

***Conception et réalisation d'un  
dispositif d'imagerie  
multispectrale embarqué : du  
capteur aux traitements pour la  
détection d'adventices***

Jean-Baptiste VIOIX

8 juillet 2004

# *Encadrement et financement*

- Directeur de thèse : Frédéric TRUCHETET (le2i)
- Co-directeur de thèse : Jean-Paul DOUZALS (ENESAD)
- Financement :
  - Conseil Régional de Bourgogne (60 %)
  - Arvalis-Institut du végétal (40 %)

# Plan

- Contexte de l'étude
- Acquisition des images
- Recalage géométrique des images
- Discrimination spectrale
- Analyse spatiale
- Fusion des deux résultats
- Conclusion et perspectives

# *Contexte agronomique*

- La lutte contre les adventices est l'une des opérations culturales les plus onéreuses et les plus polluantes.



# *Contexte agronomique*

- La lutte contre les adventices est l'une des opérations culturales les plus onéreuses et les plus polluantes.
- Certaines adventices se développent en taches, donc le désherbage localisé semble être possible.

# *Contexte agronomique*

- La lutte contre les adventices est l'une des opérations culturales les plus onéreuses et les plus polluantes.
- Certaines adventices se développent en taches, donc le désherbage localisé semble être possible.
- D'autre part une évaluation efficace des produits désherbants peut permettre de mieux connaître les conséquences de ceci.

# *Détection des adventices*

- Dans le cadre de l'évaluation des produits désherbants, de nombreux essais sont réalisés en micro parcelles.

# *Détection des adventices*

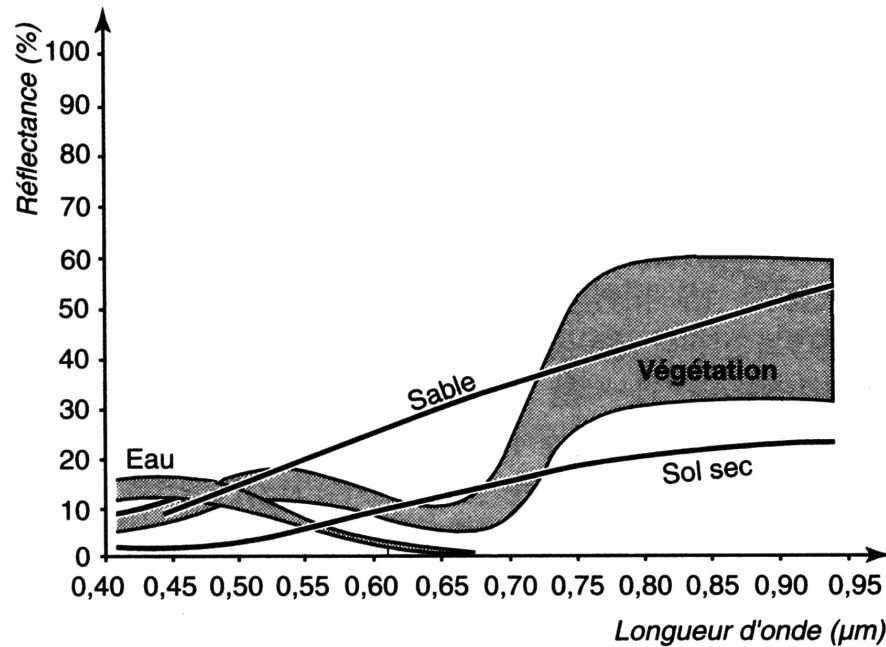
- Dans le cadre de l'évaluation des produits désherbants, de nombreux essais sont réalisés en micro parcelles.
- Deux méthodes sont utilisées pour la notation :
  - le comptage dans un cadrat,
  - l'évaluation visuelle.

# *Détection des adventices*

- Dans le cadre de l'évaluation des produits désherbants, de nombreux essais sont réalisés en micro parcelles.
- Deux méthodes sont utilisées pour la notation :
  - le comptage dans un cadrat,
  - l'évaluation visuelle.
- Le désherbage de précision nécessite une cartographie rapide et peu onéreuse.

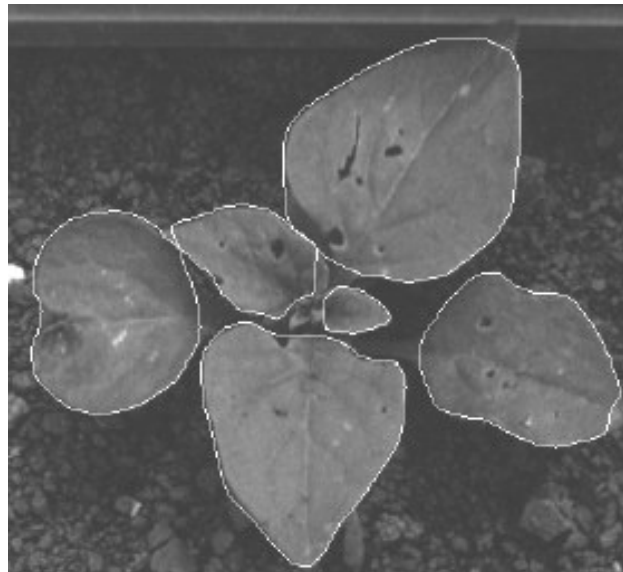
# Méthodes utilisées

- Méthodes basées sur la spectrométrie (télédétection ou proxi-détection).



# Méthodes utilisées

- Méthodes basées sur la spectrométrie (télédétection ou proxi-détection).
- Méthodes morphologiques (critères simples ou contours actifs).



# *Méthodes utilisées*

- Méthodes basées sur la spectrométrie (télédétection ou proxi-détection).
- Méthodes morphologiques (critères simples ou contours actifs).
- Méthodes basées sur la texture, ...



# *Résolution nécessaire*

- Dans le cadre de la notation d'essais, les micro-parcelles font quelques mètres carrés.

# ***Résolution nécessaire***

- Dans le cadre de la notation d'essais, les micro-parcelles font quelques mètres carrés.
- La résolution des images est liée aux méthodes de détection retenues.

# ***Résolution nécessaire***

- Dans le cadre de la notation d'essais, les micro-parcelles font quelques mètres carrés.
- La résolution des images est liée aux méthodes de détection retenues.
- On souhaite pouvoir couvrir complètement une parcelle d'essais par image.

# *Résolution nécessaire*

- Dans le cadre de la notation d'essais, les micro-parcelles font quelques mètres carrés.
- La résolution des images est liée aux méthodes de détection retenues.
- On souhaite pouvoir couvrir complètement une parcelle d'essais par image.
- Une résolution de l'ordre du  $\text{cm}^2$  est envisageable, donc les images devront être composées de quelques dizaines de kilo-pixels.

# *Imagerie aérienne*

- L'imagerie aérienne permet une cartographie sans parcourir la parcelle.

# *Imagerie aérienne*

- L'imagerie aérienne permet une cartographie sans parcourir la parcelle.
- On mesure le couvert végétal qui est, notamment, lié au stade physiologique de la plante.

# *Imagerie aérienne*

- L'imagerie aérienne permet une cartographie sans parcourir la parcelle.
- On mesure le couvert végétal qui est, notamment, lié au stade physiologique de la plante.
- La résolution dépend de la plate forme (de l'altitude) et de la focale de l'objectif.

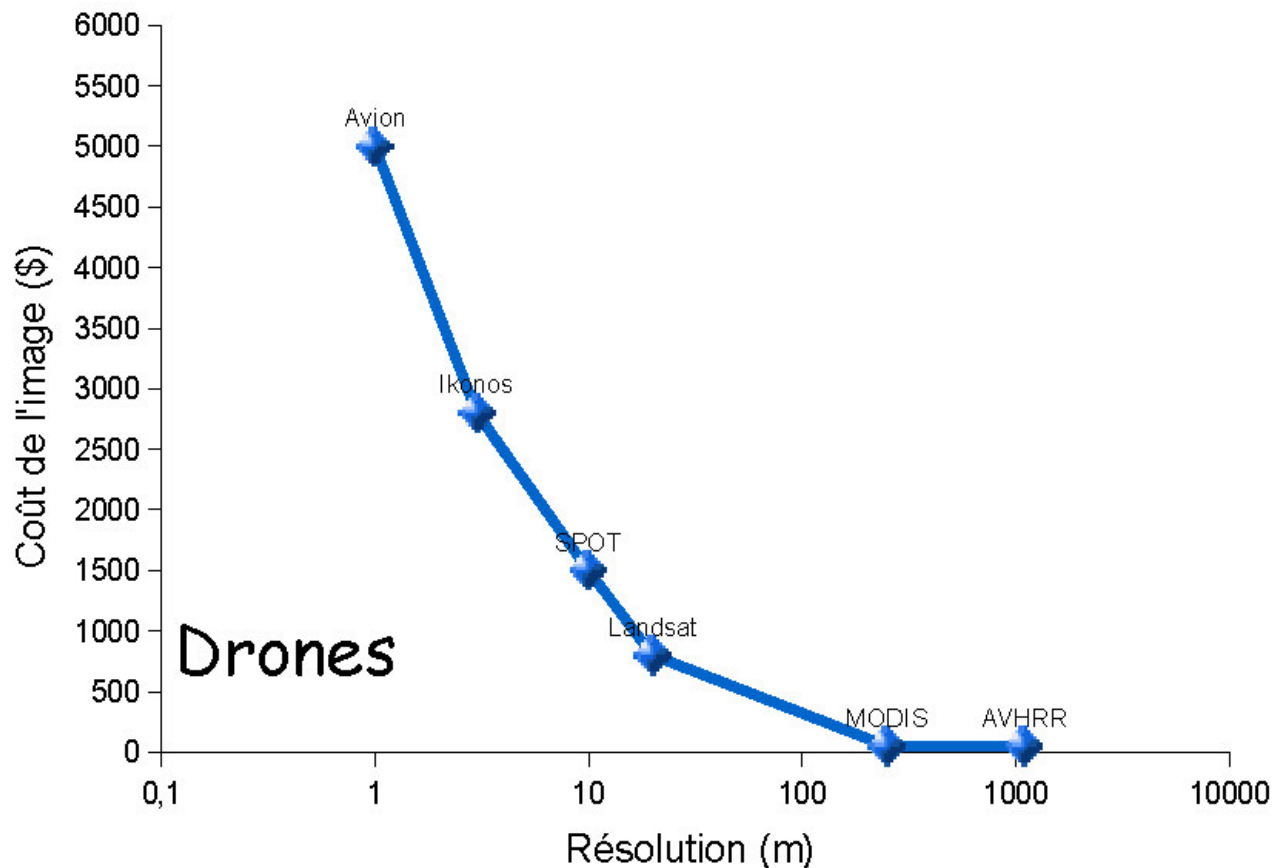
# *Imagerie aérienne*

- L'imagerie aérienne permet une cartographie sans parcourir la parcelle.
- On mesure le couvert végétal qui est, notamment, lié au stade physiologique de la plante.
- La résolution dépend de la plate forme (de l'altitude) et de la focale de l'objectif.
- Parmi ces plate-formes, on peut citer : les satellites, les avions de tourisme, les ULM, les cerf volants, les avions radiocommandés, ...



# Coût des images aériennes

- Etude proposée par Hunt en 2002.



# *Synthèse*

- En prenant en compte la résolution voulue et le coût des images, nous avons choisi d'utiliser un avion radiocommandé.

# *Synthèse*

- En prenant en compte la résolution voulue et le coût des images, nous avons choisi d'utiliser un avion radiocommandé.
- L'envergure est de 2,50 m, la charge utile est de l'ordre du kg.

# Synthèse

- En prenant en compte la résolution voulue et le coût des images, nous avons choisi d'utiliser un avion radiocommandé.
- L'envergure est de 2,50 m, la charge utile est de l'ordre du kg.
- Nous souhaitons utiliser un capteur d'images multispectrales.

# ***Drone utilisé***



# Plan

- Contexte de l'étude
- Acquisition des images
- Recalage géométrique des images
- Discrimination spectrale
- Analyse spatiale
- Fusion des deux résultats
- Conclusion et perspectives

# *Cahier des charges*

- Domaine visible et proche infra-rouge (de 400 nm à 1000 nm).
- Quelques bandes spectrales.
- Cadence d'acquisition inférieure à 100 ms.
- Autonomie de fonctionnement complète (temps d'exposition, stockage, ...)
- Poids de l'ordre du kg, volume d'environ 2 litres.

# ***Dispositifs utilisables***

- Deux dispositifs semblent convenir :



# *Dispositifs utilisables*

- Deux dispositifs semblent convenir :
  - Filtres passe-bandes réglables,
  - Roues de filtres.

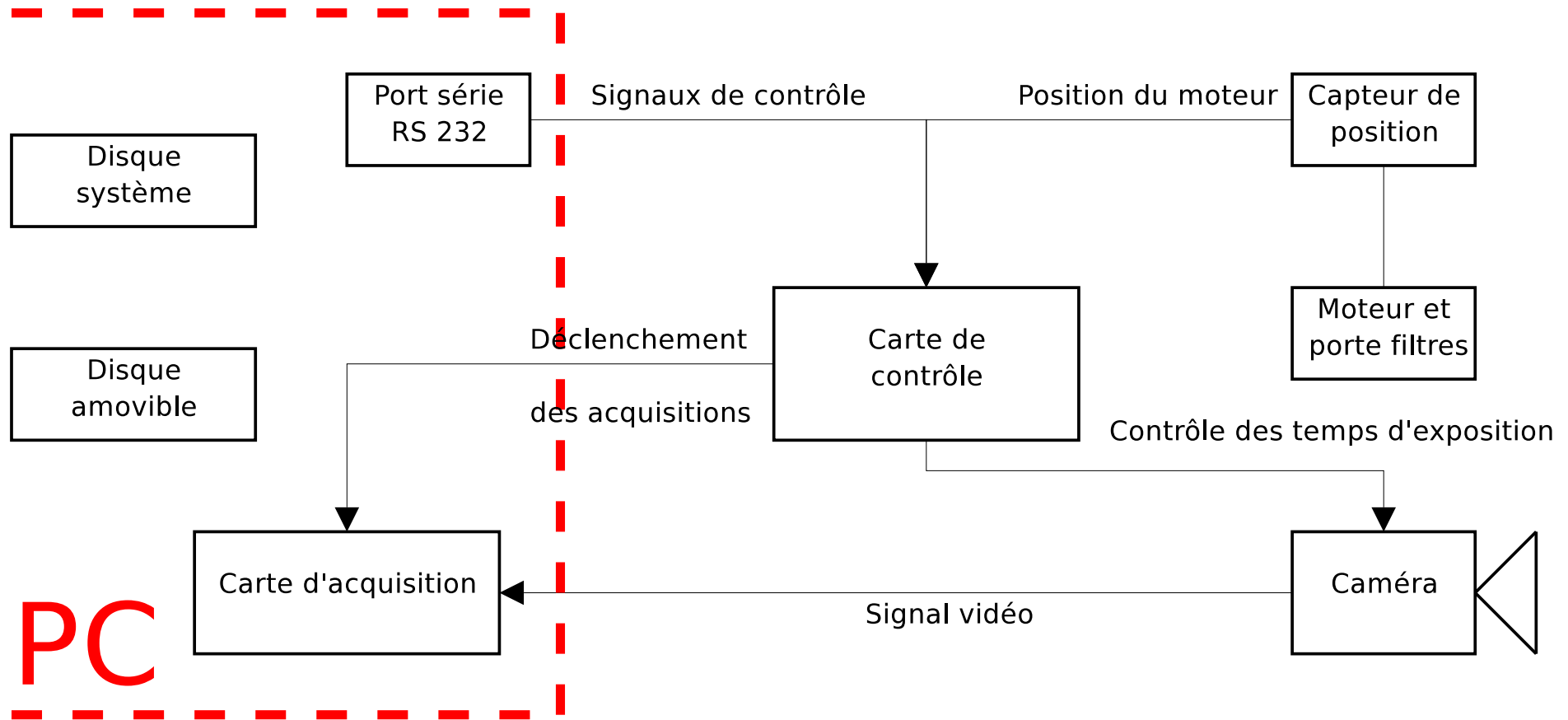
# *Dispositifs utilisables*

- Deux dispositifs semblent convenir :
  - Filtres passe-bandes réglables,
  - Roues de filtres.
- Concernant les filtres passe-bandes réglables, la cadence exigée est trop proche des limites d'utilisation.
- Les dispositifs à roues de filtres disponibles sont beaucoup trop lents.

