

**Phénotypage par imagerie drone sur essais variétaux fruitiers :  
quels dispositifs de terrain ? quelles méthodologies ?  
quelles variables ? quelle exploitation des données ?**

*Jean-Luc Regnard, Montpellier SupAgro - INRA (UMR AGAP - équipe AFEF)  
coll. David Gómez-Candón, Ingénieur d'études Montpellier SupAgro*

Pourquoi phénotyper ?



## Les enjeux du phénotypage

**Domaine scientifique émergent** ayant pour objectif la caractérisation quantitative du comportement des plantes, de manière précise et reproductible<sup>1</sup>, pour des traits de croissance, de tolérance aux stress, et permettant d'établir des liens avec le contrôle génétique de ces traits (→ “**Phenomics**”<sup>2</sup> )

**Domaine multidisciplinaire**, utilisant une gamme de méthodologies très variées.

- **Phénotypage de plante entière / imagerie** (traits morphol. et physiol. des plantes),
- Phénotypage aux échelles cellulaire & moléculaire (-omics, ...)
- Automatisation des **méthodes d'analyse d'image**, pour la modélisation des phénotypes, l'analyse statistique des données et l'intégration de celles-ci.

### 3 défis (pour la sélection et/ou l'évaluation variétale)

- **Phénotyper à haut débit (high-throughput)** (cf. débits des technol. NGS d'analyse des génomes, pour dépasser les limites des méthodes conventionnelles <sup>3</sup> )
- **Phénotyper au champ**, pas uniquement sur plateforme conditions contrôlées : ++ pour espèces fruitières (conditions environnementales réelles, stade adulte)
- **Phénotyper les essais de comportement variétal** : en contexte professionnel

<sup>1</sup>Pieruschka ; <sup>2</sup>Fiorani and Schurr, 2013 ; <sup>3</sup>White et al., 2012

## Contexte scientifique

- Importance du concept d'**idéotype** : Interaction G\*E\*C ; prise en compte croissante des contextes cibles en sélection végétale (cf. GIS GCHP2E)
- Besoin de nouvelles technologies pour le **phénotypage (notamment haut débit)** (plateforme ou champ) vs progrès exponentiels sur les génomes
- Imagerie de **proxi- et télédétection** pour le pilotage des cultures (CSIC-IAS) également applicable au **phénotypage au champ** (UMR Emmah, UMR AGAP)
- **Expertise scientifique croissante en matière d'imagerie multispectrale** [pf. Diaphen Manguio (projet Phenome) ; UMR Emmah ... ]
- **Données génétiques & génomiques sur le pommier** (détection de QTL, perspectives de SAM, séquençage du génome, ...) (INRA IRHS ; PFR-NZ, ...)
- Travaux UMR AGAP (équipe AFEF) sur **la tolérance des génotypes à la contrainte hydrique (sol + atmosphère)**



# Idéotype ?

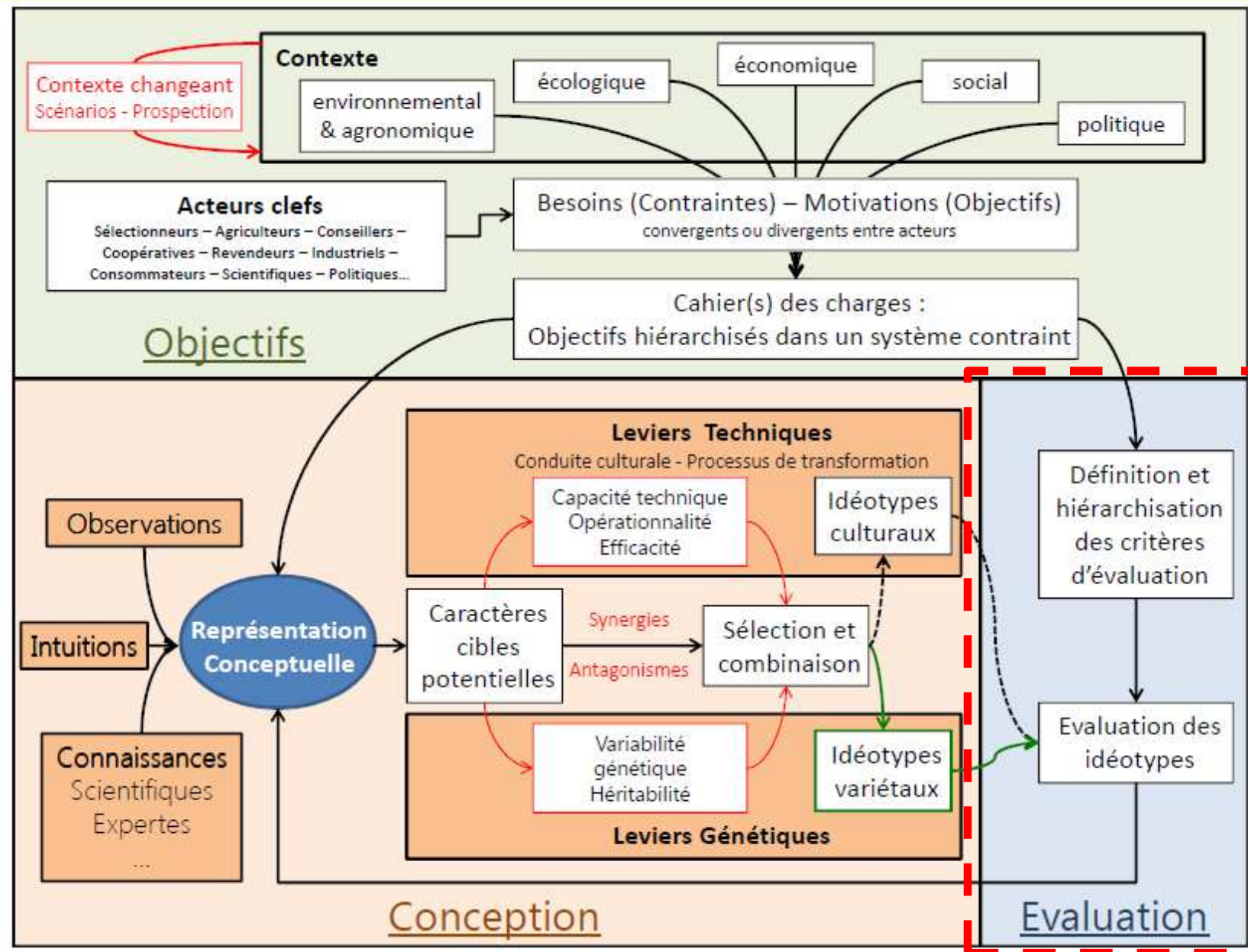
« **Combinaison optimale de caractères morphologiques et physiologiques**, ou de leurs **déterminants génétiques**, conférant à un matériel végétal une adéquation satisfaisante à un **environnement**, à un **mode de production** et **d'utilisation** donné ».

