

SEMINAIRE
Numérique et Arboriculture
face aux enjeux
du changement climatique

Bordeaux Sciences Agro
Le 14 Décembre 2021

Organisé par :



Les outils du phénotypage à haut-débit : appui à la sélection de variétés fruitières performantes et résilientes

Magalie DELALANDE^{1,3}, Grégory BEURIER^{1,2}, Frédéric BOUDON^{1,2}, Aude COUPEL-LEDRU^{1,3},
Benoît PALLAS^{1,3} Fernando ANDRES ^{1,3}, Evelyne COSTES^{1,3}, Jean-Luc REGNARD^{1,4}

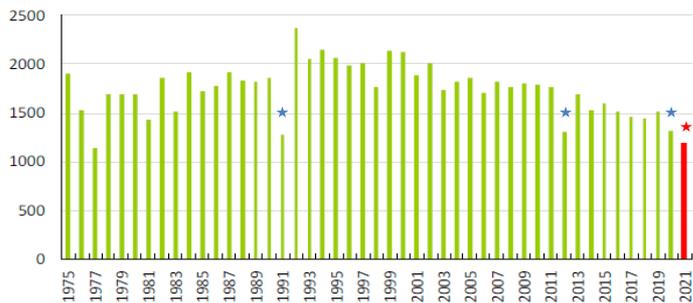


Éléments de contexte

- Une **filière fruitière vulnérable**
 - Aléas climatiques (gel de printemps, canicules, stress atmosphérique, grêle)
 - Défis de compétitivité (coûts de production, concurrence internationale, ...)
- ... confrontée à **divers verrous technologiques**
 - Mesure des effets des pratiques : ex. monitoring de l'irrigation, détection d'anomalies
 - Intra-parcellaire rarement modulé : ex. pulvérisation, désherbage, éclaircissage
- ... innovante pour le **matériel végétal** : variétés et porte-greffes
 - Evaluation multicritères (rendement, qualité, conduite, rusticité, plasticité, ...)
 - Diversité d'acteurs de la sélection & édition des nouveautés
 - Durée de la sélection + Expérimentation coûteuse et complexe

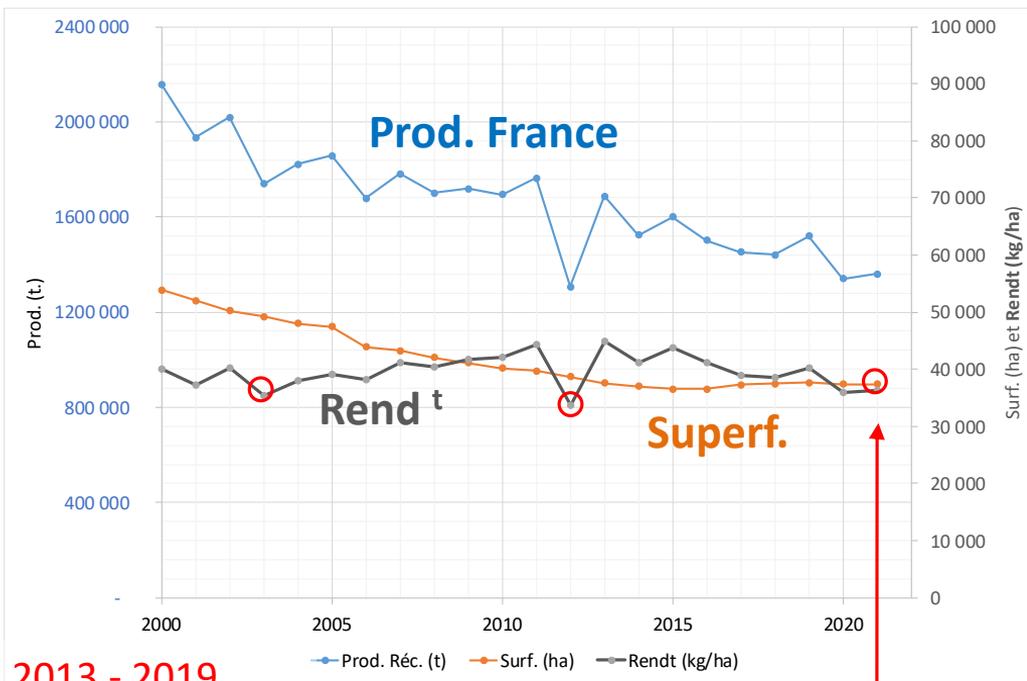
Production récoltée pommes - France

Unité : 1000t



Source : Agreste

Infos rapide Pomme 2021-154 (Agreste)



2021 : - 11 % vs récolte moy. 2013 - 2019.