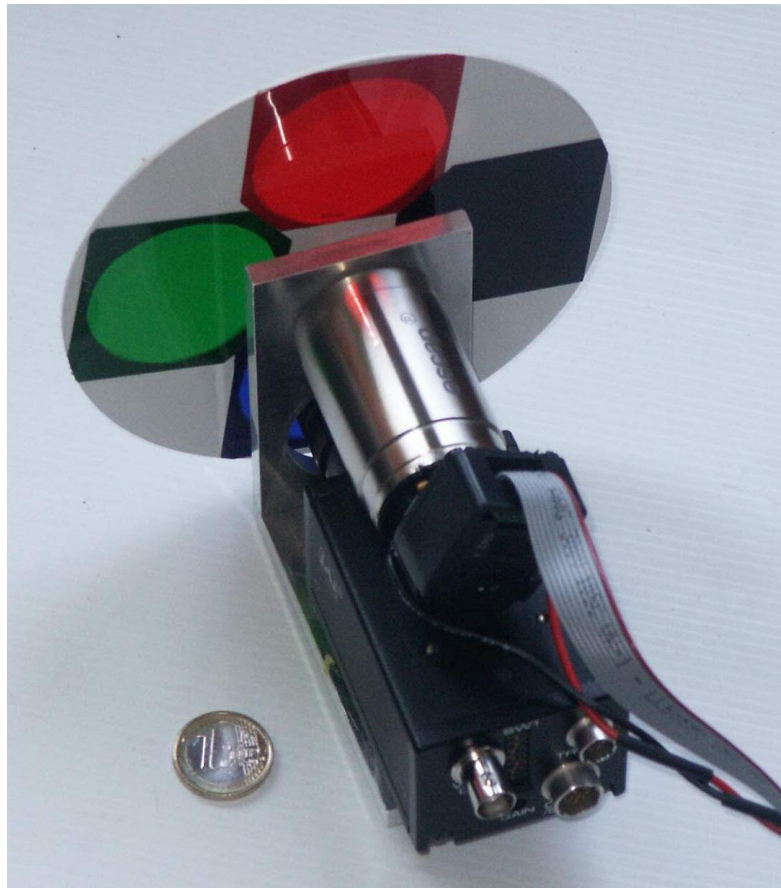
# *Dispositifs utilisables*

- Deux dispositifs semblent convenir :
  - Filtres passe-bandes réglables,
  - Roues de filtres.
- Concernant les filtres passe-bandes réglables, la cadence exigée est trop proche des limites d'utilisation.
- Les dispositifs à roues de filtres disponibles sont beaucoup trop lents.
- Un dispositif à base de roue de filtres a été développé.

# Synoptique général



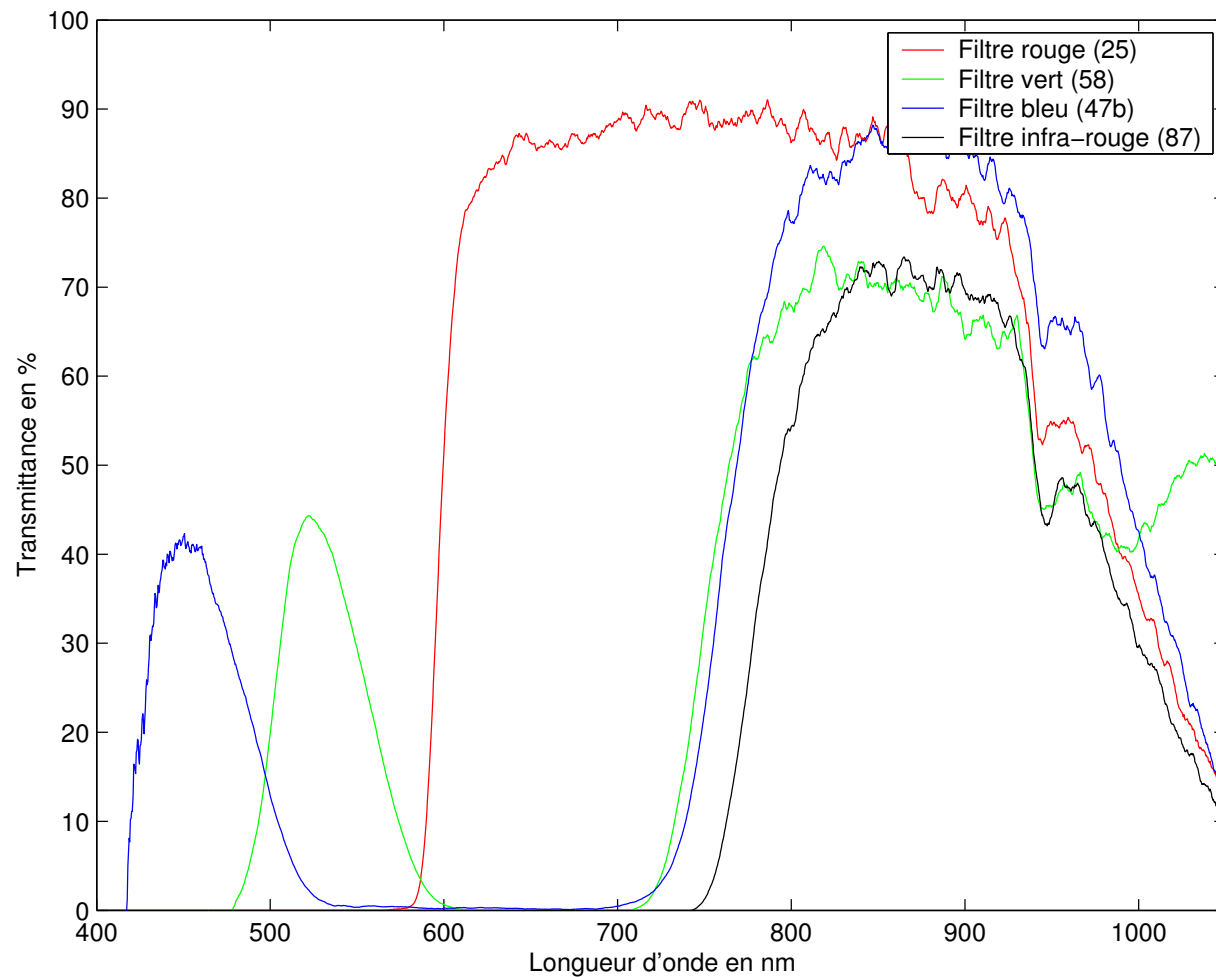
# *Prototype réalisé*



# *Choix des filtres*

- Nous avons équipé le prototype de filtres Kodak en gélatine.
- Ces filtres sont souvent utilisés pour les applications agronomiques.
- Ils sont bon marché, peu fragiles et légers.

# Transmittance des filtres



# ***Caractéristiques du dispositif***

- Images de  $768 \times 288$  pixels.
- Acquisition de 4 bandes spectrales en 80 ms.
- Configuration automatique des temps d'exposition (reconfiguration en moins de 10 secondes).
- Capacité de 150 clichés sur une mémoire de 64 Mo (images comprimées au format ZIP)
- Cadence d'acquisition supérieure à une séquence par seconde.



# Plan

- Contexte de l'étude
- Acquisition des images
- **Recalage géométrique des images**
- Discrimination spectrale
- Analyse spatiale
- Fusion des deux résultats
- Conclusion et perspectives

# ***Introduction (1)***

- La vitesse du drone est comprise entre 3 m/s et 15 m/s.
- La résolution au sol est comprise entre 1 cm et 1 dm.
- Entre deux filtres, il s'écoule 20 ms.

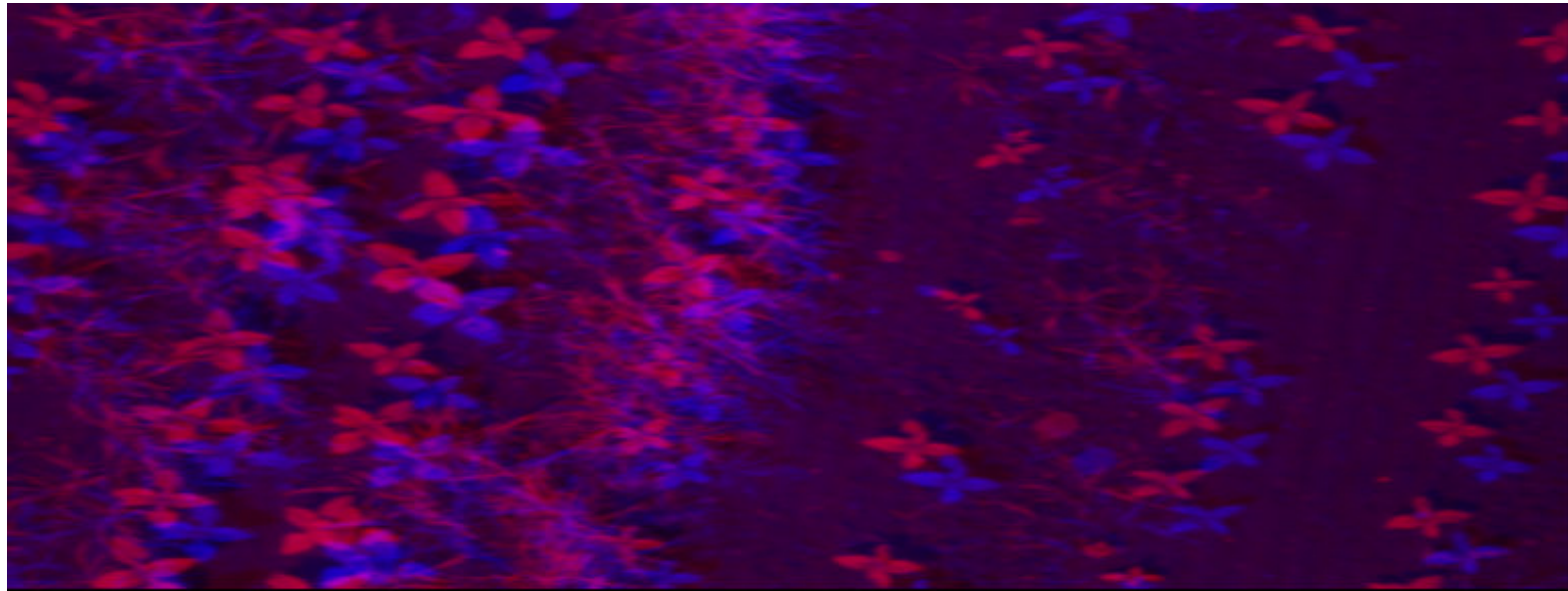
# ***Introduction (1)***

- La vitesse du drone est comprise entre 3 m/s et 15 m/s.
- La résolution au sol est comprise entre 1 cm et 1 dm.
- Entre deux filtres, il s'écoule 20 ms.
- Le décalage entre les images est compris entre quelques pixels et quelques dizaines de pixels.

# *Introduction (1)*

- La vitesse du drone est comprise entre 3 m/s et 15 m/s.
- La résolution au sol est comprise entre 1 cm et 1 dm.
- Entre deux filtres, il s'écoule 20 ms.
- Le décalage entre les images est compris entre quelques pixels et quelques dizaines de pixels.
- Les paramètres de vol sont inconnus, donc le recalage des images doit être automatique.

# *Introduction (2)*



# ***Introduction (3)***

- Le recalage est basé sur deux images : une image de référence ( $I_1$ ) et une image à recaler ( $I_2$ ).

$(I_1, I_2)$

# ***Introduction (3)***

- Le recalage est basé sur deux images : une image de référence ( $I_1$ ) et une image à recaler ( $I_2$ ).
- On déforme l'image  $I_2$  avec une transformation  $T$ .

$$(I_1, T(I_2))$$

# Introduction (3)

- Le recalage est basé sur deux images : une image de référence ( $I_1$ ) et une image à recaler ( $I_2$ ).
- On déforme l'image  $I_2$  avec une transformation  $T$ .
- On estime la similarité entre les deux images à l'aide d'une fonction  $\mathcal{S}$ .

$$\mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$



# Introduction (3)

- Le recalage est basé sur deux images : une image de référence ( $I_1$ ) et une image à recalculer ( $I_2$ ).
- On déforme l'image  $I_2$  avec une transformation  $T$ .
- On estime la similarité entre les deux images à l'aide d'une fonction  $\mathcal{S}$ .
- On cherche à maximiser cette mesure.

$$\max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

# Introduction (3)

- Le recalage est basé sur deux images : une image de référence ( $I_1$ ) et une image à recaler ( $I_2$ ).
- On déforme l'image  $I_2$  avec une transformation  $T$ .
- On estime la similarité entre les deux images à l'aide d'une fonction  $\mathcal{S}$ .
- On cherche à maximiser cette mesure.

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

# *Transformations*

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- Les transformations linéaires regroupent,

# Transformations

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- Les transformations linéaires regroupent, les translations,

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

# Transformations

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- Les transformations linéaires regroupent, les translations, les rotations,

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

# Transformations

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- Les transformations linéaires regroupent, les translations, les rotations, les changements d'échelle,

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x & 0 & 0 \\ 0 & E_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

# Transformations

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- Les transformations linéaires regroupent, les translations, les rotations, les changements d'échelle, les cisaillements.

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & S_x & 0 \\ S_y & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

# Transformations

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- Les transformations linéaires regroupent, les translations, les rotations, les changements d'échelle, les cisaillements.
- On les regroupe dans les transformations affines.

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$



# Fonctions de similarité

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- On peut classer les de similarité existantes en différents groupes :

# Fonctions de similarité

$$T_{opt} = \arg \min_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- On peut classer les de similarité existantes en différents groupes :
  - Basées sur l'intensité (SDA, SDC)

# Fonctions de similarité

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- On peut classer les de similarité existantes en différents groupes :
  - Basées sur l'intensité (SDA, SDC)
  - Basées sur les statistiques ( $\rho$ ,  $r^2$ ,  $\chi^2$ )

# Fonctions de similarité

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- On peut classer les de similarité existantes en différents groupes :
  - Basées sur l'intensité (SDA, SDC)
  - Basées sur les statistiques ( $\rho$ ,  $r^2$ ,  $\chi^2$ )
  - Basées sur la théorie de l'information (H, IM)

# Recherche de maximum (1)

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- Parmi les méthodes de recherche de maximum, on peut citer :

# Recherche de maximum (1)

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- Parmi les méthodes de recherche de maximum, on peut citer :
  - Les méthodes de descente de gradient,

# Recherche de maximum (1)

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- Parmi les méthodes de recherche de maximum, on peut citer :
  - Les méthodes de descente de gradient,
  - Les méthodes de recuit simulé,

# Recherche de maximum (1)

$$T_{opt} = \arg \max_T \mathcal{S}(I_1, T(I_2))$$

- Parmi les méthodes de recherche de maximum, on peut citer :
  - Les méthodes de descente de gradient,
  - Les méthodes de recuit simulé,
  - Les algorithmes génétiques.



# *Recherche de maximum (2)*

- Deux approches sont possibles l'optimisation :

# Recherche de maximum (2)

- Deux approches sont possibles l'optimisation :
  - soit on optimise les  $a_{n,m}$ ,

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

# Recherche de maximum (2)

- Deux approches sont possibles l'optimisation :
  - soit on optimise les  $a_{n,m}$ ,
  - soit on optimise les paramètres de la transformation.

Nom de la variable	Paramètre
$d_x$	Décalage en $x$
$d_y$	Décalage en $y$
$E_x$	Échelle en $x$
$E_y$	Échelle en $y$
$\phi$	Angle de rotation (en degrés)
$S_x$	Cisaillement en $x$
$S_y$	Cisaillement en $y$

# ***Recherche de maximum (3)***

- La recherche de maximum nécessite de borner le domaine de recherche.

# *Recherche de maximum (3)*

- La recherche de maximum nécessite de borner le domaine de recherche.
- La représentation par paramètres permet de choisir les transformations.

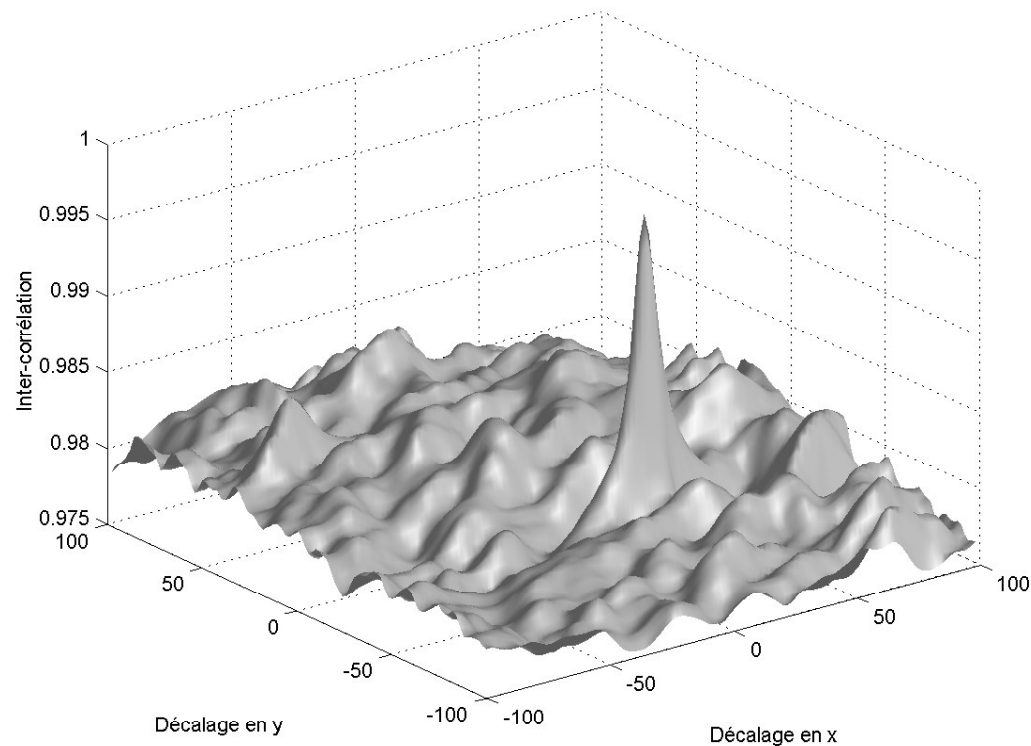
# Recherche de maximum (3)

- La recherche de maximum nécessite de borner le domaine de recherche.
- La représentation par paramètres permet de choisir les transformations.
- Le calcul de la matrice de transformation est effectué en multipliant les différentes matrices.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_x & 0 & 0 \\ 0 & E_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & S_x & 0 \\ S_y & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

# Recherche de maximum (3)

- Évolution de l'inter corrélation entre deux images consécutives.



