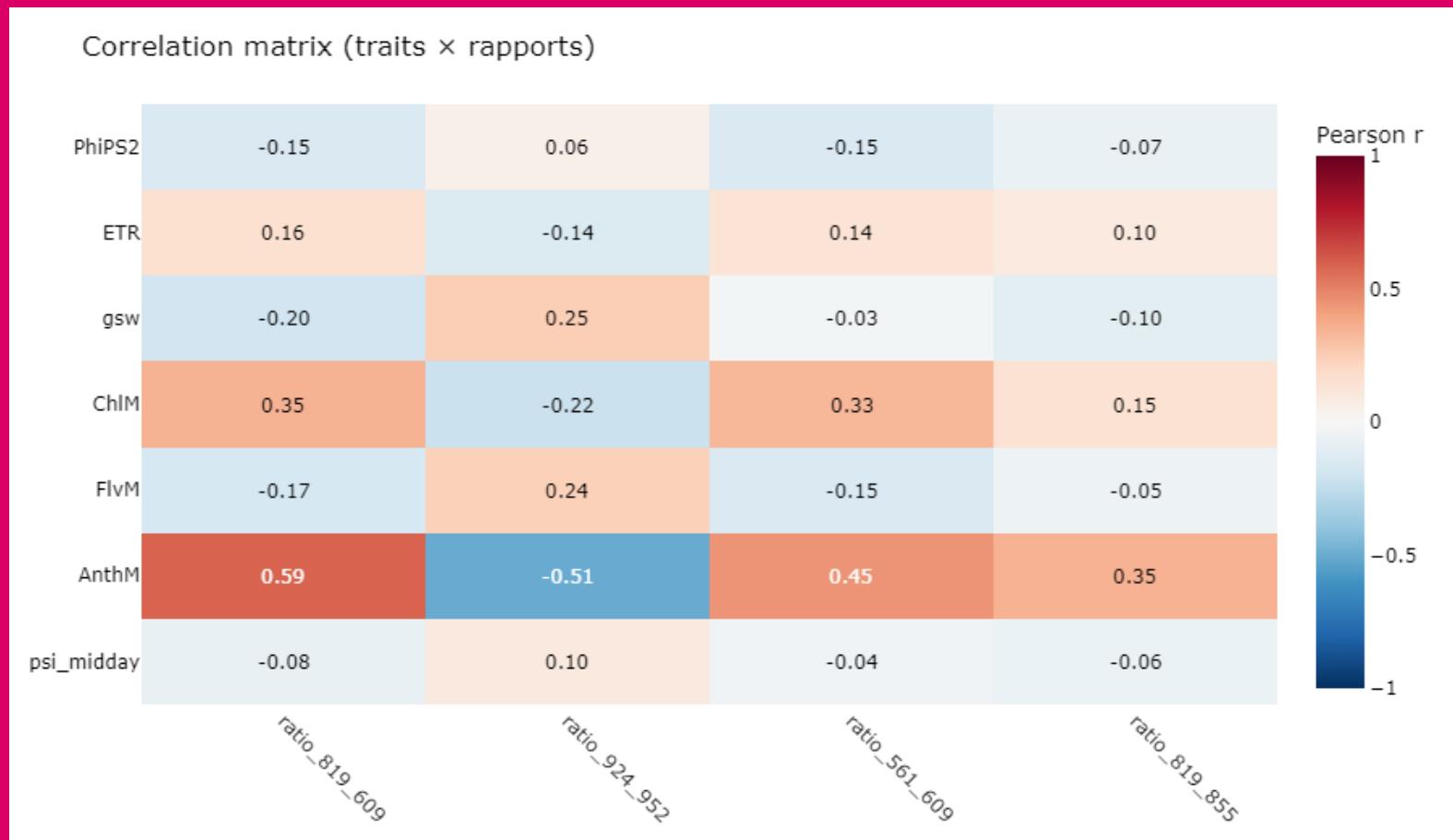
# Approche 1 – Analyse de variance



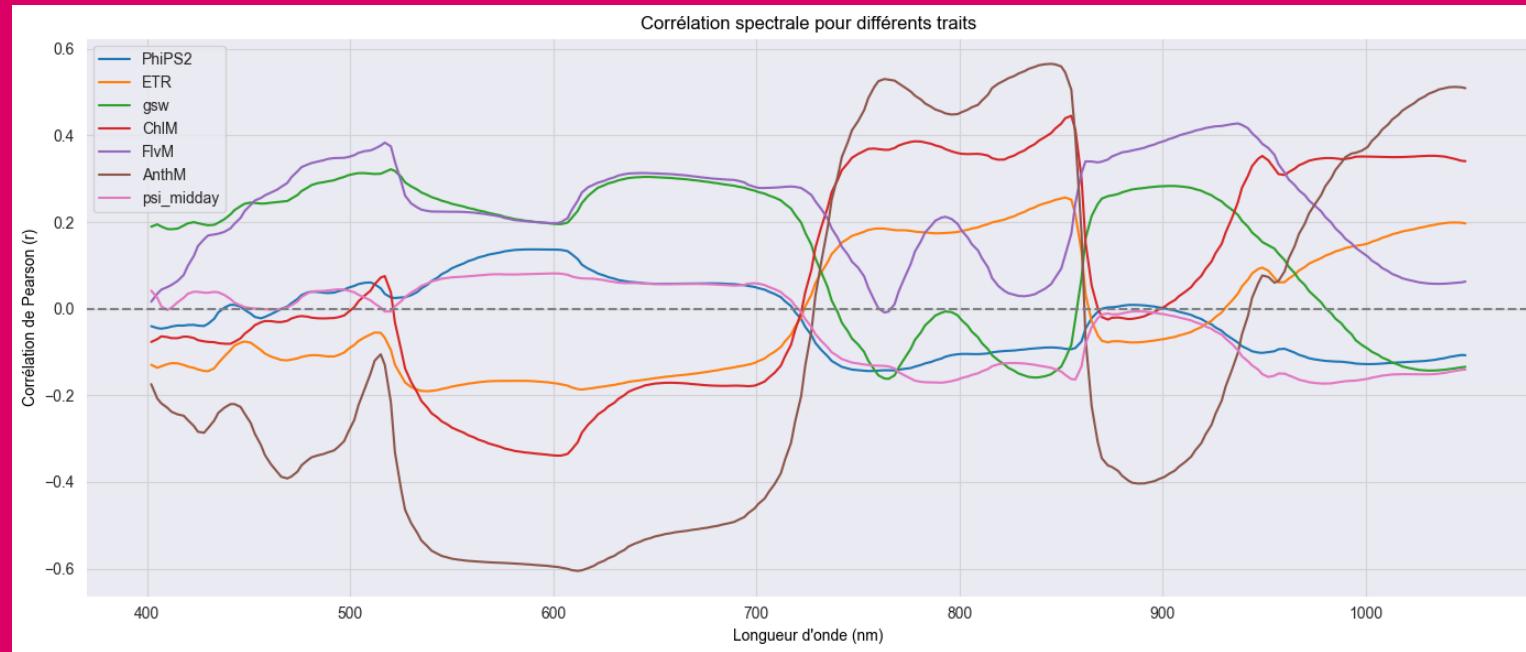
# Approche 1 – ML



# Approche 2 – Variation différentielle



# Approche 2 – Corrélation de Pearson



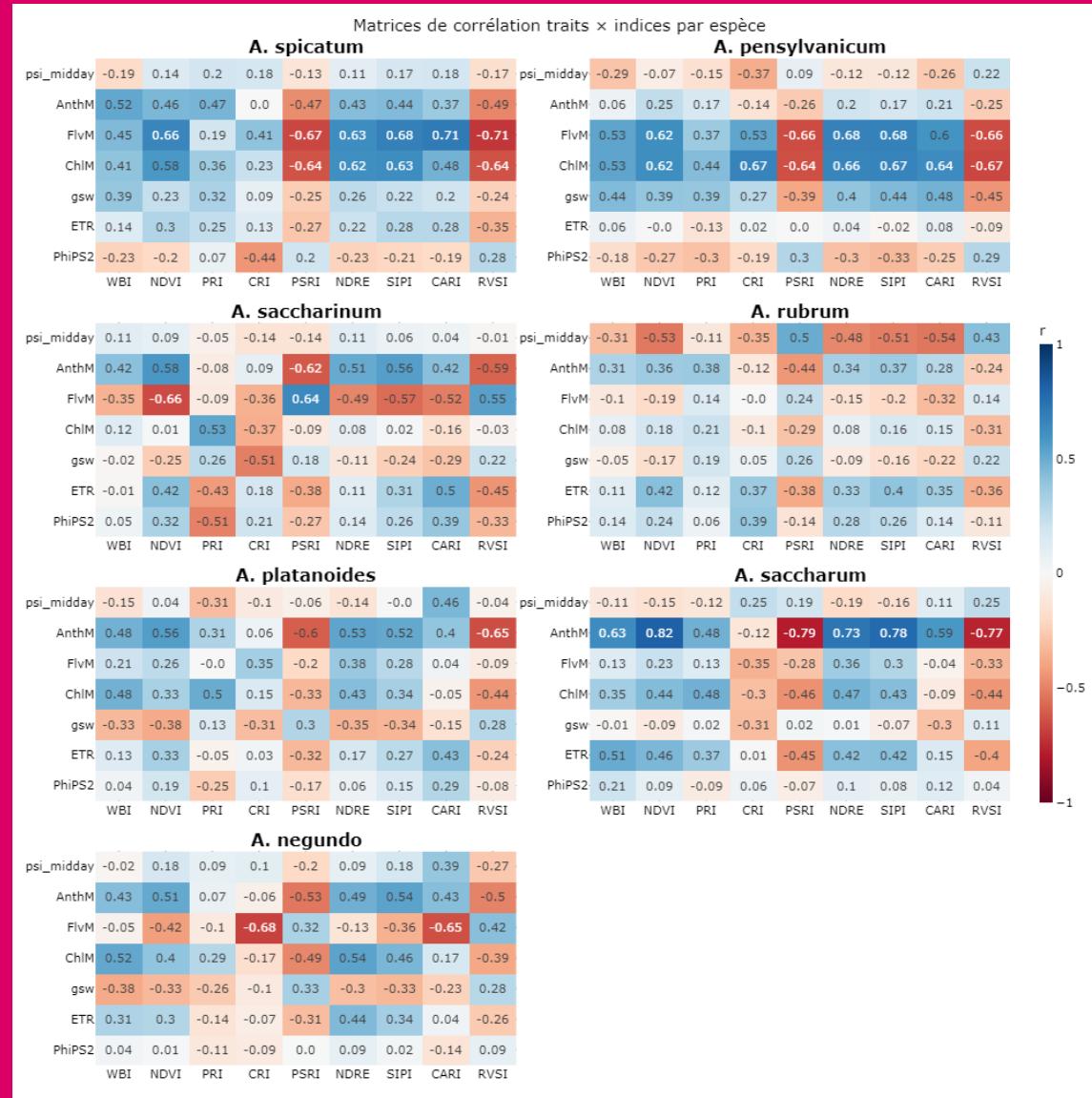
Correlation matrix (traits  $\times$  indices)

	WBI	NDVI	PRI	CRI	PSRI	NDRE	SIPI	CARI	RVSI
PhiPS2	-0.07	-0.07	-0.21	-0.07	0.08	-0.07	-0.08	-0.04	0.12
ETR	0.13	0.17	0.01	0.02	-0.17	0.15	0.15	0.14	-0.19
gsw	-0.24	-0.30	0.05	-0.28	0.26	-0.20	-0.26	-0.31	0.24
ChlM	0.21	0.20	0.36	-0.05	-0.26	0.30	0.25	0.06	-0.30
FlvM	-0.20	-0.28	-0.02	-0.29	0.23	-0.11	-0.19	-0.33	0.18
AnthM	0.50	0.54	0.33	0.04	-0.57	0.54	0.53	0.44	-0.56
psi_midday	-0.10	-0.07	-0.10	-0.02	0.08	-0.12	-0.08	-0.03	0.11