*In* : Ecole chercheur INRA-CIRAD : « Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable (2012)

**Un concept à considérer, y compris en production fruitière :**

- **Contexte du changement climatique**
- **Changement des paradigmes de production**
- **Attentes sociétales (ressources, impacts écologiques de l'arboriculture, etc.)**





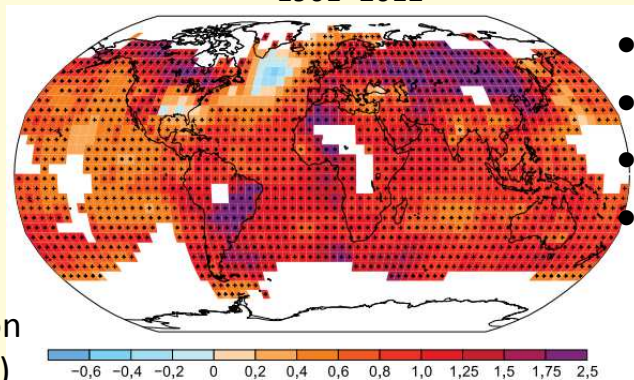
Pourquoi phénotyper dans un contexte professionnel d'essai variétal ?



# Le contexte du changement climatique

GIEC, 2013-14

1901-2012



Elévation  
de T (°C)

↗ températures

↗ demande évaporative

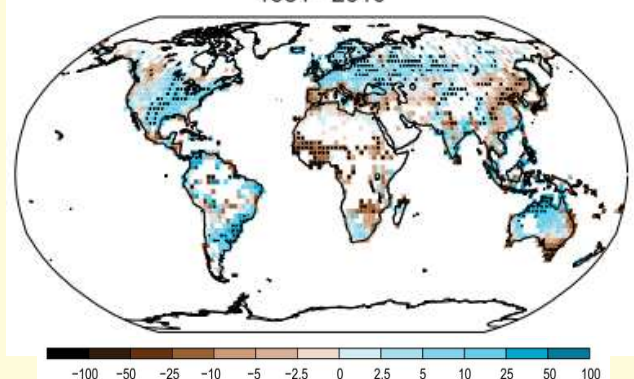
↘ pluies (zone médit. : hotspot)

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

## Le contexte pour le pommier

- 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)
- Variabilité intraspécifique de la tolérance à la sécheresse des *Malus* (Bassett *et al.*, 2011, 2013)
- Effet « puits » du fruit : WUE ↘ (Wünsche *et al.*, 2000 ; Pretorius and Wand, 2003)

1951-2010



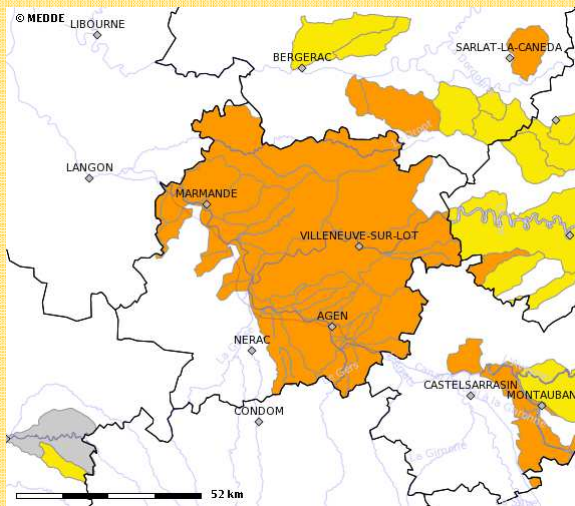
Variation (mm par an, par période de 10 ans)



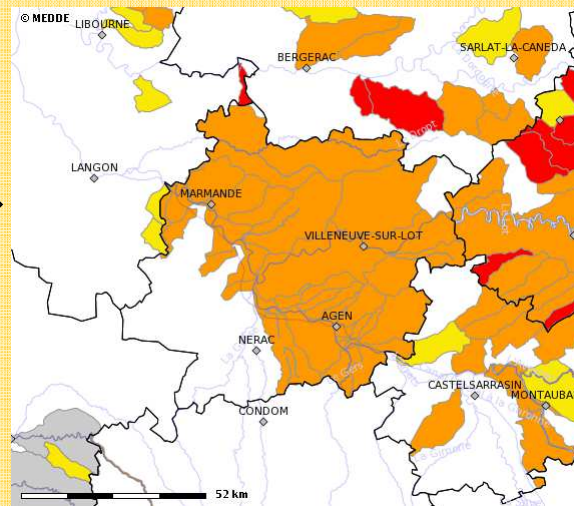
# Arrêtés de limitation des usages de l'eau (étiage 2013)

(été 2013, SO France)

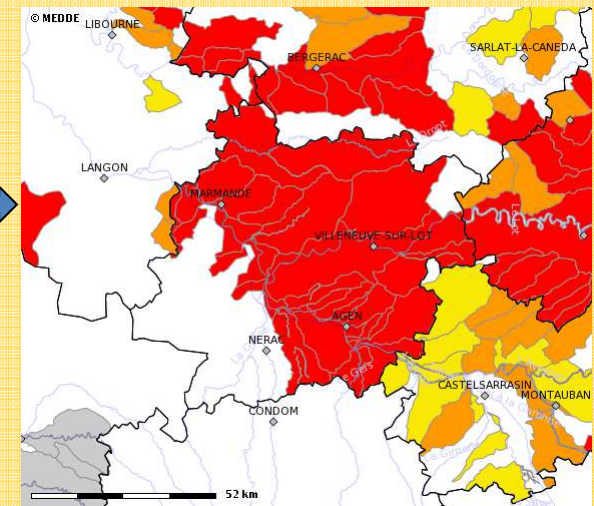
8 Août



29 Août



13 Septembre



**Alerte** : Réduction de l'irrigation en agriculture < 50% ; 4 jours sur 7 autorisés



**Alerte renforcée** : Réduction de l'irrigation en agriculture  $\geq$  50%



**Crise** : Irrigation interdite agriculture; consommation limitée à la santé, alimentation ...

→ Impact sur les production fruitières à cycle long (pomme, kiwi, fruits à coque, etc.)



Source : <http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr/propluvia/faces/public/carteDep.jsp>

# Les effets des altérations climatiques

- Arrêt des échanges gazeux et de l'assimilation de C
- Limitation du grossissement des fruits
- Altération de la qualité des fruits
- Stress thermique ; altération du feuillage ou des fruits
- Frein à l'accumulation des réserves C (effet année  $n \rightarrow n+1$ )
- Flétrissement / Perte d'organes
- ...

# Éléments de contexte professionnel

- **Changements climatiques** encore peu pris en compte pour l'amélioration génétique des espèces fruitières : quelle stabilité de la production face aux cond° non optimales, dont contrainte hydrique ?
- **Espèces fruitières vulnérables** malgré l'irrigation : (i) incidents de fonct<sup>t</sup> des réseaux, (ii) arrêtés préfectoraux limitant l'irrigation, (iii) canicule estivale, (iii) coût de l'intrant eau & préservation de la ressource,
- Critères de sélection **variétés greffon** (dont pommier) : résistance durable aux bio-agresseurs, qualité des fruits, niveau et régularité de rendement, (+ récemment les caractères architecturaux)
- Contexte **porte-greffe** : gamme existante adéquate pour culture intensive, mais celle-ci plutôt adaptée aux conditions de culture optimales
- Expérimentation : **essais de comportement** s/c de la Charte nationale de caractérisation et de comportement des variétés et porte-greffe fruitiers (Ctifl, FNPF, CEP, Inra, stations régionales ; 1998)



## Story® Inored c.o.v.

Story® Inored c.o.v. est une très jolie variété résistante à la tavelure avec un niveau gustatif très élevé et une excellente conservation.