# *Application de la méthode*

- Nous disposons de quatre images, l'une d'entre elles doit servir de référence.
- Afin de minimiser les décalages, seules la seconde et la troisième conviennent.
- Nous avons choisi la seconde image car son contraste est assez proche des images 1 et 4.



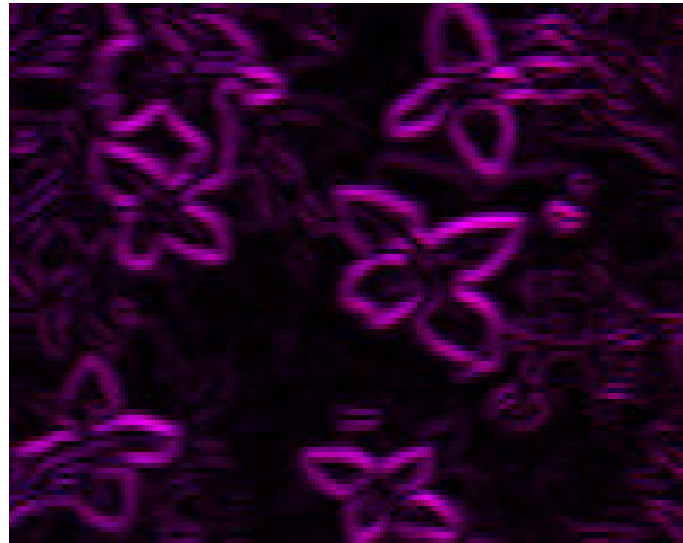
# Résultats

- Image de référence ( $V_2$ )



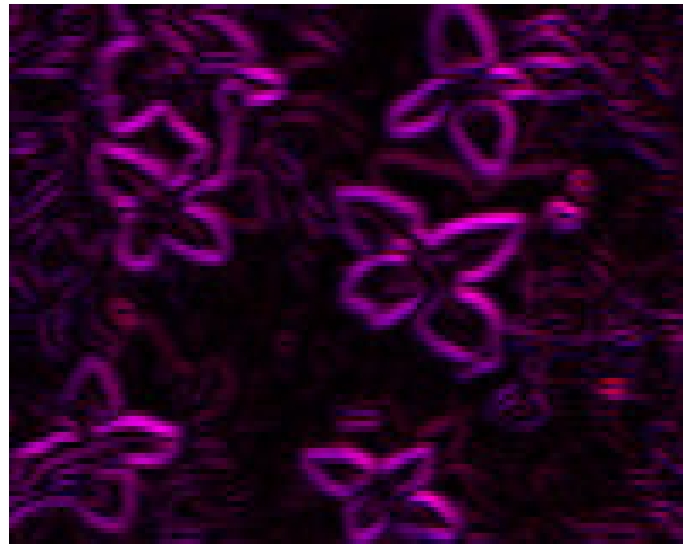
# Résultats

- Contours de l'image  $V_1$  superposés à ceux de l'image  $V_2$



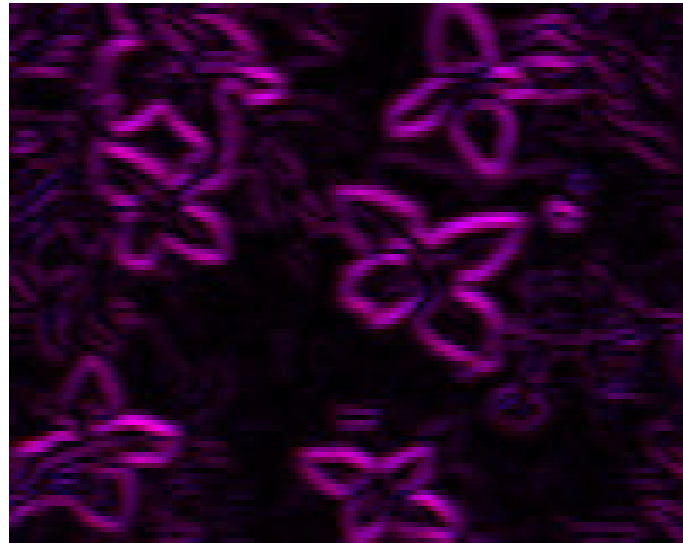
# Résultats

- Contours de l'image  $V_3$  superposés à ceux de l'image  $V_2$



# Résultats

- Contours de l'image  $V_4$  superposés à ceux de l'image  $V_2$



# Plan

- Contexte de l'étude
- Acquisition des images
- Recalage géométrique des images
- **Discrimination spectrale**
- Analyse spatiale
- Fusion des deux résultats
- Conclusion et perspectives

# *Principes*

- Trois classes sont présentes dans nos images :
  - le sol,
  - la culture,
  - les adventices.

# Principes

- Trois classes sont présentes dans nos images :
  - le sol,
  - la culture,
  - les adventices.
- Deux approches sont possibles pour la segmentation :
  - la segmentation en une seule étape,
  - la segmentation en deux phases : sol/végétation puis culture/adventices.

# Référence

- Avant de segmenter les images, la connaissance d'une "vérité terrain" est nécessaire pour juger de la qualité des méthodes utilisées.



# Référence

- Avant de segmenter les images, la connaissance d'une "vérité terrain" est nécessaire pour juger de la qualité des méthodes utilisées.
- Il n'existe pas de méthode de référence pour segmenter ce type d'image.

# Référence

- Avant de segmenter les images, la connaissance d'une "vérité terrain" est nécessaire pour juger de la qualité des méthodes utilisées.
- Il n'existe pas de méthode de référence pour segmenter ce type d'image.
- Une segmentation manuelle est très difficile à réaliser (notamment à cause de la dynamique et de la résolution des images).

# Référence

- Avant de segmenter les images, la connaissance d'une "vérité terrain" est nécessaire pour juger de la qualité des méthodes utilisées.
- Il n'existe pas de méthode de référence pour segmenter ce type d'image.
- Une segmentation manuelle est très difficile à réaliser (notamment à cause de la dynamique et de la résolution des images).
- La qualité de la segmentation a été évaluée par un expert.

# *Attributs*

- Quatre valeurs sont associées à chaque pixel :  $g_1 \dots g_4$

# Attributs

- Quatre valeurs sont associées à chaque pixel :  $g_1 \dots g_4$
- On pose :  $V_n = g_n \times t_n$  qui est homogène au flux lumineux.

# Attributs

- Quatre valeurs sont associées à chaque pixel :  $g_1 \dots g_4$
- On pose :  $V_n = g_n \times t_n$  qui est homogène au flux lumineux.
- De plus, on calcule  $I_n = V_n/L$ .
- Chaque pixel est alors décrit par huit composantes  $(V_1, \dots, V_4, I_1, \dots, I_4)$

# ***Séparation sol/végétation (1)***

- De nombreux indices de végétation existent :

# Séparation sol/végétation (1)

- De nombreux indices de végétation existent :
- Le NDVI :  $NDVI = \frac{pIR - R}{pIR + R}$



# Séparation sol/végétation (1)

- De nombreux indices de végétation existent :
- Le NDVI :  $NDVI = \frac{pIR - R}{pIR + R}$
- Le NDI :  $NDI = \frac{G - R}{G + R}$

# Séparation sol/végétation (1)

- De nombreux indices de végétation existent :
- Le NDVI :  $NDVI = \frac{pIR - R}{pIR + R}$
- Le NDI :  $NDI = \frac{G - R}{G + R}$
- La base de Steward et Tian ( $V_1, V_2, I$ ) , ...

# Séparation sol/végétation (1)

- De nombreux indices de végétation existent :
- Le NDVI :  $NDVI = \frac{pIR - R}{pIR + R}$
- Le NDI :  $NDI = \frac{G - R}{G + R}$
- La base de Steward et Tian ( $V_1, V_2, I$ ) , ...
- Ces indices ne peuvent pas être utilisés avec nos images.

# ***Séparation sol/végétation (2)***

- La réflectance des plantes est élevée dans le vert et l'infra-rouge et faible dans le bleu et le rouge.

# ***Séparation sol/végétation (2)***

- La réflectance des plantes est élevée dans le vert et l'infra-rouge et faible dans le bleu et le rouge.
- La réflectance du sol n'a pas de caractéristiques particulières.

# ***Séparation sol/végétation (2)***

- La réflectance des plantes est élevée dans le vert et l'infra-rouge et faible dans le bleu et le rouge.
- La réflectance du sol n'a pas de caractéristiques particulières.
- Les filtres utilisés ont un comportement passe-haut dans l'infra-rouge.

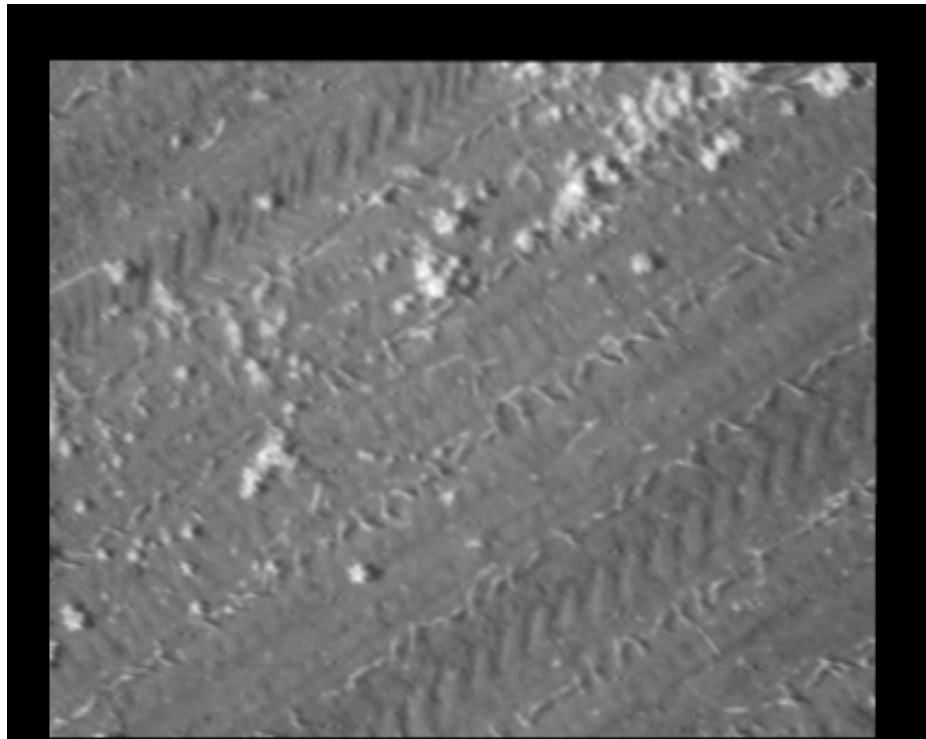
# Séparation sol/végétation (2)

- La réflectance des plantes est élevée dans le vert et l'infra-rouge et faible dans le bleu et le rouge.
- La réflectance du sol n'a pas de caractéristiques particulières.
- Les filtres utilisés ont un comportement passe-haut dans l'infra-rouge.
- Ces informations permettent de calculer un indice  $IV$ .

$$IV = \frac{V_2 + V_4}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}$$

# Séparation sol/végétation (3)

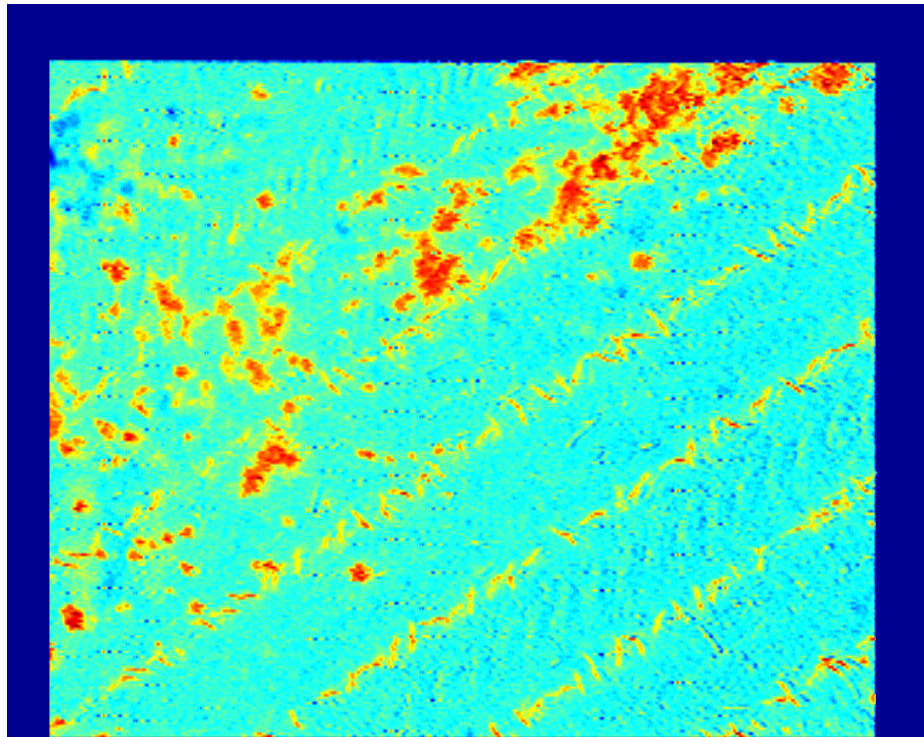
- On calcule l'indice  $IV$ .





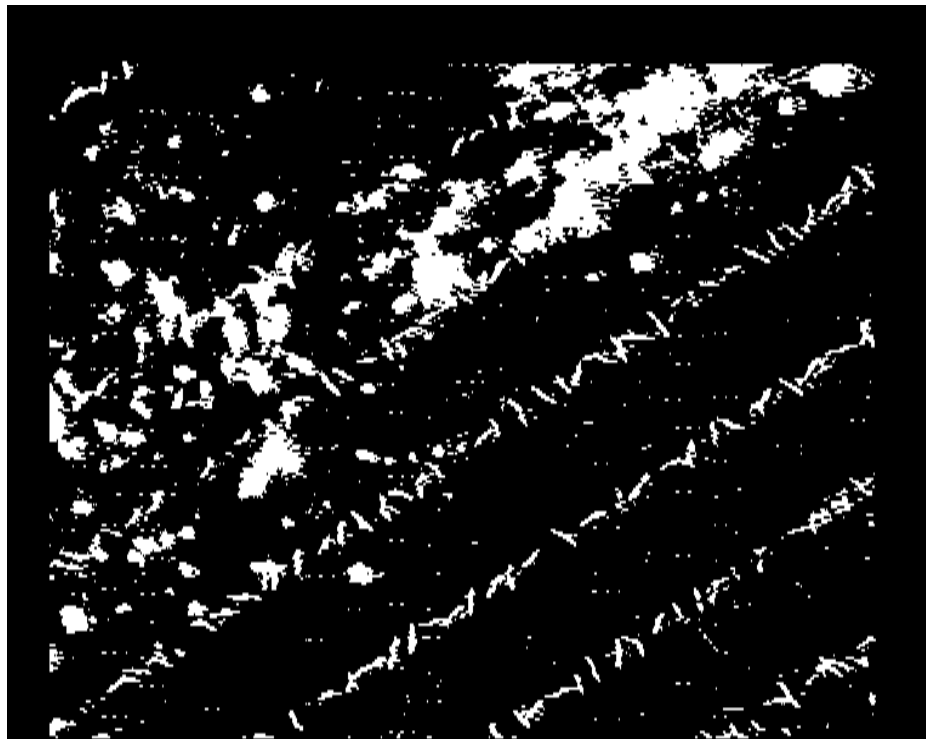
# Séparation sol/végétation (3)

- On calcule l'indice  $IV$ .