Pearson  $r$

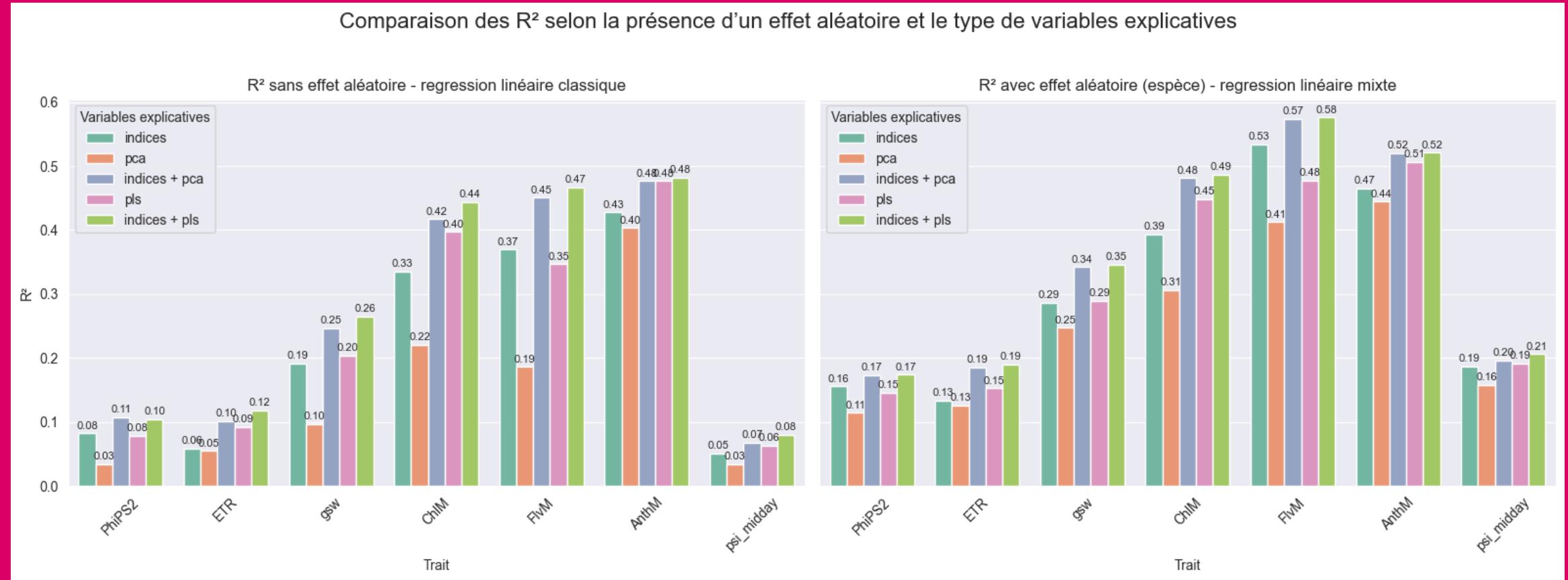
Color scale from -1 (dark red) to 1 (dark blue).