A planter en zones méridionales (site web éditeur)

« Adaptée aux zones  
méridionales »  
(site web co-obtenteur)



## STORY ® Inored cov

(Les valeurs indiquées sont celles observées en Val de Loire - France)

(C.O.V.: Certificat d'Obtention Végétale - ®: Marque protégée)

Espèce	Pommier
Résistance	Porteuse au moins du gène vf
Obtenteur	INRA NOVADI
Parents	Pinova x X6398

### L'arbre

Port de l'arbre	Ouvert Golden
Vigueur	Moyenne
Époque de floraison	2 jours avant Golden
Eclaircissage	Moyen
Productivité	Très forte
Alternance	Faible
Sensibilité à la chute	Faible

(site web co-obtenteur)

L'adaptation « proposée »  
pour la zone méridionale ne  
préjuge pas spécifiquement  
de la tolérance de la variété  
aux contraintes abiotiques



# Quel idéotype variétal vs contrainte hydrique temporaire ??

isohydrie et anisohydrie



- Comportement conservatif de l'eau, évitement du stress par régulation stomatique rapide ; homéostasie du potentiel hydrique ; bonne efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) ; **risque de stress thermique, risque de déficit de l'assimilation de C**

**Plasticité, adaptation à la contrainte, au prix d'un rendement moindre**



- Utilisation plus prodigue de l'eau absorbée, régulation stomatique plus tardive ; capacité à tolérer un  $\Psi$  hydrique bas ; thermorégulation par transpiration ; **risques d'embolie des vaisseaux (sécheresse prolongée) vs maintien du gain de C (stress modéré)**

**Performance /rendement, tolérance au stress T°, mais risque de stress hydrique**

**Présence de fruits : isohydrie → anisohydrie**

Les avantages relatifs des 2 stratégies sont fortement dépendants des scénarii de contrainte hydrique



Adapté de Tardieu et Simonneau, 1998 ; McDowell et al. 2011

# Phénotypage et imagerie thermique

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

### L'imagerie thermique est actuellement utilisée

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

### L'imagerie thermique 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) permet d'accroître la résolution spatiale et la flexibilité (Berni et al., 2009)
- Phénomobile moins adaptée (Phenome plutôt pensé pour grandes cultures ; incompatible avec imagerie thermique)



# Mesurer le stress par la température du couvert

Bilan d'énergie feuillage :  $R_n = H + \lambda E + G$

Flux de chaleur sensible :  $H = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a}$

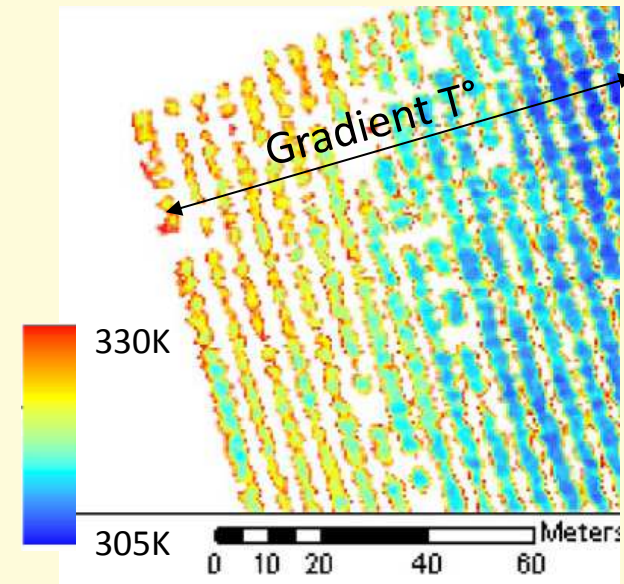
Flux de chaleur latente :  $\lambda E = \lambda (C_{v,s} - C_{v,a}) / r_a$

Évaporation de l'eau à la surface du feuillage  
(changement de phase, consommation d'énergie,  
Chaleur latente de vaporisation  $\lambda = 2400 \text{ J g}^{-1}$ )

E est proportionnel à la différence de concentration en  
vapeur d'eau entre la S. feuille ( $C_{v,s}$ ) et l'air ( $C_{v,a}$ ) ; E  
s'accroît avec le VPD

- Plante stressée (non transpirante) :  $\nearrow T_s$
- Plante bien irriguée  $\searrow T_s$

$T_s$  : température de surface ;  $T_a$  : température de l'air  
 $G$  : flux de chaleur depuis le sol  
 $\rho$  : masse volumique de l'air ;  $C_p$  : chaleur massique de l'air  
 $r_a$  : résistance aérodynamique air



Verger de pêcher thermographie IR  
(Crédit photo : Berni et al., 2009)

# Présentation du projet *Aliage-fruits*







**Projet : Apport de L'Imagerie Aéroportée haute résolution  
à l'acquisition et l'exploitation de données  
Génotype\*Environnement dans un réseau d'évaluation  
des variétés fruitières (ALIAGE-fruits)  
(AP Semences et sélection végétale – CASDAR 2014)**

*INRA (UMR AGAP - équipe AFEF), Jean Luc Regnard, Montpellier SupAgro  
IRSTEA (UMR Tétis), Sylvain Labbé Maison de la Télédétection, Montpellier  
Ctifl Balandran, Vincent Mathieu, Ctifl - 30127 Bellegarde  
CEHM, Xavier Crété, - 34590 Marsillarques*

*Ingénieur d'études : David Gómez-Candón*

***Termes de référence de l'AP : Thème I « mise au point de nouveaux outils pour caractériser la qualité des variétés » + Thème II : « conception de dispositifs innovants d'évaluation variétale ... approche méthodologique, évaluation multicritères ».***

Dépôt AAP Casdar 04-2014 / Audition CTPS 05-2014 / Projet accepté Ministère-DGAL 08-2014  
Labellisation Terralia 10-2014 / Mise en œuvre fin 2014-2017 / stage GIS fruits 2015