# *Séparation sol/végétation (3)*

- Un seuillage est ensuite utilisé pour obtenir une image de végétation.



# ***Séparation culture/adventices (1)***

- La classe végétation représente la culture et les adventices.

# ***Séparation culture/adventices (1)***

- La classe végétation représente la culture et les adventices.
- Il n'existe pas de méthode reconnue pour séparer ces deux classes sur les images multispectrales.

# ***Séparation culture/adventices (1)***

- La classe végétation représente la culture et les adventices.
- Il n'existe pas de méthode reconnue pour séparer ces deux classes sur les images multispectrales.
- Nous avons donc choisi de comparer différents classifieurs.

# ***Séparation culture/adventices (2)***

- Une méthode non supervisée a été étudiée : l'ACP segmentée à l'aide des centres mobiles.

# *Séparation culture/adventices (2)*

- Une méthode non supervisée a été étudiée : l'ACP segmentée à l'aide des centres mobiles.
- Parmi les méthodes supervisées nous avons comparé : les classifieurs à distance minimale, les  $k$  plus proches voisins, les réseaux de neurones, les SVM.

# ***Séparation culture/adventices (3)***

- La méthode non supervisée n'a pas donné de résultats reproductifs.



# ***Séparation culture/adventices (3)***

- La méthode non supervisée n'a pas donné de résultats reproductifs.
- Les classifieurs à distance minimale n'ont pas obtenu de résultats satisfaisants.

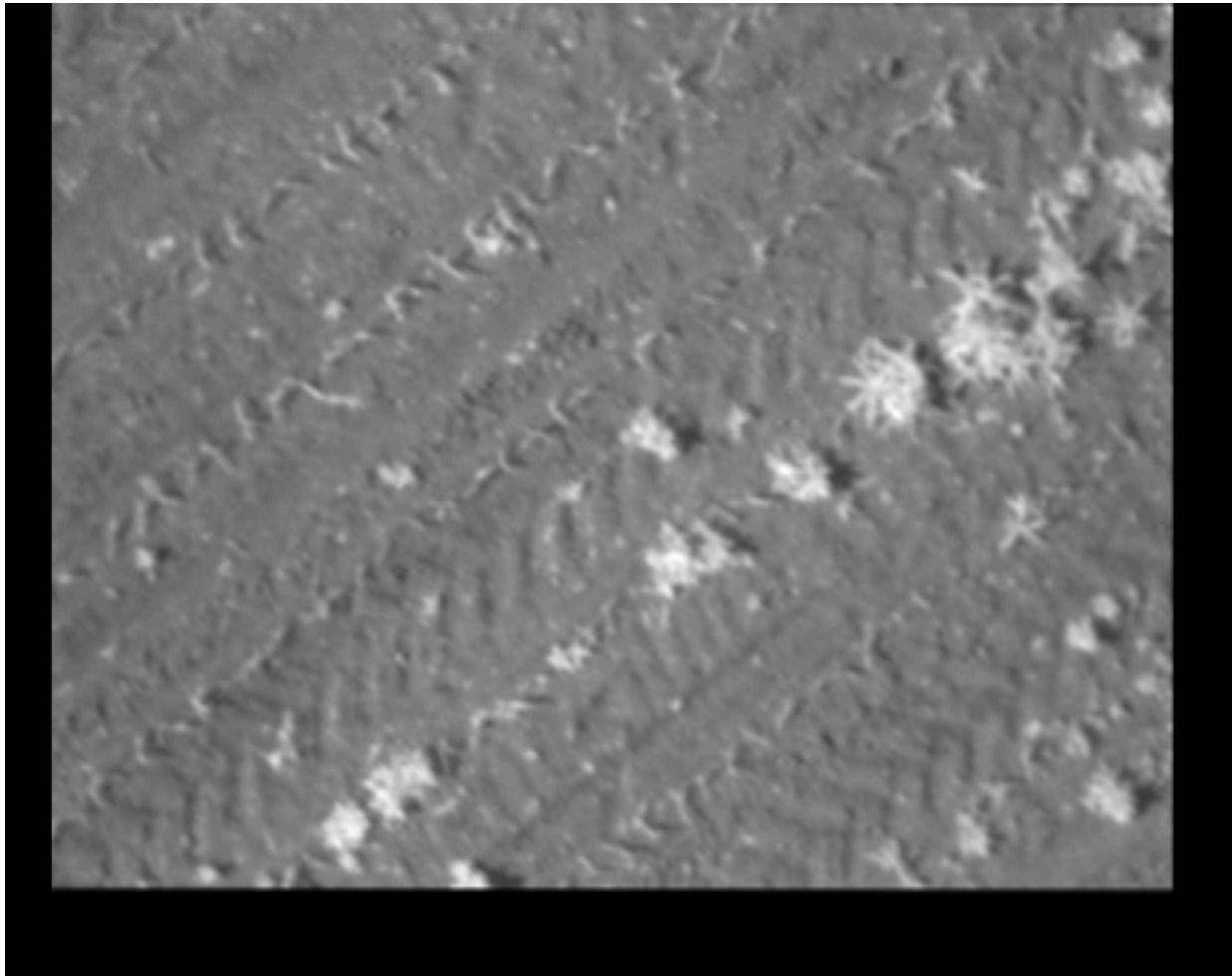
# ***Séparation culture/adventices (3)***

- La méthode non supervisée n'a pas donné de résultats reproductifs.
- Les classifieurs à distance minimale n'ont pas obtenu de résultats satisfaisants.
- La qualité des résultats fournis par les réseaux de neurones est directement liée à l'apprentissage.

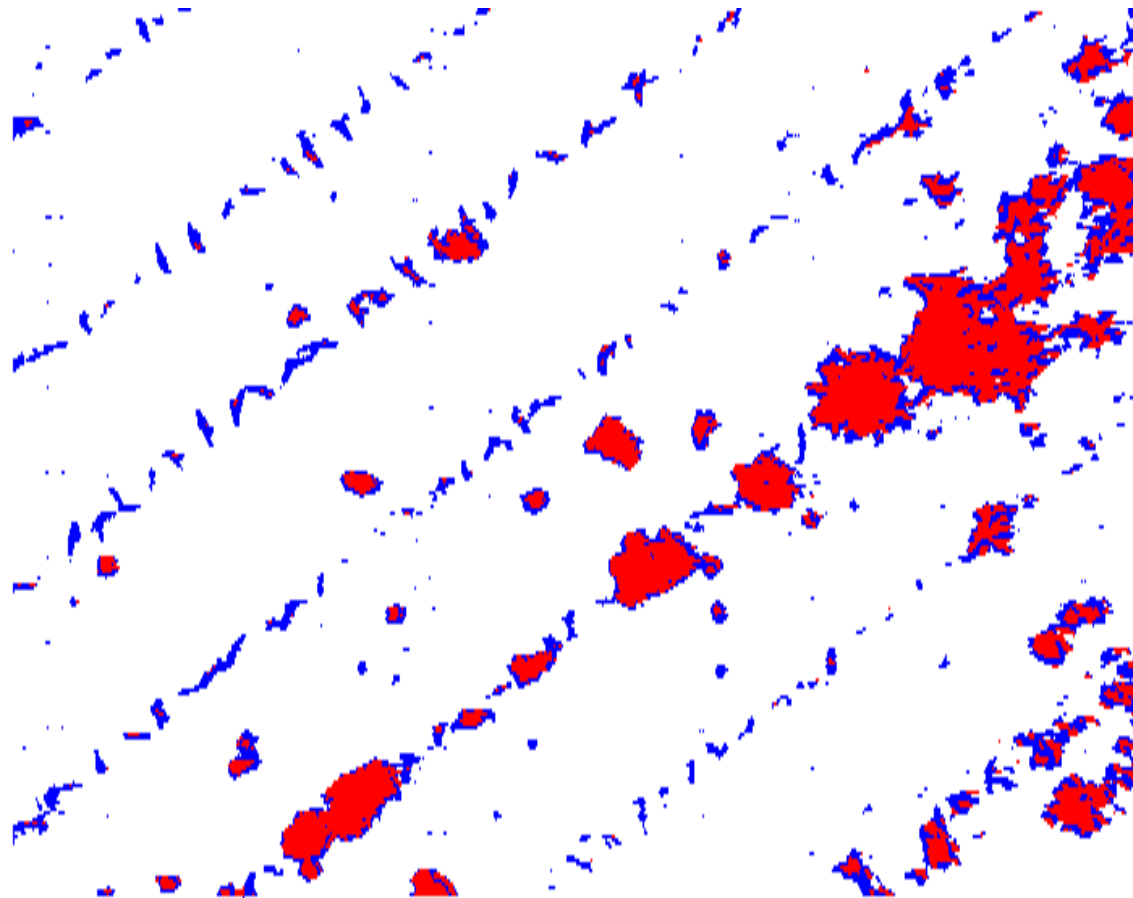
# ***Séparation culture/adventices (3)***

- La méthode non supervisée n'a pas donné de résultats reproductifs.
- Les classifieurs à distance minimale n'ont pas obtenu de résultats satisfaisants.
- La qualité des résultats fournis par les réseaux de neurones est directement liée à l'apprentissage.
- Les  $k$ PPV et les SVM fournissent des résultats satisfaisants et reproductifs.

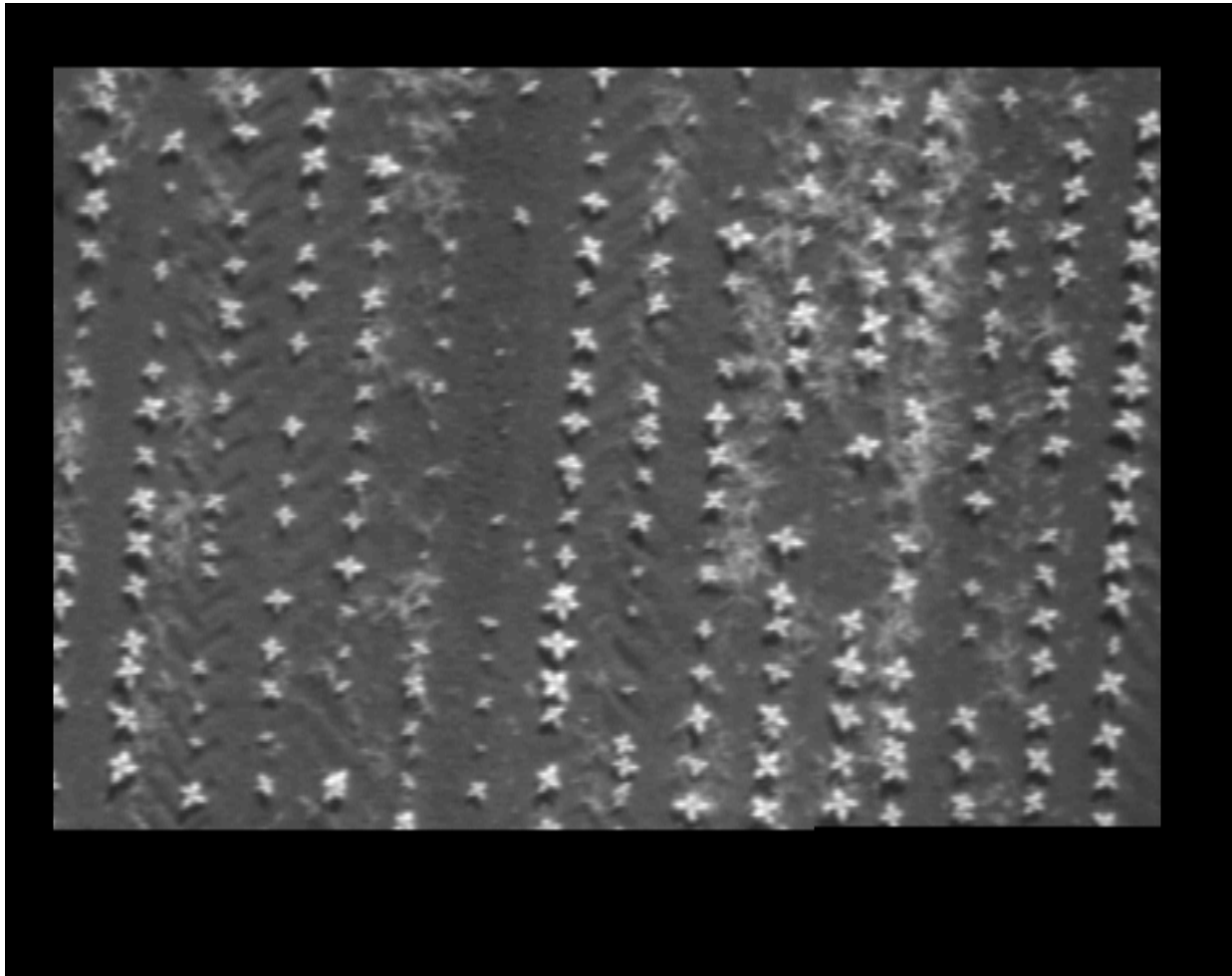
# *Séparation culture/adventices (4)*



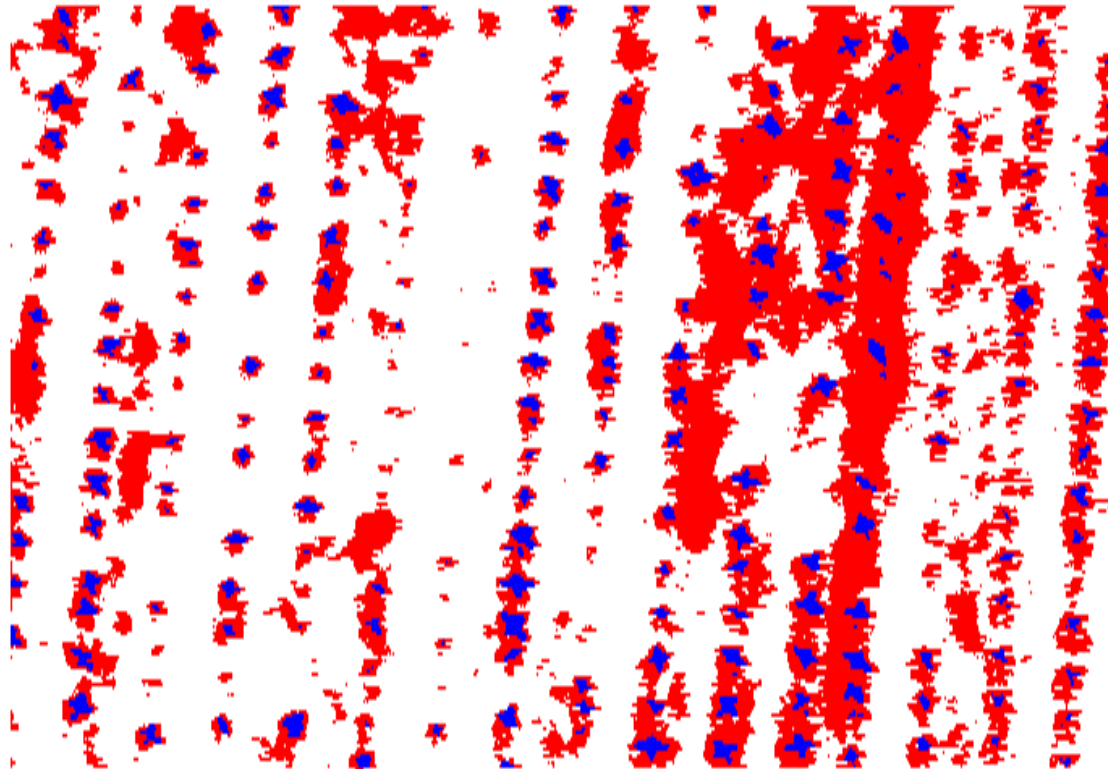
# *Séparation culture/adventices (4)*



# *Séparation culture/adventices (4)*



# *Séparation culture/adventices (4)*



# *Synthèse*

---

- On constate que les erreurs dépendent des familles végétales :



# *Synthèse*

- On constate que les erreurs dépendent des familles végétales :
- Le taux d'erreurs est très faible pour les monocotylédones.

# *Synthèse*

- On constate que les erreurs dépendent des familles végétales :
- Le taux d'erreurs est très faible pour les monocotylédones.
- Il est plus élevé et localisé (contours) pour les dicotylédones.

# Synthèse

- On constate que les erreurs dépendent des familles végétales :
- Le taux d'erreurs est très faible pour les monocotylédones.
- Il est plus élevé et localisé (contours) pour les dicotylédones.
- L'ajout des attributs des pixels voisins ne permet pas d'améliorer les résultats.

# ***Cause possible des erreurs (1)***

- On construit un pixel de synthèse, mélange de sol et de tournesol (dicotylédone), et on classe ce pixel.

$$p_i = n.S_i + (1 - n).C_i$$

# ***Cause possible des erreurs (1)***

- On construit un pixel de synthèse, mélange de sol et de tournesol (dicotylédone), et on classe ce pixel.

$$p_i = n.S_i + (1 - n).C_i$$

- Pour les valeurs extrêmes de  $n$ , le comportement est celui prévu.
- Pour les valeurs intermédiaires de  $n$ , le point est classé adventices.