L'un des plus faibles rendements depuis 1991

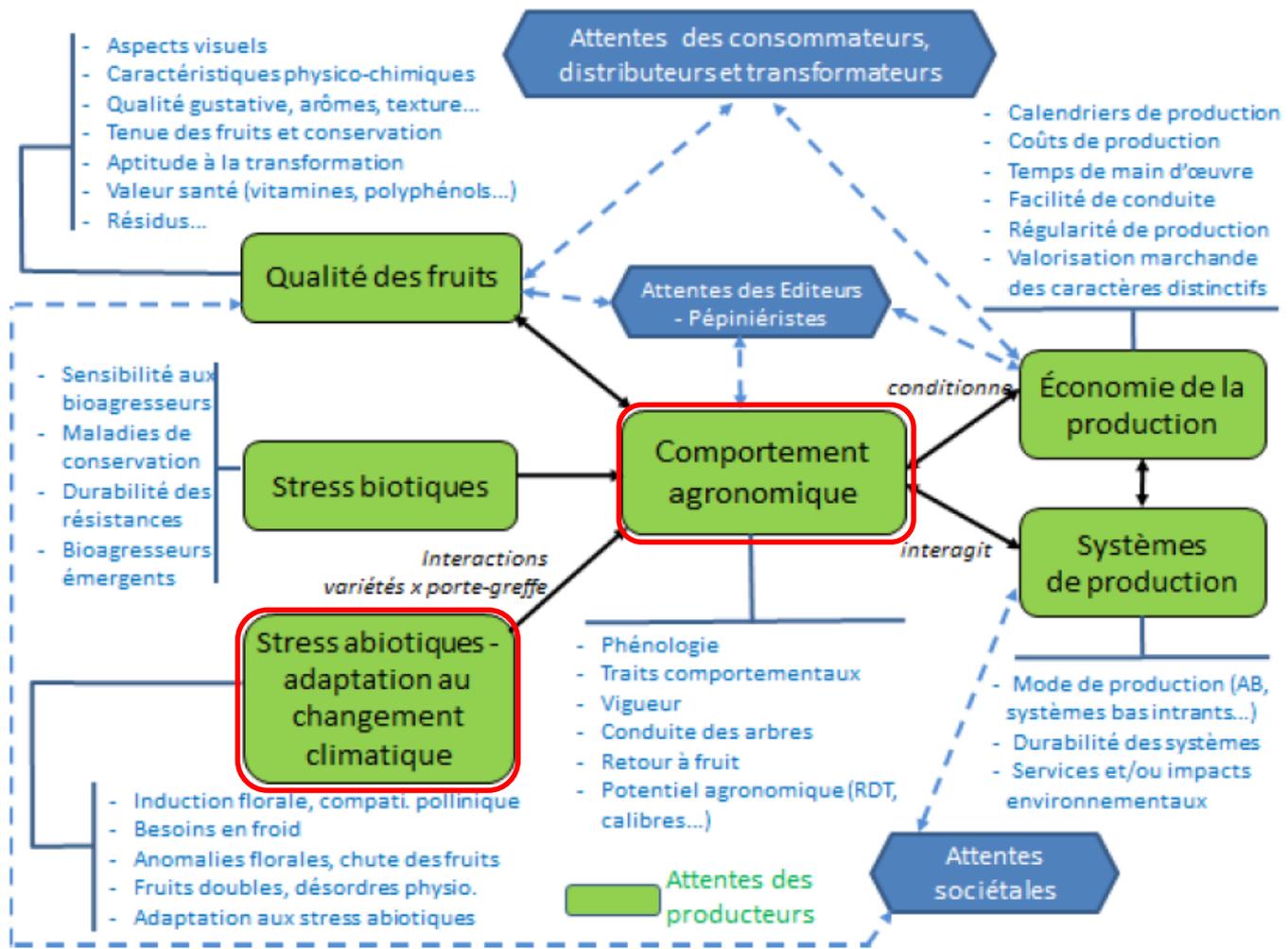


Caractéristiques à évaluer sur le matériel végétal fruitier

(rapport Medieval, GIS fruits, 2016)



14/12/2021



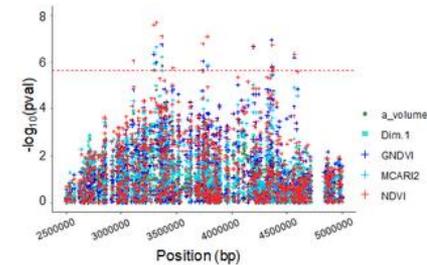
Enjeux du phénotypage au champ

- Acquérir des données à H^t débit (caractérisation & comportement)
 - Echelles : intra-arbre / individu arbre / couvert végétal,
 - Architecture, capacité d'interception lumineuse,
 - Phénologie ; intensité de floraison / nouaison ; prévision de récolte,
 - Détection des / réponses aux / stress abiotiques,
 - Détection précoce des stress biotiques
- Phénotyper sur panel variétal → appui à la sélection végétale
 - Disposer de proxies des traits morpho-physiologiques
 - Explorer la variabilité des traits (et en étudier les bases génétique)
 - Capitaliser s/connaissances → méthodes de sélection avancées (incluant NBT)

Dispositifs et Méthodes

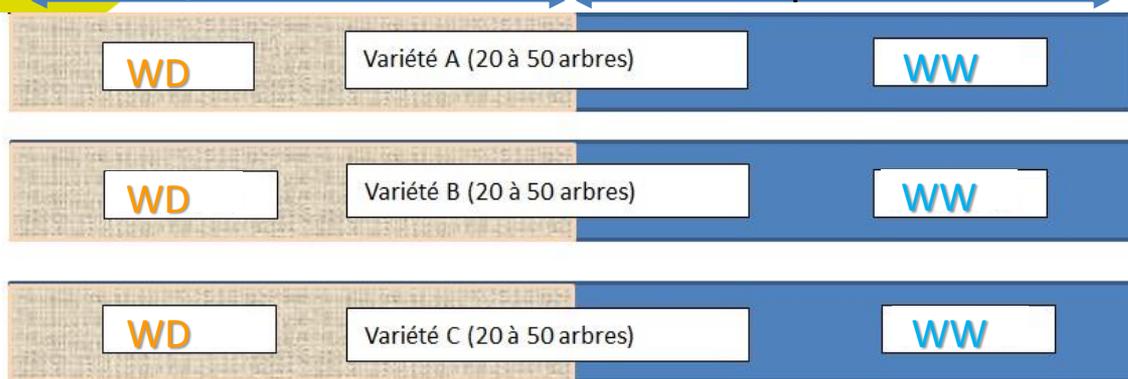
- Dispositifs expérimentaux de terrain
- Scan 3D (LiDAR terrestre)
- Imagerie multi-spectrale & IR-thermique aéroportée (drone)
- Etude de génétique d'association s/ collection (GWAS)
- Modélisation structure-fonction (p.m.)

