

L'imagerie drones pour caractériser l'état physiologique des variétés fruitières au champ.

J.L. Regnard, D. Gómez-Candón,
et équipe AFEF – UMR AGAP Montpellier

- **Un domaine scientifique émergent** : caractérisation et quantification de variables de croissance et de fct^t du végétal, diagnostic (précise et reproductible) des stress
 - Compétences interdisciplinaires, car large gamme d'outils et de méthodologies :
 - Imagerie aéroportée haute-résolution,
 - Pré- et post-traitement des images (nécessité d'automatisation),
 - Photo-interprétation,
 - Gestion des données, création de bases de données,
 - Systèmes d'aide à la décision, règles de décision .
- **L'imagerie haute résolution est applicable au champ sur arbres fruitiers** (cond. environnementales réelles, plantes jeunes ou en production)
 - **Moyen à haut-débit** : dépassement des limitations des méthodes traditionnelles (chronophages)
 - Nécessité d'une évaluation de la **sensibilité & fiabilité**, de la **flexibilité** et du **rapport coût / efficacité**

Applications en sélection végétale: l'imagerie hte-résolution → phénotypage, et facilite le lien phénotype / génotype

→ dissection du contrôle génétique des traits (“**Phénomique**”)

(White *et al.*, 2012; Fiorani & Schurr, 2013 ; Prashar & Jones, 2014)



- **Un domaine d'application pour le diagnostic et la prise de décision en agriculture**

- **Imagerie de proxi- et télédétection** pour le pilotage des cultures (CSIC-IAS) applicable au **phénotypage au champ** (UMR AGAP; Sté HiPhen et UMT Capte)
- **Expertise scientifique croissante en matière d'imagerie multispectrale** [UE Diascope INRA Mauguio (p.f. Diaphen) ; UMR Emmah ...]
- **Réflexion sur les idéotypes** dans une perspective d'arboriculture à plus faibles niveaux d'intrants (participation UMR AGAP, équipe AFEF)

Etudier la réponse du pommier au déficit hydrique par imagerie thermique & multispectrale ?

Echauffement du feuillage en réponse à l'arrêt / à la limitation / de la transpiration

L'imagerie thermique est actuellement utilisée 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)

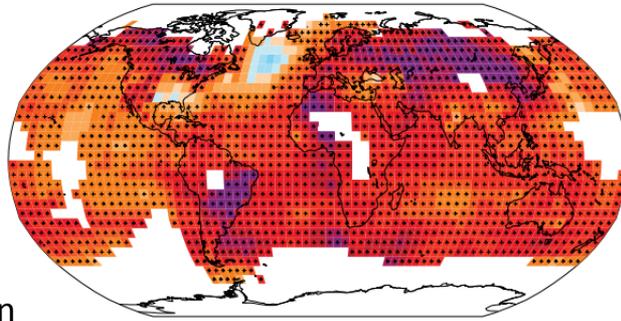
Elle permet le phénotypage au champ (Jones et al., 2009 ; Prashar and Jones, 2014)

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

Les technologies de vecteur évoluent rapidement : au sol ou en aéroporté

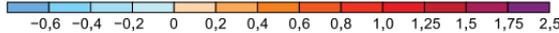
- ULM (Zarco-Tejada et al., 2009)
- Drone (UAV) qui permet d'accroître la résolution spatiale et la flexibilité (Berni et al., 2009)

1901- 2012



- Réduction des ressources en eau pour l'agriculture, restriction possibles en cas de crise (cf. site Propluvia)
- Enjeu de durabilité pour ≠ cultures, dont fruitières
- Prog. de sélection émergents en gde culture (maïs, ...)
- Opportunité : le screening des variétés fruitières

Élévation des T (°C)

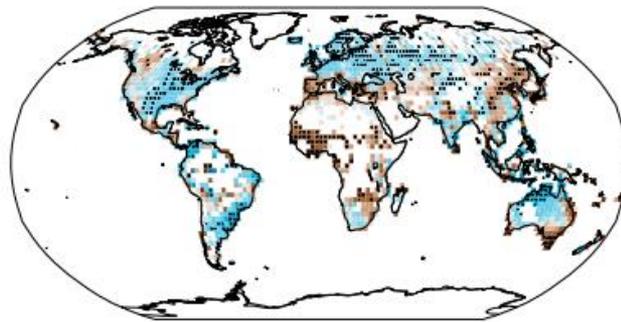


↗ températures

↗ demande évaporative

↘ pluies (zone médit. : hotspot)

1951- 2010



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

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.*, 2008, 2009)
- Variation de la Water Use Efficiency entre cvs. (Massonnet *et al.*, 2007; Gonzalez-Talice *et al.*, 2012)
- Effet « puits » du fruit : WUE ↘ (Wünsche *et al.*, 2000 ; Pretorius and Wand, 2003)
- Données génétiques et génomiques sur pommier (équipe AFEF et collaborations)