# Approche 2 – Corrélations par espèce

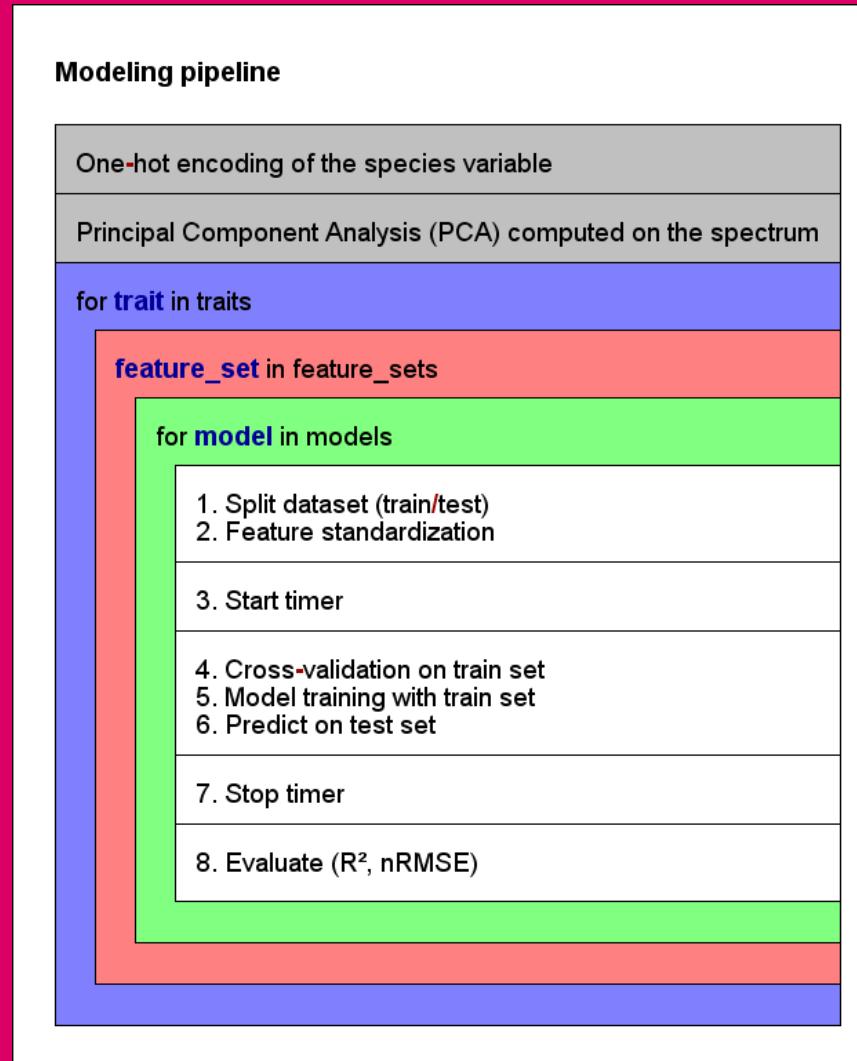


# Approche 2 – Régression linéaire multiple

