



Les Rencontres du  
**Végétal**

**9<sup>e</sup>**  
édition

**2017**  
**16 & 17 janvier**  
**AGROCAMPUS OUEST**  
ANGERS, FRANCE

**RECHERCHE**  
**EXPÉRIMENTATION**  
**INNOVATION**

Fruits  
Légumes  
Ornement  
Plantes aromatiques  
et médicinales  
Semences  
Cidriculture  
Viticulture  
Paysage

## Détection précoce de maladies et/ou de ravageurs sur feuilles dans les cultures par traitement d'image Intérêts et limites de l'imagerie hyperspectrale

Session « *Le Numérique au service des systèmes de production* »

...

**Gilbert GRENIER**

Professeur, Bordeaux Sciences Agro  
EC à IMS (UMR 5218)



## Préambule : Présentation du Laboratoire bordelais IMS

### IMS : Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (UMR5218)

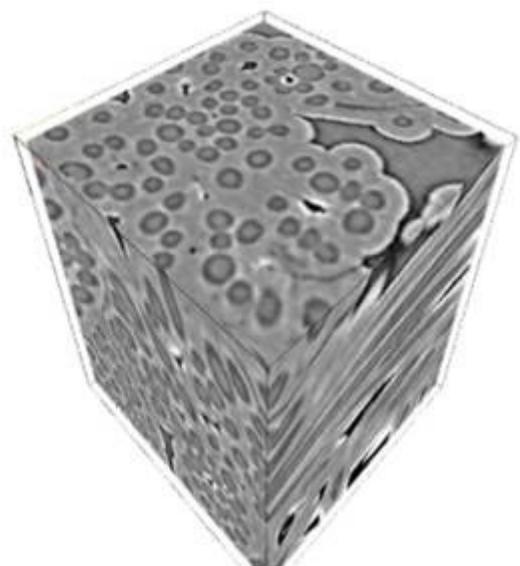
- L'IMS : 50 personnes, dont 135 chercheurs et enseignants-chercheurs, 150 doctorants et postdoctorants, et 65 ingénieurs et techniciens
- La recherche est organisée au sein de 10 groupes et 27 thèmes de recherche.
- Groupe Signal et Image : conception d'algorithmes pour le traitement du signal
  - Spectral = développement de méthodes statistiques de traitement du signal,
  - Motive = **analyse, classification, détection et reconstruction** d'objets dans des **images et volumes texturés (images 2D et 3D)**.

Groupe Signal et Image : 20 membres permanents, dont 5 EC de BSA

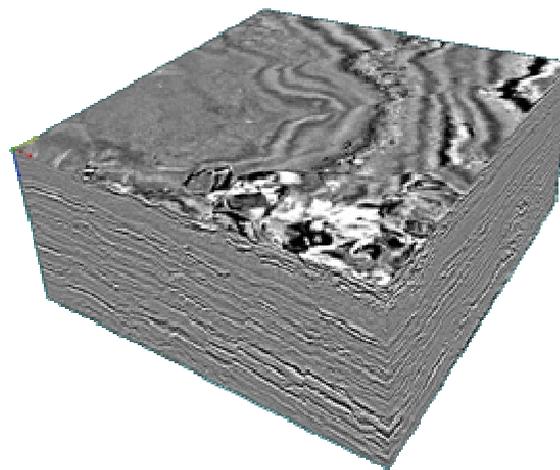
## Préambule : Présentation du Laboratoire bordelais IMS

### Groupe Signal et Image / Motive

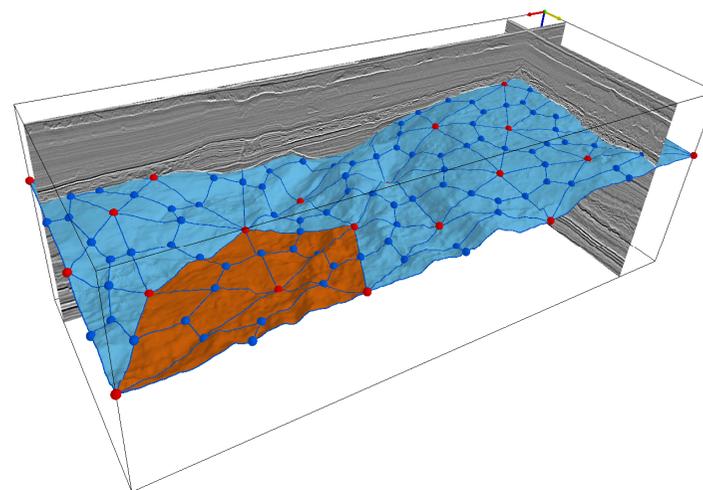
- Très fort partenariat industriel (groupe Safran, Total,...)
- Excellence scientifique en analyse d'images texturées
  - Images 2D (restauration de documents anciens, télédétection,...)
  - Images 3D (matériaux composites, prospection pétrolière,...)