- **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**

Campagnes de phgénotypage 2010-2011

Sur verger d'hybrides INRA

Commande de missions ULM

Auprès d'une Société de Services

Appui du programme Telerieg (Interreg)



Two digital cameras
Canon EOS 500D

Visible (RGB)

Red ~ 580 - 670 nm

Green ~ 500 - 580 nm

Blue ~ 420 - 500 nm

Near infrared (NIR)

(Filter > 745nm)

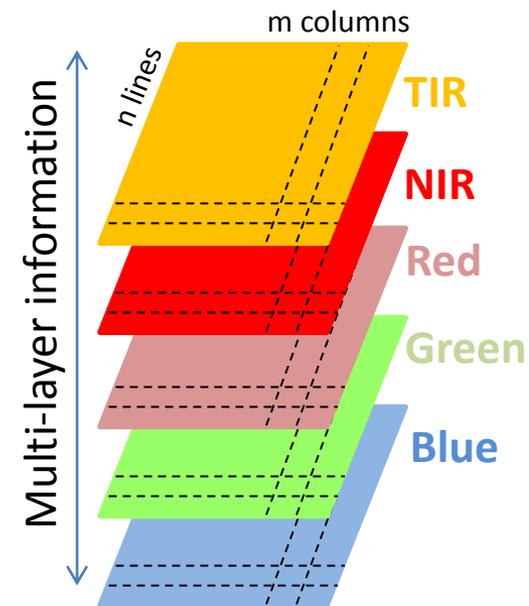
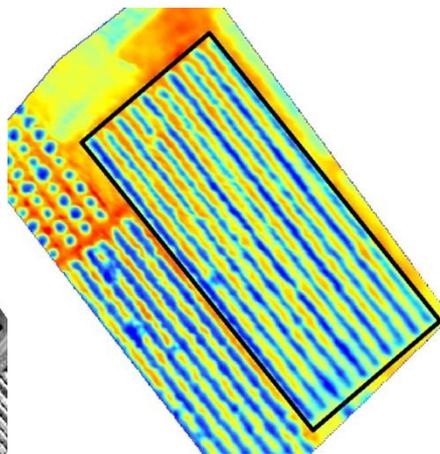
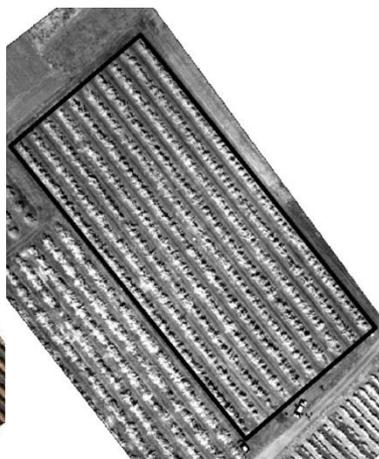
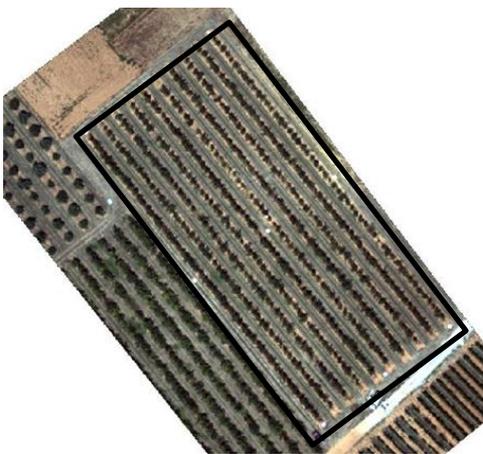
(Lebourgeois *et al.*, 2008)



Thermal camera Flir B20HSV

→ Thermal infrared (TIR)