# ***Cause possible des erreurs (2)***

- Ce phénomène n'apparaît que pour les dicotylédones.

# ***Cause possible des erreurs (2)***

- Ce phénomène n'apparaît que pour les dicotylédones.
- La réflectance des monocotylédones est plus faible que celle des dicotylédones dans l'infra-rouge.

# ***Cause possible des erreurs (2)***

- Ce phénomène n'apparaît que pour les dicotylédones.
- La réflectance des monocotylédones est plus faible que celle des dicotylédones dans l'infra-rouge.
- Le mélange des caractéristiques spectrales du sol et des dicotylédones est une source d'erreurs.



# Plan

- Contexte de l'étude
- Acquisition des images
- Recalage géométrique des images
- Discrimination spectrale
- **Analyse spatiale**
- Fusion des deux résultats
- Conclusion et perspectives

# *Principes (1)*

- Les cultures sont semées avec un espacement constant, alors que les adventices n'ont pas de structures particulières.

# *Principes (1)*

- Les cultures sont semées avec un espacement constant, alors que les adventices n'ont pas de structures particulières.
- La transformée de Hough est souvent utilisée pour le guidage d'engin dans les cultures.

# ***Principes (1)***

- Les cultures sont semées avec un espacement constant, alors que les adventices n'ont pas de structures particulières.
- La transformée de Hough est souvent utilisée pour le guidage d'engin dans les cultures.
- Une information fréquentielle est intrinsèquement présente dans les cultures.

# Principes (2)

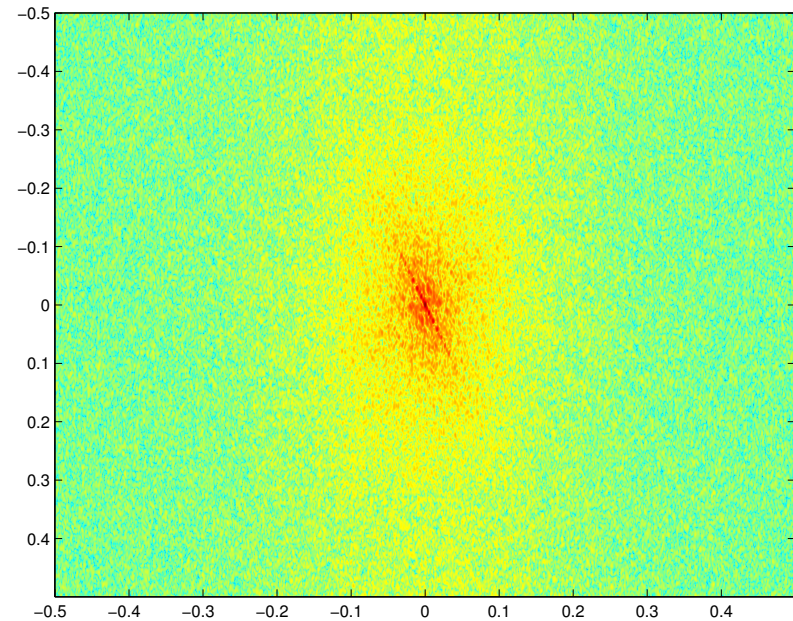
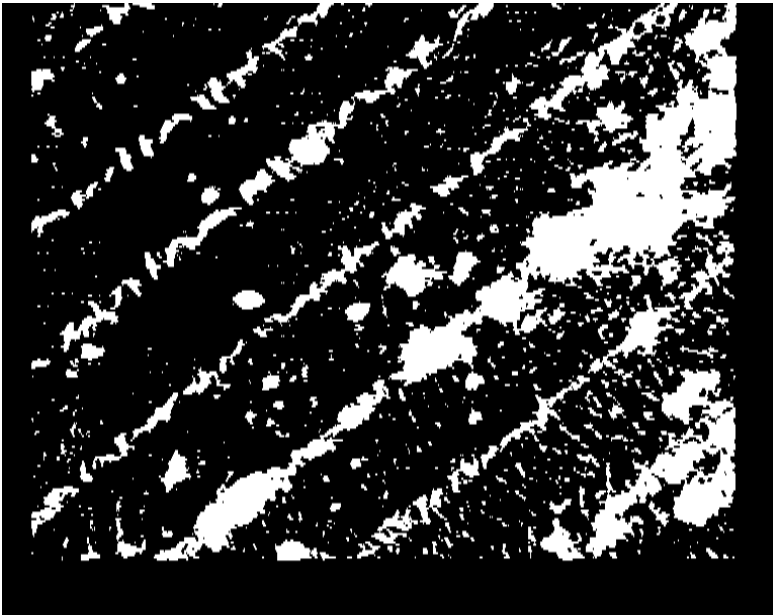
Culture	Espacement des lignes de semis
Blé, Orge	16 à 18 cm
Tournesol	45 cm
Maïs	75 à 80 cm
Betterave	50 cm

# ***Principes (3)***

- La transformée de Fourier doit permettre de dégager des paramètres (la fréquence  $f$  et l'orientation  $\theta$ ) caractérisant les lignes de semis.

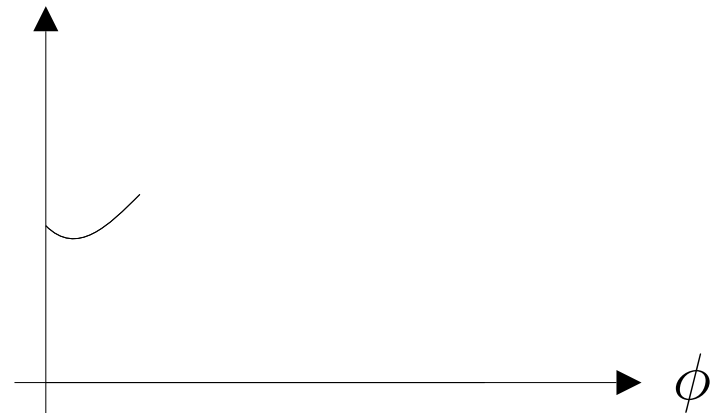
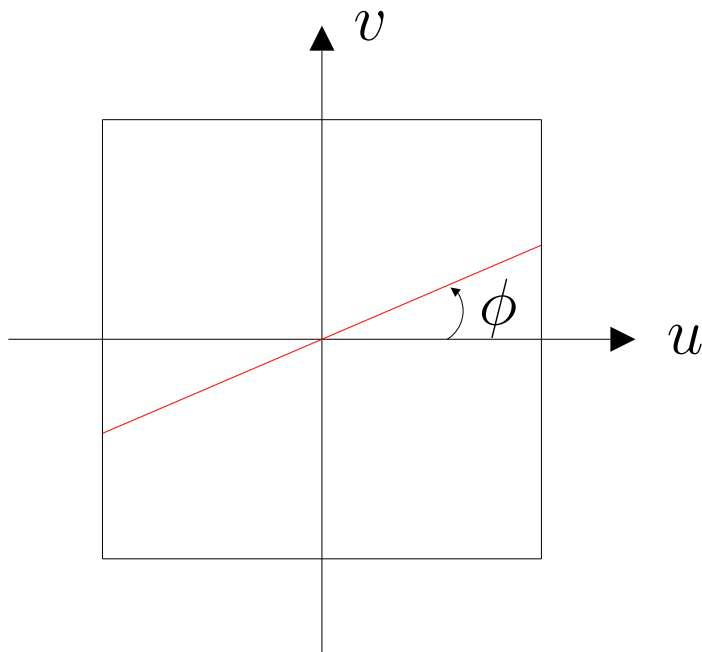
# Principes (3)

- La transformée de Fourier doit permettre de dégager des paramètres (la fréquence  $f$  et l'orientation  $\theta$ ) caractérisant les lignes de semis.



# Recherche des paramètres $\theta$ et $f$ (1)

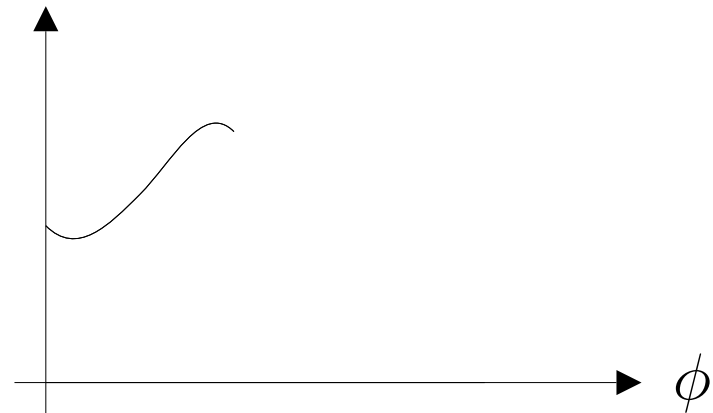
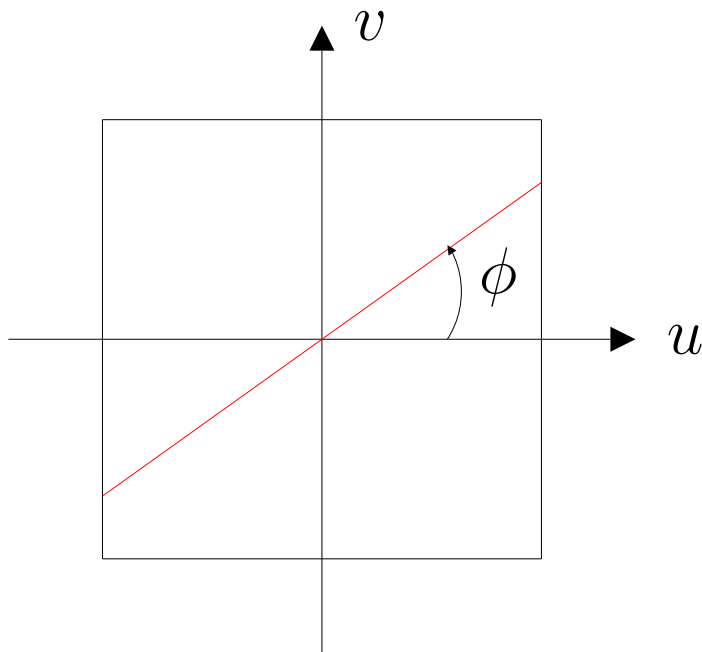
- On calcule l'intégrale de la TF le long d'une ligne orientée selon un angle  $\phi$ .





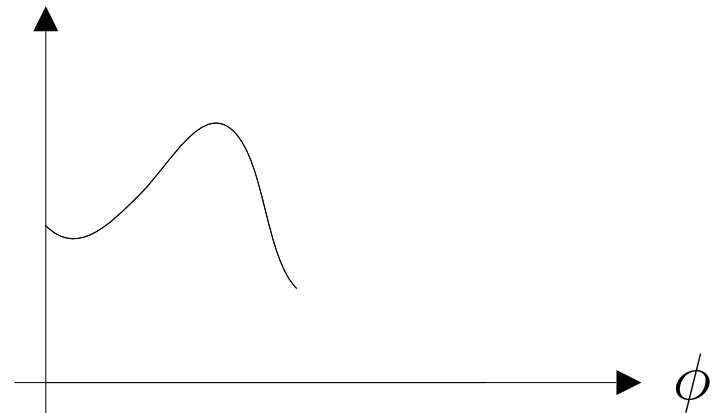
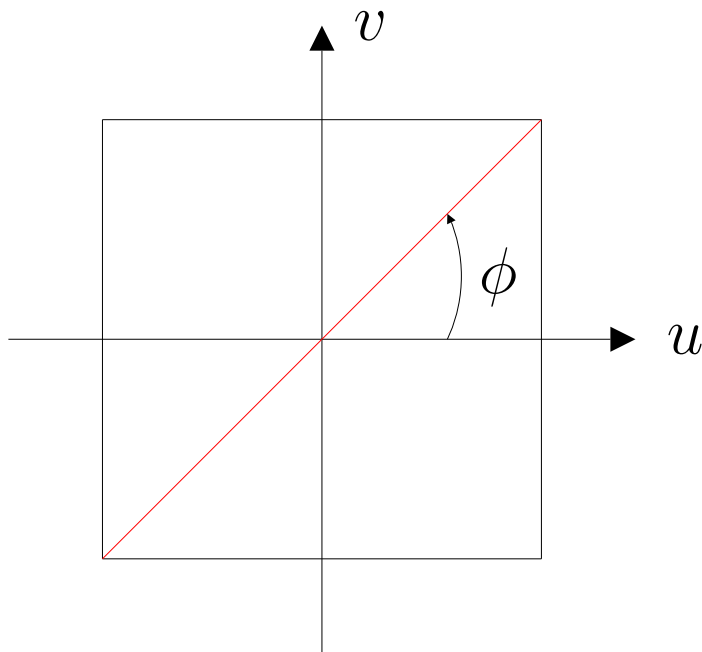
# Recherche des paramètres $\theta$ et $f$ (1)

- On calcule l'intégrale de la TF le long d'une ligne orientée selon un angle  $\phi$ .



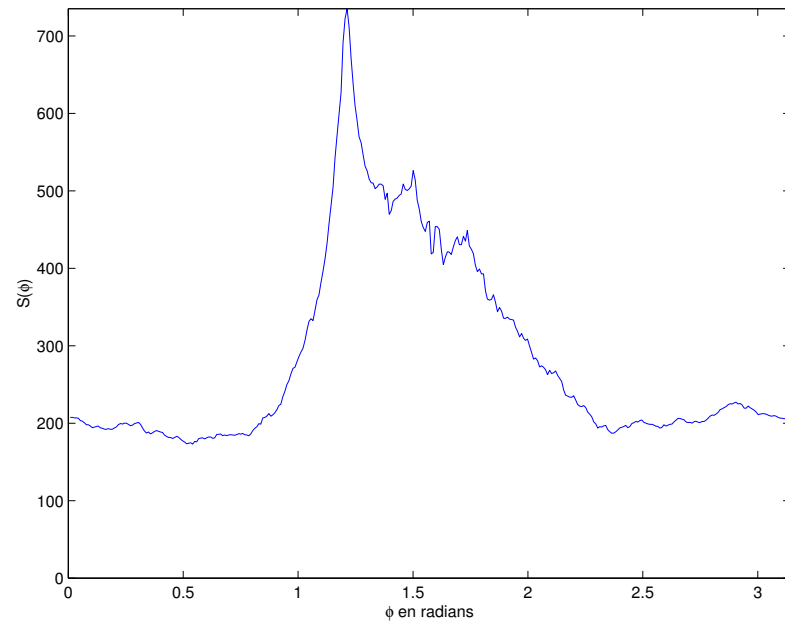
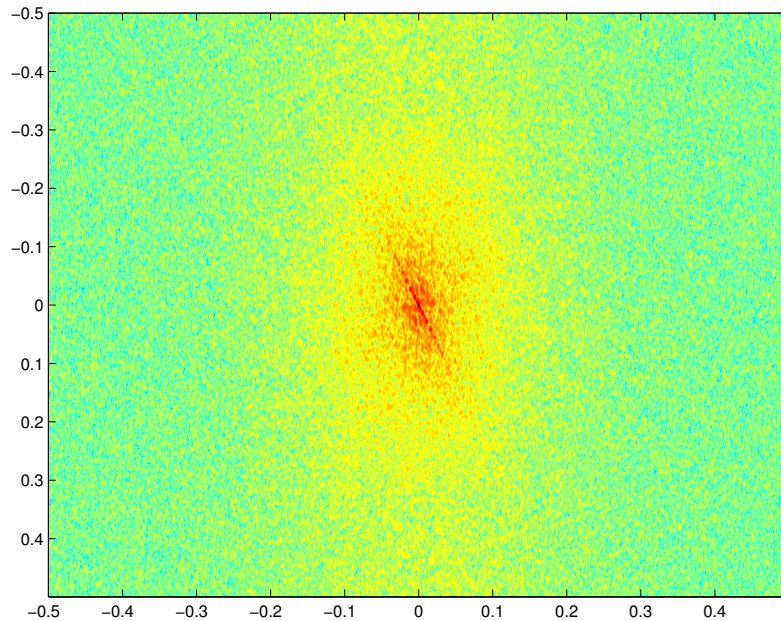
# Recherche des paramètres $\theta$ et $f$ (1)

- On calcule l'intégrale de la TF le long d'une ligne orientée selon un angle  $\phi$ .



