

# **L'imagerie haute résolution aéroportée par drone pour caractériser l'état physiologique des arbres fruitiers au champ**

*Jean-Luc Regnard,  
Montpellier SupAgro  
UMR AGAP - équipe AFEF*

# L'imagerie végétale haute résolution et ses applications

- **Un ensemble d'applications émergentes** pour caractériser et quantifier des variables de croissance et de fonctionnement du végétal → **diagnostic des stress, prise de décision**
- Des **compétences variées à réunir**, car large gamme d'outils et de méthodologies :
  - Imagerie aéroportée haute-résolution,
  - Pré- et post-traitement des images,
  - Photo-interprétation,
  - Gestion des données, archivage,
- **L'imagerie haute résolution applicable sur arbres fruitiers au champ**
- **Moyen ou haut-débit** (> méthodes traditionnelles chronophages)
- Combinaison drone + capteurs imageurs : **sensibilité, flexibilité, rapport coût / efficacité**

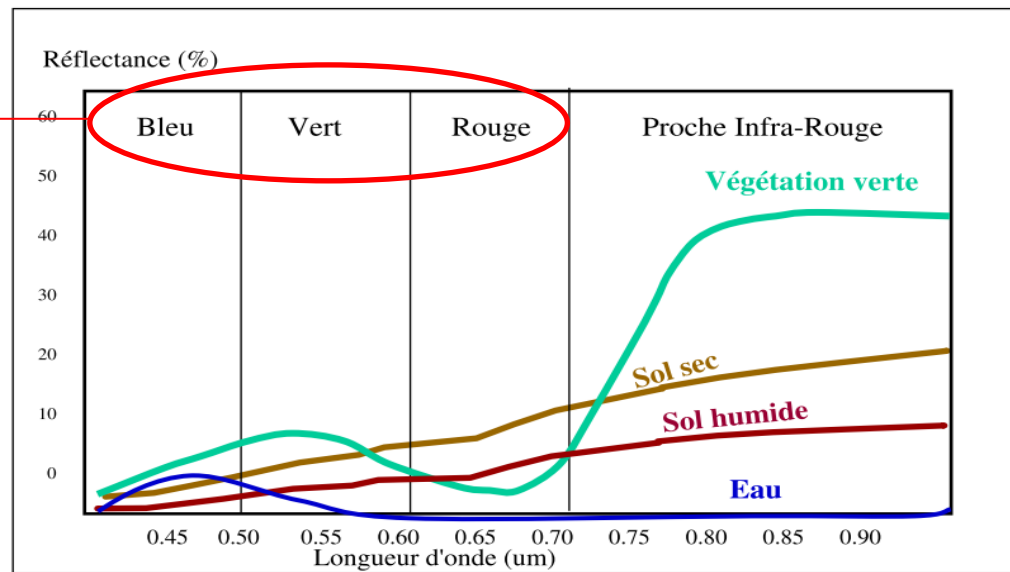
**En sélection végétale:** l'imagerie h<sup>te</sup>-résolution → phénotypage de précision  
(lien phénotype / génotype → étude du contrôle génétique des traits "Phénomique")  
(White *et al.*, 2012; Fiorani & Schurr, 2013 ; Prashar & Jones, 2014)



# Propriétés spectrales des couverts végétaux

Domaine réflectif : Rayonnement reçu et réfléchi par le couvert végétal

Visible



## Signature spectrale de la végétation

- ☐ Visible : Absorption dans le Bleu et le Rouge par les pigments chlorophylliens
- ☐ Proche Infrarouge (PIR): forte réflectance

## Influencée par :

- ☐ Structure du couvert
- ☐ Présence de sol en couvert discontinu

# Contexte : imagerie / idéotypes variétaux

- Expertise en **télédétection en général** (UMR Tétis Montpellier)
- **Imagerie** de **proxi- et télédétection** pour le pilotage de l'irrigation des cultures (CSIC-IAS) applicable au **phénotypage au champ** (Sté HiPhen; projet Phénome)
- **Expertise scientifique en matière d'imagerie multispectrale** (UMR Emmah, UMT Capte, Avignon)
- **Réflexion sur les idéotypes** (perspective d'arboriculture + faibles intrants) (UMR AGAP, équipe AFEF, Montpellier). Ex. économie de l'eau par la plante :

isohydrie vs anisohydrie

Économie vs prodigalité

(Tardieu & Simonneau, 1998)

# Contexte : imagerie thermique / vecteurs

## Réponse du pommier au déficit hydrique par imagerie thermique & multispectrale ?

### Echauffement du feuillage en réponse à la limitation de la transpiration

#### L'imagerie thermique en tant qu'outil de diagnostic

- Pour le monitoring du stress hydrique au champ (e.g. Grant et al., 2006 ; vigne)
- Pour la gestion de l'irrigation (e.g. Jones et al., 2004; diverses espèces)

#### Pour le phénotypage au champ (Jones et al., 2009 ; Prashar & Jones, 2014)

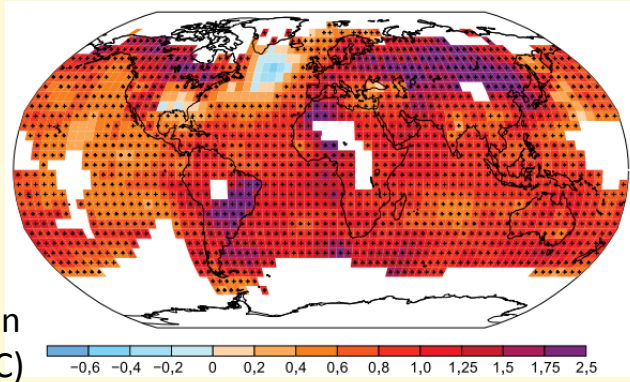
- Indices de stress issus de l'analyse d'images, corrélation avec les variables de la plante
- Importance de tester la sensibilité : en lien avec l'intensité du stress, et les ≠ génotypes