8 - 13.5µm



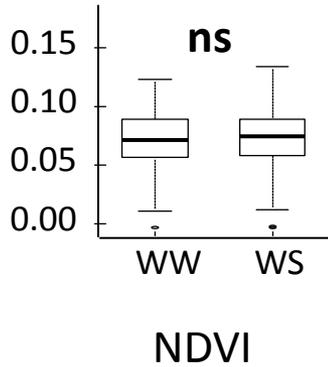
Altitude
300m →

RGB & NIR image
resolution: 3cm

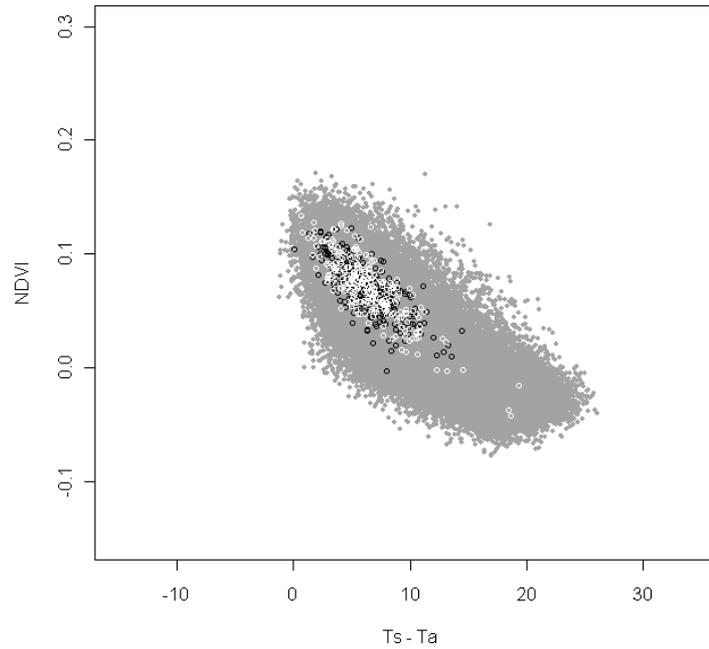
TIR image
resolution: 30cm

R_g ($W.m^{-2}$) = 770.7
 T_a ($^{\circ}C$) = 26.9
 HR (%) = 58.7
 VPD (kPa) = 1.5
 u ($m.s^{-1}$) = 2.0

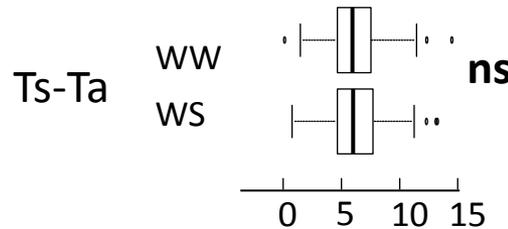
Graphique NDVI / Ts-Ta



21 juin (DOY 172)



- Pixels de la parcelle (zone d'intérêt)
- Valeur à l'arbre (NDVI/Ts-Ta) **WW**
- Valeur à l'arbre (NDVI/Ts-Ta) **WS**



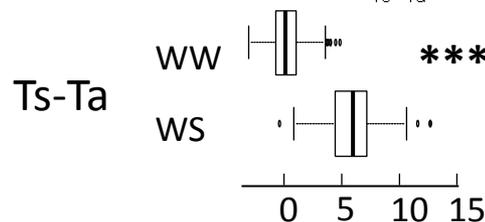
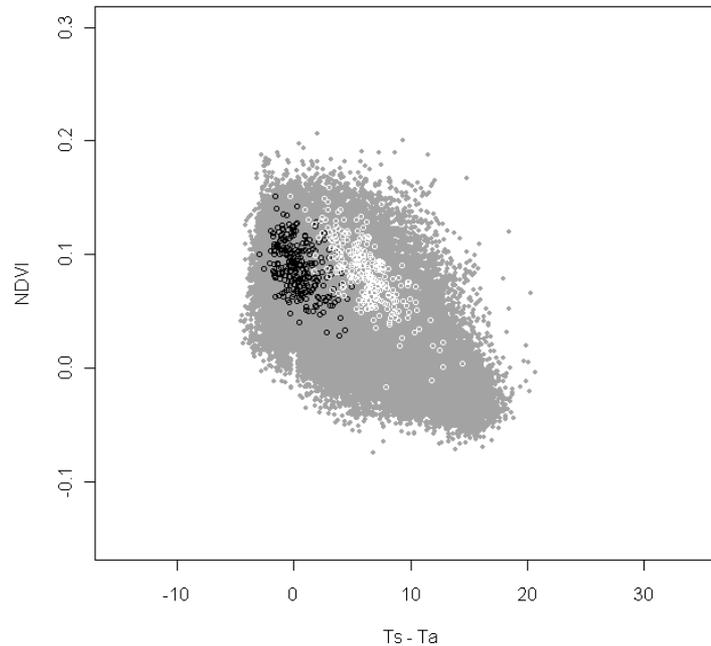
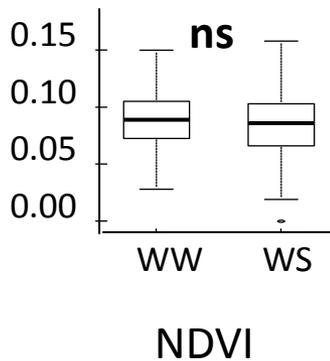
Avant stress

Données Virlet et al. (2014)

Graphique 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

22 juillet (DOY 203)

