



HAL
open science

Contribution de l'imagerie multispectrale et infrarouge thermique aéroportée à l'étude de l'effet de la contrainte hydrique sur plusieurs variétés de pommier

Samuel Vincourt

► To cite this version:

Samuel Vincourt. Contribution de l'imagerie multispectrale et infrarouge thermique aéroportée à l'étude de l'effet de la contrainte hydrique sur plusieurs variétés de pommier. *Biologie végétale*. 2016. hal-02799978

HAL Id: hal-02799978

<https://hal.inrae.fr/hal-02799978>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire Master 2

**Téledétection et Technique Spatiale
-Méthodes physiques en télédétection-**

Samuel Vincourt

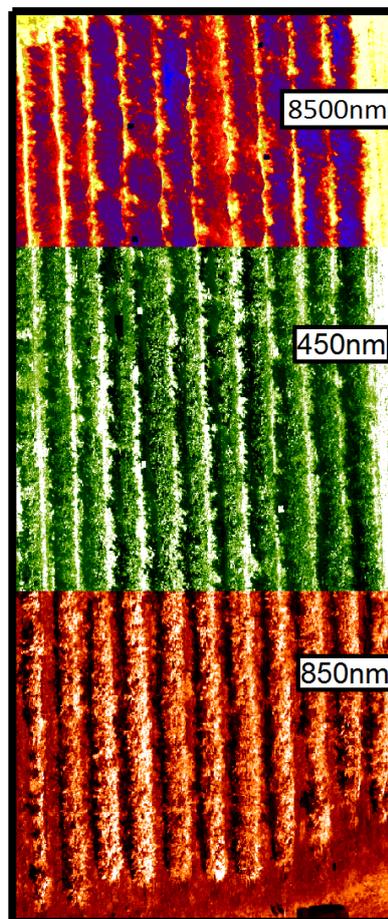
Mars-Juin 2016

Université Paris Diderot-Paris 7

Stage encadré par : Magalie Delalande et Jean-Luc Regnard

Unité d'accueil : UMR AGAP Equipe AFEF (INRA-Montpellier SupAgro)

Contribution de l'imagerie multispectrale et infrarouge thermique aéroportée à l'étude de l'effet de la contrainte hydrique sur plusieurs variétés de pommier



Remerciements

En premier lieu je remercie Jean-Luc Regnard, Magalie Delalande et David Gómez-Candón pour l'aide et le suivi de mon travail au sein de l'équipe AFEF, que je remercie également de m'avoir intégré dans ce milieu de travail.

Je remercie le GIS Fruits pour le soutien à la mise en place du projet étudié.

Je remercie également Stéphane Jacquemoud pour la confiance et le temps qu'il m'a accordés pendant ces années de master.

Je remercie mes deux parents pour leurs conseils et leur soutien avant, après et pendant la production de ce travail.

Enfin, je remercie mes collègues de stage : Olivier, Victor, Rémi et Chloé, je remercie Nuit Debout, DrFeelGood, et tous ceux qui font nos nuits plus claires.

Abréviations

ACP : Analyse en composantes principales

ANOVA : Analyse de la variance

CEHM : Centre Expérimental Horticole de Marsillargues

ETM : Evapotranspiration maximale

ETR : Evapotranspiration réelle

FWHM : largeur à mi-hauteur / full width at half maximum

GNDVI : Green NDVI

MPa : méga pascal

NDVI : normalized difference vegetation index

NIR : proche infrarouge / near infrared : domaine spectral compris entre 780 à 2500nm

PAR : rayonnement photosynthétiquement actif / photosynthetically active radiation

PRI : Photochemical Reflectance Index

RedEdge : domaine spectral entre 680 et 750nm, séparant le visible (VIS) du proche infra-rouge (NIR)

RGB : Rouge – Vert – Bleu / Red – Green – Blue (cf. VIS)

Ta : Température de l'air (°C)

TIR : infrarouge thermique / thermal infrared (mesure couramment entre 8000-13500nm)

Ts : Température de surface du couvert (°C)

UTC : Temps universel coordonné / Universal Time Coordinated

VIS : domaine spectral du visible (400-700nm)

VPD : déficit de pression de vapeur / vapour pressure deficit

Sommaire

Introduction.....	7
Synthèse bibliographique.....	8
Réponse du pommier à la sécheresse.....	8
Phénotypage des caractères quantitatifs.....	9
Application de la télédétection aux couverts végétaux.....	10
Avantages et inconvénients de la télédétection aéroportée.....	11
Objectifs de l'étude.....	12
Matériel et méthodes.....	13
Site d'étude.....	13
Géométrie du verger et répartition des pommiers.....	13
Météorologie.....	14
Acquisition des images par drones.....	15
Orthorectification, géoréférencement et mosaïquage.....	16
Extraction des données de température.....	16
Radiance et réflectance.....	17
Extraction des données spectrales.....	17
Potentiel hydrique de tige.....	18
Analyses statistiques.....	18
Résultats.....	19
Comparaison des températures de couvert (Jours 1-4).....	19
Températures du J4 (28/07/2015, 10h UTC) :.....	21
Evolution du potentiel hydrique de tige.....	21
Spectres obtenus.....	22
Indices de végétation.....	22
Analyses statistiques.....	24
Discussion générale.....	32
Conclusion.....	34
Références bibliographiques.....	35
Annexes.....	37

Introduction

Dans le contexte du réchauffement climatique actuel et futur, l'étude de ses effets mobilise les efforts de recherche puisque la sélection de variétés cultivées tolérantes à une augmentation de la température moyenne est un enjeu crucial pour l'agriculture. De plus, pour de nombreuses zones agricoles, la capacité des productions végétales à atteindre et maintenir des rendements satisfaisants repose sur la satisfaction de leurs besoins en eau, qui peuvent s'accroître du fait de ce réchauffement, dans un contexte de diminution tendancielle des précipitations.