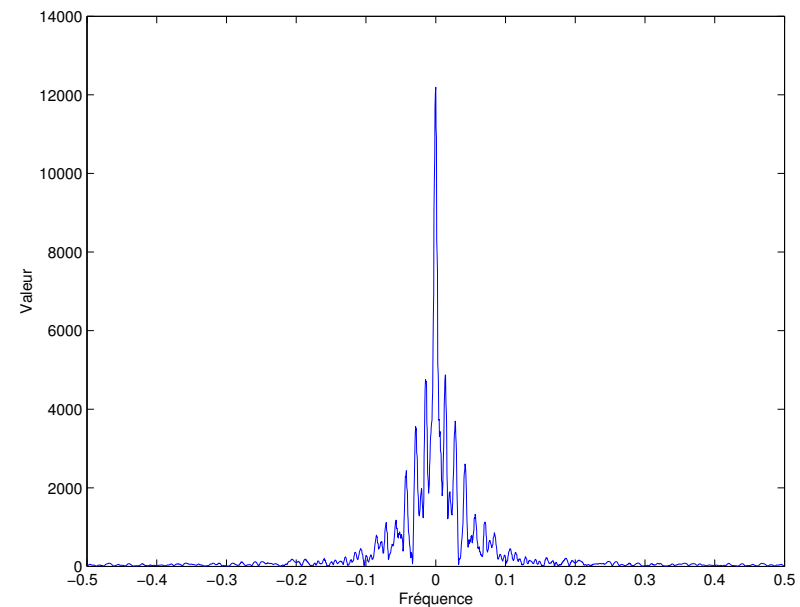
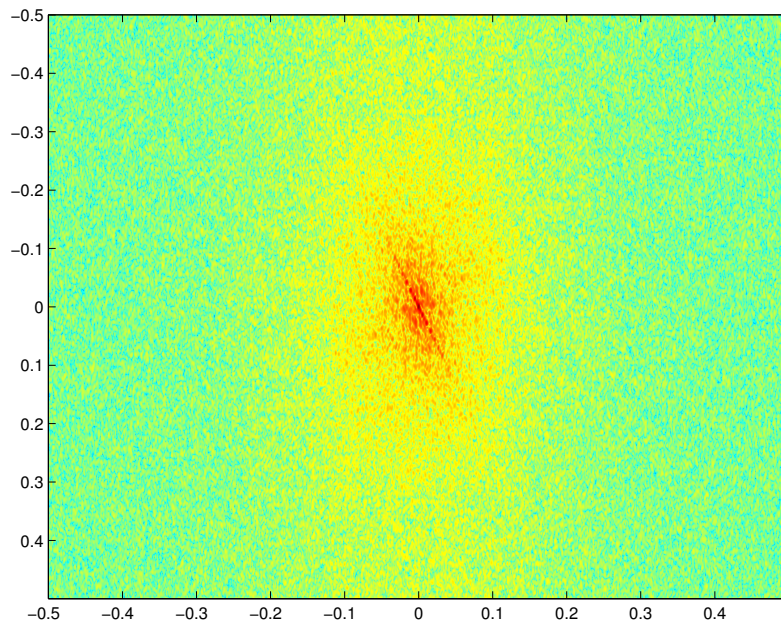
# Recherche des paramètres $\theta$ et $f$ (2)

- Le maximum de l'intégrale fournit  $\theta$ .



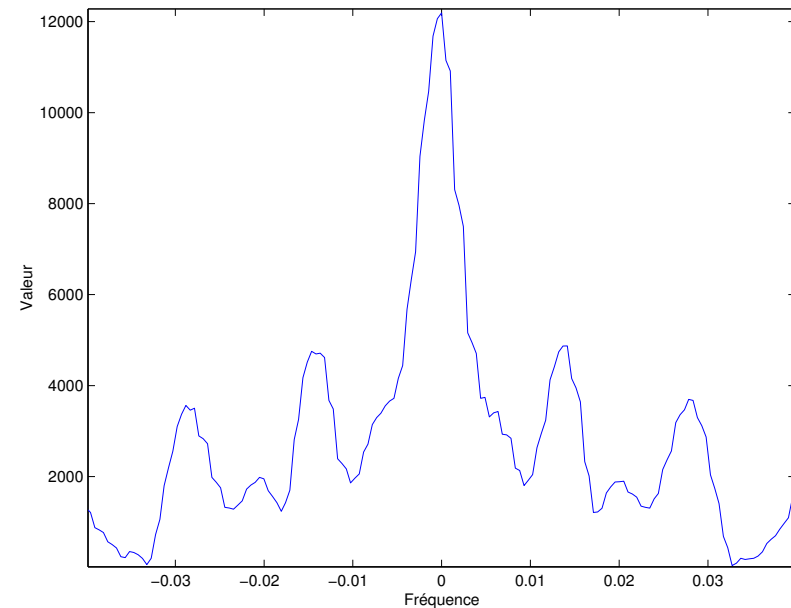
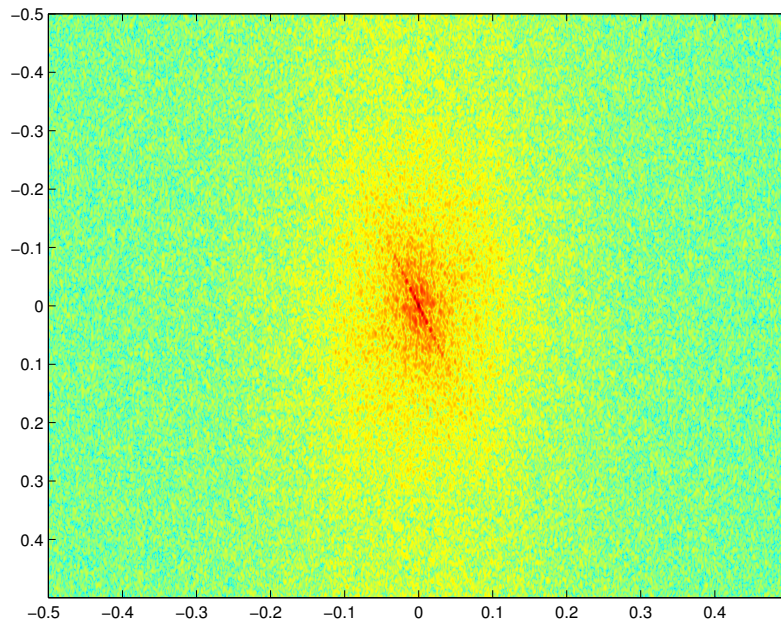
# Recherche des paramètres $\theta$ et $f$ (3)

- La coupe de la transformée de Fourier le long de la droite d'orientation  $\theta$  permet de caractériser  $f$ .



# Recherche des paramètres $\theta$ et $f$ (3)

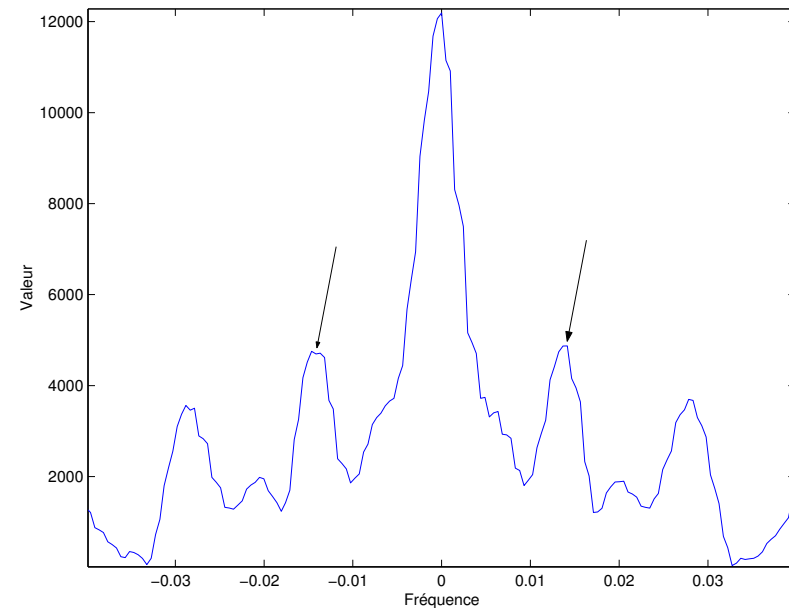
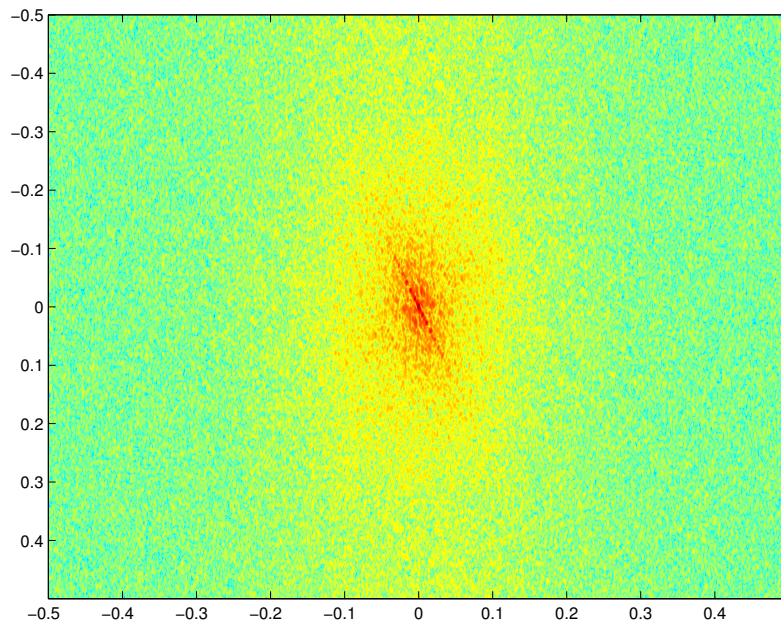
- La coupe de la transformée de Fourier le long de la droite d'orientation  $\theta$  permet de caractériser  $f$ .





# Recherche des paramètres $\theta$ et $f$ (3)

- La coupe de la transformée de Fourier le long de la droite d'orientation  $\theta$  permet de caractériser  $f$ .



# *Filtrage des cultures*

- Les paramètres caractérisant les lignes de semis sont déterminés ( $f$  et  $\theta$ ).

# *Filtrage des cultures*

- Les paramètres caractérisant les lignes de semis sont déterminés ( $f$  et  $\theta$ ).
- Un filtre passe-bande centré sur  $f$  doit permettre de sélectionner les pixels appartenant aux cultures.



# *Filtrage des cultures*

- Les paramètres caractérisant les lignes de semis sont déterminés ( $f$  et  $\theta$ ).
- Un filtre passe-bande centré sur  $f$  doit permettre de sélectionner les pixels appartenant aux cultures.
- Parmi les filtres passe-bandes existants, le filtre de Gabor est souvent utilisé.

# Filtre de Gabor 2D (1)

- Le filtre de Gabor est construit à partir d'une fonction gaussienne et d'une fonction de modulation

$$g(x) = \underbrace{e^{\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)}}_{\text{Fonction gaussienne}} \cdot \underbrace{e^{2\pi j(u_0x + v_0y)}}_{\text{Fonction harmonique}}$$

# ***Filtre de Gabor 2D (1)***

- Une des représentations réelles du filtre de Gabor est :

$$g(x, y) = e^{-\frac{1}{2}\left[-\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right]} \cdot \cos(2\pi u_0 x)$$

# Filtre de Gabor 2D (1)

- Une des représentations réelles du filtre de Gabor est :
- Une rotation permet d'orienter le filtre selon une direction préférentielle.

$$g(x, y) = e^{-\frac{1}{2}\left[-\frac{x_{\theta}^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_{\theta}^2}{\sigma_y^2}\right]} \cdot \cos(2\pi u_0 x_{\theta})$$

$$\text{avec : } \begin{cases} x_{\theta} = x \cos \theta - y \sin \theta \\ y_{\theta} = x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases}$$

# *Filtre de Gabor 2D (2)*

- Décomposition du filtre de Gabor

$$g(x, y) = \left( e^{-\frac{1}{2} \frac{x_\theta^2}{\sigma_x^2}} \cdot \cos(2\pi u_0 x_\theta) \right) \cdot \left( e^{-\frac{1}{2} \frac{y_\theta^2}{\sigma_y^2}} \right)$$

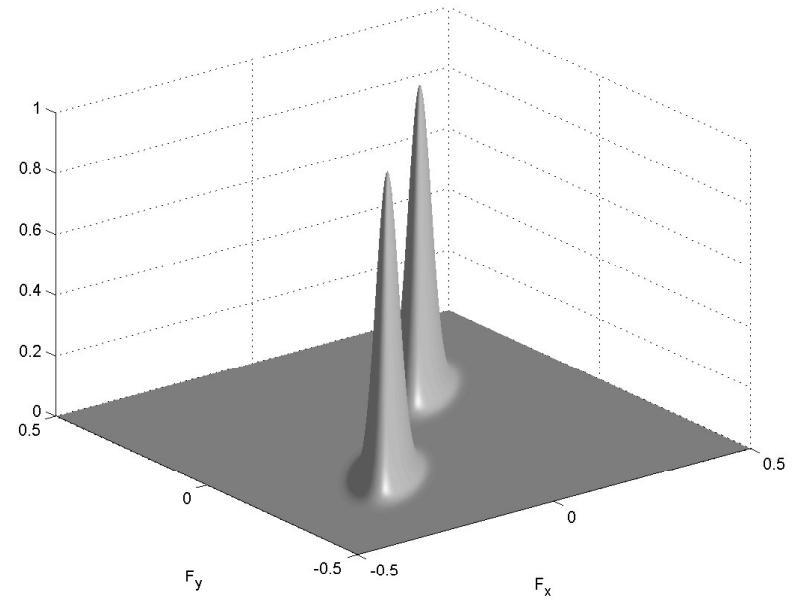
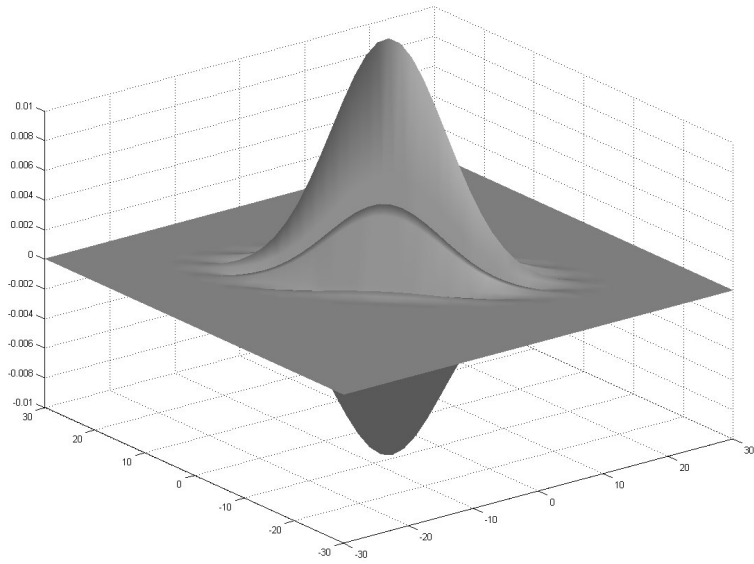
# Filtre de Gabor 2D (2)

- Décomposition du filtre de Gabor

$$g(x, y) = \underbrace{\left( e^{-\frac{1}{2} \frac{x_\theta^2}{\sigma_x^2}} \cdot \cos(2\pi u_0 x_\theta) \right)}_{b_{x_\theta}} \cdot \underbrace{\left( e^{-\frac{1}{2} \frac{y_\theta^2}{\sigma_y^2}} \right)}_{l_{y_\theta}}$$

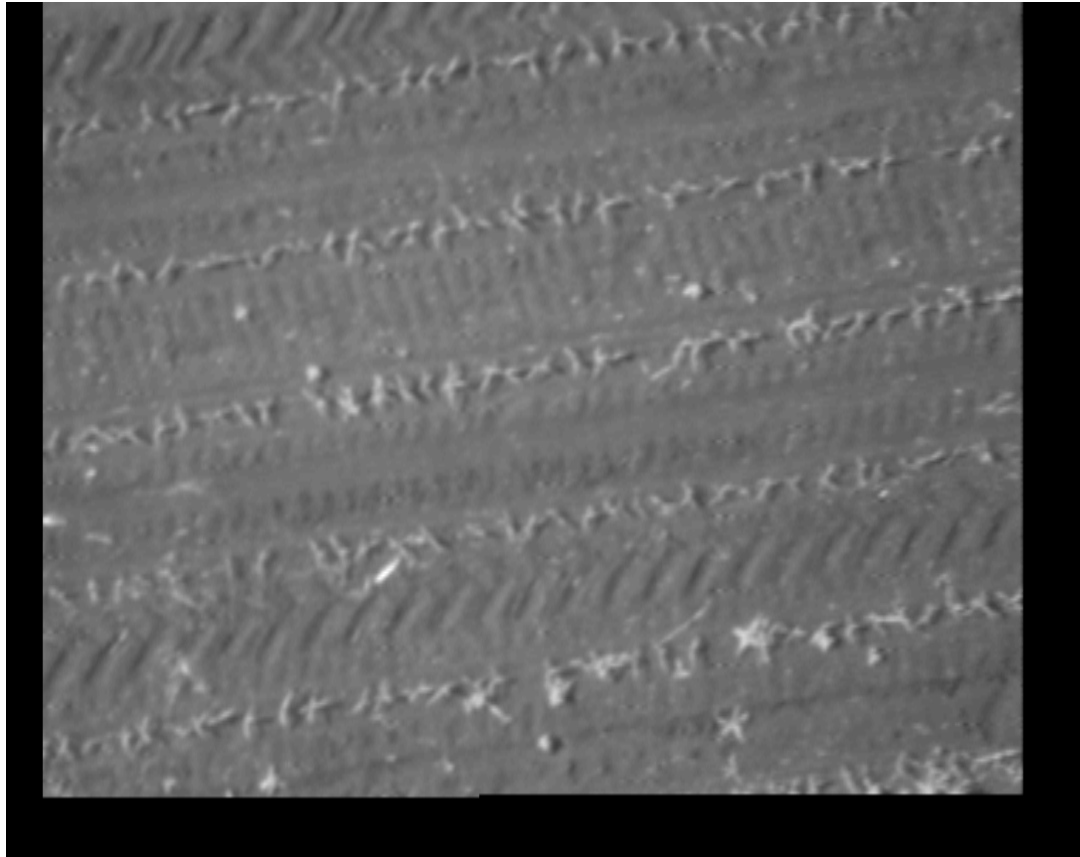
- Le filtre  $b_{x_\theta}$  est un filtre de Gabor le long de l'axe  $x_\theta$
- Le filtre  $l_{y_\theta}$  est un filtre passe-bas le long de l'axe  $y_\theta$