Vue 3D d'une texture volumique fibreuse



Visualisation 3D de données sismiques

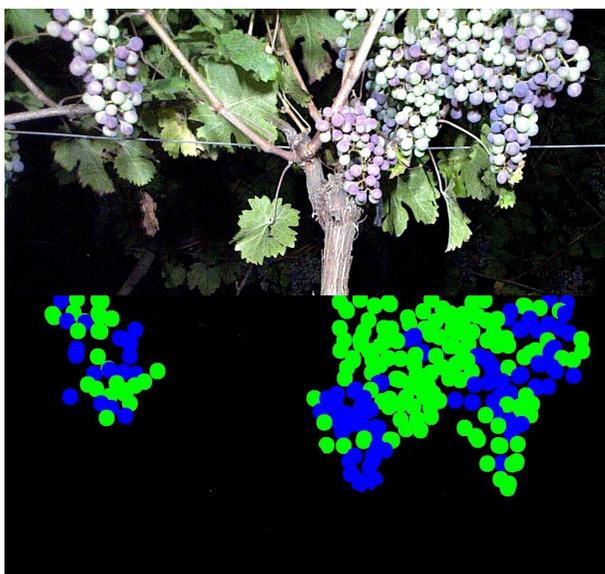


Reconstruction d'horizon en imagerie sismique

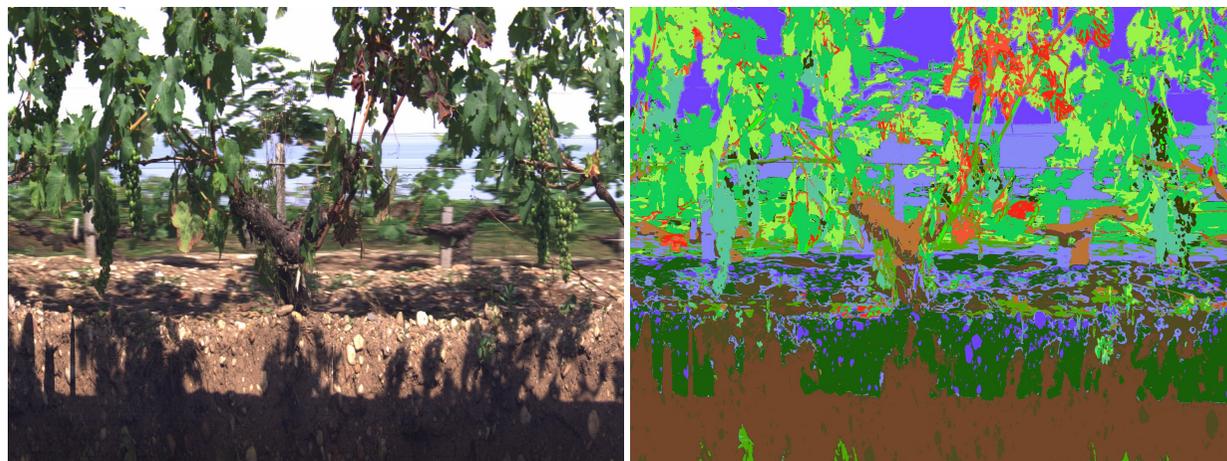
## Préambule : Présentation du Laboratoire bordelais IMS

### Groupe Signal et Image / Motive

- Très fort partenariat industriel (groupe Safran, Total,...)
- Excellence scientifique en analyse d'images texturées
  - Images 2D (restauration de documents anciens, **proxidtection et télédtection**,...)



Détection automatique de maturité sur baies de raisin



Feuilles de vigne touchées par l'esca

Image de départ  
(couleurs naturelles)

résultat de classification  
automatique

# L'imagerie au service des systèmes de production

## Contexte : Nombreuses applications de l'imagerie depuis les années 80

### Développement des outils numériques

- Passage des caméras à tube (Analogique) aux capteurs CCD (**Numérique**)
- Développement des puissances de calcul
- Développement des algorithmes de traitement adaptés aux caractéristiques des images  
Images en Niveaux de Gris → Images Multispectrales → Cubes de données  
Images simples (objet simple sur fond uniforme) → Scènes extérieures complexes,....
- Développement des moyens de stockage des données (passage du Ko au To,..)
- Développement des réseaux de transfert de données volumineuses,....

### Développement de l'imagerie pour le contrôle et l'automatisation des tâches

- Industries : tri, conditionnement, métrologie,...
- Agro-alimentaire : tri, conditionnement, qualité
- Agriculture :
  - Suivi des cultures (besoins en engrais, eau,...),
  - Automatisation des machines et Robotique

## L'imagerie au service des systèmes de production

### Contexte : Nombreuses applications de l'imagerie depuis les années 80

Applications commerciales majoritairement basées sur l'imagerie multispectrale

- Imagerie couleur (RGB) = contrôle qualité, tri colorimétrique, métrologie, guidage
  - Tri colorimétrique de fruits et légumes (pomme, tomate,...)
  - Détection de défauts d'aspect
  - Guidage de véhicules agricoles et de robots (**robot Magali**)
  - Calibrage (station de conditionnement) ou pré-calibrage (PIXFEL©)
- Imagerie visible + NIR : calculs d'indices de végétation (NDVI, RVI, SAVI,...)
  - Suivi de la qualité des apports d'eau d'irrigation
  - Détermination des besoins en azote des cultures (blé, colza,...)
  - Suivi du dépérissement de la végétation (platanes du canal du midi,...)