#### Les technologies de vecteur aéroporté évoluent rapidement

- ULM (Zarco-Tejada et al., 2009)
- Drone (UAV) qui permet d'accroître la résolution spatiale et la flexibilité (Berni et al., 2009)

# Contexte : changement climatique / espèces fruitières

1901- 2012



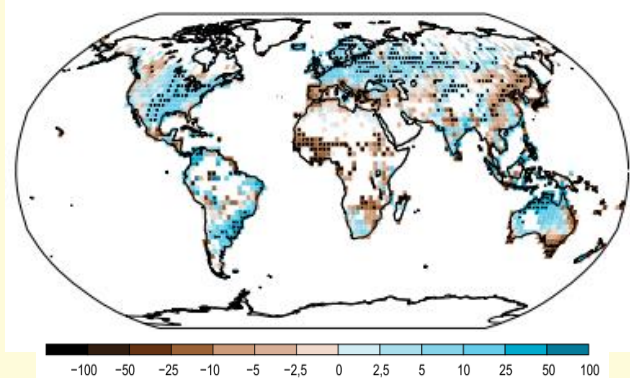
Elévation  
des T (°C)

↗ températures

↗ demande évaporative

↘ pluies (zone médit. : hotspot)

1951– 2010



Variation (mm par an, par période de 10 ans)

GIEC, 2013-14

- Réduction des ressources en eau pour l'agriculture, restriction possibles en cas de crise (cf. Propluvia)
- Enjeu de durabilité p/ nbres cultures, dont fruitières
- Programmes de sélection émergents (maïs, ...)
- Opportunité : le screening des variétés fruitières

## pour le pommier ...

- Variabilité inter- et intraspécifique de la tolérance à la sécheresse des *Malus* (Bassett et al., 2011, 2013)
- Variabilité génétique de la régulation stomatique foliaire en réponse au VPD (Regnard et al., 2009)
- Variation d'efficacité d'utilisation de l'eau entre cvs. (Massonnet et al., 2007; Gonzalez-Talice et al., 2012)

# Quelques réponses à la contrainte hydrique

- **Limitation de l'assimilation de C**
  - et/ou : **Embolie vasculaire** → Flétrissement / Perte d'organes
  - et/ou : **Stress thermique** → Altération du feuillage et des fruits
- 
- ✓ **Limitation du grossissement des fruits**, altération de la qualité
  - ✓ **Moindre accumulation de réserves C** (effet année  $n \rightarrow n+1$ )
  - ✓ **Alternance de production**

# Imagerie aéroportée ULM

Phénotypage en 2010 et 2011 : verger d'hybrides INRA Montpellier (GT janv. 2007)

Missions ULM

Par Société de Services



**Programme Telerieg (Interreg) en collaboration avec Irstea (UMR Tetis)**

- **Imagerie sur couverts végétaux discontinus**, **RVB**, **NIR** et IR thermique, traitement des images → indices de végétation et de stress (Virlet et al., 2014, 2015),
  - Résultats scientifiques probants et novateurs,
  - **Transfert délicat :**
    - Manque de flexibilité (programmation vols), coût élevé,
    - résolution faible si couverts poreux (px mixtes sol / végétation dans le thermique)
- **Décision de passer au drone : 2012-13**



# Drones et agriculture (d'après Besqueut et al., 2015)

**Technologie mature** pour l'utilisation commerciale.

Maniabilité et fiabilité → application en agriculture.

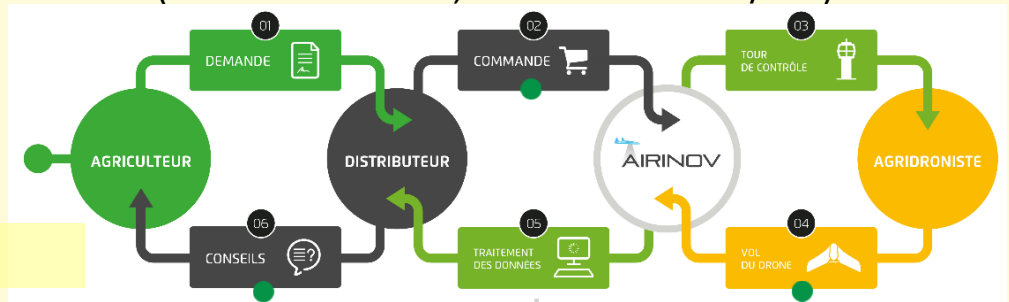
Utilisa° en grande culture (blé tendre et colza) pour diagnostics ou du conseil de fertilisation N.

Applications qui débutent en viticulture.

**Aile volante** doit se déplacer constamment pour voler (autonomie 45-60', couverture 20ha / vol)



[www.airinov.fr/](http://www.airinov.fr/)



**Multirotor** (4 à 8 hélices) réalisation de vols stationnaires, peut emporter une charge utile (↗ 3kg)

L'autonomie plus réduite (5 à 15mn) et fragilité plus grande.

Résolution imagerie drone : 5 à 30cm par pixel, selon altitude de vol et capteurs.



**Volume de données généré :**

Résolution	1cm/ pixel	10cm/ pixel	25cm/p ixel	100cm/p ixel
Volume de données pour 10 ha	1400 Mo	28 Mo	5 Mo	0,5 Mo

**Réglementation** : Direction régionale de l'aviation civile, déclaration des vols, formation des télépilotes (évolutions en cours).