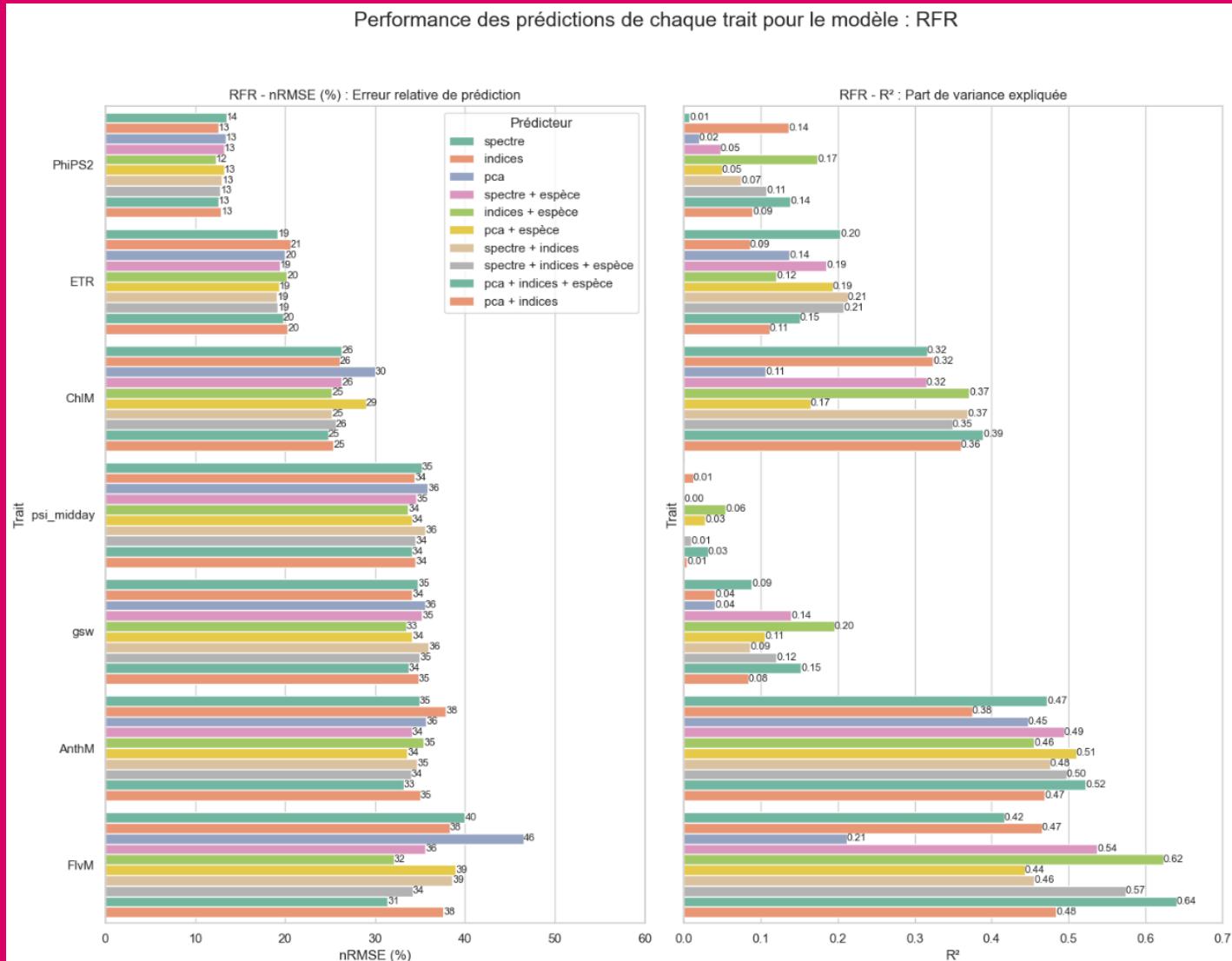
Comparaison des R<sup>2</sup> selon la présence d'un effet aléatoire et le type de variables explicatives