Pixfel © : collaboration CTIFL, IMS et BSA

Applications monospectrales

- Imagerie Rayons X
- Imagerie Thermique
- Imagerie Terahertz

## L'imagerie au service des systèmes de production

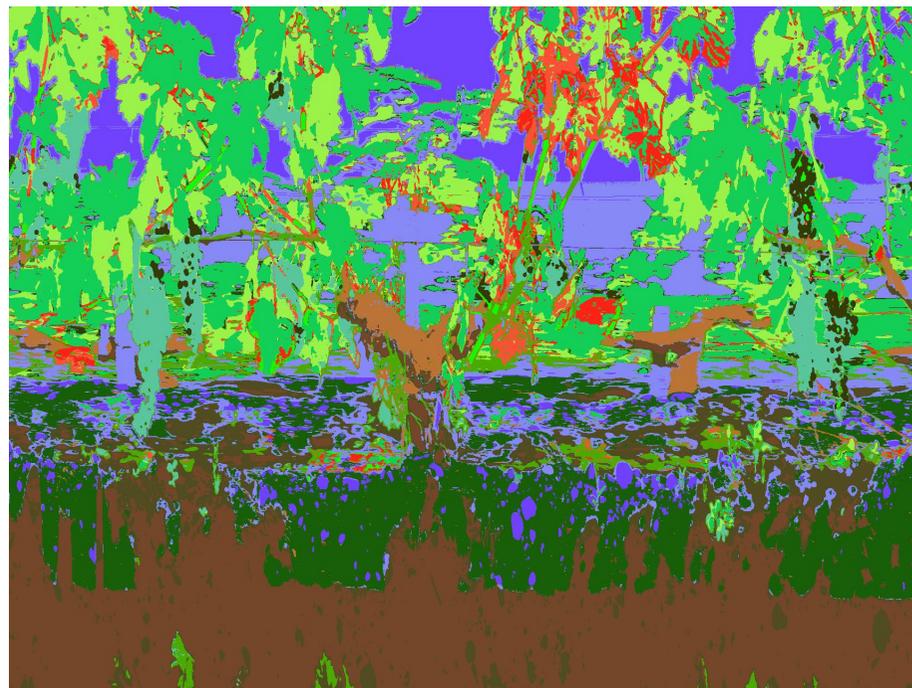
### Détection des maladies par imagerie

Différents niveaux de détection → différentes technologies à considérer

- Imagerie multispectrale (RGB, visible + NIR, UV + visible,..)



Image de départ



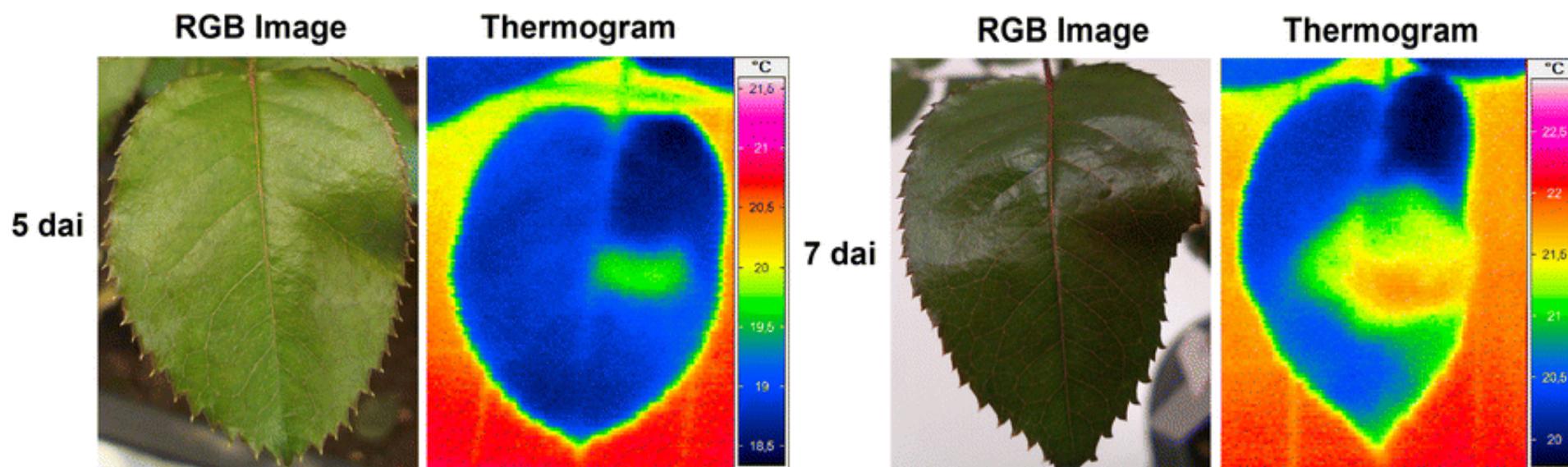
résultat de classification automatique

## L'imagerie au service des systèmes de production

### Détection des maladies par imagerie

Différents niveaux de détection → différentes technologies à considérer

- Imagerie multispectrale (RGB, visible + NIR, UV + visible,..)
- Imagerie thermique



Surveillance de la colonisation des feuilles de rose par *Peronospora sparsa* et développement des symptômes du mildiou dans les stades précoces (5 et 7 jours après inoculation) de la maladie par imagerie thermique. (Photo: S. Gomez)