# Application possibles en production fruitière

d'après Besqueut et al., 2015, applications en viticulture)

Cible de l'observation	Bande spectrale exploitée	Application directe	Stade	Applic. Indirecte	Stade
Relief	RGB	Modèle de terrain 3D	OP	Pente, surface, exposition	OP
Sol nu	RGB	Hétérogénéité de S. Repérage mouillères	OP DEV	Diagnostic parcellaire avant plantation	DEV
Végétation	RGB + NIR	Zones de stress ou de carence, Indice foliaire	OP OP	Diagnostic parcellaire : carence N Comptage de plantes	DEV DEV
Température de surface	TIR	Mesure des variations de T° foliaire	OP	Diagnostic de stress hydrique	DEV
Maladies du feuillage	Hyperspectral, NIR	Repérage des foyers de maladie	R	Protection phyto de précision	R
Couverture du sol	RGB + NIR	Evaluation de l'enherbement	OP	Calcul des S. enherbées	OP

**OP : opérationnel ; DEV : en cours de développement ; R : au stade recherche**

# Acquisition des images : vecteur et capteurs



Drone  
MikroKopter  
avec centrale  
inertielle et  
nacelle porte-  
capteurs



1. Instrumentation des parcelles ; géolocalisation
2. Gestion de l'irrigation par sondes, régimes hydriques différenciés
3. Acquisit° par drone d'images multispectrales dans les bandes  
**R**, **V**, **B**, **NIR**, **TIR**



Appareils  
**RVB** et **NIR**  
2640x1760  
pixels

**Moyens actuel<sup>t</sup> disponibles, mobilisés dans les projets HiriFap (Agropolis Fondation, 2013-14) et Aliage fruits (Casdar, 2015-17)**

Caméra **TIR**  
Thermoteknix  
Miricle  
(640x480 px)



# Exemple de dispositif au champ

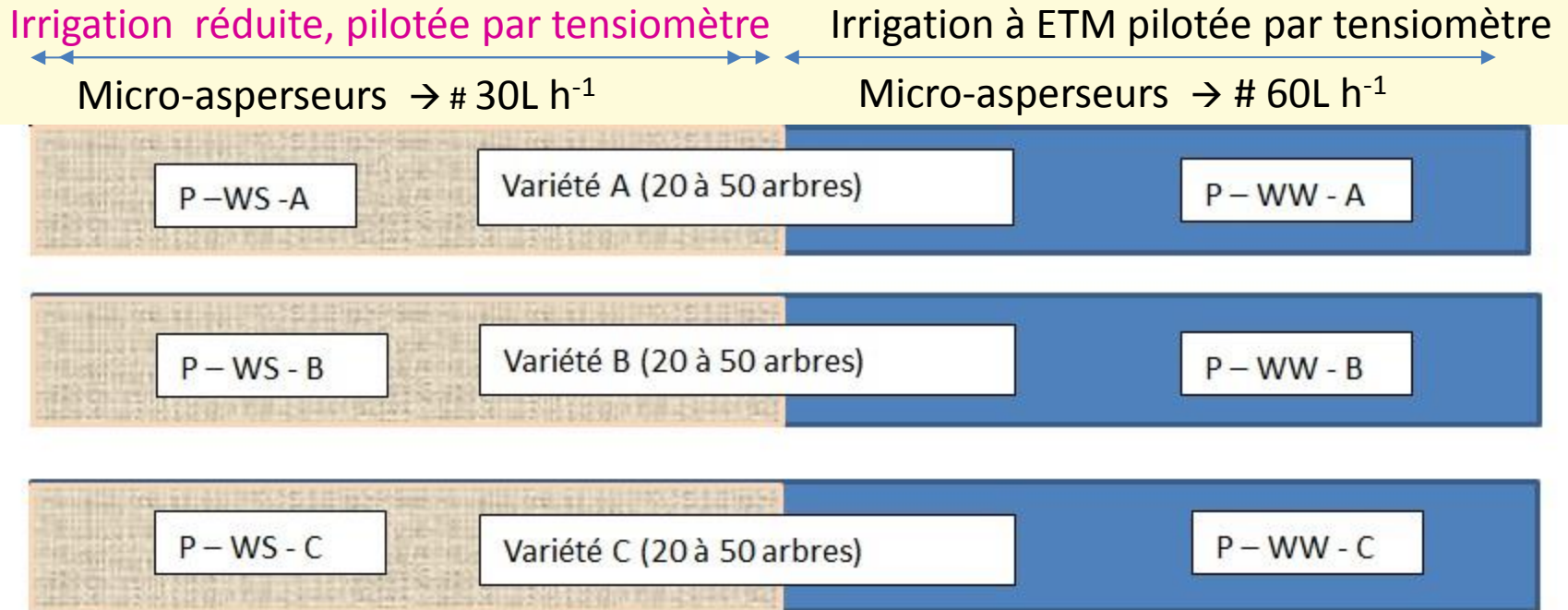


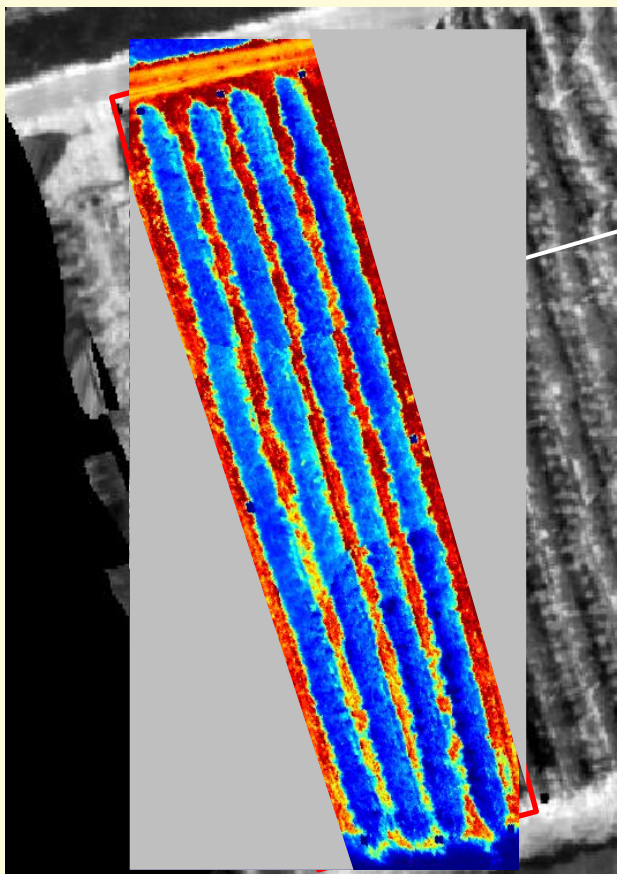
Schéma de principe du test des variétés (verger de comportement stade 2, Ctifl Balandran)