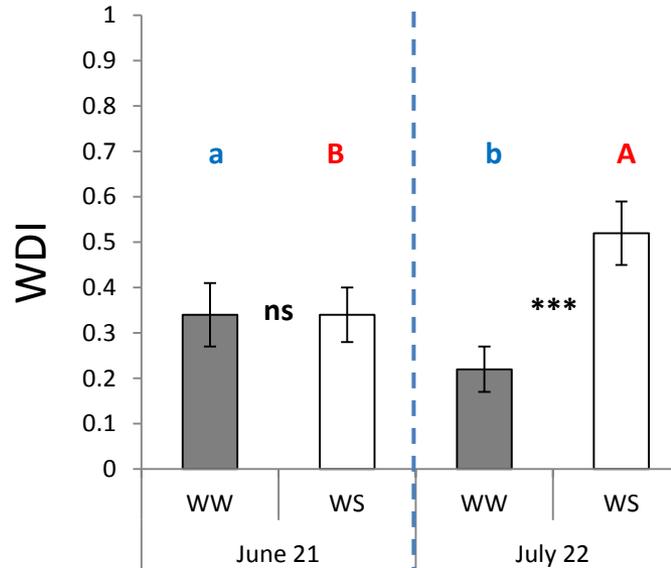


- Pixels de la parcelle (zone d'intérêt)
- Valeur à l'arbre (NDVI/Ts-Ta) **WW**
- Valeur à l'arbre (NDVI/Ts-Ta) **WS**

14j. after arrêt de l'irrigation

Données Virlet et al. (2014)

☐ Effet de la contrainte hydrique sur l'indice de stress WDI (water deficit index)



Effet significatif du VPD sur les arbres bien irrigués (WW)

Effet significatif du déficit hydrique WS (WS ≠ WW)

Les valeurs de l'indice WDI sont en cohérence avec le déficit hydrique du sol et la demande évaporative, et sont corrélées avec le Ψ_{tige} (Virlet et al., 2014)

☐ Effet significatif du génotype sur l'indice de stress WDI (WW+WS)

– Application réussie de l'imagerie thermique / ULM,

- Application de l'indice de stress WDI (la part de sol couvert est prise en compte)
- 2 clichés par parcelle de 0.6 à 1 ha
- Exploitation des données d'imagerie en phénotypage (déterminismes génétiques, détection de QTL ... Virlet et al., 2015)
- Application au champ : adéquate pour des surfaces moyennes

– Problèmes résiduels :

- Résolution spatiale moyennes (30cm / pixel pour IR thermique >> taille feuille)
- Présence de pixels mixtes (Jones & Prashar, 2014)
- Flexibilité limitée et coût horaire élevé

Technologie mature pour l'utilisation commerciale.

Maniabilité et fiabilité du drone → application en agriculture.

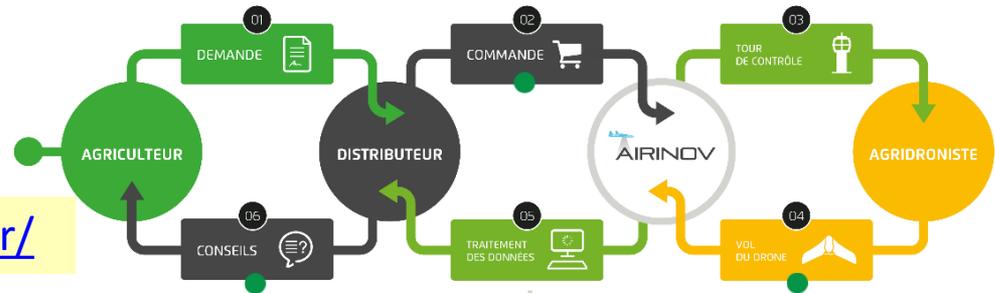
Utilisa° en grande culture (blé tendre et colza) pour diagnostics ou du conseil de fertilisation N.

Application débutant en viticulture.

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



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/ pixel	100cm/ pixel
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.

Application possibles du drone en arboriculture fruitière

Elaboration 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



1. Instrumentation des parcelles ; géolocalisation (GPRS)
2. Gestion de l'irrigation avec suivi par sondes → régimes hydriques différenciés
3. Acquisit° par drone d'images multispectrales : R, V, B , NIR, TIR



Drone
MikroKopter
avec centrale
inertielle et
nacelle porte-
capteurs



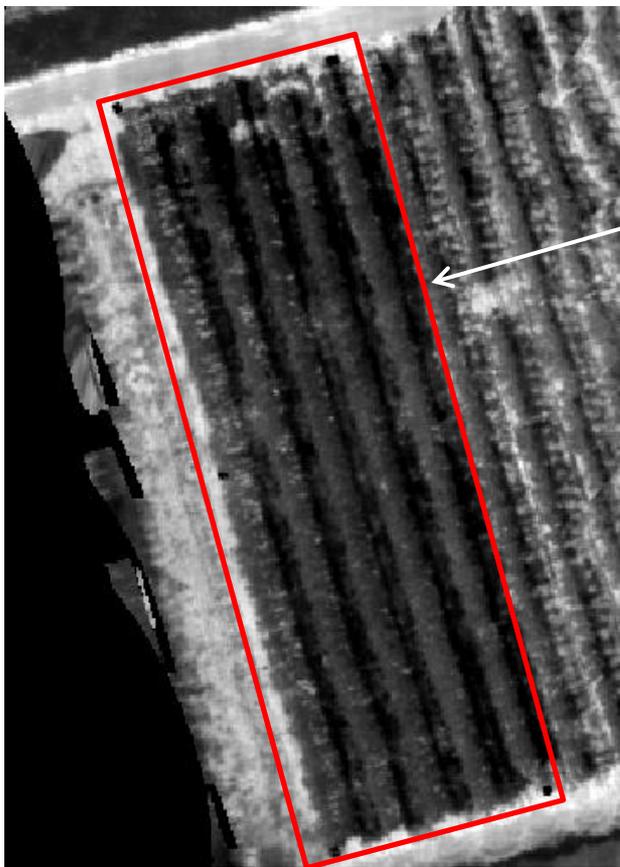
Appareils
RVB et NIR
2640x1760
pixels

Caméra TIR
Thermoteknix
Miricle
(640x480 px)