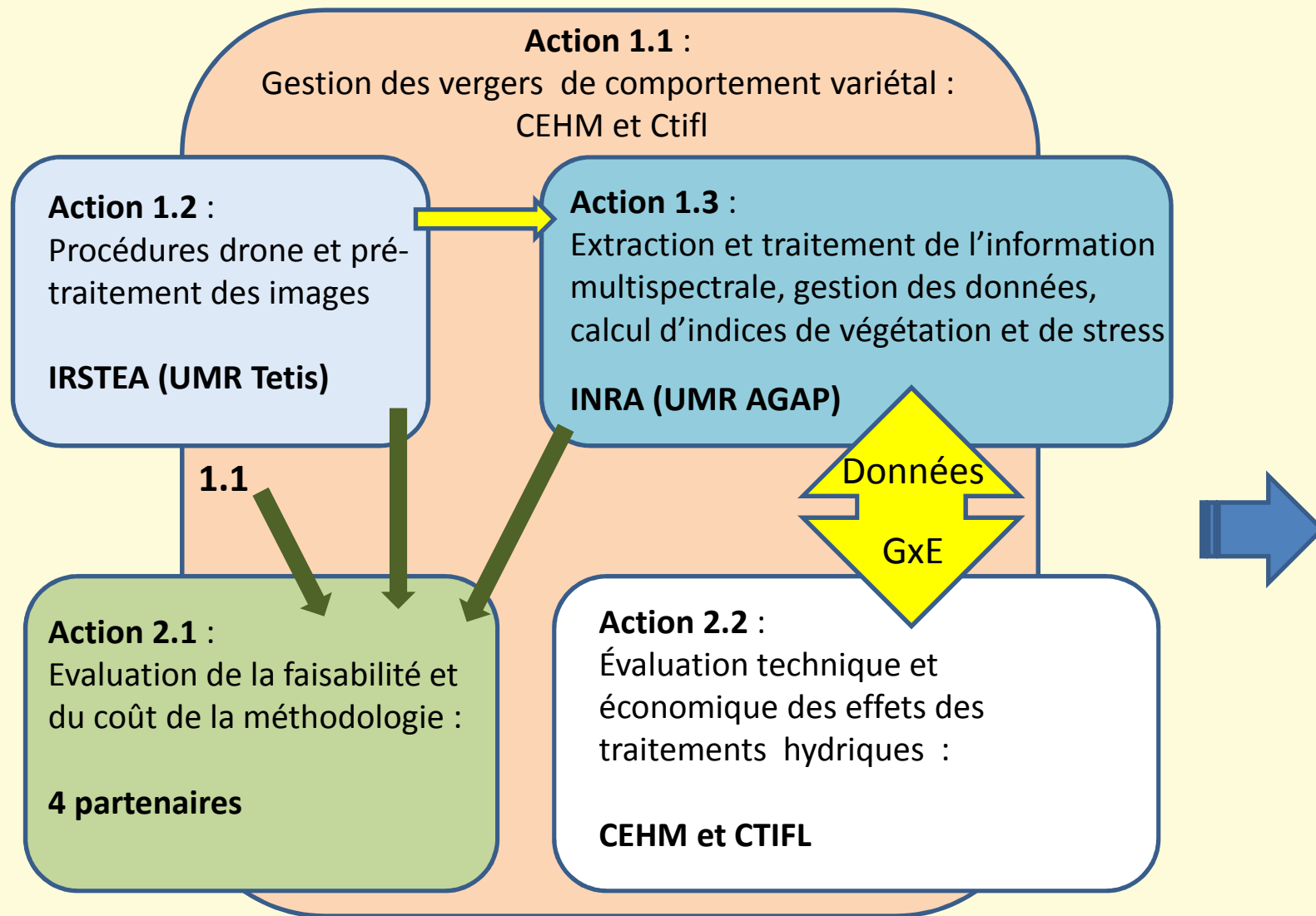


# Objectifs du projet *Aliage-fruits*

- **Compléter les méthodes d'évaluation** du comportement des variétés fruitières, dans la perspective d'une arboriculture + durable, résiliente vis-à-vis des situations dégradées,
- **Offrir aux utilisateurs des nouvelles variétés les informations nécessaires** sur leur capacité à une performance agronomique soutenable, en conditions non optimales
- **Tester dans le niveau 2** de la Charte diverses **modalités de gestion hydrique** et accéder à des variables inspirées par les méthodes de phénotypage à haut débit
- **Evaluer l'opérationnalité et le coût marginal de ces méthodes**, en termes organisationnel, humain et financier
- **Diffuser les résultats** auprès de l'ensemble des parties prenantes : INRA (groupe fruits), Institut technique, Stations régionales, éditeurs et obtenteurs, CEP Innovation, etc.



# Organisation du projet



**Action 3 : communica°, disséminat°, valorisat° : 4 partenaires**

**Action 4 : coordination et pilotage : INRA (équipe AFEF / UMR AGAP)**



# Chronogramme du projet

	2015												2016												2017												Partenaires
	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	
<b>Action 1</b>																																				Ctifl, CEHM IRSTEA (UMR Tetis) INRA (UMR AGAP)	
1.1																																					
1.2																																					
1.3																																					
<b>Action 2</b>																																				Ctifl, Cehm, IRSTEA, INRA Ctifl, Cehm	
2.1																																					
2.2																																					
<b>Action 3</b>																																				Ctifl, Cehm, INRA, Irstea	
<b>Action 4</b>																																				INRA, Ctifl	

Années 1 et 2 x 2 sites => exploitation des données

Années 2 et 3 => évaluation des méthodologies

Année 3 => dissémination / communication



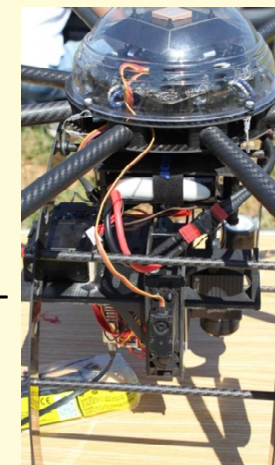
# Technologies proposées (1)



1. Complément d'instrumentation des parcelles ; géolocalisation
2. Gestion de l'irrigation par sondes, et régimes hydriques différenciés
3. Survol de parcelle par drone : acquisit° images multispectrales dans les bandes R, V, B , NIR, TIR



Drone MikroKopter avec centrale inertielle et nacelle porte-capteurs



Appareils RVB et NIR  
2640x1760 pixels

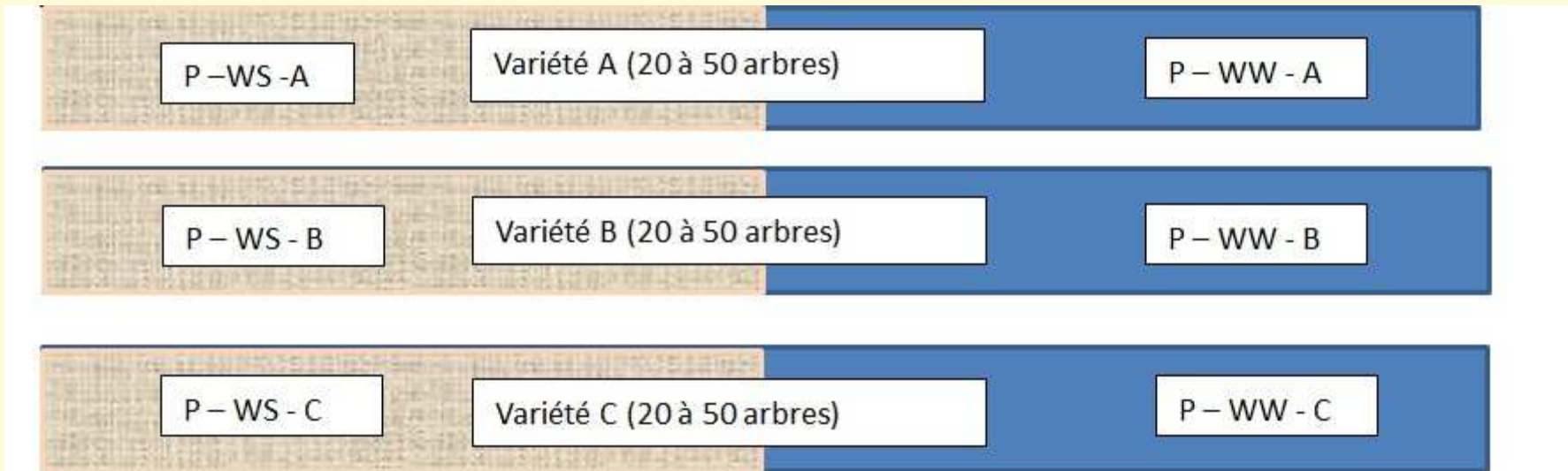
Caméra TIR Thermoteknix Miricle (640x480 px)