# Filtre de Gabor 2D (3)



# *Application*

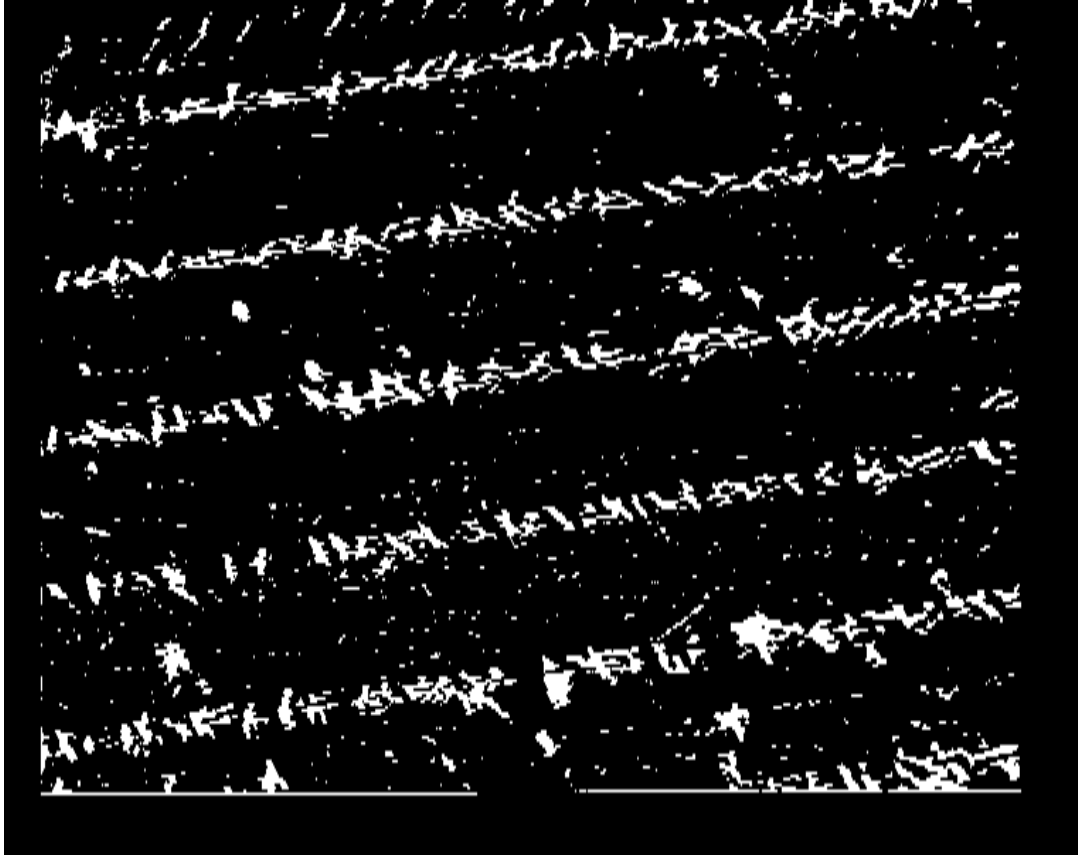
- Culture de maïs avec présence de chardons.





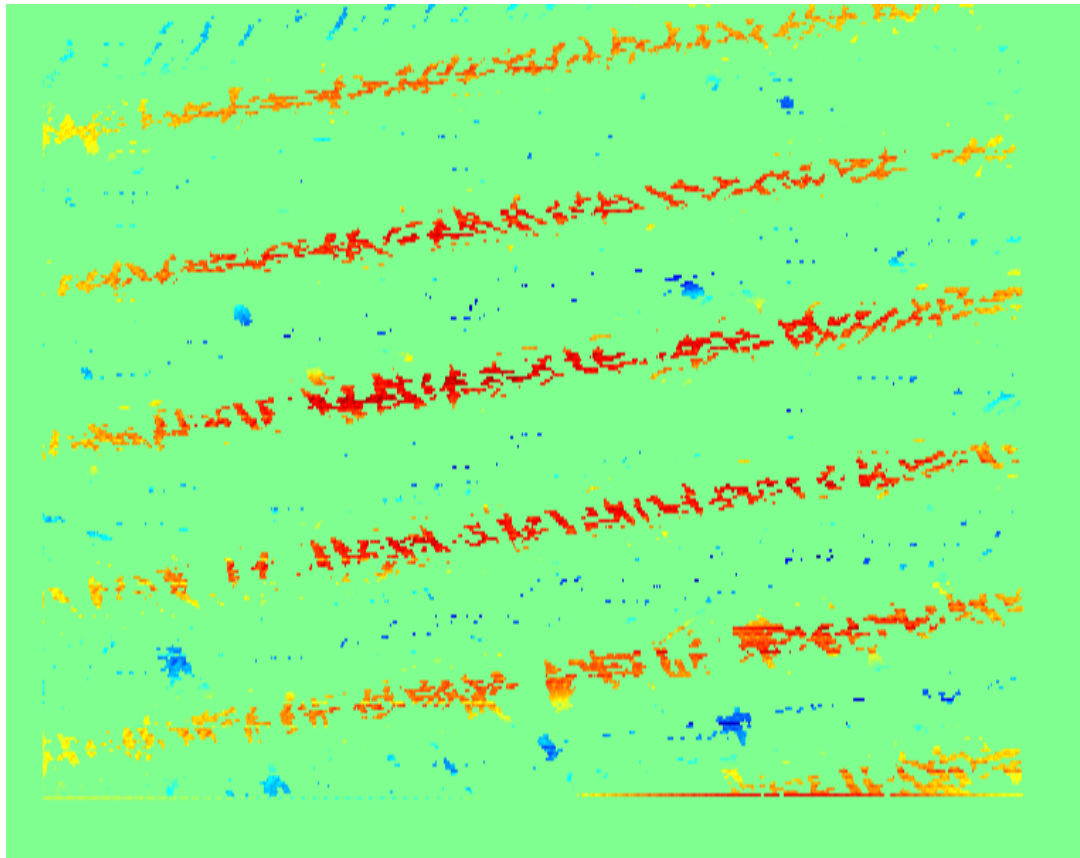
# *Application*

- L'image de végétation est calculée.



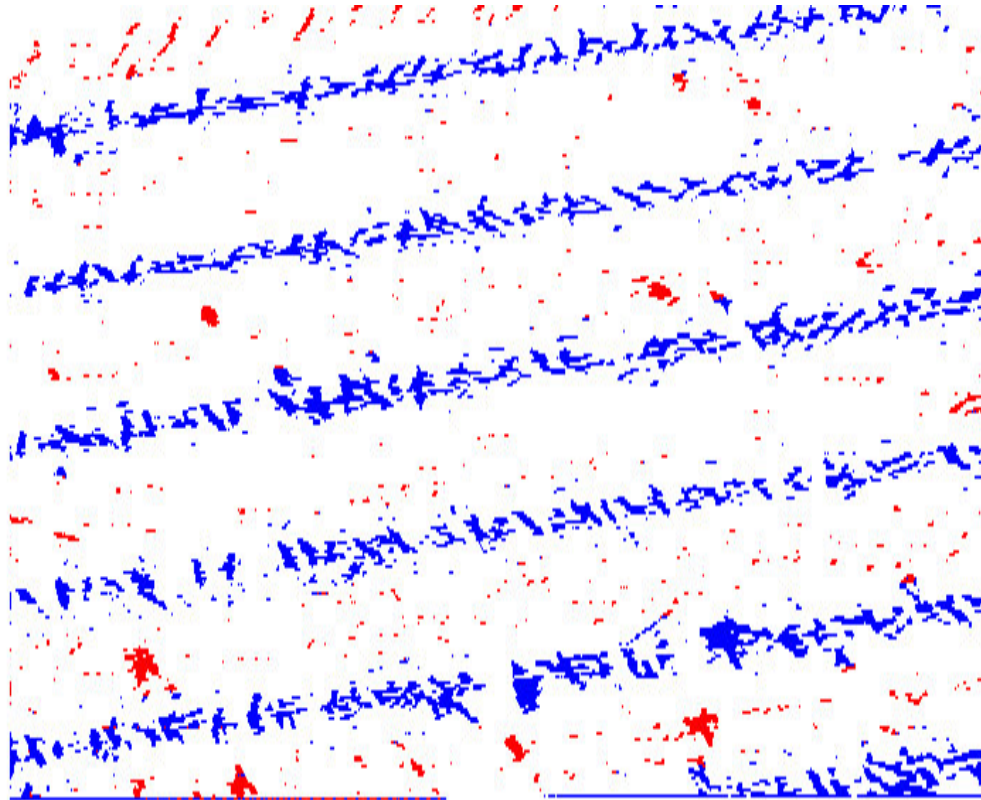
# *Application*

- On convolue avec le filtre de Gabor.



# *Application*

- Le signe du résultat permet la classification.



# *Synthèse*

---

- L'approche retenue conduit à des résultats satisfaisants.

# Synthèse

- L'approche retenue conduit à des résultats satisfaisants.
- Deux limites apparaissent toutefois :
  - Les adventices présentes dans la ligne de semis sont reconnues comme des cultures.
  - Les pointes de feuilles de certaines cultures (maïs,...) sont classées parmi les adventices.

# Synthèse

- L'approche retenue conduit à des résultats satisfaisants.
- Deux limites apparaissent toutefois :
  - Les adventices présentes dans la ligne de semis sont reconnues comme des cultures.
  - Les pointes de feuilles de certaines cultures (maïs,...) sont classées parmi les adventices.
- Une méthode permettant l'optimisation des temps de calculs basée sur les paquets d'ondelettes a été développée.

# Plan

- Contexte de l'étude
- Acquisition des images
- Recalage géométrique des images
- Discrimination spectrale
- Analyse spatiale
- Fusion des deux résultats
- Conclusion et perspectives

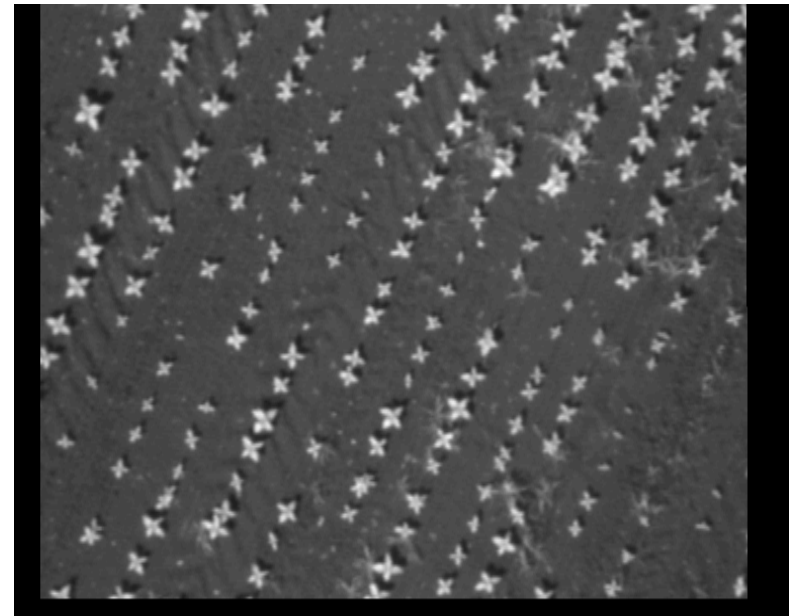
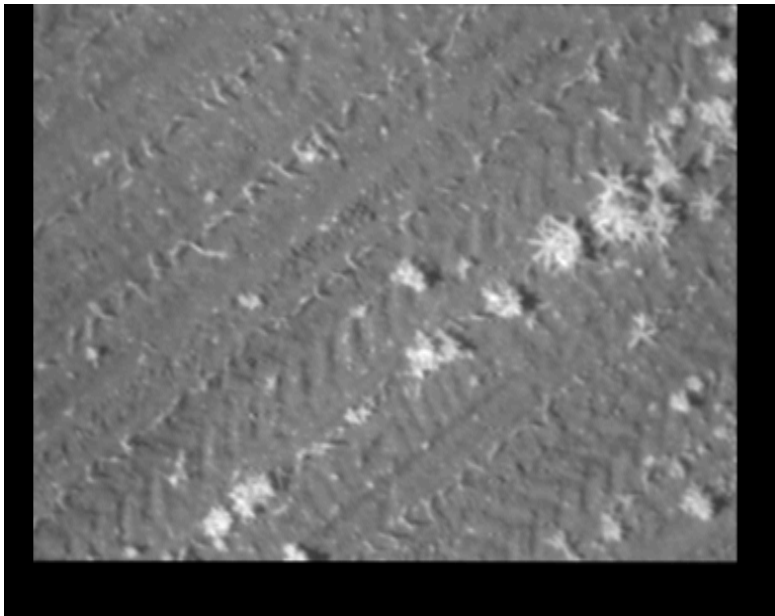
# *Principes*

- Les deux méthodes de détection (spectrale et spatiale) donnent des résultats convenables.
- Les sources d'erreurs sont différentes.
- L'utilisation de méthodes de fusion de données doit permettre d'améliorer le résultat global.



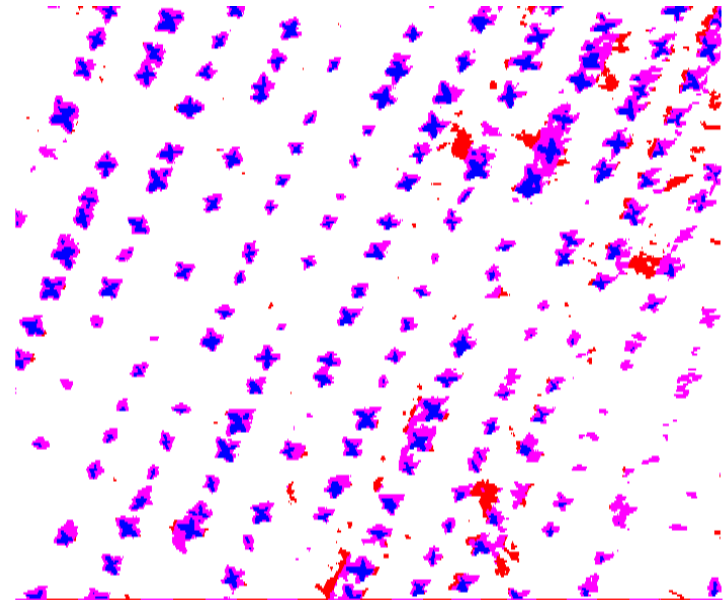
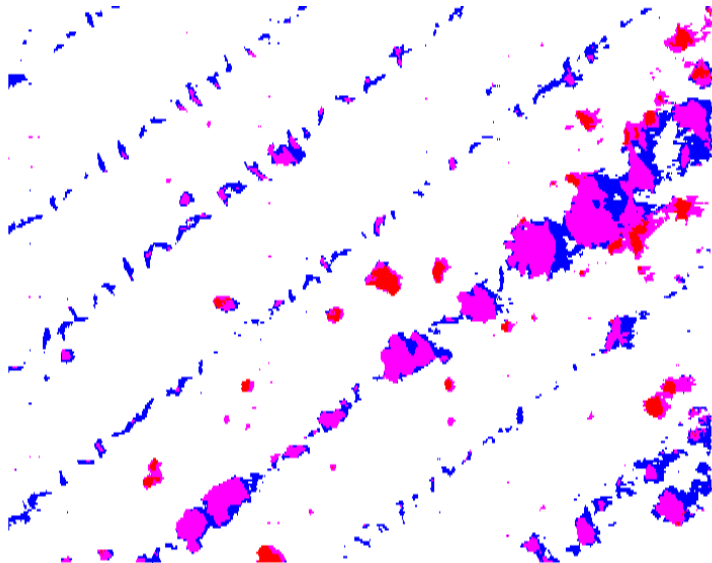
# *Fusion ET*

- On considère qu'un résultat est valide si les deux méthodes sont concordantes.