En bleu : pleine irrigation à l'ETM ; en tramé : restriction du régime hydrique

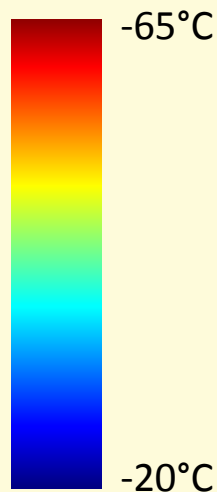
(projet Casdar Aliage-fruits, en cours)

## Dispositif expérimental – Ctifi Balandran (2014-17)

Image mosaïquée dans l'IR thermique  
(assemblage de 9 images thermiques)



Parcelle  
d'étude



## Dispositif expérimental – INRA UE Diascope, p.f. Diaphen - Mauguio Projet phénotypage panel variétal (2016 ..)

Phénotypage d'une **core-collection de variétés de pommes** (coll. UMR IRHS, Angers)

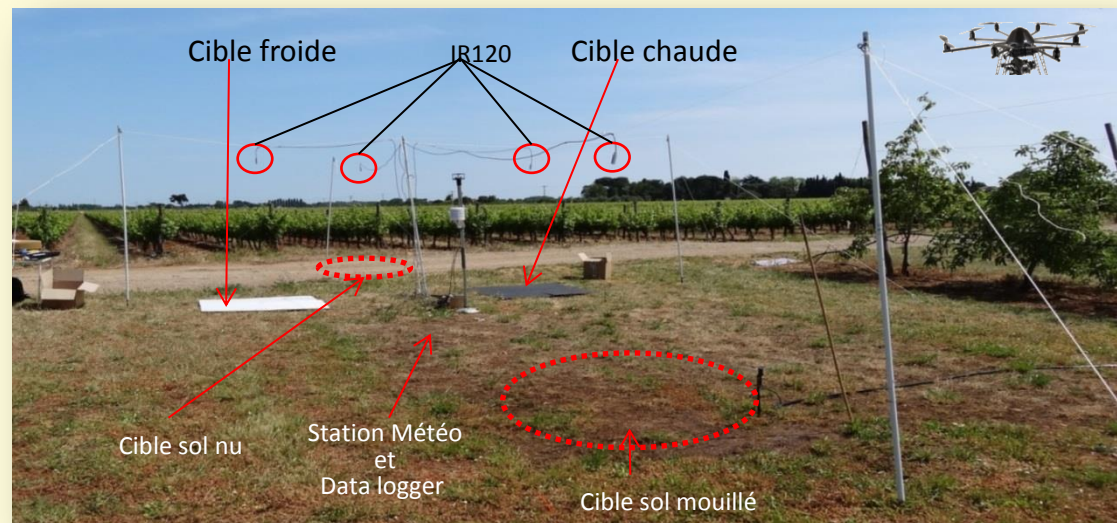
*200 variétés de pomme à couteau, françaises et européennes, représentatives de la diversité observée en France*



# Programme drones : données de terrain (1)

## — Données physiques au sol pendant le vol du drone

- Températures :
  - cibles « chaudes » et « froides »
  - 2 références sol nu et sol humide
  - Scrutées par thermoradiomètres IR120
- Station micro-météo :
  - température et humidité relative de l'air ( $T_a$ )
  - radiation solaire
  - vitesse du vent



Design expérimental de champ  
selon Jolivot et al. (2014)

# Acquisition d'images multispectrales par drone

Gómez-Candón et al. (submitted)

**2 appareils photo Sigma DP1**

→ VIS & PIR (résolution 0,02m)

**1 caméra thermique Thermoteknix Miricle 307K**

→ IR Thermique (résolution 0,10m)