**Moyens disponibles actuellement, testés en 2014 à Balandran sur parcelle Q (stade 2)**

## Dispositif au champ en site expé. niveau 2

Irrigation réduite, pilotée par tensiomètre → # 30L h<sup>-1</sup> ← Irrigation à ETM pilotée par tensiomètre → # 60L h<sup>-1</sup>



**Schéma de principe du dispositif expérimental prévu en vergers de comportement (WW : irrigation à la demande évaporative ; WS : irrigation déficitaire de 50%). Huit variétés choisies en accord avec les partenaires techniques seront plus particulièrement suivies.**

# Système d'acquisition aéroporté par drone



Drone  
MikroKopter  
Oktokopter,  
altitude 40-150m

2 appareils photo numériques Sigma DP1

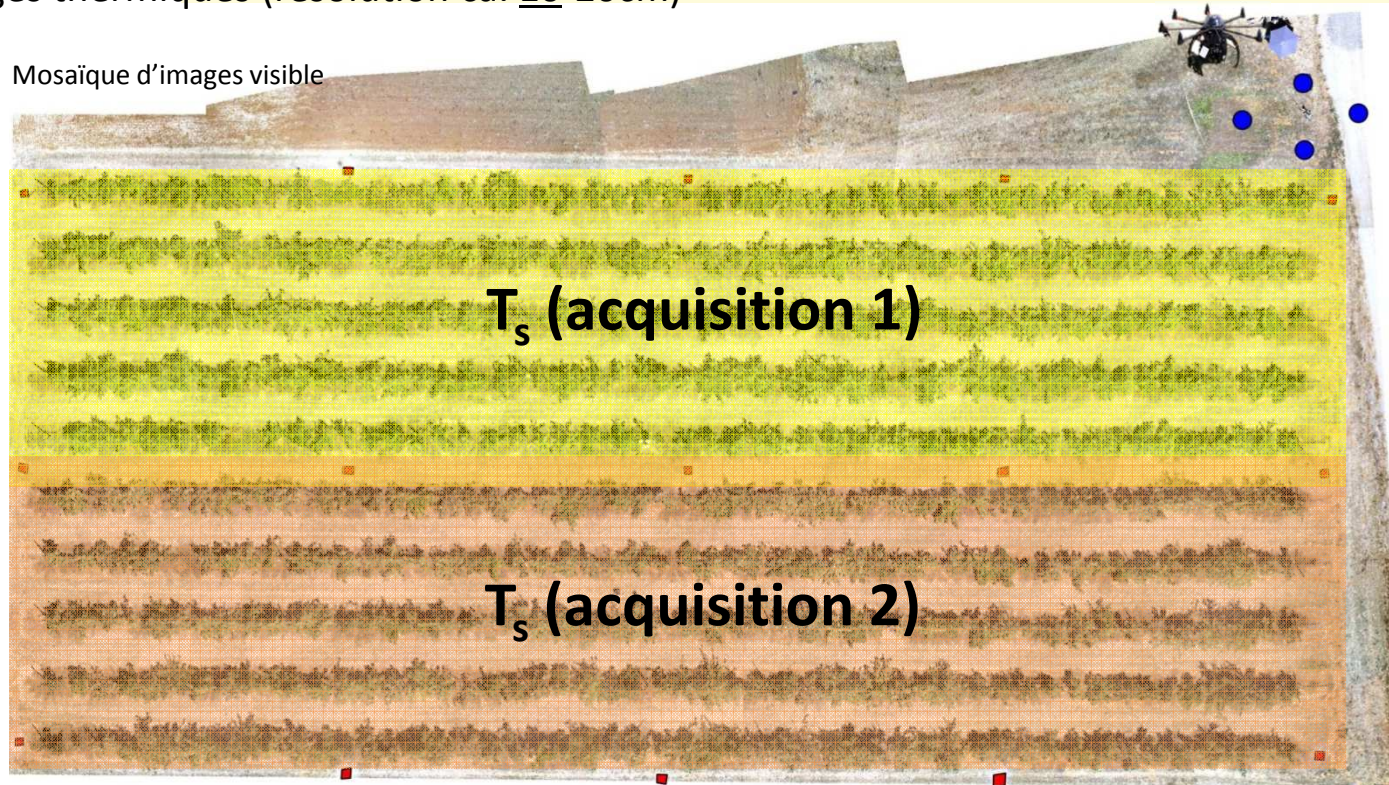
→ images VIS & PIR (résolution # 1-2cm)

1 Caméra thermique Thermoteknix Miricle 307K →

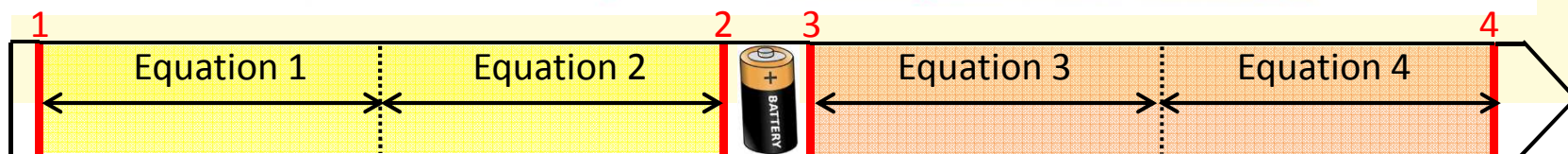
images thermiques (résolution ca. 10-20cm)

Cibles (2)