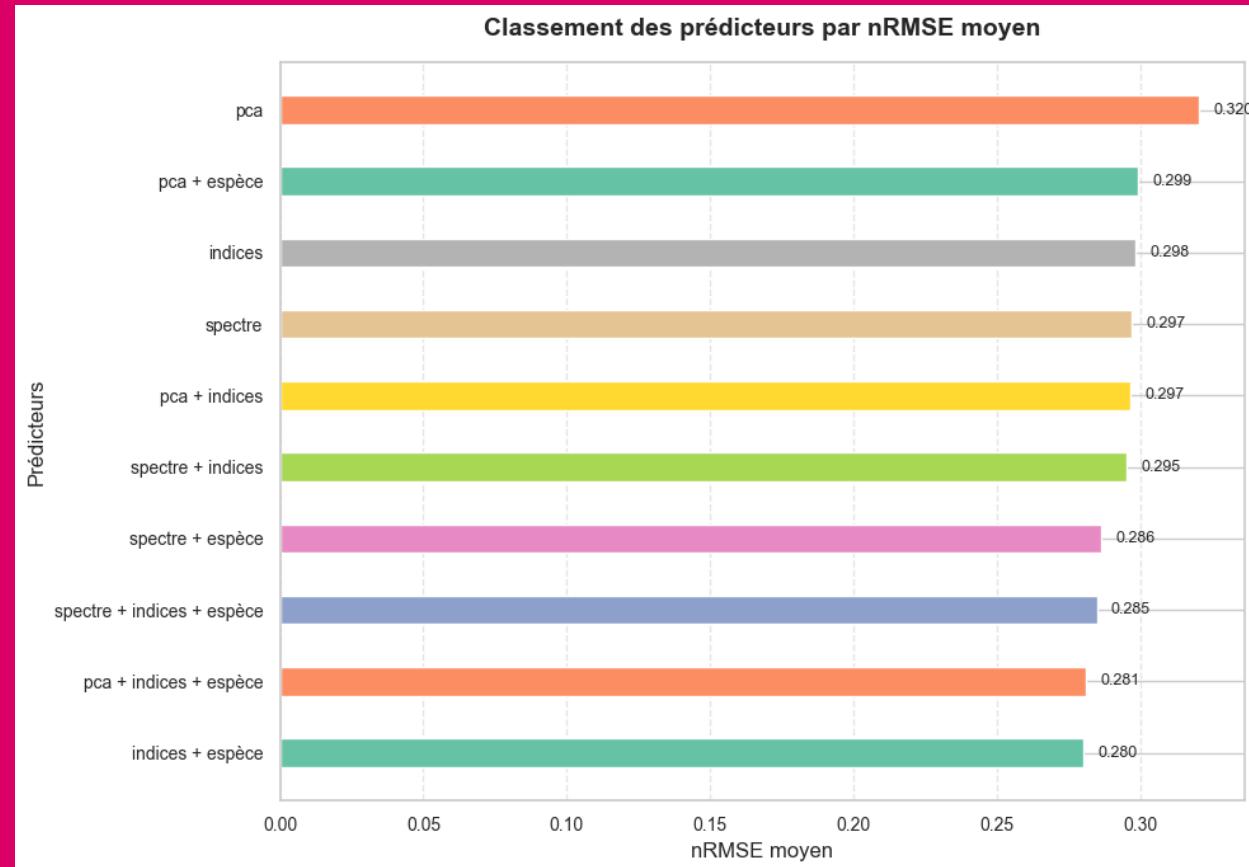
# Approche 2 – ML



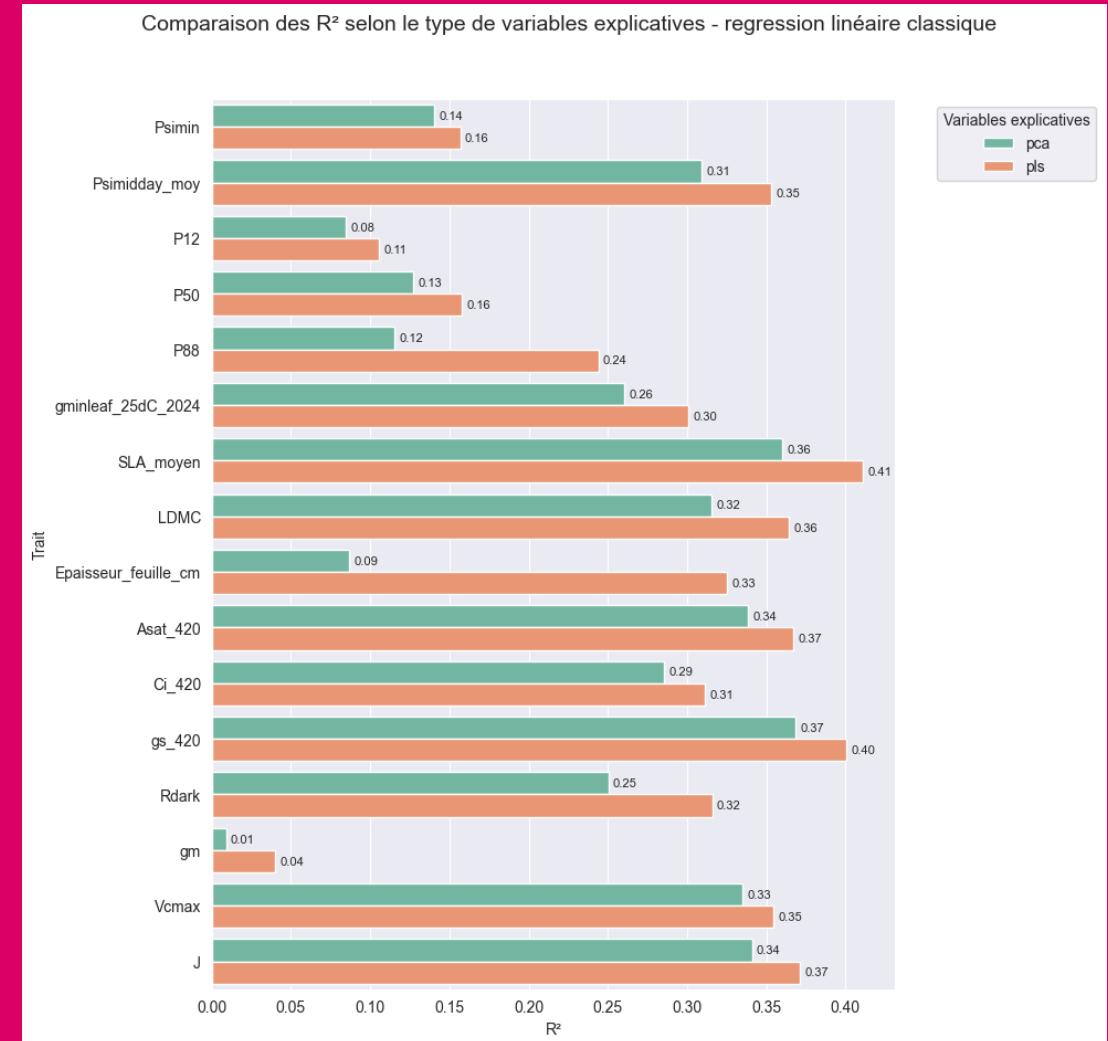