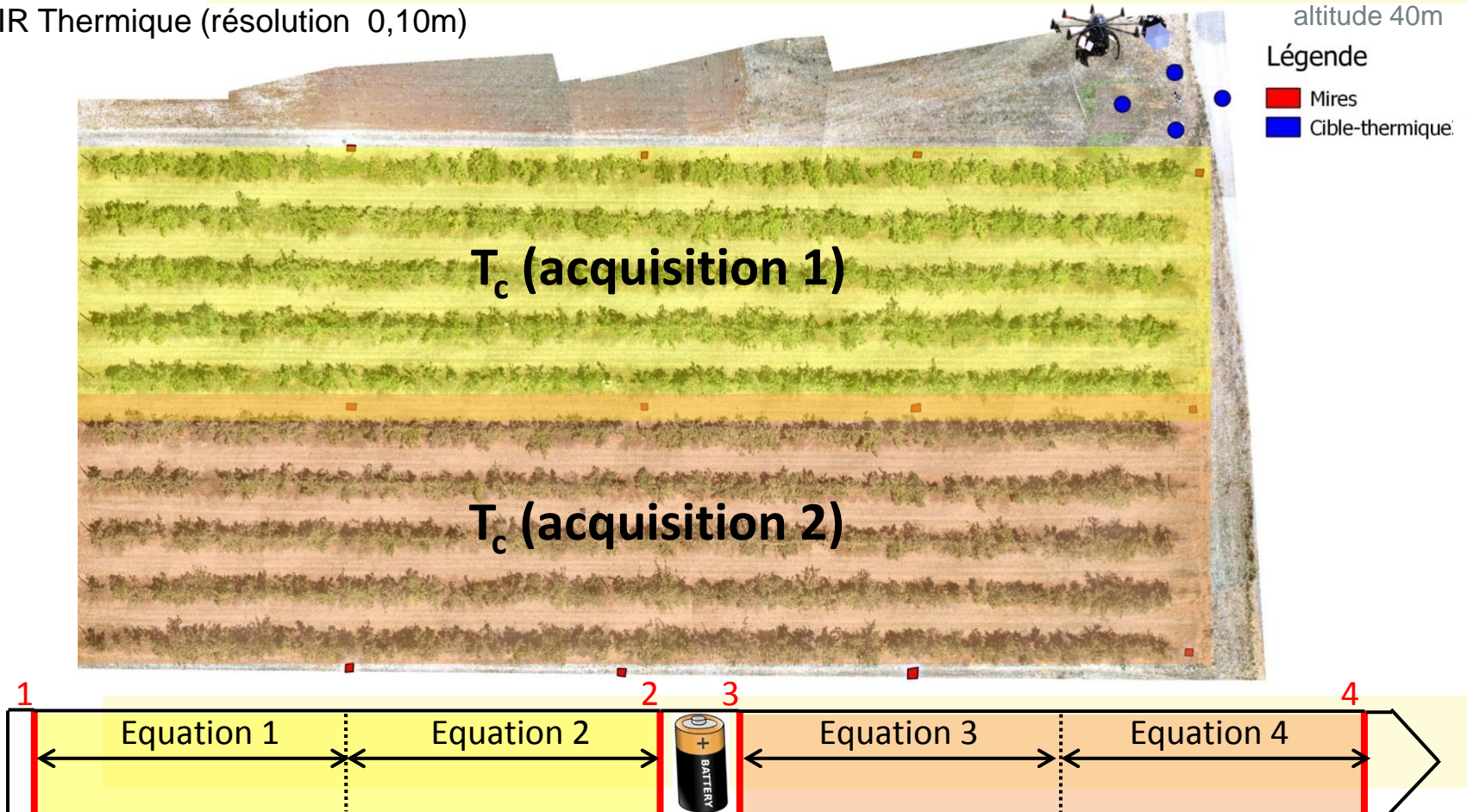
Cibles



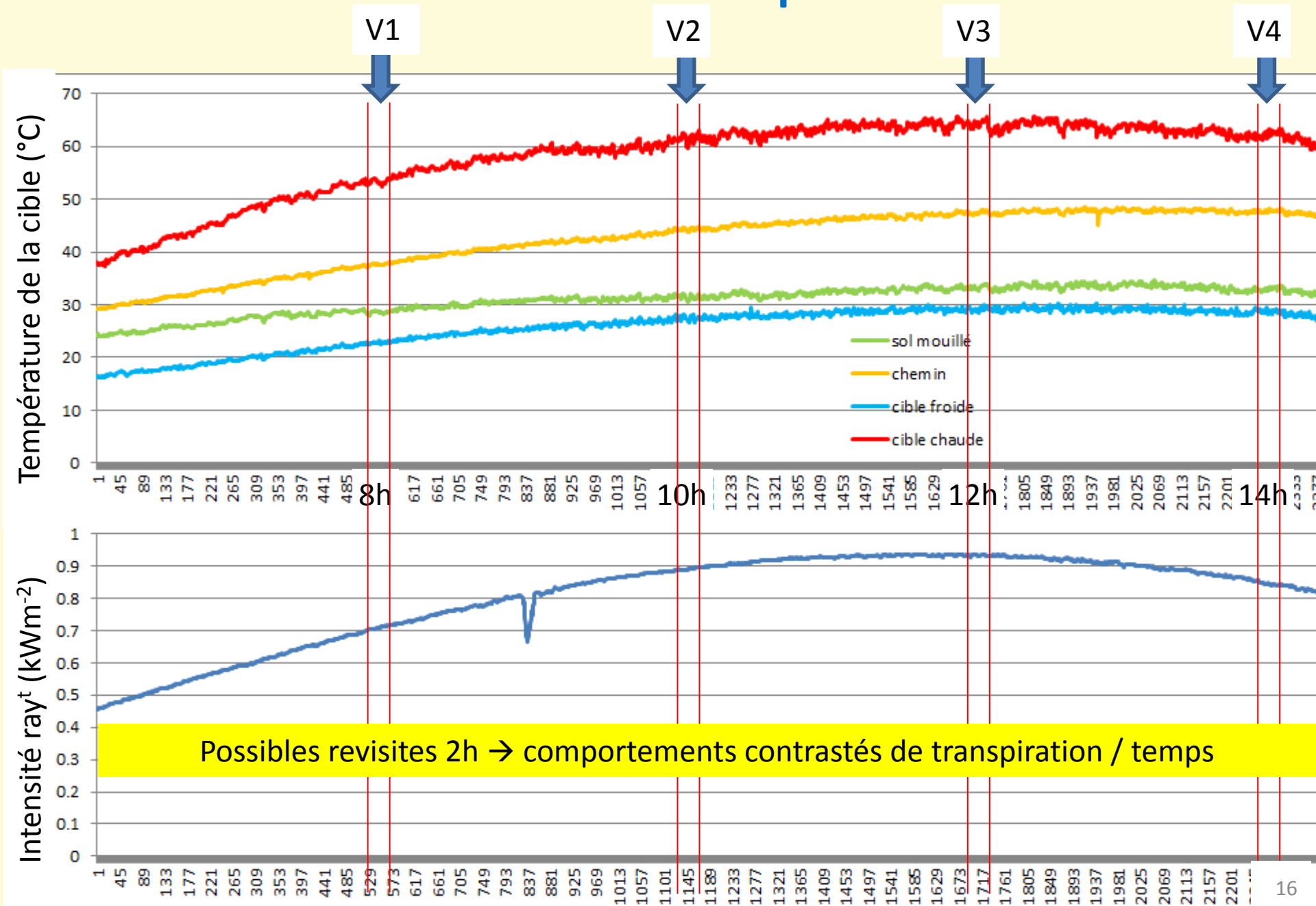
Drone MikroKopter  
altitude 40m

Légende

- Mires
- Cible-thermique.