Maquette 3D générée par MApple-T
(Costes *et al.*, 2008)



Dispositif exp. 1 : essais de comportement

Micro-asperseurs → 30L h⁻¹ ← Micro-asperseurs → 60L h⁻¹



WW : sous-parcelle bien irriguée (suivi tensiométrique) →

WD : sous-parcelle rationnée en eau (-50%, 4 semaines)



Ctifl, Bellegarde (30)
(43°45'N, 4°27'E, 54m alt.)

Essais pommier – niveau 2



Variables classiques (WW)
Croissance,
Rendement,
Sensibilités / bioagresseurs,
Qualité des fruits,
Aptitude à la conservation

Variables additionnelles (WD)
T° du feuillage (Ts) et Ts-Tair (capteur fixe + imagerie / drone)
Indices de végétation, potentiels hydriques foliaires / de tige
Croissance de la charpente, grossissement des fruits,
Composantes du rendement

Projet Aliage fruits (2014-17)



14/12/2021

Numérique et Arboriculture face aux enjeux du changement climatique

Dispositif exp. 2 : collection variétale

INRAE Mauguio : Unité expérimentale Diascope
plateforme DiaPhen (43°36'N, 3°58'E, 10m alt.)

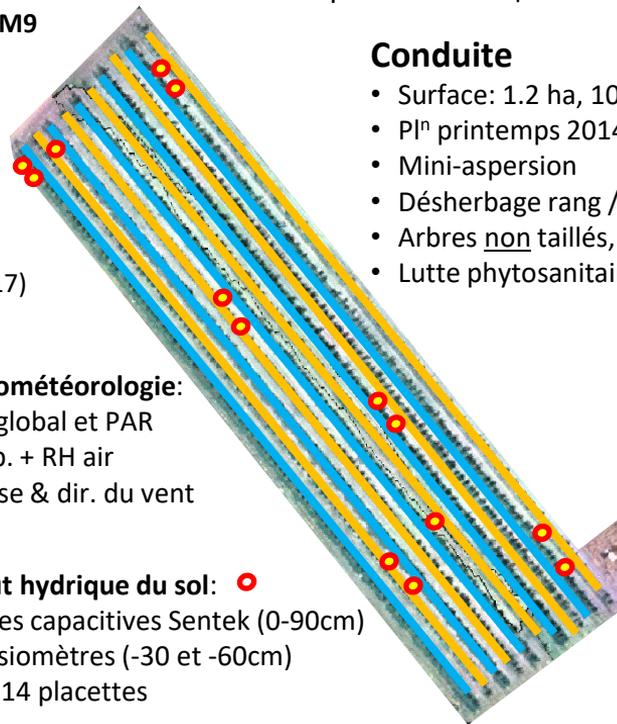
- Core-collection de 242 var. de pommes x 4 répétitions
- p.g. : M9



Climat Méditerranéen (été sec)
Sol : capacité de rétention limitée
Distances : 5x2m
Possibilité de phénotypage à l'arbre

Conduite

- Surface: 1.2 ha, 10 rangs (# 200m)
- Plⁿ printemps 2014 (8^e feuille 2021)
- Mini-aspersion
- Désherbage rang / enherb^t interrang
- Arbres non taillés, éclaircissage des fruits
- Lutte phytosanitaire (PFI)



Projets:

ApCoreStress (2016-17)
ApStress (2017-18)

Micrométéorologie:

Ray^t global et PAR
Temp. + RH air
Vitesse & dir. du vent

Statut hydrique du sol: ●

Sondes capacitives Sentek (0-90cm)
+Tensiomètres (-30 et -60cm)
pour 14 placettes

2 régimes hydriques différenciés en été

- **WW = bien irrigué (2 arbres / var.)**
- **WD = déficit hydrique (2 arbres / var.)**
- Couples d'arbres **WW / WD** en vis-à-vis

Variables mesurées

Architecture 3D / LiDAR (hiver, été)
Echanges gazeux et **proxy du t^x de photosynthèse**
Ts feuilles et **Indices de végétation**

Diversité phénotypique et génotypique



Credit photos : Magalie Delalande

Core-collection
var. fr. et européennes
(diversité allélique max.)
Lassois et al., 2016

Dispositif exp. 3 : verger de production



Climate-KIC

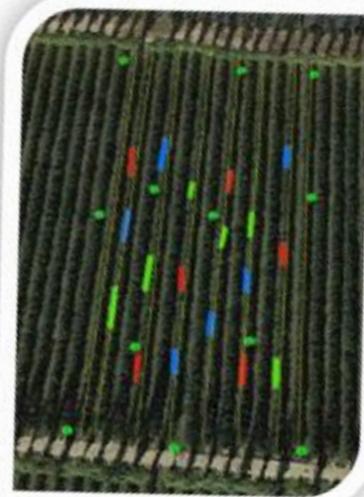


Climate-KIC is supported by the EIT, a body of the European Union

Projet  **Friendly Fruit** (2019 & 2020)
collaboration IRTA (Mas Badia)



St Pere Pescador (Cat., SP), 42°10'N, 3°05'E, 2m alt.)