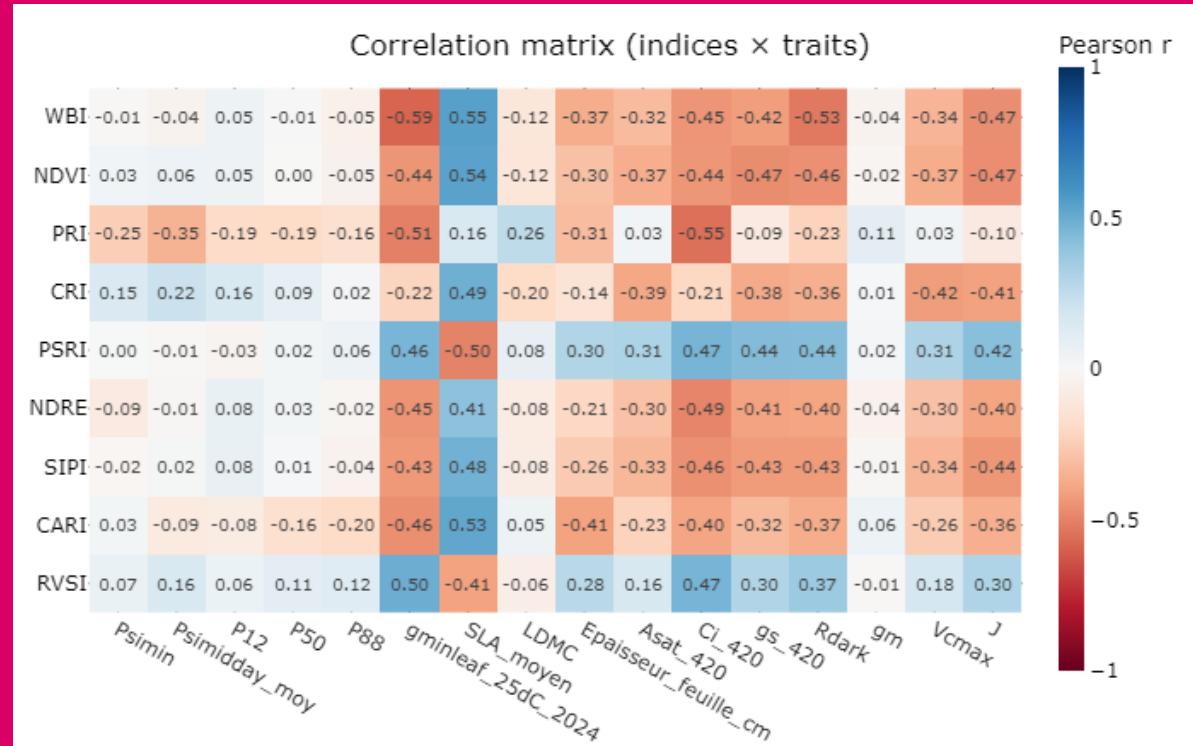
# Approche 2 – ML



# Approche 2 – ML



# Approche 3



# Perspectives