# Suivi de T° sur cibles de référence par radiothermomètres

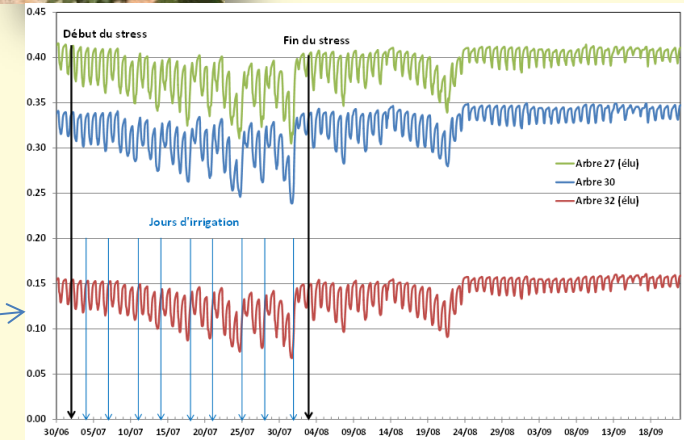




# Programme drones : données de terrain (2)

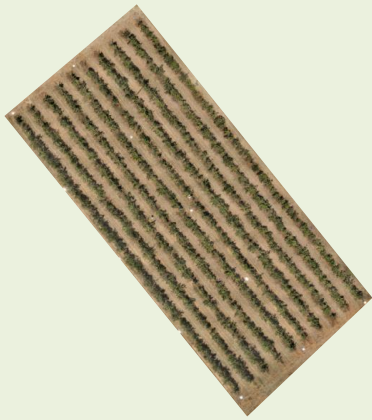
## — Données biophysiques de terrain

- Potentiel hydrique de base (avant l'aube)
- Potentiel hydrique de tige pendant la journée
  - 3 feuilles / arbre \* 2 arbres par génotype et traitement
  - 2 à 4 vols / jour
- Suivi de l'état hydrique du sol
  - Sondes Watermark
  - Sondes Sentek®
- Suivi du grossissement d'organes (Projet Aliage; contribution Ctifl et Cehm)
- Suivi vol. d'eau distribués



# Acquisition dans 5 bandes spectrales

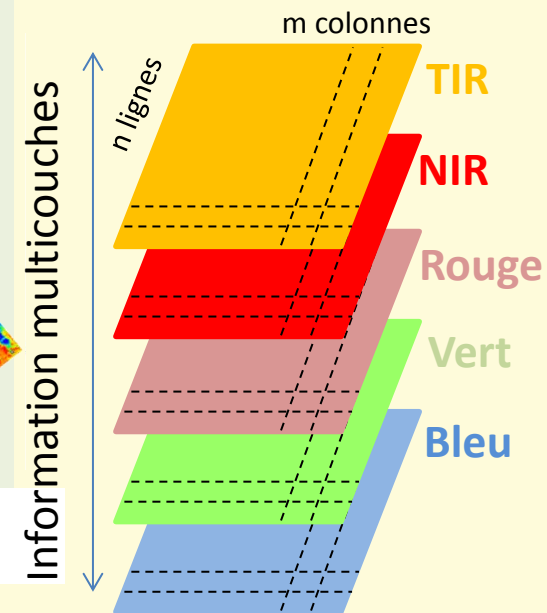
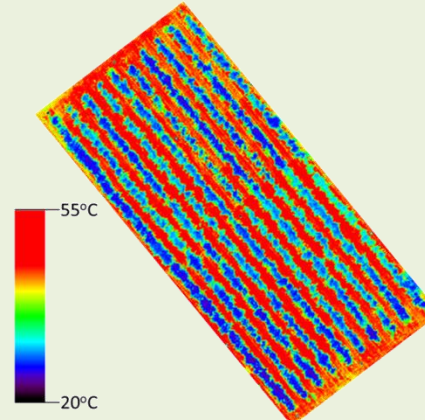
**Visible Image (RVB)**