6 répétitions x 7 arbres

Brookfield® Gala cv

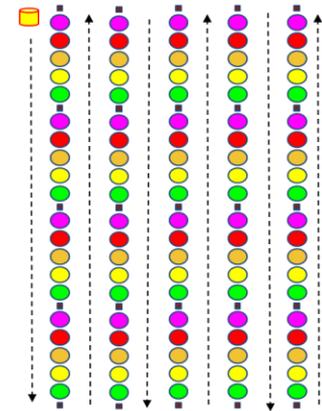
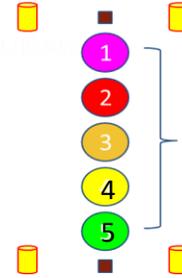


Etablissement puis repérage d'anomalies de l'irrigation

-  **WW** : bien irrigué : 4L/h/arbre
(IoT sondes capacitives et météo)
-  **OW** : excès d'irrigation (x 6)
24L/h/arbre
-  **WD** : arrêt de l'irrigation
0L/h/arbre

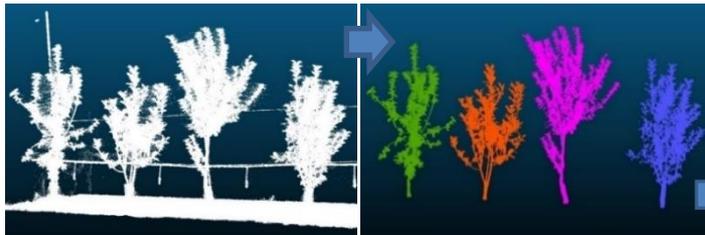
T-LiDAR scanner 3D (exp. 2)

250 scans tous les 10m entre les rangs,
 Résolution: 0.04° (6mm à 10m)
 Durée d'acquisition : 5 jours pour 1000 arbres
 Co-registation des images : RiSCAN PRO



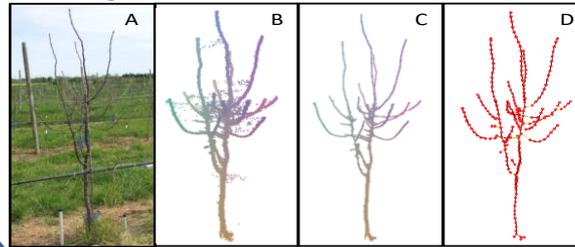
RIEGL VZ-400 T_Laser scanner (RIEGL Laser Meas^t. Systems, GmbH, Austria).

Segmentation des images (hiver et été)

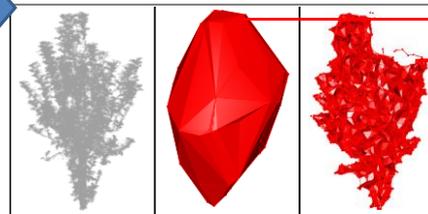


Outils PF OpenAlea (Pradal et al., 2008)