# L'imagerie au service des systèmes de production

## Détection des maladies par imagerie

Sensor	Crop	Disease / Pathogen	Reference
<b>RGB</b>	Cotton	Bacterial angular ( <i>Xanthomonas campestris</i> ) Ascochyta blight ( <i>Ascochyta gossypii</i> )	Camargo and Smith (2009)
	Sugar beet	Cercospora leaf spot ( <i>Cercospora beticola</i> ), Sugar beet rust ( <i>Uromyces betae</i> ), Ramularia leaf spot ( <i>Ramularia beticola</i> ), Phoma leaf spot ( <i>Phoma betae</i> ), bacterial leaf spot ( <i>Pseudomonas</i> <i>syringae</i> pv. <i>Aptata</i> )	Neumann et al. (2014)
	Grapefruit	Citrus canker ( <i>X. axonopodis</i> )	Bock et al. (2008)
	Tabaco	Anthraxnose ( <i>Colletotrichum destructivum</i> )	Wijekoon et al. (2008)
	Apple	Apple scab ( <i>Venturia inaequalis</i> )	Wijekoon et al. (2008)
	Canadian goldenrod	Rust ( <i>Coleosporium asterum</i> )	Wijekoon et al. (2008)
	<b>Spectral sensors</b>	Barley	Net blotch ( <i>Pyrenophora teres</i> ), Brown rust ( <i>Puccinia hordei</i> ), Powdery mildew ( <i>Blumeria graminis hordei</i> )
Wheat		Head blight ( <i>Fusarium graminearum</i> ) Yellow rust ( <i>Puccinia striiformis</i> f. sp. <i>tritici</i> )	Bauriegel et al. (2011); Bravo et al. (2003); Huang et al. (2007); Moshou et al. (2004)
Sugar beet		Cercospora leaf spot ( <i>C. beticola</i> ), Sugar beet rust ( <i>U. betae</i> ), Powdery mildew ( <i>Erysiphe betae</i> ), Root rot ( <i>Rhizoctonia solani</i> ), Rhizomania ( <i>Beet necrotic yellow vein virus</i> )	Bergsträsser et al. (2015); Hillnhütter et al. (2011); Mahlein et al. (2010, 2012, 2013); Rumpf et al. (2010); Steddom et al. (2003, 2005)
Tomato		Late blight ( <i>Phytophthora infestans</i> )	Wang et al. (2008)
Apple		Apple scab ( <i>V. inaequalis</i> )	Delalieux et a. (2007)
Tulip		Tulip breaking virus (TBV)	Polder et al. (2014)
Sugar cane		Orange rust ( <i>Puccinia kuehnii</i> )	Apan et al. (2004)
<b>Thermal sensors</b>	Sugar beet	Cercospora leaf spot ( <i>C. beticola</i> )	Chaerle et al. (2004)
	Cucumber	Downy mildew ( <i>Pseudoperonospora cubensis</i> ), Powdery mildew ( <i>Podosphaera xanthii</i> )	Berdugo et al. (2014); Oerke et al. (2006)
	Apple	Apple scab ( <i>V. inaequalis</i> )	Oerke et al. (2011)
	Rosa	Downy mildew ( <i>Peronospora sparsa</i> )	Gomez (2014)
<b>Fluorescence imaging</b>	Wheat	Leaf rust ( <i>Puccinia triticina</i> ) Powdery mildew ( <i>Blumeria graminis</i> f. sp. <i>tritici</i> )	Bürling et al. (2011)
	Sugar beet	Cercospora leaf spot ( <i>C. beticola</i> )	Chaerle et al. (2004, 2007); Konanz et al. (2014)
	Bean	Common Bacterial Blight ( <i>Xanthomonas fuscans</i> subsp. <i>fuscans</i> )	Rousseau et al. (2013)
	Lettuce	Downy mildew ( <i>Bremia lactucae</i> )	Bauriegel et al. (2014); Brabandt et al. (2014)

# L'imagerie au service des systèmes de production

## Détection des maladies par imagerie

Sensor	Crop	Disease / Pathogen	Reference
RGB	Cotton	Bacterial angular ( <i>Xanthomonas campestris</i> ) Ascochyta blight ( <i>Ascochyta gossypii</i> )	Camargo and Smith (2009)

### Sensors

RGB



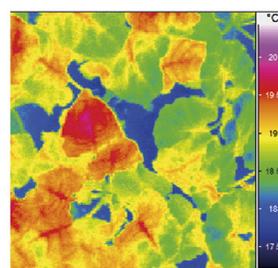
Multispectral



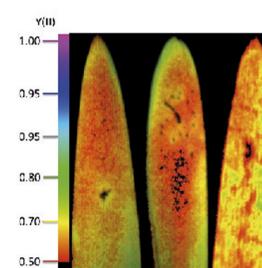
Hyperspectral



Thermal



Chlorophyll-Fluorescence



3D-Sensors



**Thermal sensors**

Sugar beet  
Sugar beet  
Cucumber

Orange leaf spot (*Ascochyta blight*)  
Cercospora leaf spot (*C. beticola*)  
Downy mildew (*Pseudoperonospora cubensis*),  
Powdery mildew (*Podosphaera xanthii*)

Chaperle et al. (2004)  
Chaerle et al. (2004)  
Berdugo et al. (2014); Oerke et al. (2006)

**Fluorescence imaging**

Apple  
Rosa  
Wheat

Apple scab (*V. inaequalis*)  
Downy mildew (*Peronospora sparsa*)  
Leaf rust (*Puccinia triticina*)  
Powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*)

Oerke et al. (2011)  
Gomez (2014)  
Bürling et al. (2011)

Sugar beet  
Bean  
Lettuce

Cercospora leaf spot (*C. beticola*)  
Common Bacterial Blight (*Xanthomonas fuscans* subsp. *fuscans*)  
Downy mildew (*Bremia lactucae*)

Chaerle et al. (2004, 2007); Konanz et al. (2014)  
Rousseau et al. (2013)  
Bauriegel et al. (2014); Brabandt et al. (2014)

# L'imagerie au service des systèmes de production

## Détection des maladies par imagerie

Différents niveaux de détection → différentes technologies à considérer

- Imagerie multispectrale (RGB, visible + NIR, UV + visible,...)
- Imagerie thermique

### Pour :

- Capteurs avec une bonne résolution spatiale (1000x1000 pixels à 4000x4000 pixels)
- Bon rapport signal/bruit
- Technologie éprouvée et largement diffusée
- Images "*relativement simples*" à analyser
- Taille d'images réduite ( $\pm 1$  Mo, fonction compression et résolution)
- ...

### Contre :

- Très faible résolution spectrale (larges bandes spectrales)
- Signal utile noyé dans le reste : impossibilité de détecter des pics isolés
- Variations dans le spectre non spécifiques à une variable d'intérêt

# L'imagerie au service des systèmes de production

## Détection des maladies par imagerie

Différents niveaux de détection → différentes technologies à considérer

- Imagerie multispectrale (visible + NIR)
  - Détection globale (à l'échelle de la plante)
  - Détection tardive (symptômes déjà +/- exprimés)
  - Confusion possible entre maladies, carences, stress hydrique
  - Détection limitée aux individus gravement touchés, mauvaise détection début d'infestation

Nombreux travaux de recherche sur le sujet :