**NIR Image**



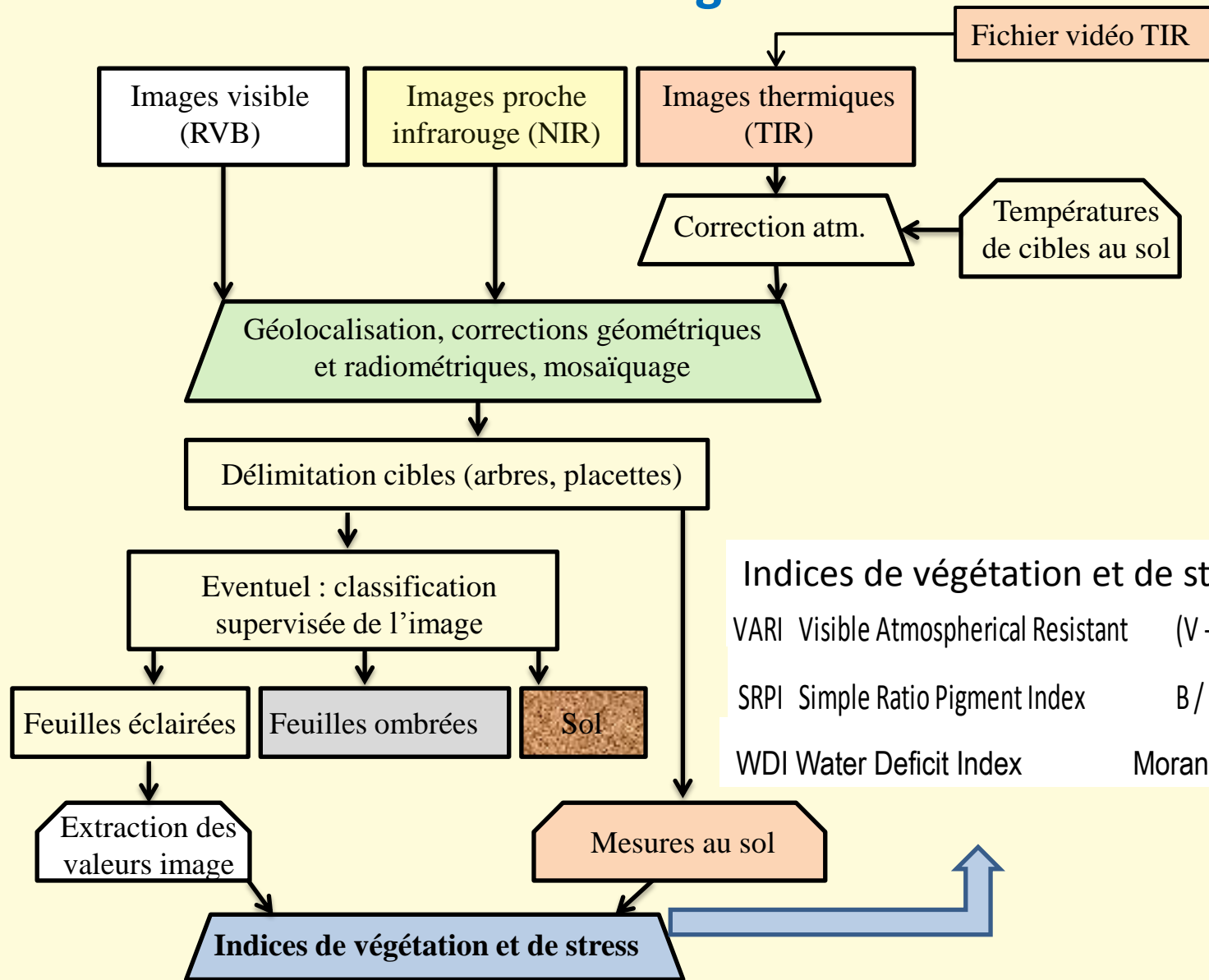
**TIR Image**



**Altitude**  
40 m → **images RGB & proche-IR**  
résolution: 0.02 m

**image thermique**  
résolution: 0.10 m

# Chaîne de traitement des images



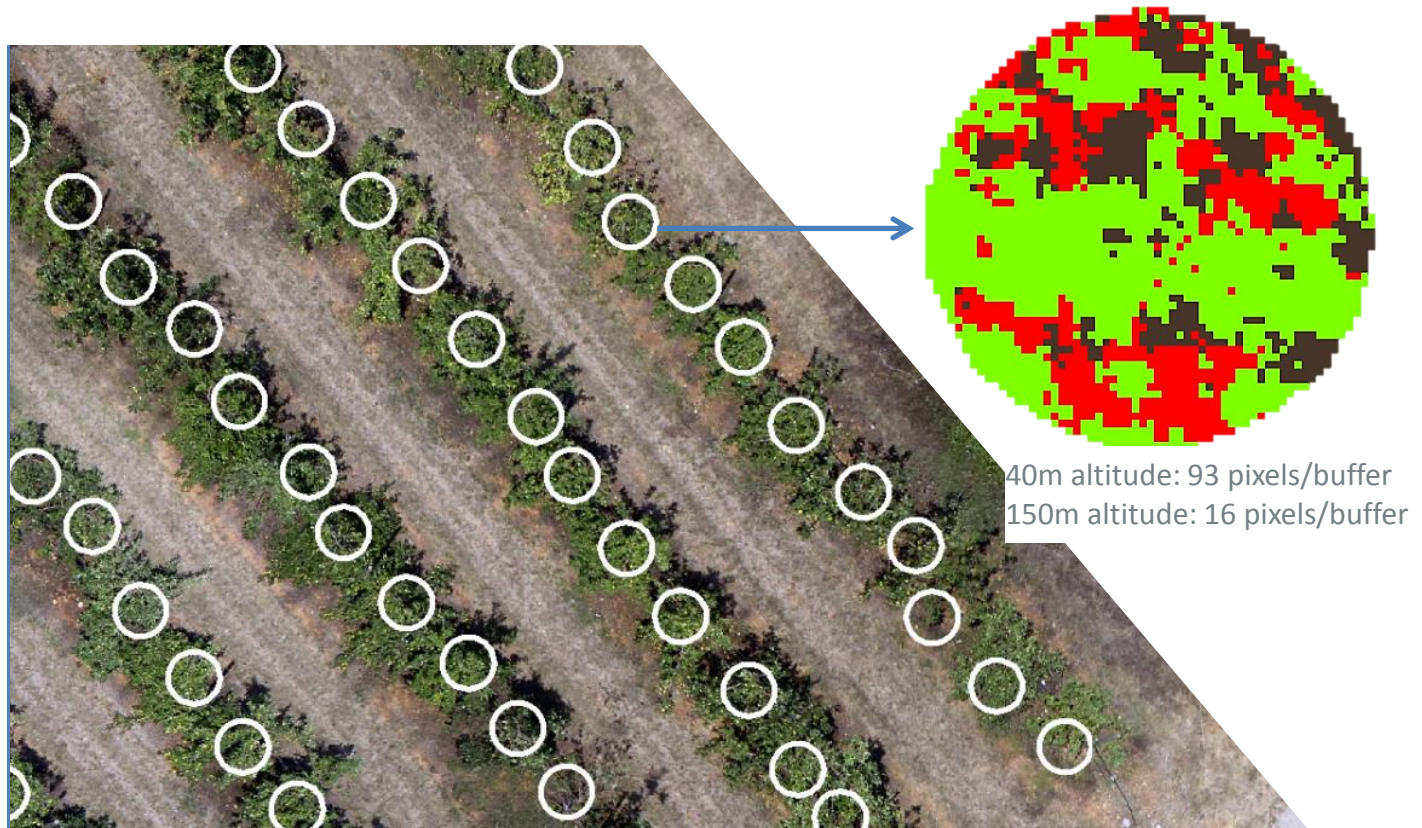
## Indices de végétation et de stress hydrique :

VARI Visible Atmospheric Resistant  $(V - R / V + R)$  Gitelson et al. 2002.