Filtrage – contraction



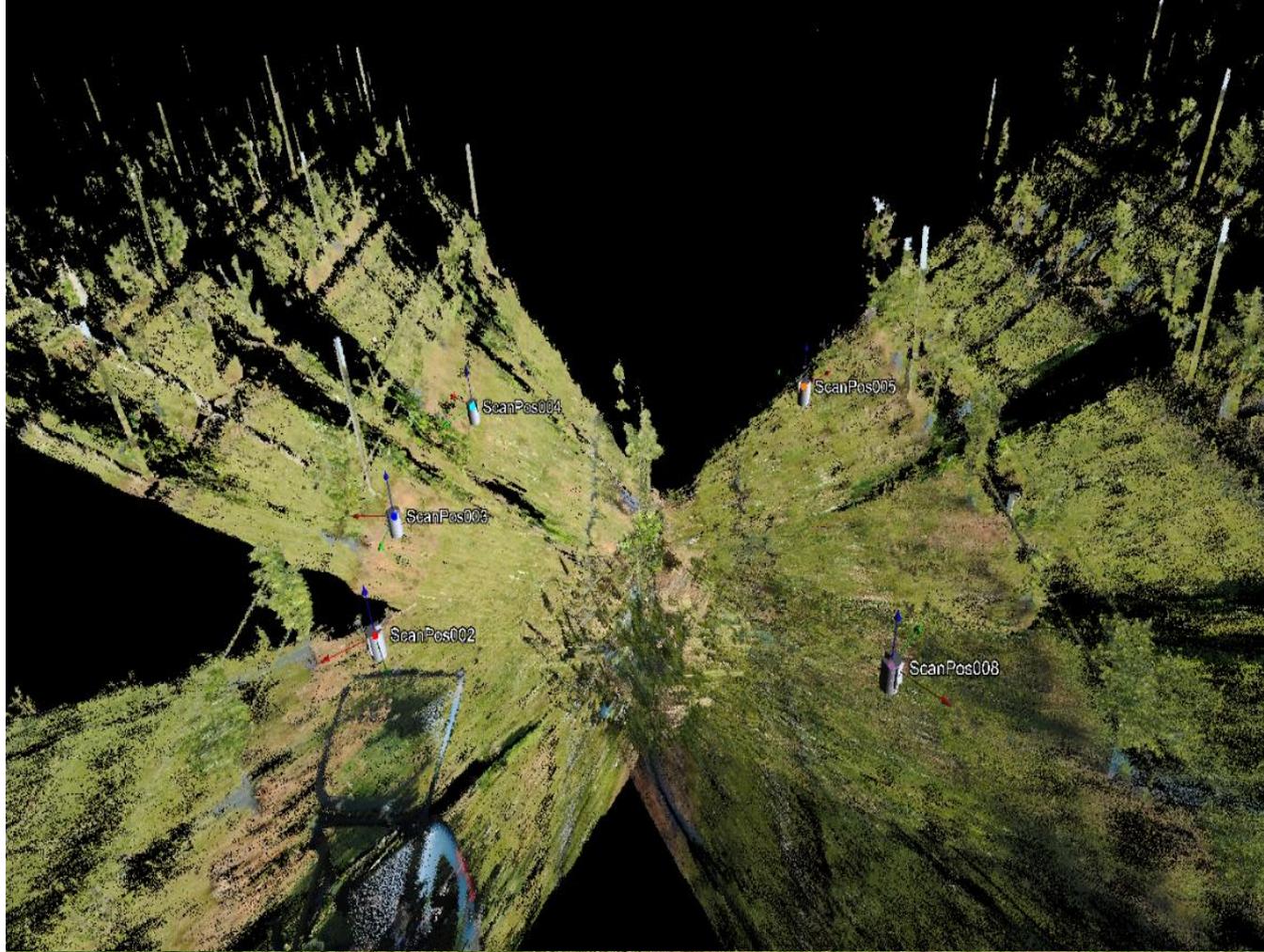
Hauteur
nb_ axes
longueur_ axes



c_volume
 a_volume } $Ci = a_vol. / c_vol.$

STAR (Silhouette to Total leaf Area Ratio)
 proxy de la capacité d'interception lumineuse

T-LiDAR (exp. 2)



Imagerie drone :

Capteurs et indices



AirPhen® 3 / HiPhen



Flir® Tau-2



Absorption (pigments)

- Chlorophylles a et b
- Caroténoïdes (Xanthophylles)
- ...
- Fluorescence chl.

Absorption (molécules)

- Eau
- Composés organiques
 - Protéines
 - Cellulose, Lignine
 - ...

Emission radiative

- T° de S. du feuillage, (corr. émissivité)

Indices de Végétation (VI) & de Stress	Caract. biologiques	Bandes du spectre							Références	
		450 nm	532 nm	568 nm	675 nm	730 nm	750 nm	850 nm		7.5-14μm
Biomasse ←	NDVI Green Area Index (GAI)				X			X		<i>Rouse et al., 1974</i>
+ chlorophylles ←	GNDVI GAI (+ chlorophyll)			X				X		<i>Gitelson et al., 1996</i>
	MCARI GAI		X		X	X				<i>Daughtry et al., 2000</i>
Ray ^t intercepté ←	MCARI_2 GAI (-chl.), LAI and FIPAR		X		X			X		<i>Haboudane et al., 2004</i>
Pigments ←	PRI cycle Xanthoph., eff. PSII		X	X						<i>Gamon et al., 1992</i>
Régul ^o stomatique ←	Ts-Ta; WDI Water stress				X			X	X	<i>Maes & Steppe, 2012; Moran et al., 1994</i>

Vecteur et traitement d'images

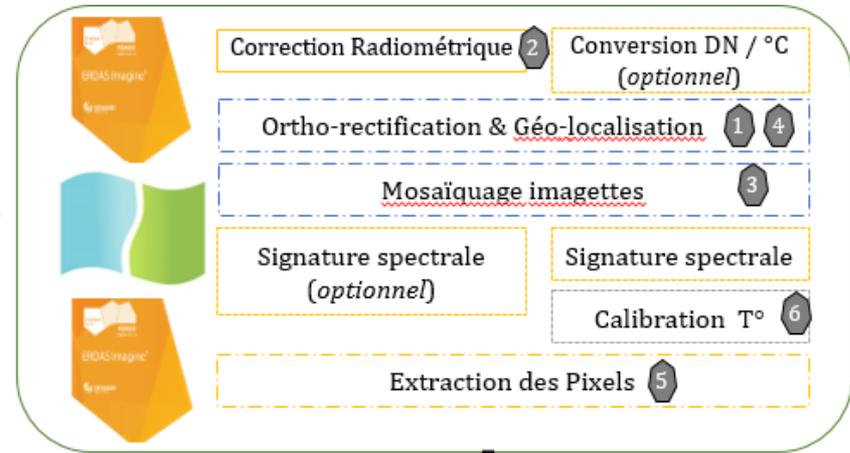


Hexacoptère
 Vol à 50m (exp.1 & 3) ou 25m (exp. 2);
 Journée sans nuages & sans vent
 (survol verger en 1 à 3 élévations, selon S.)

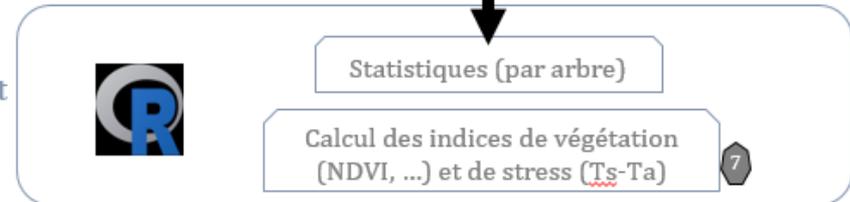


Crédit photos : Magalie Delalande

Pré-traitement



Traitement



Chaîne de traitement manuelle (Delalande et al., 2020)