**Moyens mobilisés dans les projets
HiriFap (Agropolis Fondation, 2013-14) et
Aliage-fruits (Casdar, 2015-17)**

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



Parcelle
d'étude

**Projet de phénotypage (2016-17)
d'une core-collection de variétés de pommes**
(coll. avec UMR IRHS, Angers)

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

Localisation

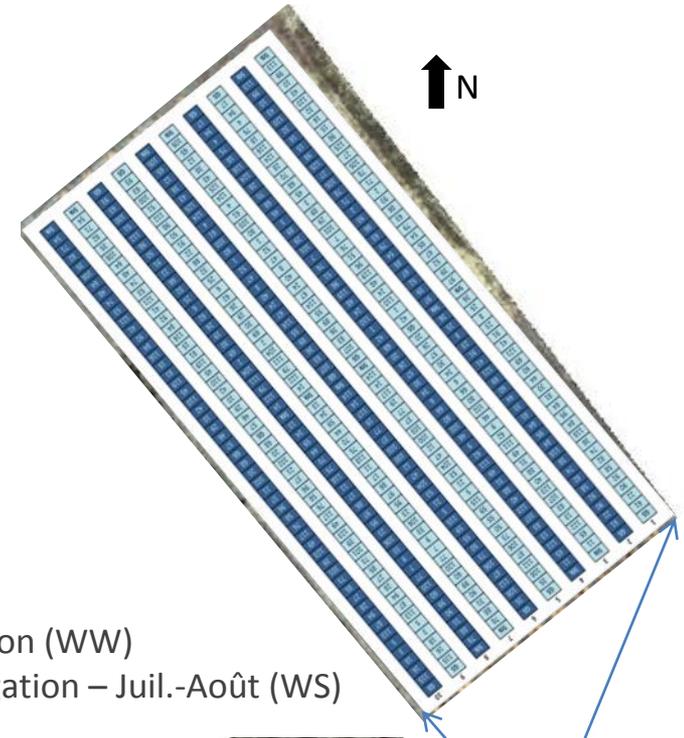
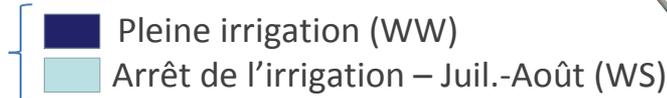
UE INRA de Mauguio (43°36' N, 3°58' E)



Population de pommiers hybrides

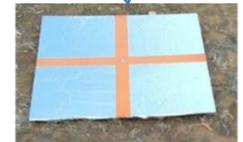
- Starkrimson (STK) x Granny Smith (GS)
- 122 hybrides*4 répétitions (porte-greffe M9)
- Écartements 5x2m ; 10 rangs (# 6400 m²)
- Régimes hydriques différenciés en été : WS/WW