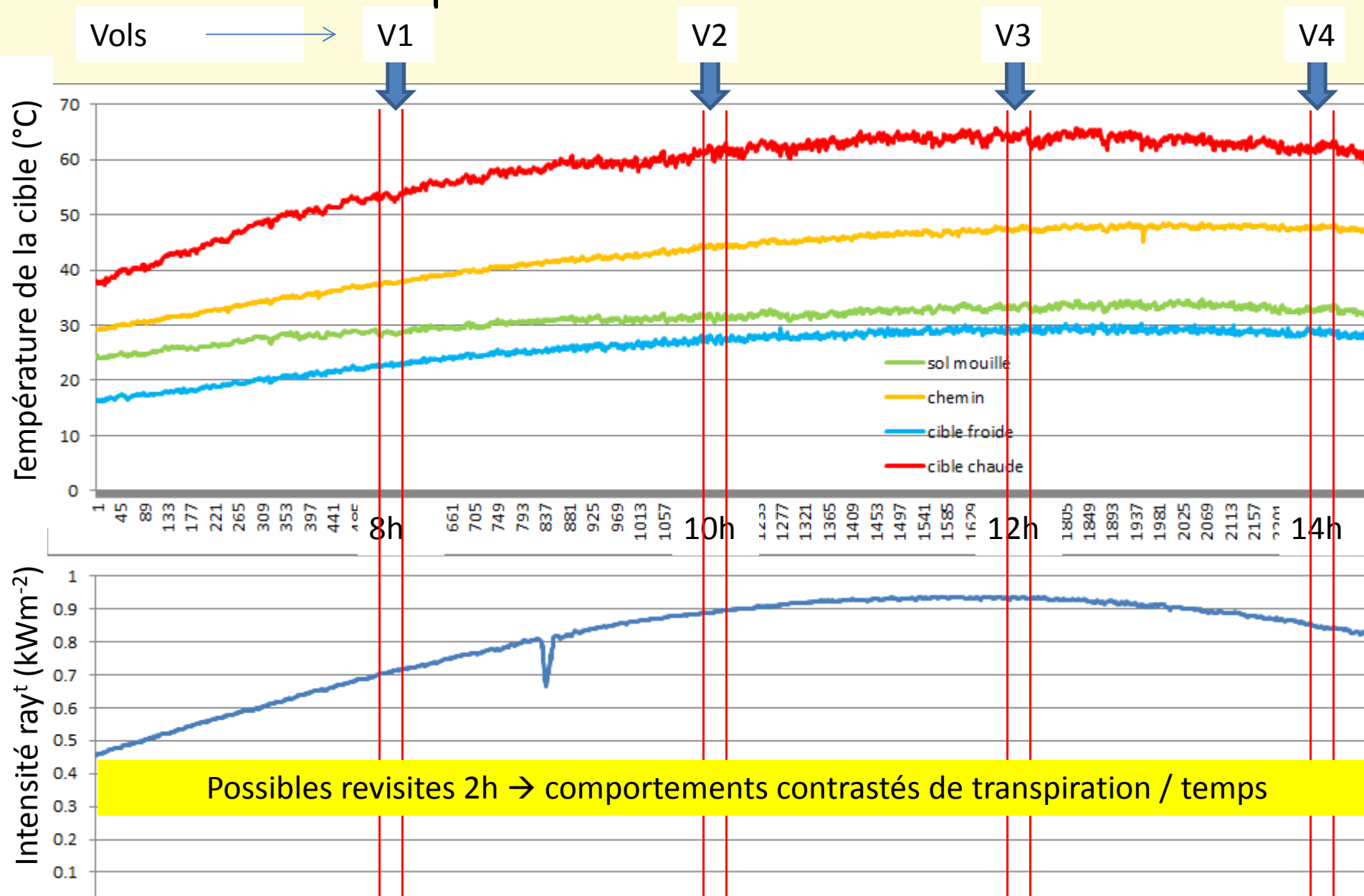
Mosaïque d'images visible



- Cibles géoréf.
- Cibles thermiques

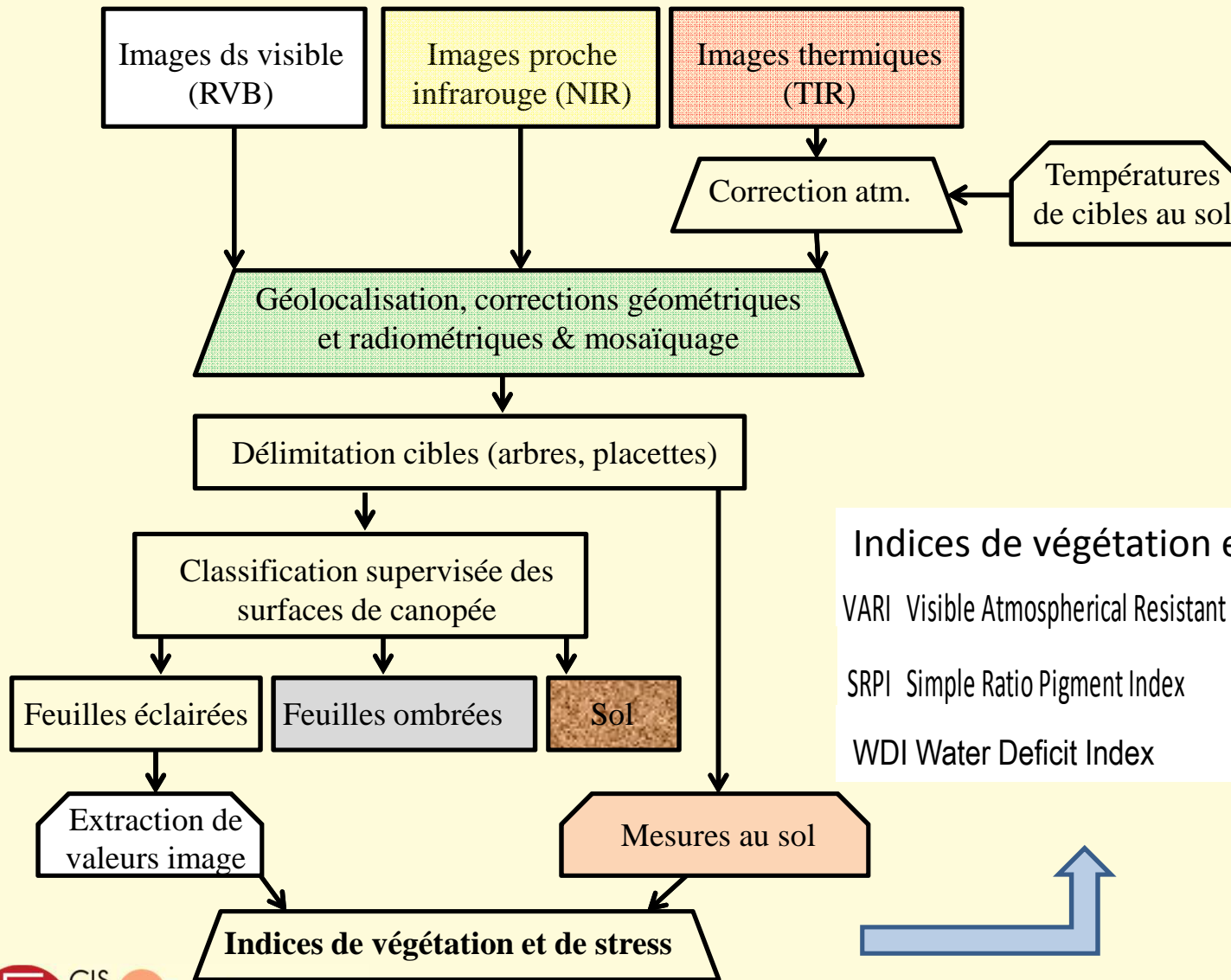


# Suivi thermique de cibles de référence par radiothermomètres





# Technologies proposées (2)



## 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

Quelles variables de comportement ?



# Expertise acquise s/ le dispositif expérimental – UE INRA de Mauguio (2010-2013)

## Localisation

INRA Mauguio (43°36' N, 3°58' E)



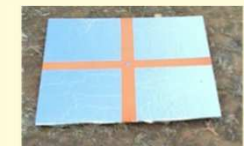
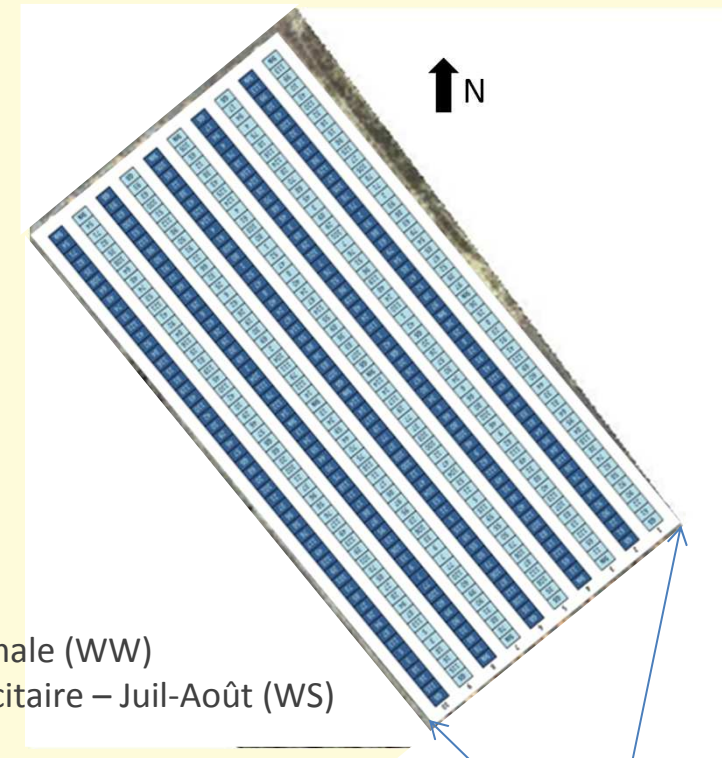
## Population de pommiers