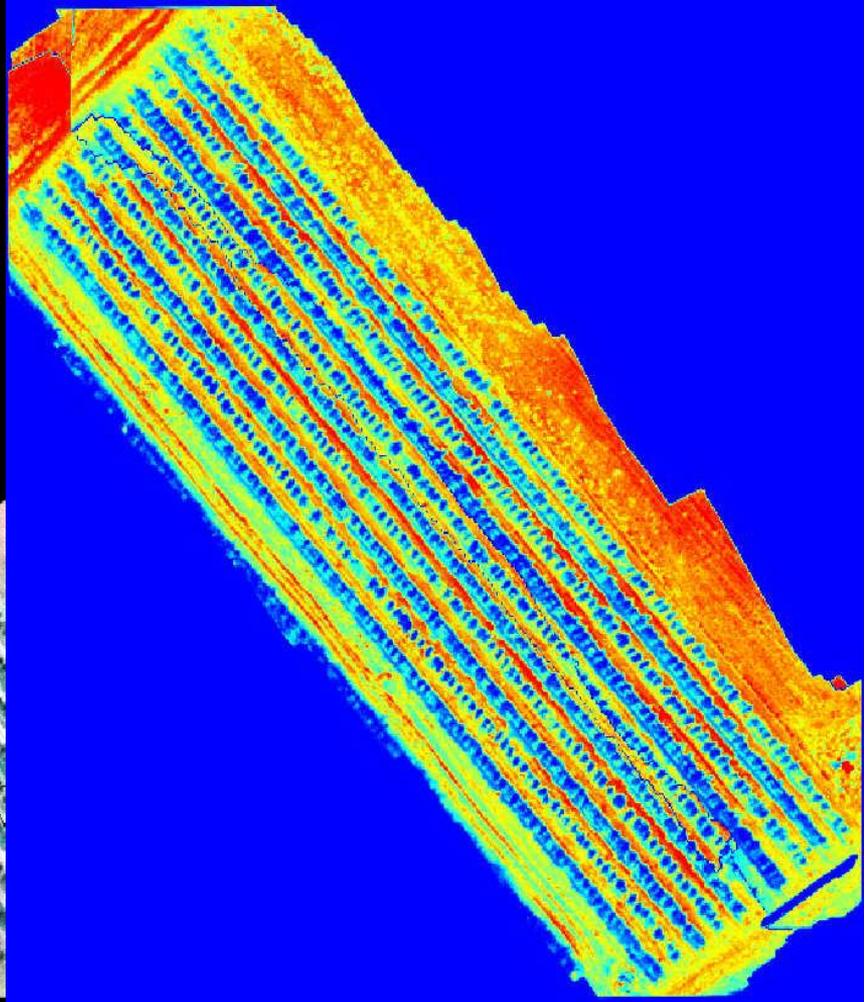
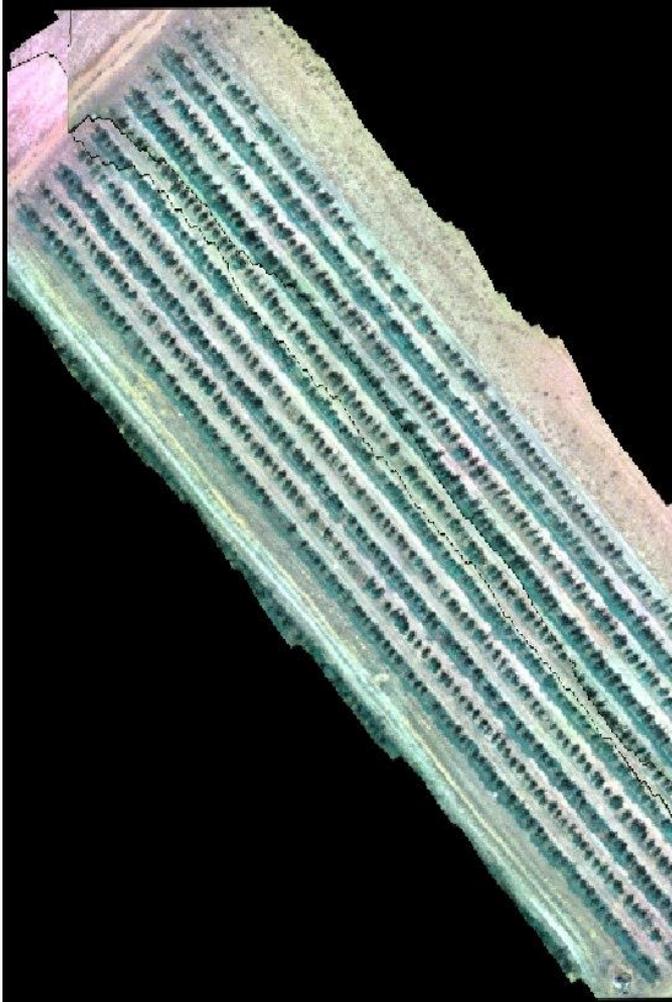
Cohérence données d'imagerie vs. mesures *in planta*
 (Virlet et al., 2014 ; Coupel-Ledru et al., 2019)

Données d'entrée

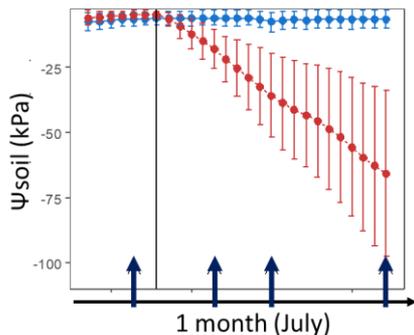
- 1 Caractéristiques des caméras
- 2 Cibles radiométriques
- 3 Modèle d'élévation numérique
- 4 Coordonnées des balises au sol
- 5 Coordonnées base des arbres
- 6 Cibles thermiques
- 7 Données micro-météo