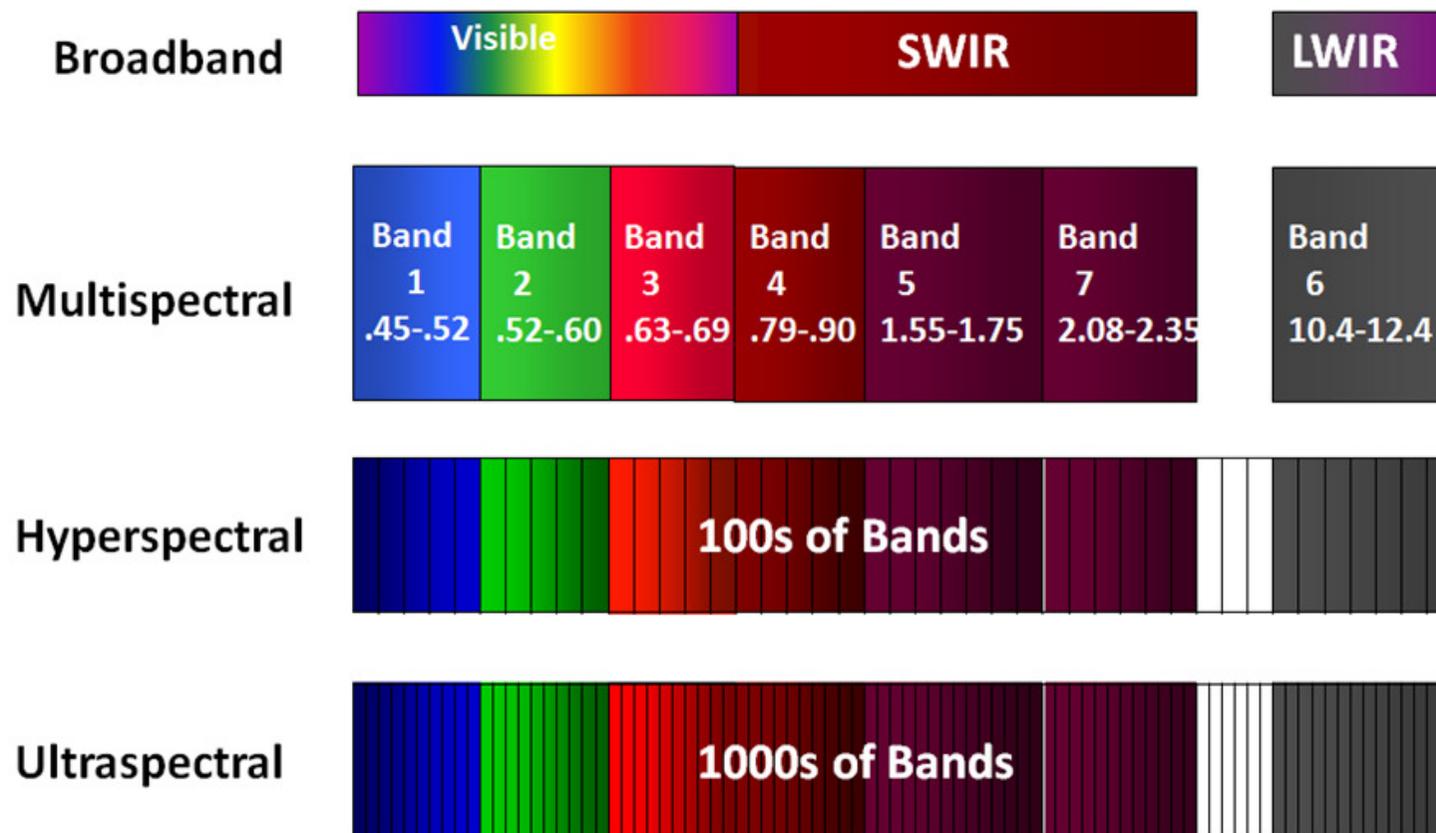
- ) détection maladies de la vigne à évolution lente (ESCA, Flavescence dorée,...)
- ) détection mildiou, oïdium, .... sur de nombreuses cultures

Quelques propositions commerciales :

- ) Digital globe, USA (<https://www.digitalglobe.com/industries/agriculture>)
- ) Skysquirrel, Canada (<https://www.skysquirrel.fr/applications.html>),....

## L'imagerie au service des systèmes de production

### Détection des maladies par imagerie : gamme de techniques possibles



Comparaison des techniques d'imagerie (pas d'application de l'ultraspectral pour l'agriculture)

# L'imagerie au service des systèmes de production

## Détection des maladies par imagerie

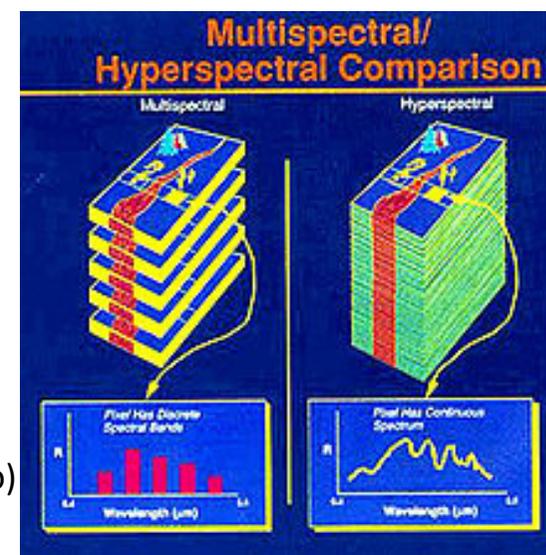
L'imagerie hyperspectrale : technique prometteuse pour la détection des maladies

### Pour :

- Très forte résolution spectrale (bandes spectrales quelques nm)
- Possibilité de détecter dans le spectre des pics isolés
- Variations dans le spectre spécifiques à une variable d'intérêt (?)
- Pas de "trous" dans la mesure de la bande spectrale (spectre continu)
- ...