- Starkrimson (STK) x Granny Smith (GS)
- 122 hybrids\*4 répétitions (M9)
- Distances 5x2m; 10 rangs (6400 m<sup>2</sup>)
- Régimes hydrique différenciés en été : WS/WW

→ 2 rép. / génotype \* régime hydrique

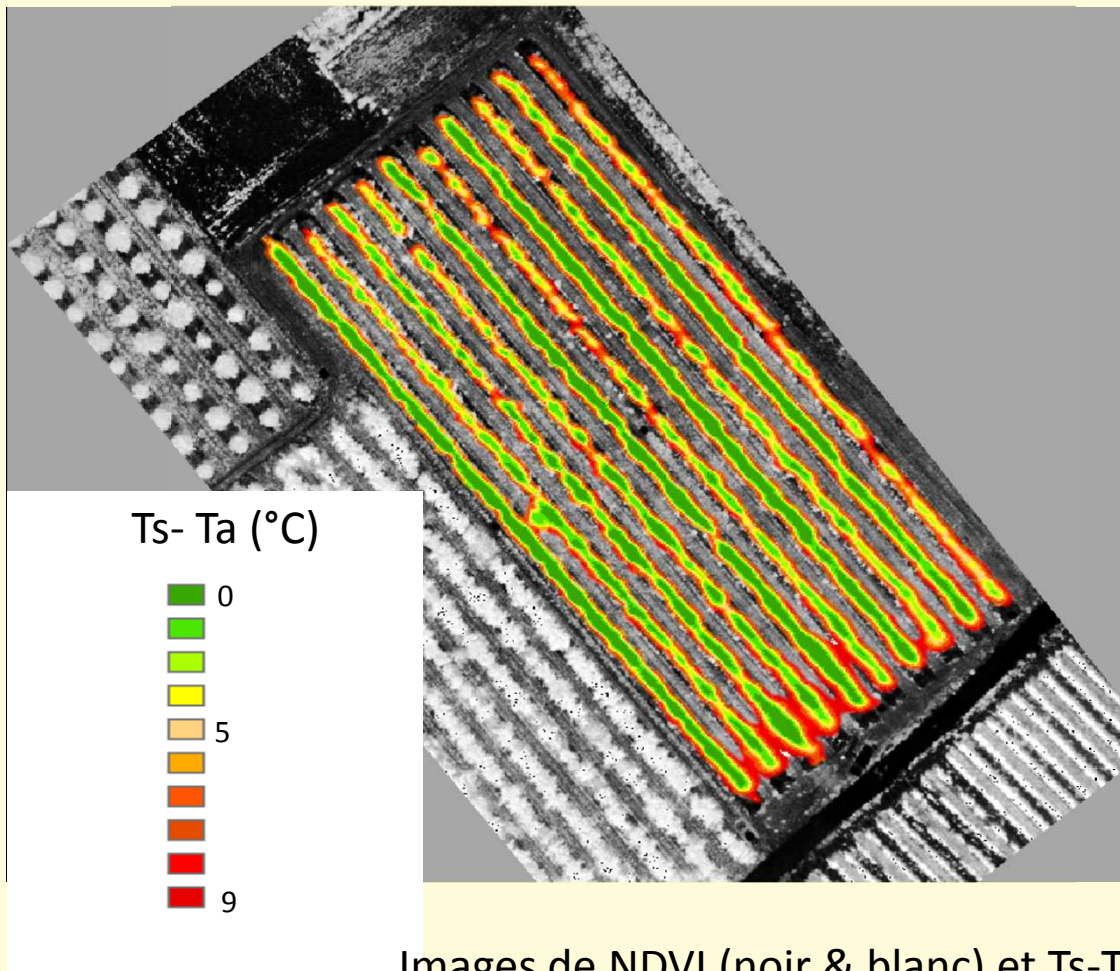
## Monitoring environnemental

- Rayonnement global (Rg) et PAR
- Humidité (RH) et température (Ta) de l'air
- Vitesse du vent (u)
- Pluies
- Potentiel hydrique de sol  $\Psi$  (tensiomètres)



9 à 15 cibles  
géoreferencées  
aluminisées

## Expertise acquise s/ le dispositif expérimental – UE INRA de Mauguio (2010-2013)



### 1. Acquisition d'images à haute définition (par drone)

- Visible (R V B) 400-700nm
- Proche IR # 745 nm
- Thermique : 8-14μm

### 2. Calcul de l'indice de végétation

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

### 3. Trait<sup>t</sup> de l'information de l'image thermique : calcul de (Ts – Ta)

### 4. Calcul du **Water Deficit Index** (Moran et al. 1994 ; Virlet et al. 2014)

### 5. Réflexion sur le **calcul et l'exploitation d'autres indices**

Images de NDVI (noir & blanc) et Ts-Ta (fausses couleurs); phénotypage d'1 descendance de pommiers sous contrainte hydrique

(N. Virlet, non publié)

# Quelques indices pouvant être calculés à partir d'images multispectrales (6 bandes + IR thermique)

Bande	Nom	lambda centre de bande (nm)	Combinaison	Indications biologiques	Indice	Référence
Bleu	Blue	450				
Vert 1	PRI 1	532		Caroténoïdes	CRlgreen	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



# Est-il possible de détecter des maladies par imagerie ?

## Imagerie multi- ou hyper-spectrale, fluorescence de la chlorophylle

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

Problème : la variabilité des bandes spectrales à exploiter

Sankaran et al. 2010



Quelle exploitation des données ?