Résultats

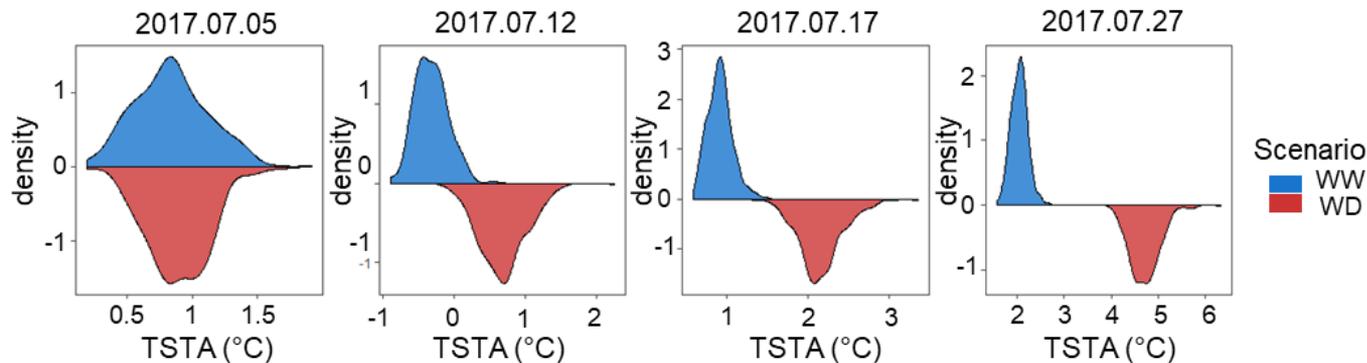
Exp. 2
Carto en
RGB et TIR
(fausses
couleurs)
© INRAE



Etablis^t de régimes hydriques différenciés (exp. 2, juil. 2017)



Déficit hydrique progressif
(pour arbres **WD**)



TSTA : $T_{\text{surf.}} - T_{\text{air}}$

Resp.TSTA : différentiel de T° **WD**-**WW**

Coupel-Ledru *et al.*, in press

Traitement automatisé en *progrès* (exp. 3)



1- Image acquisition



Image acquisition:
20-25 min

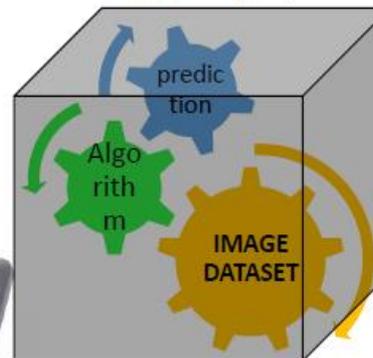
2-Inputs : as few as possible



Transfert images to laptop:
5-10 min

Total 30 – 55min / ha

A.I. package wrapped
into the laptop



3-Process:

as fast as possible

4-Ouputs:

as precise as possible

Run AI and get prediction
mapping : 10 -20 min

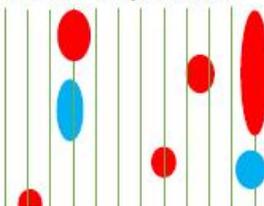


Image de fuite
(OW)

Image de
bouchage (WD)

Deep learning

(Réseaux de neurones
CNN s/ data MS+TIR
ou CNN-VGG16 s/TIR)



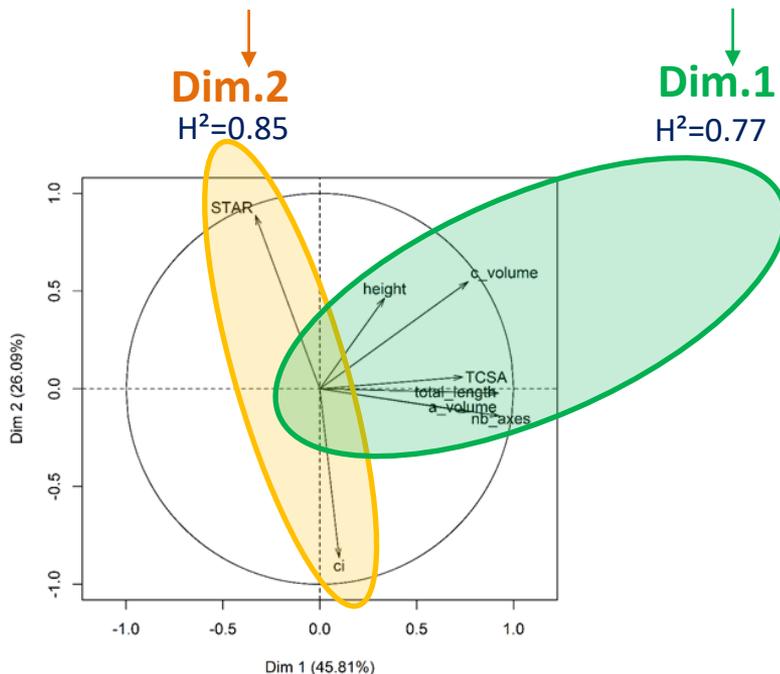
Précision 73%
Rappel 80%
F1 score 80%

Delalande et al., 2021, ISWEE Conf.

Variabilité Architecture & Interception ray^t (exp. 2)

Faibles corrélations entre **efficience d'interception** & **caractères d'architecture**

→ Classification



Coupel-Ledru et al., in press

Group 1
(n=57)



Group 2
(n=60)



Group 5
(n=40)



Group 6
(n=26)