SRPI Simple Ratio Pigment Index  $B / R$  Peñuelas et al., 1994.

WDI Water Deficit Index Moran et al., 1994

# Extraction des données à l'arbre individuel (et infra)

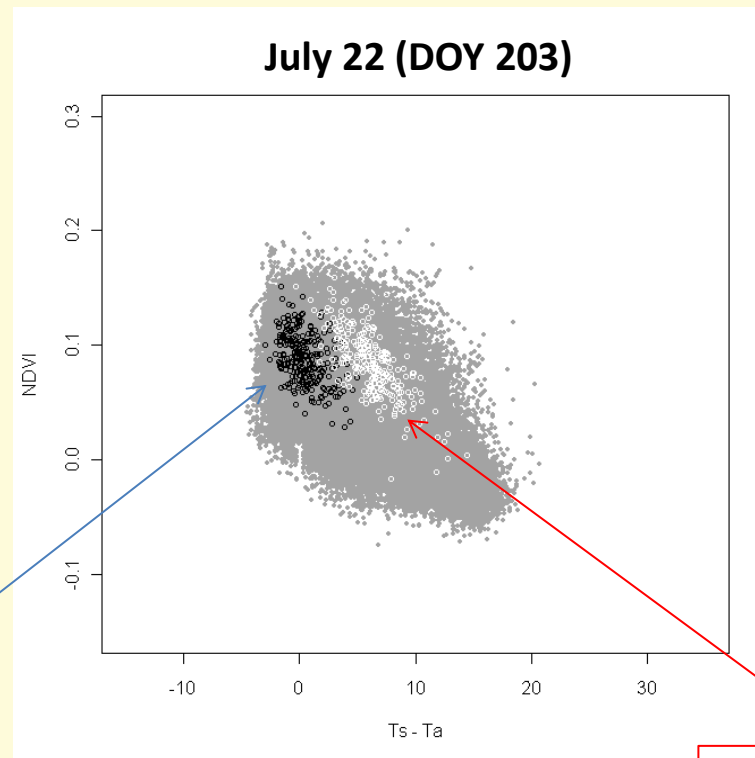


Possibilité de classification des images pour séparer par ex. le feuillage bien éclairé (vert clair) le feuillage à l'ombre (orangé) et le sol (brun sombre)

# Calcul de l'indice de stress pour 500 pommiers

## □ Graphe NDVI / Ts-Ta

$R_g$  ( $W.m^{-2}$ ) = 599.3  
 $T_a$  ( $^{\circ}C$ ) = 26.6  
HR (%) = 28.0  
VPD (kPa) = 2.5  
 $u$  ( $m.s^{-1}$ ) = 1.7



- Pixels du champ (intérêt zone)
- Valeur moy. arbre (NDVI/Ts-Ta) **WW**
- Valeur moy. arbre(NDVI/Ts-Ta) **WS**

Peu de contrainte

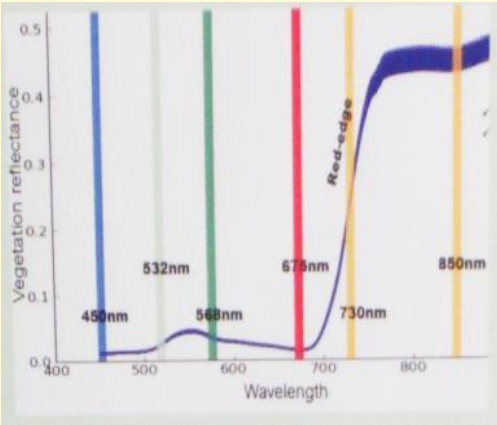
**14j. après début de déficit hydrique : différences thermiques de 5° à 10°C**



# Indices pouvant être calculés à partir d'images multispectrales (6 bandes)



Prototype de l'UMT Capte



Bande	Nom	lambda centre de bande (nm)	Combinaison	Indications biologiques	Indice	Référence
Bleu	Blue	450		Caroténoïdes	CRIgreen	Gitelson et al., 2006
Vert 1	PRI 1	532		Xanthophylles et rapport chl/car	PRI	Gamon et al., 1992
Vert 2	PRI 2	568		Green Area Index (et FIPAR)	NDVI	Rouse et al., 1974
Rouge	Red	675		Chlorophylle	MTCI	Dash and Curran, 2004
Red-Edge	RE	730		GAI (et FIPAR)	MCARI2	Haboudane et al., 2004
Proche IR	NIR	850		Ts	WDI	Moran et al., 1994
Thermique	TIR	8500-13500	-			

(F. Baret, comm. pers., 2014)

Les indices de végétation sont corrélés avec l'indice foliaire LAI  
 L'indice PRI traduit l'efficience du système photosynthétique  
 L'indice WDI permet une évaluation normalisée du stress hydrique

# Conclusions

## Imagerie drone pour la caractérisation physiol. des arbres fruitiers au champ

### ☐ Robustesse des approches méthodologiques

- Phénotypage du stress hydrique ( $T^{\circ}$  du couvert)
- Monitoring spatialisé parcelle
  - Définition de placettes de référence
  - Application à l'irrigation de précision, si des règles de pilotage sont précisées

### ☐ En cours

- Comportement de nouvelles variétés fruitières en phase d'inscription (projet Aliage) :
  - proof of the concept
  - évaluation du ratio coût / efficience

### ☐ En projet: screening sur core-collection de pommiers, incluant d'autres traits :

- dynamique de feuillaison, altération du photosystème II, azote foliaire, ...

### ☐ Nouveaux challenges

- Bioagresseurs : ravageurs, maladies
- Automatisation du traitement des images

**Merci de votre attention**



Parcelle de phénotypage pommiers, INRA Melgueil (Mauguio), avril 2011

Photo : N. Virlet