→ 2 répétition / genotype * régime hydrique

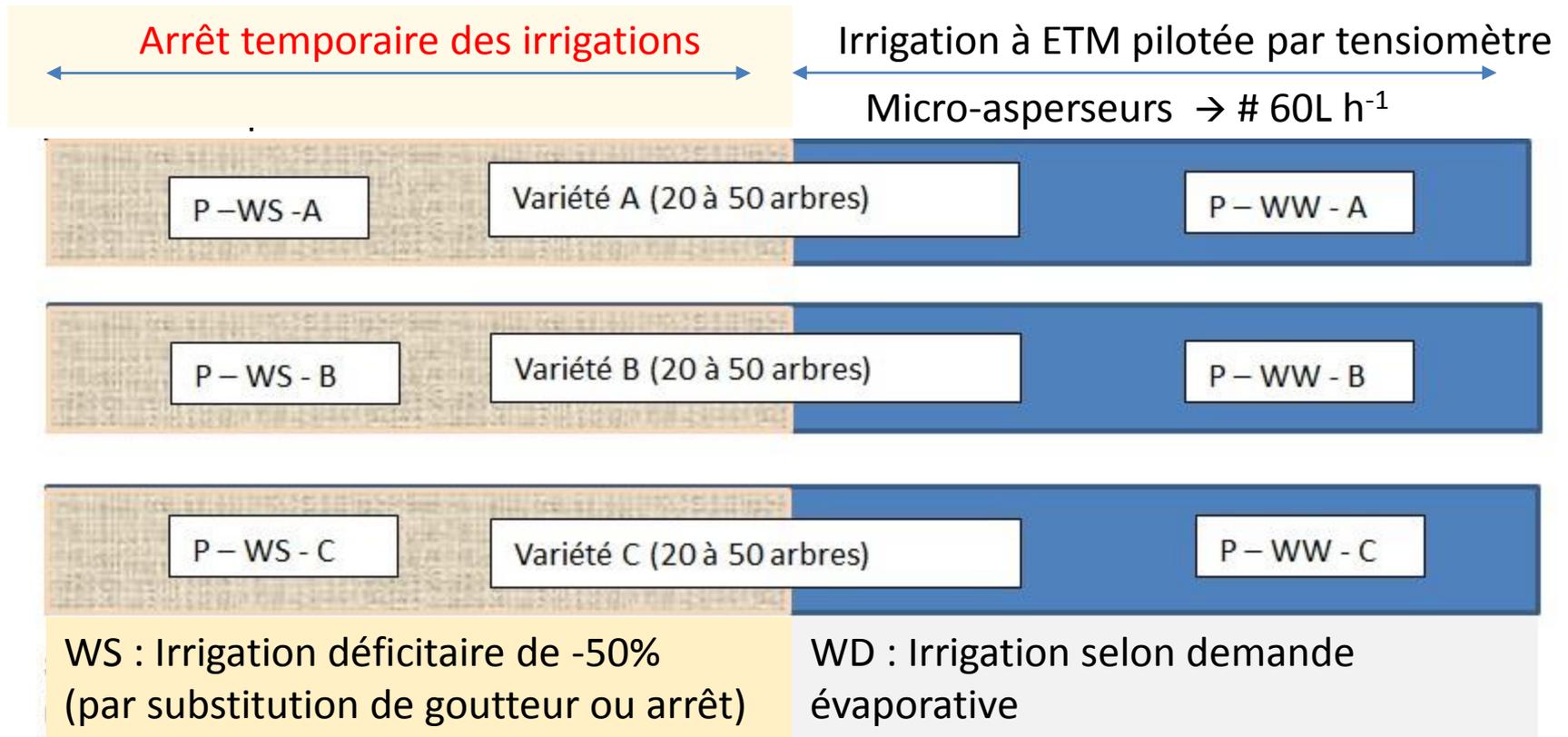


Suivi environnemental

- Rayonnement global (Rg) et PAR
- Humidité (HR) et Température (Ta) de l'air
- Vitesse du vent (u)
- Précipitations
- Potentiel hydrique de sol Ψ (sondes Watermark)



9 à 15 cibles géoréférencées aluminisées (pour géolocaliser les images)