### Contre :

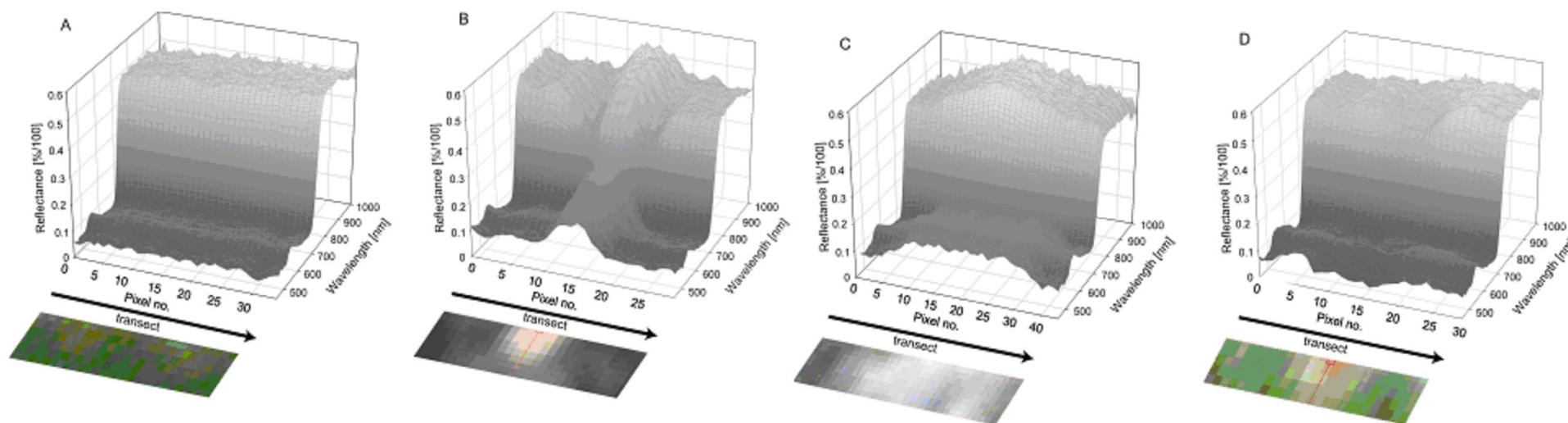
- Capteurs avec faible résolution spatiale, ou dans une seule direction
- Rapport signal bruit réduit (faible niveau d'énergie par pixel)
- Technologie complexe et faiblement diffusée
- Images volumineuse / multispectral (cube d'image 100 Mo / image 1 Mo)
- Flux de données important entre capteur et stockage ou analyse
- Images complexes à analyser (méthodes statistiques ACP, ...)
- Très difficile d'avoir des traitements temps réel
- Reconstruction d'images qui peut être complexe (ex.: technologie "pushbroom")



# L'imagerie au service des systèmes de production

## Détection des maladies par imagerie

L'imagerie hyperspectrale : technique prometteuse pour la détection des maladies

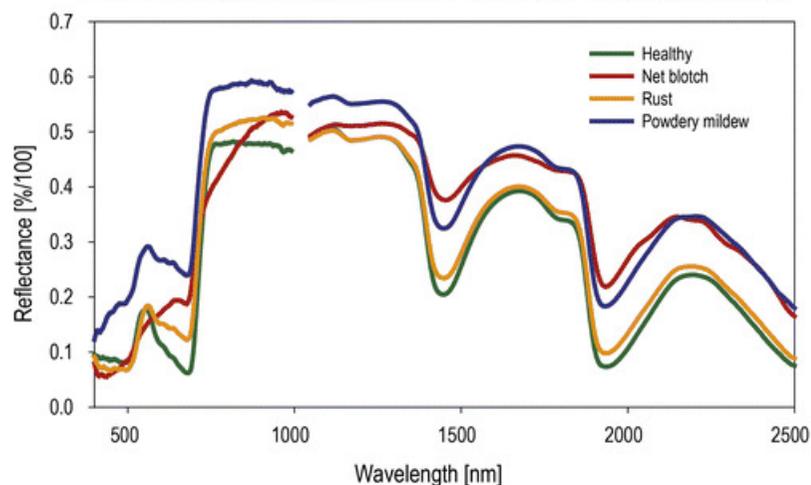


Impact des maladies foliaires sur la réflectance spectrale des feuilles de betterave sucrière  
spectres de réflectance en pixel d'un transect à travers le tissu foliaire à partir d'imagerie hyperspectrale :  
(A) tissus sains, (B) Symptômes matures Cercospora, (C) oïdium et (D) rouille de la betterave à sucre.

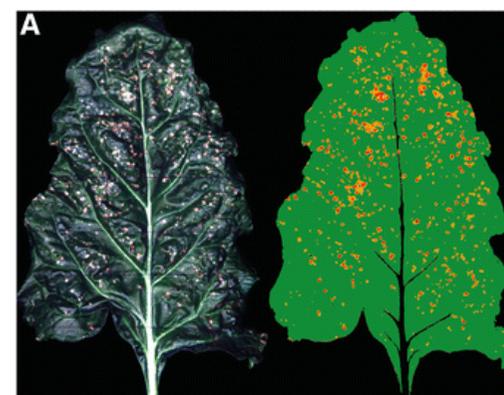
# L'imagerie au service des systèmes de production

## Détection des maladies par imagerie

L'imagerie hyperspectrale : technique prometteuse pour la détection des maladies



Signatures spectrales caractéristiques de feuilles d'orge atteintes respectivement d'helminthosporiose, de rouille et de mildiou



Détection de maladies fongiques à base d'images hyperspectrales.