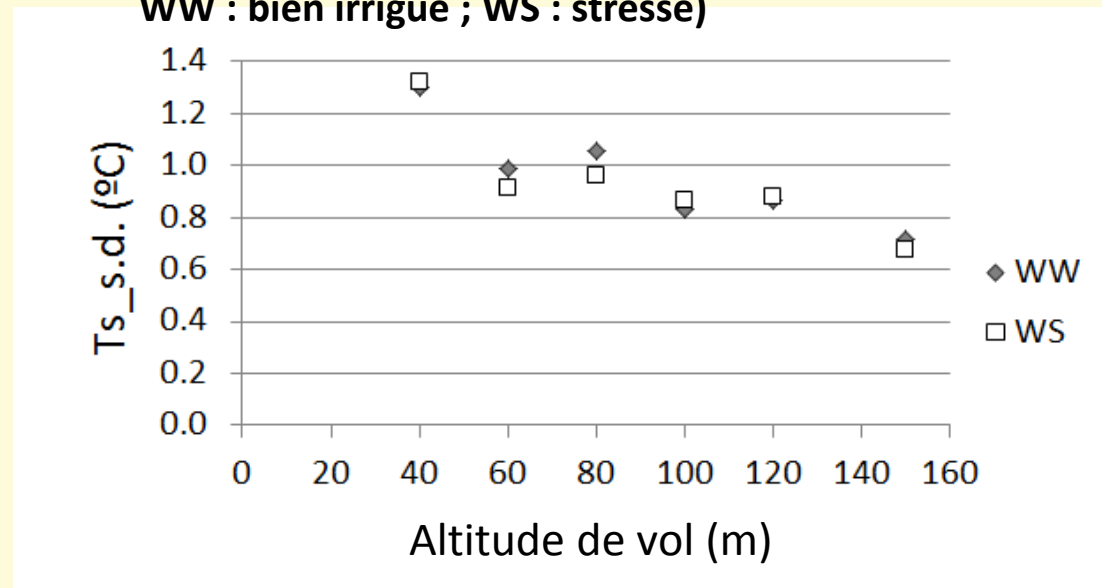
## Résultats: effets de la résolution de l'image (cf. altitude de vol)

Altitude	résolution spatiale
40 m	0.10 m
60 m	0.11 m
80 m	0.13 m
100 m	0.16 m
120 m	0.21 m
150 m	0.27 m

### Résolution des images TIR en fct de l'altitude du vol (ULM)

- ❑ La plus forte variabilité de la Ts (s.d.) est obtenue pour une résolution d'image proche de la dimension d'une feuille de pommier (Gómez-Candón, non publié).
- ❑ La diminution du % de pixels mixtes végétation / sol → permet une classification de l'image pour améliorer la photo-interprétation

Déviatiun standard de la variable Ts dans une zone de 60-cm de rayon au centre de l'arbre (6 Sept. 2013; WW : bien irrigué ; WS : stressé)

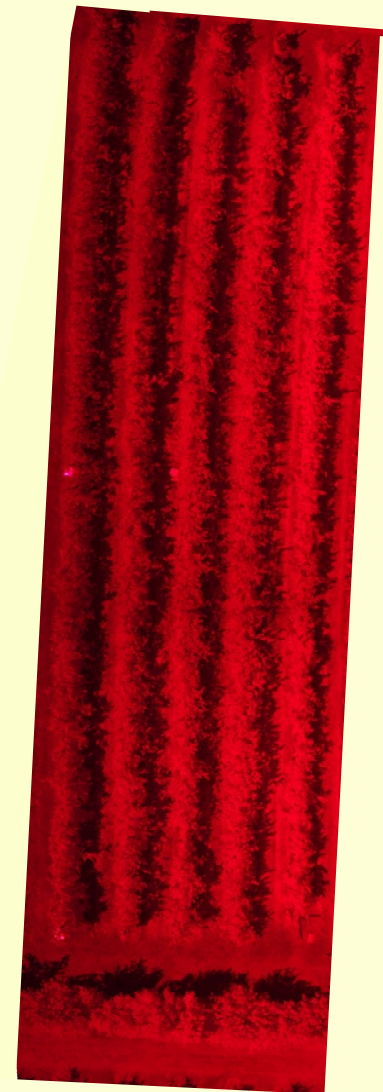




# Premiers essais : site Ctifl Balandran (été 2014)



Mires  
géométriques  
aluminisées



## Balandran (Parcelle Q, bloc Est) 4 variétés

- Opal,
- mutant de Cripps Pink,
- Crimson Crisp,
- Dalinette

Il est prévu **d'anonymer les variétés**

Schéma d'expérimentation validé, mais difficulté à instaurer 1 réelle contrainte hydrique en juil. 2014

Analyse par variété (WW / WS) et intra-placette

Vols drone du 31 juil. 2014  
(mosaïquage : D. Gómez-Candón)



Image RGB

Image NIR

Résolution 1 à 2cm

# Pour le projet *Aliage-fruits*

## Proposition d'exploitation des données G \* E

### Données d'imagerie aéroportée : 2 campagnes (2015 et 2016)

- 2 sites
- 8 variétés dont 5 sont en commun sur les 2 sites
- 2 régimes hydriques
- « N » variables image (indices bruts, variation d'indice WS/WW) ou acquis sur plante

Pour chaque variable analysée, Anova suivant modèle linéaire  
(optimisation possible des modèles par critères Bayésiens)

### Acquisition de variables au sol / in planta :

- caractérisation environnementale (potentiels de sol),
- suivi potentiel hydrique plante : base et diurne (tige),
- mesures de grossissement (tronc), fruits, rendement,
- plus ponctuellement : mesures écophysio

**Corrélations entre les variables : issues de télédétection / mesurées in planta**  
variables image → variables biophysiques (cf. exposé B. de Solan)



## Parmi les chantiers à mener ...

- Préparation des campagnes (Comité de pilotage projet)
- Automatisation des traitements d'image (stage GIS fruits)
- Gestion et archivage des données
- ...



Retour sur le contexte et ses opportunités



## Contexte organisationnel ... en évolution ?

- Espèces fruitières (France) : **Catalogue officiel depuis 1961**, inscription des variétés aujourd'hui non obligatoire, mais requise pour la certification
- Epreuve de **Valeur Agronomique et Technologique (VATE)** supprimée en 1994 pour les espèces fruitières
- **Charte d'évaluation du matériel fruitier** : 2 niveaux. Niveau 1 : caractérisation. **Niveau 2 = comportement**, 9 situations agroclimatiques pour le pommier représentant divers bassins de production (3 sites en zone méditerranéenne)
- CTPS : **dimension environnementale dans l'évaluation des variétés** (chang<sup>t</sup> des pratiques agricoles et diversification des modes de production : depuis fin 2009, au titre d'une démarche « orientations VATE »)
- Orientation du progrès génétique : variétés adaptées à des ITK diversifiés, ... permettant la **réduction des intrants (produits phyto, engrais, eau)**
- Réflexion à engager sur le **phénotypage pour la tolérance aux bioagresseurs** (doit inclure une réflexion sur dispositif au champ, et méthodes d'imagerie)



## Protocole d'évaluation ... en évolution ?

- **Conçu pour le système dominant de production intensive** (y.c. P.F.I.)
- **Niveau 2 : placettes  $\geq 20$  arbres**, 3 années de fructification successives\*
- **Expé. non encore financée** par éditeurs obtenteurs, soutenue / FranceAgriMer
- **Actuellement peu ou pas d'exploitation des données GxE**
- **Variables étudiées** : croissance, rendements, notation des sensibilités, qualités des fruits, aptitude à la conservation
- Croiser (à terme) les ccl. du GT Medieval s/les nouvelles variables à phénotyper, et les possibilités de l'imagerie aéroportée.

\* Au niveau 2 de comportement, depuis 1998 : 49 variétés observées \* 9 à 10 sites  
→ Base de données Koala (accès expérimentateurs)



# Principales références citées

- Bassett, C. L. (2013). Water use and drought response in cultivated and wild Apples. In : Abiotic stress - plant responses and applications in agriculture. (K. Vahdati, L. Charles, eds.), InTech: 249-275. DOI: 10.5772/45842
- 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.
- 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 Hort.* 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 Hort.* 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.
- 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.
- 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.



**Merci de votre attention**



Parcelle de phénotypage pommiers, INRA Melgueil (Mauguio), avril 2011 Photo : N. Virlet