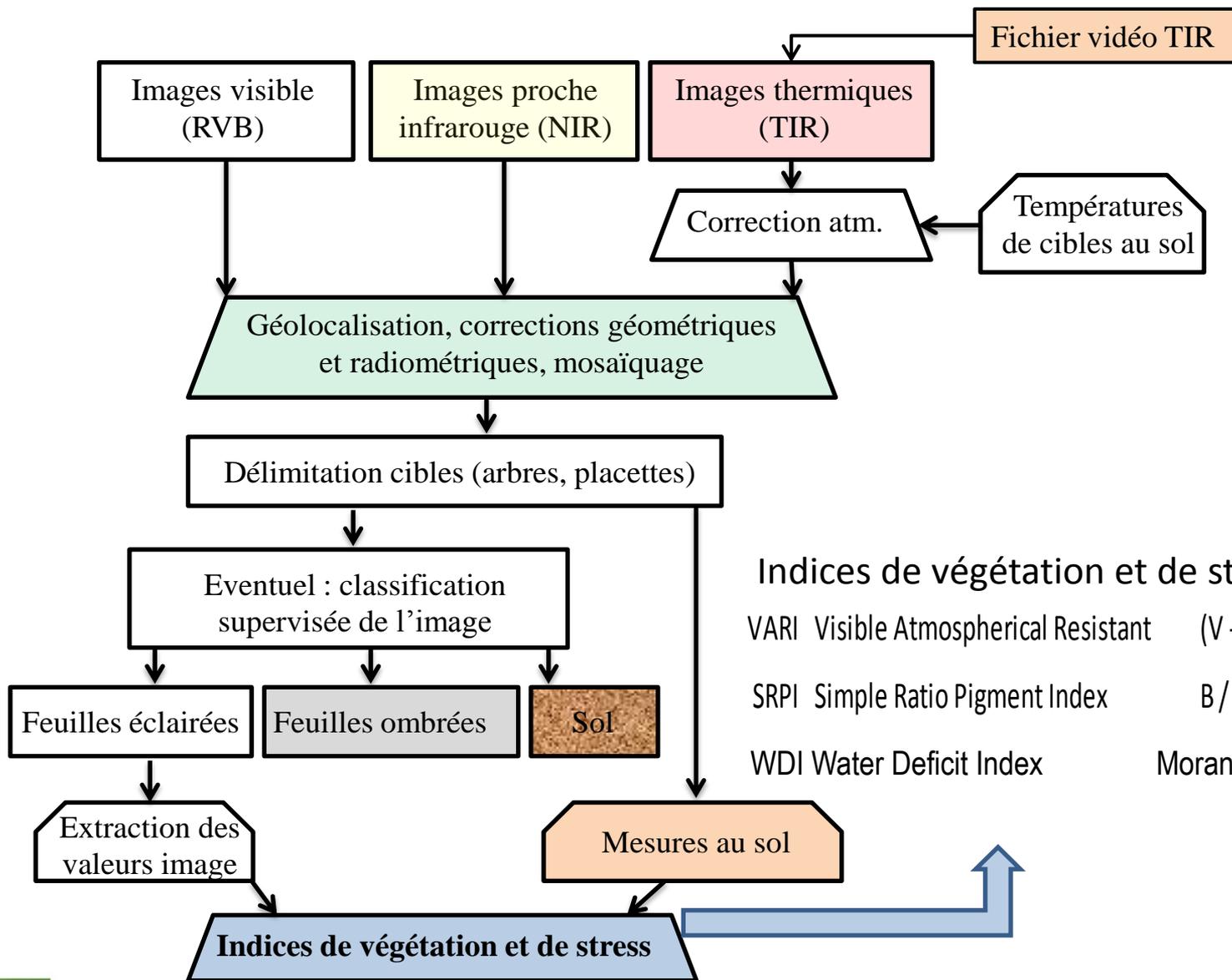


Installation mobile

- Températures de référence:
 - Cibles chaudes et froides } Sondes IR120
 - Soil humide et sec
- Micrométéorologie



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



Indices de végétation et de stress hydrique :

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

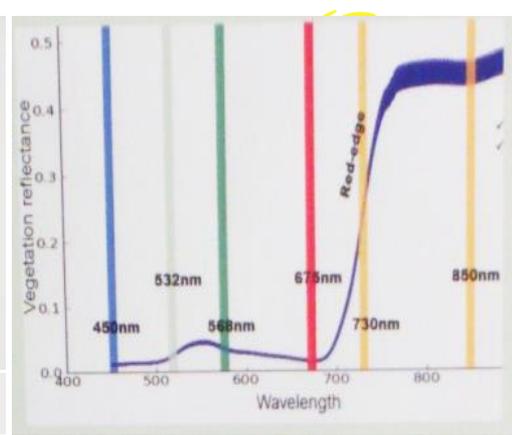
SRPI Simple Ratio Pigment Index B / R Peñuelas et al., 1994.

WDI Water Deficit Index Moran et al., 1994

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				
Vert 1	PRI 1	532		Caroténoïdes	CRIgreen	Gitelson et al., 2006
Vert 2	PRI 2	568		Xanthophylles et rapport chl/car	PRI	Gamon et al., 1992
Rouge	Red	675		Green Area Index (et FIPAR)	NDVI	Rouse et al., 1974
Red-Edge	RE	730		Chlorophylle	MTCI	Dash and Curran, 2004
Proche IR	NIR	850		GAI (et FIPAR)	MCARI2	Haboudane et al., 2004
Thermique	TIR	8500-13500		-	Ts	WDI

D'après F. Baret, comm. pers., 2014

Les indices de végétation sont corrélés avec l'indice foliaire LAI

Imagerie multi- or hyper-spectrale

Revue par Sankaran *et al.*, 2010

Plant	Disease/Damage	Statistical Methods	Optimum spectral range
Wheat	Scab (Fusarium head blight)	Step discrimination and discriminant analysis	568, 715 nm (550, 605, 623, 660, 697 and 733 nm)
Tomato	Late blight disease	Minimum noise fraction transformation and spectral angle mapping-based classification	700–750 nm, 750–930 nm, 950–1,030 nm, and 1,040–1,130 nm
Wheat	Yellow rust, nutrient deficiency	Self-organizing map neural network, quadratic discriminant analysis	680, 725 and 750 nm
Wheat	Yellow rust	Regression analysis	–
Grapefruit (fruit)	Citrus canker	Principal component analysis	553, 677, 718 and 858 nm
Vidalia sweet onions	Sour skin disease	Image analysis	1,150–1,280 nm
Sweet orange	Blue mold, Browning rot	Difference in reflectance	540 and 680 nm

Problèmes: recherche d'une spécificité des bandes spectrales / maladie

Application récente: évaluation de dégâts de *Verticillium* en vergers d'olivier par imagerie hyperspectrale + thermique (vecteur = drone) (Calderón *et al.*, 2015)

Plateforme Phenotic (Angers) : détection de maladies (équipe Belin, Rousseau et al.)