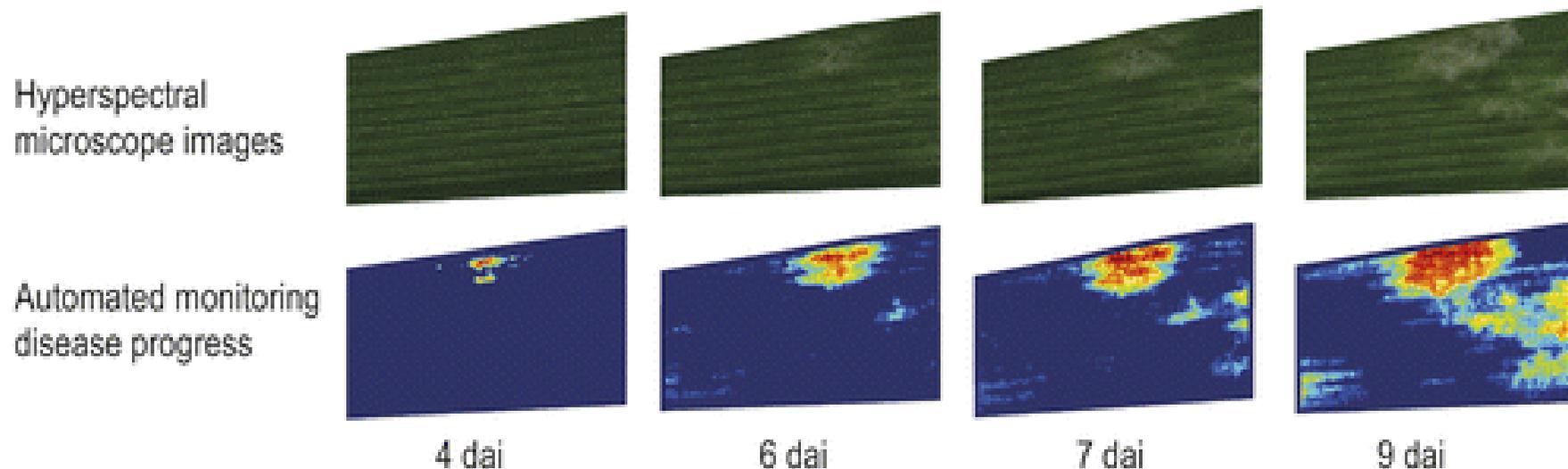
A : Cercosporiose sur betterave à sucre.

B : Fusariose sur blé

## L'imagerie au service des systèmes de production

### Détection des maladies par imagerie

L'imagerie hyperspectrale : technique prometteuse pour la détection des maladies



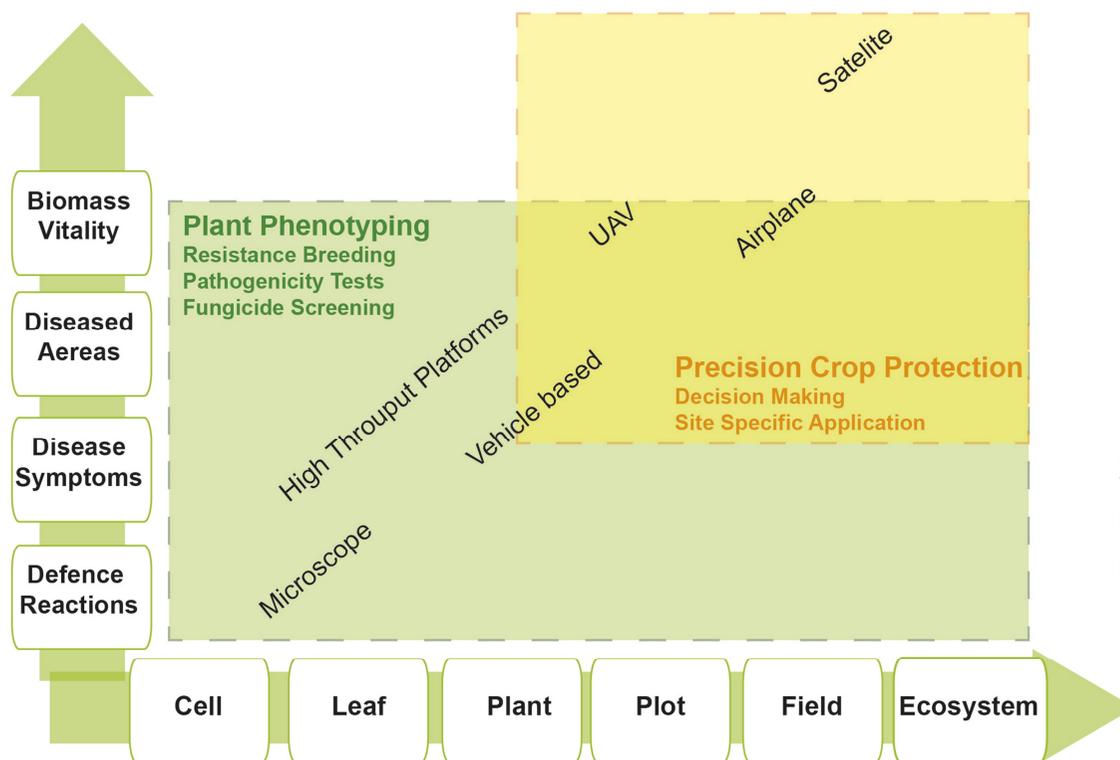
Progression du mildiou pulvérulent sur orge entre 4 et 9 jours après inoculation

# L'imagerie au service des systèmes de production

## Détection précoce des maladies par imagerie

Quel outil pour quel niveau de "précocité" ?

Quel outil pour quel niveau d'observation ?



Source : A.K. Mahlein, **Plant Disease**,  
February 2016, Volume 100,  
Number 2, Pages 241-251

# L'imagerie au service des systèmes de production

## Détection précoce des maladies par imagerie

Quel outil pour quel niveau de "précocité" ?

Quel outil pour quel niveau d'observation ?