# ***Fusion ET***

- On considère qu'un résultat est valide si les deux méthodes sont concordantes.
- On minimise ainsi les erreurs.



# ***Fusion bayésienne (1)***

- Les taux d'erreurs sont très différents, certains étant négligeables.

# ***Fusion bayésienne (1)***

- Les taux d'erreurs sont très différents, certains étant négligeables.
- Le taux d'erreurs de classification des adventices par la méthode de détection des lignes de semis est très faible.

# ***Fusion bayésienne (1)***

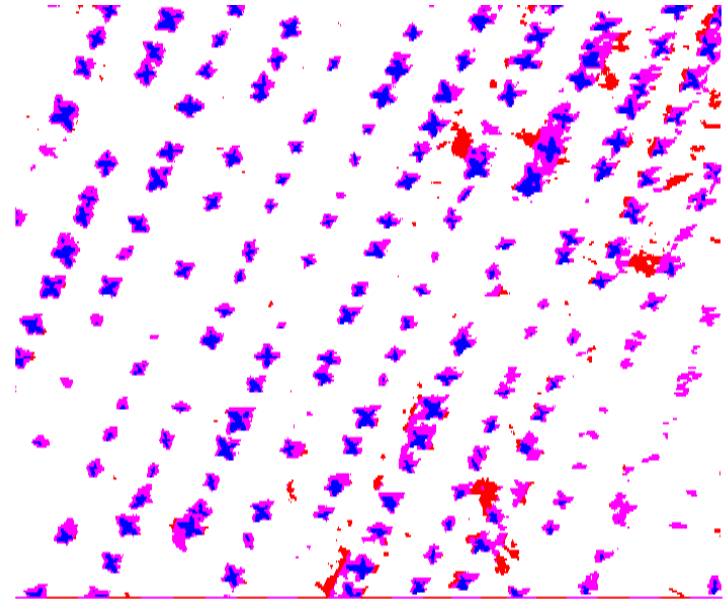
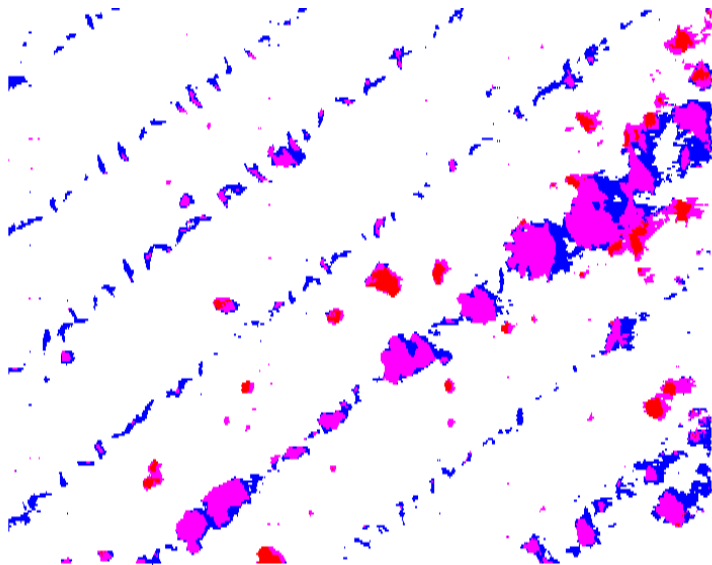
- Les taux d'erreurs sont très différents, certains étant négligeables.
- Le taux d'erreurs de classification des adventices par la méthode de détection des lignes de semis est très faible.
- Le taux d'erreurs de classification pour les dicotylédones par l'analyse spectrale est très faible.

# ***Fusion bayésienne (1)***

- Les taux d'erreurs sont très différents, certains étant négligeables.
- Le taux d'erreurs de classification des adventices par la méthode de détection des lignes de semis est très faible.
- Le taux d'erreurs de classification pour les dicotylédones par l'analyse spectrale est très faible.
- On approxime le théorème de Bayes pour donner une priorité dans ces deux cas.

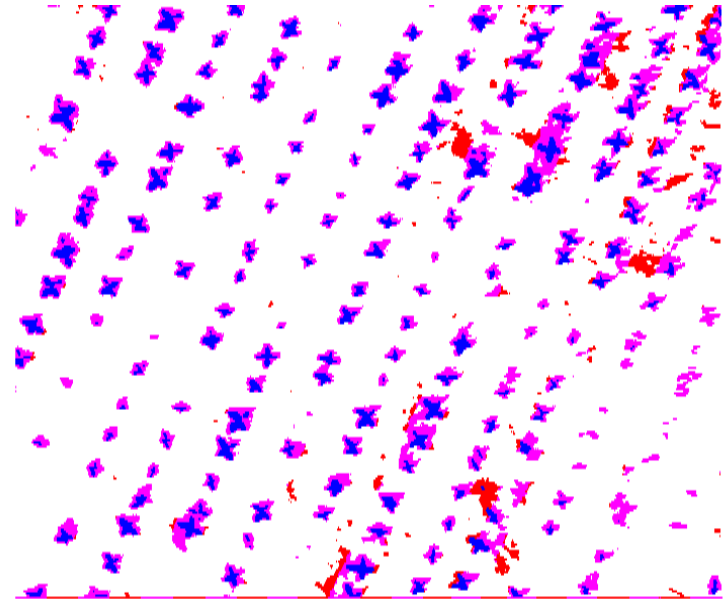
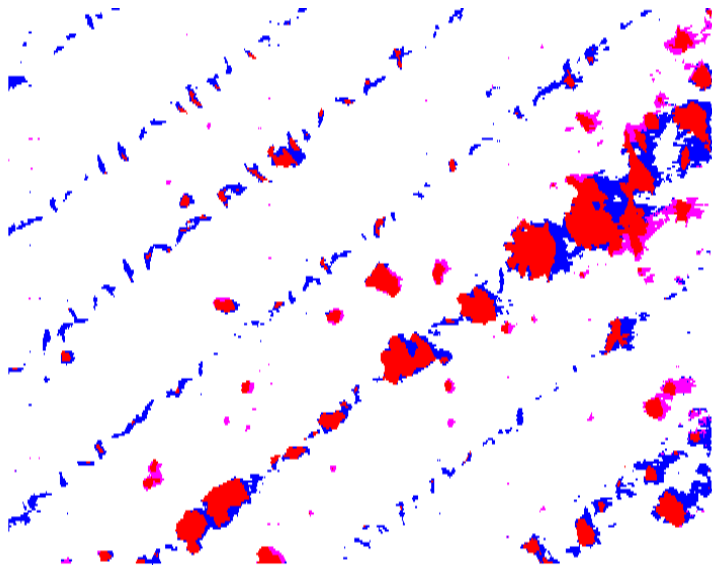
# ***Fusion bayésienne (2)***

- Résultat de l'utilisation des règles de priorités.



# ***Fusion bayésienne (2)***

- Résultat de l'utilisation des règles de priorités.





# ***Fusion bayésienne (3)***

- Cette méthode est très efficace pour les cultures monocotylédones.

# ***Fusion bayésienne (3)***

- Cette méthode est très efficace pour les cultures monocotylédones.
- Par contre, pour les cultures dicotylédones, peu de points incertains sont classés.

# ***Fusion bayésienne (3)***

- Cette méthode est très efficace pour les cultures monocotylédones.
- Par contre, pour les cultures dicotylédones, peu de points incertains sont classés.
- Les points incertains restants ne peuvent pas être résolus à l'aide de relations simples.

# ***Regroupement de pixels***

- On classe prioritairement les pixels dont le voisinage est le mieux défini.

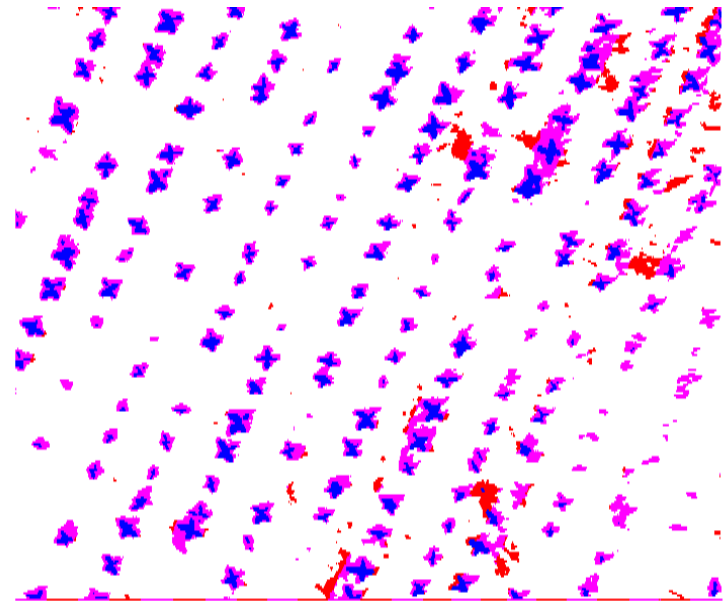
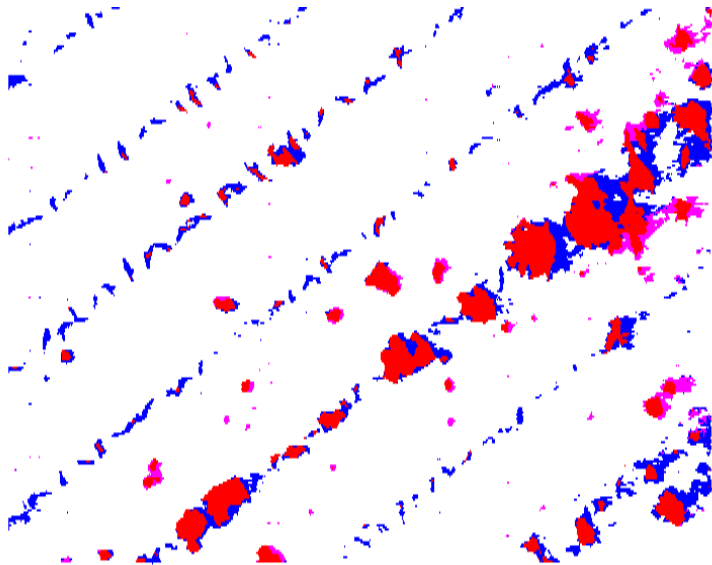
# ***Regroupement de pixels***

- On classe prioritairement les pixels dont le voisinage est le mieux défini.
- On utilise la méthode des  $k$ PPV avec les voisins définis comme base d'apprentissage.

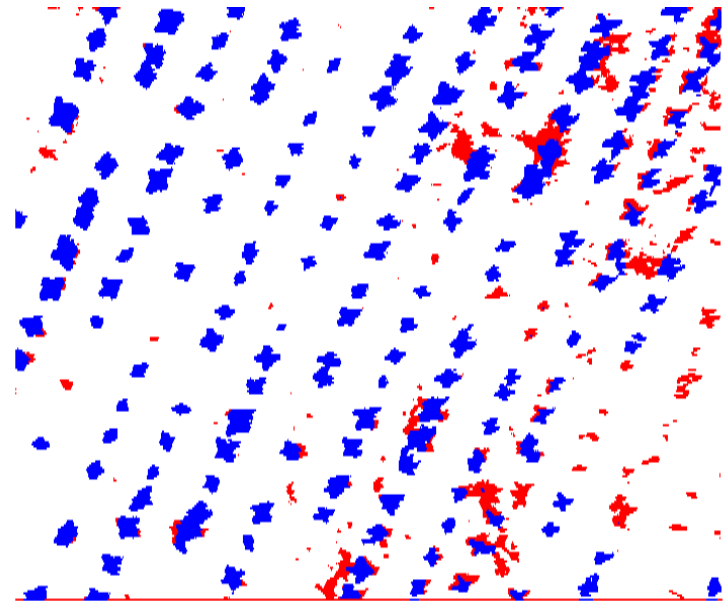
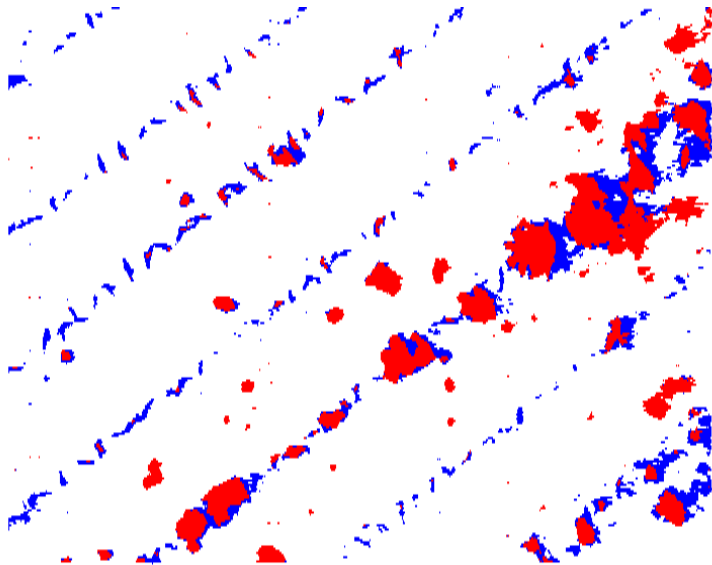
# ***Regroupement de pixels***

- On classe prioritairement les pixels dont le voisinage est le mieux défini.
- On utilise la méthode des  $k$ PPV avec les voisins définis comme base d'apprentissage.
- Afin de résoudre les points isolés, on ajoute un ensemble de points de référence.

# *Regroupement de pixels (2)*



# *Regroupement de pixels (2)*





# Plan

- Contexte de l'étude
- Acquisition des images
- Recalage géométrique des images
- Discrimination spectrale
- Analyse spatiale
- Fusion des deux résultats
- Conclusion et perspectives

# *Conclusion générale*

- Le dispositif d'acquisition d'images multispectrales embarqué répond aux besoins du milieu de l'expérimentation agricole.

# *Conclusion générale*

- Le dispositif d'acquisition d'images multispectrales embarqué répond aux besoins du milieu de l'expérimentation agricole.
- Les traitements appliqués aux images permettent une segmentation de l'image en trois classes : sol, culture, adventices.

# *Perspectives (1)*

- Le choix des filtres équipant le dispositif d'acquisition peut être optimisé en utilisant des mesures spectrométriques.

# *Perspectives (1)*

- Le choix des filtres équipant le dispositif d'acquisition peut être optimisé en utilisant des mesures spectrométriques.
- Des améliorations sont envisageables sur le capteur d'images (vitesse de reconfiguration, acquisitions géoréférencées, ...)

# *Perspectives (1)*

- Le choix des filtres équipant le dispositif d'acquisition peut être optimisé en utilisant des mesures spectrométriques.
- Des améliorations sont envisageables sur le capteur d'images (vitesse de reconfiguration, acquisitions géoréférencées, ...)
- D'autres applications agronomiques peuvent être envisagées (mesure des besoins azotés, stress hydrique, ...)

# ***Perspectives (2)***

- La méthode d'optimisation des temps de calcul du filtre de Gabor permet des résultats satisfaisants.

# *Perspectives (2)*

- La méthode d'optimisation des temps de calcul du filtre de Gabor permet des résultats satisfaisants.
- Toutefois, nous n'avons pas mené une étude théorique complète, notamment le choix de l'ondelette utilisée.



# *Perspectives (2)*

- La méthode d'optimisation des temps de calcul du filtre de Gabor permet des résultats satisfaisants.
- Toutefois, nous n'avons pas mené une étude théorique complète, notamment le choix de l'ondelette utilisée.
- De même, on constate une évolution très régulière de la qualité des images qui n'a pas été expliqué.

# ***Perspectives (3)***

- L'évaluation des résultats fournis par notre méthode est très complexe.

# *Perspectives (3)*

- L'évaluation des résultats fournis par notre méthode est très complexe.
- Les méthodes actuellement utilisées pour le comptage des adventices ne peuvent pas être utilisées comme référence.
  - Le comptage manuel fournit un nombre d'individus, sans prendre en compte leurs surfaces.
  - L'estimation visuelle est trop imprécise.
  - La pesée de biomasse est une mesure destructive (de plus, le lien entre biomasse et couvert végétal est complexe).

# Perspectives (3)

- L'évaluation des résultats fournis par notre méthode est très complexe.
- Les méthodes actuellement utilisées pour le comptage des adventices ne peuvent pas être utilisées comme référence.
  - Le comptage manuel fournit un nombre d'individus, sans prendre en compte leurs surfaces.
  - L'estimation visuelle est trop imprécise.
  - La pesée de biomasse est une mesure destructive (de plus, le lien entre biomasse et couvert végétal est complexe).
- Une parcelle d'essais comportant différentes densités d'adventices (semées) peut être une référence utilisable.