☐ Robustesse des approches méthodologiques

- Phénotypage de la réponse variétale au stress hydrique
- Monitoring du stress hydrique : champ ou placettes
 - Définition de placettes de référence
 - Application à l'irrigation de précision, si des règles de pilotage sont précisées
- Monitoring de stress biotiques ou de stress azoté : indices de télédétection disponibles,

☐ En cours

- Test en stations professionnelles (projet Casdar Aliage-*fruits* 2014-17): comportement de nouvelles variétés fruitières en phase d'inscription :
 - proof of the concept
 - évaluation de la balance : coût / efficience

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

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

☐ Nécessaire travail de développement prenant appui sur le diagnostic → OADs

Remerciements

Programme Interreg IV, pour le projet  (imagerie ULM, 2010-12)

Projet Open Science 'HiriFap' (imagerie drone, 2013-14) financé par 

Projet 'Aliage-fruits' financé par le CASDAR Semences et Plants (Min. Agriculture, 2015-17)



pour le financement de 2 étudiants de Master 2, en 2015 et 2016



- Bassett, C. L. (2013). Water use and drought response in cultivated and wild Apples. Abiotic stress - plant responses and applications in agriculture. K. Vahdati, L. Charles, InTech: 249-275.
- Berni, J. A. J., P. Zarco-Tejada, et al. (2009). Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring From an Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(3): 722-738.
- Besqueut G., Pichon L., Tisseyre B. (2015). Les drones en viticulture : quels enjeux, quels services. *Revue des Œnologues*, Octobre 2015, 3p.
- Fiorani, F. and U. Schurr (2013). Future scenarios for plant phenotyping. *Annual Review of Plant Biology* 64: 267-291.
- Gitelson, A. A., Y. J. Kaufman, et al. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment* 80: 76– 87.
- Gonzalez-Talice, J., J. A. Yuri, et al. (2012). Water use in three apple cultivars from the second season to sixth season in a drainage lysimeter. *Scientia Horticulturae* 146: 131-136.
- Grant, O. M., M. M. Chaves, et al. (2006). Optimizing thermal imaging as a technique for detecting stomatal closure induced by drought stress under greenhouse conditions. *Physiologia Plantarum* 127(3): 507-518.
- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* 55(407): 2427-2436.
- Jones, H. G., R. Serraj, et al. (2009). Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology* 36(10/11): 978-989.
- Massonnet, C., E. Costes, et al. (2007). Stomatal regulation of photosynthesis in apple leaves: Evidence for different water-use strategies between two cultivars. *Annals of Botany* 100(6): 1347-1356.
- McDowell, N. G. (2011). Mechanisms Linking Drought, Hydraulics, Carbon Metabolism, and Vegetation Mortality. *Plant Physiology* 155(3): 1051-1059.
- Moran, M. S., T. R. Clarke, et al. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index . *Remote Sensing of Environment* 49(3): 246-263
- Peñuelas, J., J. A. Gamon, et al. (1994). Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment* 48(2): 135-146.
- Prashar, A. and H. G. Jones (2014). Infra-Red Thermography as a High-Throughput Tool for Field Phenotyping. *Agronomy* 4(3).397-417.
- Pretorius, J. J. B. and S. J. E. Wand (2003). Late-season stomatal sensitivity to microclimate is influenced by sink strength and soil moisture stress in 'Braestar' apple trees in South Africa. *Scientia Horticulturae* 98(2): 157-171.
- Regnard, J. L., M. Ducrey, et al. (2008). Phenotyping apple progeny for ecophysiological traits: how and what for? *Acta Horticulturae* 772: 151-158.
- Regnard, J. L., V. Segura, et al. (2009). QTL analysis for leaf gas exchange in an apple progeny grown under atmospheric constraints. *Acta Horticulturae* 814: 369-374.
- Sankarana, S., A. Mishraa, et al. (2010). A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Computers and Electronics in Agric.* 72: 1-13.
- Tardieu, F. and T. Simonneau (1998). Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. *Journal of Experimental Botany* 49(Special issue): 419-432.
- Virlet N., Lebourgeois, V. et al., 2014. Stress indicators based on airborne thermal imagery for field phenotyping a heterogeneous tree population for response to water constraints. *Journal of Experimental Botany* 65(18): 5429–5442.
- Virlet, N., Costes, E., et al. (2015). Multispectral airborne imagery in the field reveals genetic determinisms of morphological and transpiration traits of an apple tree hybrid population in response to water deficit. *Journal of Experimental Botany* 66(18): 5453–5465
- White, J. W., P. Andrade-Sanchez, et al. (2012). Field-based phenomics for plant genetics research. *Field Crops Research* 133: 101-112.
- Wünsche, J. N., J. W. Palmer, et al. (2000). Effects of crop load on fruiting and gas-exchange characteristics of 'Braeburn'/M.26 apple trees at full canopy. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 125(1): 93-99.
- Zarco-Tejada, P. J., J. A. J. Berni, et al. (2009). Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment* 113(6): 1262-1275.