- ) **Symptômes exprimés** = multispectral (cartographie des dégâts, prospection des maladies à déclaration obligatoire (flavescence dorée,...)  
niveau de détection = plante entière  
résolution métrique et sub-métrique
- ) **Détection précoce** (avant expression des symptômes mais longtemps après infestation) = "**multispectral plus**" ou "**hyperspectral moins**" (qq dizaines de bandes) , thermique,  
niveau de détection = organe (feuille, tige,...)  
résolution décimétrique à centimétrique
- ) **Détection très précoce** (proche du moment de l'infestation) = hyperspectral, hyperspectral simplifié + thermique (ex : CarbonBee, Gamaya,...)  
niveau de détection = tâche sur organe (quelques mm<sup>2</sup> ) qq cm<sup>2</sup>  
résolution centimétrique à millimétrique

## L'imagerie au service des systèmes de production

### Détection précoce des maladies par imagerie

Quel outil pour quel niveau de "précocité" ?

Quel outil pour quel niveau d'observation ?

		Multispectral	Hyperspectral (Gamaya)
Technical specs	Number of spectral bands/ spectral resolution	4-5 bands	40 bands + thermal sensor
	Information content of data	Low	High (~10 times higher than NDVI)
AG applications	Detection of diseases and pests	no	yes
	Detection and classification of weeds	no	yes
	Detection of P and K deficiency	no	yes
	Detection of crop variety	no	yes
	Detection of nitrogen deficiency	yes	yes
	Yield prediction and biomass development	based on NDVI only	based on a complete diagnostics throughout the growing cycle

Comparaison Multipsectral/ Caméra "hyperspectrale moins" Gamaya  
(<http://gamaya.com/blog-post/multispectral-vs-hyperspectral/>)

# L'imagerie au service des systèmes de production

## Détection précoce des maladies par imagerie

**Quel outil pour quel niveau de "précocité" ?**

**Quel outil pour quel niveau d'observation ?**

**Plus la détection veut être précoce, plus il faut augmenter la résolution**

(passage du métrique au millimétrique)

→ taille des images x par 100 à chaque changement de résolution (m → dm, dm → cm,...)

(scène de 1mx1m = 1 pixel si résolution métrique,  $10^6$  pixels si résolution millimétrique)

**Conséquences :**

Taille des images à transférer, mémoriser, charger pour analyse,...

Complexité calculatoire et temps de calcul

Hétérogénéité qui augmente dans l'image

- )détails moyennés si résolution métrique (canopée qui parait ± uniforme)
- ) détails différenciés si résolution millimétrique (feuille, pétiole, branche,...)

Rapport signal/bruit qui se dégrade (moins d'énergie par pixel)

## L'imagerie au service des systèmes de production

### Détection précoce des maladies par imagerie : quelles recommandations ?

#### Adapter l'approche scientifique à l'usage recherché

- **détection tardive** = comparaison entre détection automatique et vérité terrain

Intérêt : simplicité de l'approche

Risques : -) fausses détections (confusion de symptômes, ...)  
-) faux négatifs (vérité terrain biaisée)

- **détection très précoce** = expérimentation en milieu contrôlé (labo)

Inoculation (t0) puis série d'images chronologiques jusqu'à apparition des symptômes d'infestation (tf).

Analyse à rebours des spectres enregistrés entre tf et t0 afin de définir des pics marqueurs précoces de l'infestation

(ex : Projet CASDAR "Aventuria", Détection précoce de la tavelure du pommier et de l'anthracnose du noyer par imagerie hyperspectrale, CTIFL/IRSTEA/IMS-BSA)

Intérêt : possibilité de définir des pics spécifiques à la maladie étudiée

Difficultés : Suivi du développement de la maladie malgré le développement du végétal (appairage des pixels sur les séries de photos pour suivre l'évolution des spectres)

Faible niveau des signaux utiles en début d'infestation

## L'imagerie au service des systèmes de production

### Détection précoce des maladies par imagerie : quelles recommandations ?

#### Séparer Recherche et usages professionnels (producteurs, conseillers,...)

- **Recherche** = utilisation de l'imagerie hyperspectrale et de toute sa complexité  
définir les bandes spécifiques à telle ou telle maladie  
proposer des indices  
proposer des algorithmes de traitement (réduction de bandes, optimisation analyse pour analyse **temps réel** et **non-supervisée**,...)
- **Industriels** = fabrication de caméras hyperspectrales simplifiées et/ou multispectrales spécifiques (selon bandes définies) et low cost (matériel **et** logiciels)
- **Prestataires** = proposer des services aux agriculteurs basés sur ces caméras spécifiques

## L'imagerie au service des systèmes de production

### Détection précoce des maladies par imagerie : Conclusion

#### Simplifier les outils d'imagerie (et aussi combiner avec d'autres approches)

- **Coût de l'imagerie** = le prix du capteur n'est pas l'élément essentiel, prendre en compte les autres coûts souvent très importants
  - Stockage des données,
  - Transfert des données
  - Moyens de calculs et temps passé par opérateurs
- **Vecteur utilisé** = ne pas se focaliser sur un type de vecteur particulier (ex. : drones) mais sur les conditions requises pour le capteur :
  - Résolution → largeur de la fauchée (mosaïquage, recouvrement d'images,...),
  - Capteur hyperspectral pushbroom → stabilité du capteur + reconstruction de l'image



## L'imagerie au service des systèmes de production

### Détection précoce des maladies par imagerie : Conclusion

#### Simplifier les outils d'imagerie (et aussi combiner avec d'autres approches)

- **Coût de l'imagerie** = le prix du capteur n'est pas l'élément essentiel, prendre en compte les autres coûts souvent très importants
  - Stockage des données,
  - Transfert des données
  - Moyens de calculs et temps passé par opérateurs
- **Vecteur utilisé** = ne pas se focaliser sur un type de vecteur particulier (ex. : drones) mais se focaliser sur les conditions requises pour le capteur :
  - Résolution → largeur de la fauchée (mosaïquage, recouvrement d'images,...),
  - Capteur hyperspectral pushbroom → stabilité du capteur + reconstruction de l'image
- **Echantillonnage ou analyse exhaustive ?**
  - Compromis à trouver entre précocité de détection et surface réalisable par journée de prospection
  - Caméras simplifiées = observation par réseau de capteurs (résolution temporelle !)