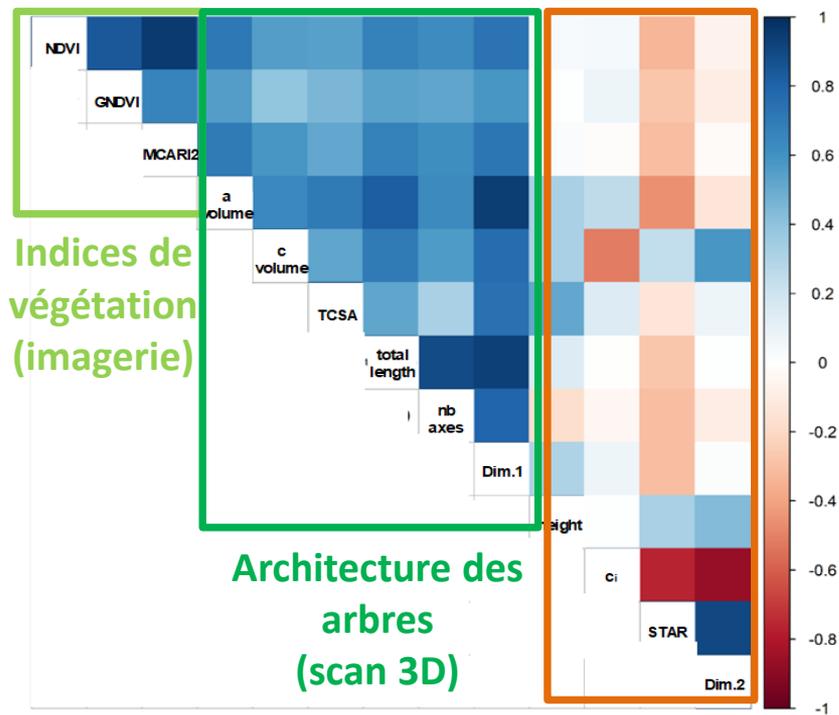


Dimensions couronne, **c_volume**

STAR (arbres en non taille)

Coupel-Ledru et al., 2019

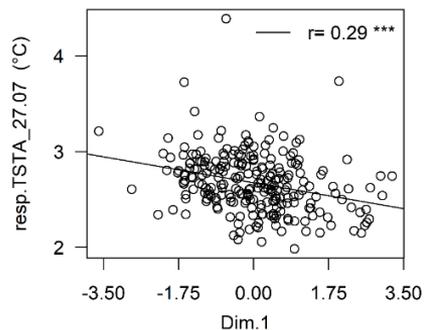
Variabilité architecture / interception ray^t (exp. 2)



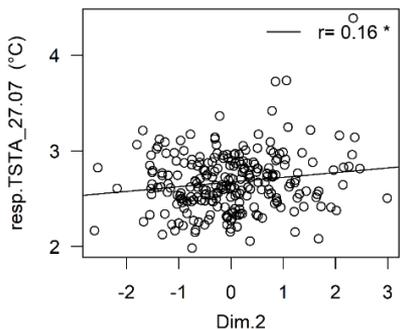
Efficiency d'interception
lumineuse

Coupel-Ledru et al., in press

Réponse au stress vs. architecture



Faible corrélation Architecture (Dim. 1) et Réponse au déficit hydrique (resp.TSTA)



Très faible corrélation Interception lumineuse (Dim. 2) et Réponse au déficit hydrique (resp.TSTA)

Confirmation par l'étude génétique / génomique

Coupel-Ledru *et al.*, in press

Trois groupes de caractères relativement indépendants

Applications potentielles (CT / MT)

- Phénologie florale
- Intensité de floraison / nouaison → *appui à l'éclaircissage*
- Repérage et dénombrement des fruits → *prévision de récolte*

- Détection précoce des stress abiotiques + cartographie associée
- *Stress biotiques : proxidétection (cf. Belal Gaci, hyperspectral ?)*

Applications potentielles (MT & LT)

- Suivi feuillaison : sénescence automne → modèles de phénologie printanière
- Adaptation régionale des nouvelles variétés
- Exploration des ressources génétiques
 - Repérage de variétés à la fois performantes et « plastiques » vs. environnement
- Prebreeding → partenariat public / privé:
 - Génotypes parentaux portant ces traits d'intérêt
 - Sélection créatrice à-venir

Crédits

Coupel-Ledru A.

Pallas B.



Projets support

ApCoreStress



ApStress



Aliage Fruits



14/12/2021

Numérique et Arboriculture face aux enjeux du changement climatique

Merci !



Population de variétés de pommiers INRAE Mauguio © J.L. Regnard

UE INRAE Diascope: Martinez S., Feral S., Rolland B., Meunier F.

Et nombreux stagiaires « imagerie / IA » (co-encadr^t G. Beurier)

Principales réf. biblio.

- Boudon *et al.*, 2014. *Ann. Bot.* [Doi:10.1093/aob/mcu062](https://doi.org/10.1093/aob/mcu062)
- Costes *et al.*, 2008. *Funct. Plant Biol.* [Doi:10.1071/FP08081](https://doi.org/10.1071/FP08081)
- Coupel-Ledru *et al.*, 2019 *Hort. Res.* [Doi:10.1038/s41438-019-0137-3](https://doi.org/10.1038/s41438-019-0137-3)
- Coupel-Ledu *et al.*, in press. *New Phytol.*
- Delalande *et al.*, 2020. *Acta Hort.* [Doi: 10.17660/ActaHortic.2020.1279.35](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1279.35)
- Delalande *et al.*, 2021. *2nd Int. Symp. Water, Ecol. Environ. (ISWEE 2021)*
- Lassois *et al.*, 2016. *Plant Mol. Biol. Rep.* [Doi:10.1007/s11105-015-0966-7](https://doi.org/10.1007/s11105-015-0966-7)
- Pallas *et al.*, 2020. *Acta Hort.* [Doi:10.17660/ActaHortic.2020.1281.82](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1281.82)
- Pradal *et al.*, 2008. *Funct. Plant Biol.* [Doi:10.1071/FP08084](https://doi.org/10.1071/FP08084)
- Virlet *et al.*, 2014. *J. Exp. Bot.* [Doi:10.1093/jxb/eru309](https://doi.org/10.1093/jxb/eru309)