Dans le cadre de la sélection végétale, l'accès depuis une dizaine d'années à des méthodes de séquençage du génome de plus en plus rapides et de moins en moins chères, génératrices de « big data », a fait apparaître un besoin de méthodes de mesures phénotypiques de même débit. Ces méthodes sont nécessaires pour la sélection de variétés plus performantes ou résilientes en situation de contrainte. En aval du processus de sélection, par ailleurs, les variétés nouvelles qui sont proposées aux agriculteurs nécessitent une évaluation au cadre local de contraintes abiotiques ; c'est le cas pour les arbres fruitiers.

Quel que soit le stade où intervient le phénotypage, une partie des méthodes utilisées reposent sur l'imagerie, qui est une méthode non invasive en plein développement. Les méthodes d'imagerie satellitaire et l'apparition des capteurs hyperspectraux, dont la résolution spatiale maximale est de l'ordre du mètre, permettent depuis environ trente ans le monitoring à grande échelle de parcelles agricoles, mais ces méthodes ne permettent pas toujours d'obtenir des résolutions satisfaisantes pour l'agriculture de précision. Ainsi, la démocratisation de la télédétection par imagerie aérienne basse altitude (par ULM puis par drone) permet actuellement l'apparition de méthodes de « phénotypage à haut débit » compatibles avec l'étude d'entités de l'ordre du m².

Nous essayerons dans ce travail d'appliquer ces méthodes à un panel de 5 génotypes de pommiers soumis ou non à des conditions de stress hydrique estival. Notre étude s'insère dans le cadre d'un projet Casdar « Aliage-fruits » piloté par l'équipe d'accueil, qui a consisté à exploiter les réponses spectrales de pommiers observés en 2015 dans le visible (VIS), le proche infrarouge (NIR) et l'infrarouge thermique (TIR). Par l'étude de ces différentes bandes spectrales, la construction d'indices de végétation (NDVI, GNDVI, PRI) et la mesure de la température du feuillage, nous souhaitons pouvoir caractériser les réponses chlorophylliennes, morphologiques et physiologiques des arbres étudiés en réponse à un scénario de contrainte abiotique.

Synthèse bibliographique

Réponse du pommier à la sécheresse

L'espèce étudiée est le pommier (*Malus domestica* Borkh) qui appartient à la famille des Rosacées. Son origine géographique est l'Asie mineure et centrale (Cornille et al., 2012). Le régime de photosynthèse du pommier est de type « C3 ». Ce régime photosynthétique est caractérisé par la fixation diurne du CO₂ atmosphérique tandis que survient une perte d'eau par transpiration. Cette perte d'eau pouvant être critique pour la plante, sa régulation s'opère par la fermeture ou l'ouverture des stomates (petits orifices présents dans l'épiderme inférieur des feuilles). Chez le pommier, Bassett (2013) a détecté une variabilité de la réponse à la contrainte hydrique dans l'espèce fondatrice sauvage *Malus sieversii*, pouvant aller jusqu'à l'adaptation xérophytique. Dans les espèces agricoles cultivées, l'adaptabilité des génotypes à des conditions de sécheresse est critique pour leur utilisation, et l'on peut sélectionner les variétés selon des critères de rendement (production de fruits par individu ou par hectare) mais aussi d'efficacité d'utilisation de l'eau transpirée (production de fruits par volume d'eau utilisée). L'équipe d'accueil (UMR AGAP équipe Afef) bénéficie d'une expertise dans l'étude de la variabilité génotypique du pommier vis-à-vis de ces caractères : morphologie et efficacité d'utilisation de l'eau (Lopez et al., 2015), architecture hydraulique (Lauri et al., 2011; in press), régulation stomatique (Regnard et al., 2009).

La réponse à la contrainte hydrique peut résulter de la réaction au déficit de pression de vapeur atmosphérique qui génère la demande évaporative au niveau des feuilles (Lakso 1994 ; Jones, 2014) et de la réaction de l'arbre au déficit d'eau dans le sol (Šircelj et al., 2007). Cette dernière réponse peut être caractérisée par des réponses graduelles : on parlera de déficit hydrique lorsque l'eau disponible du sol ne permet pas à la plante de répondre à la demande évaporative. Dans ce cas, la transpiration réelle sera inférieure à l'évapotranspiration maximale ($ETR < ETM$). On parlera de contrainte hydrique lorsque le fonctionnement de la plante est affecté de manière réversible, avec limitation des échanges gazeux et donc du bon fonctionnement de la plante. On parlera enfin de stress hydrique lorsque la contrainte s'intensifie et que le métabolisme de la plante est modifié de manière importante, avec des réactions de protection comme l'ajustement osmotique (Tardieu, 2005). Au plan de la sécurité hydraulique, il faut souligner que la structure vasculaire de la plante peut présenter une vulnérabilité (Delzon et Cochard, 2014), l'intégrité du continuum sol plante atmosphère n'étant protégé par la fermeture stomatique que dans une certaine mesure. Tardieu et Simonneau (1998) décrivent deux extrêmes dans le comportement de la plante en situation de contrainte hydrique. Soit la plante privilégie l'économie de l'eau et l'intégrité du fonctionnement vasculaire, et on peut observer une situation d'isohydrie marquée par une certaine stabilité du statut hydrique (pas de chute importante du potentiel hydrique diurne) ; la régulation stomatique limite dans ce cas l'assimilation du CO₂ et donc la production de biomasse. A l'opposé, la plante peut privilégier l'acquisition du carbone par la photosynthèse, et garder ses stomates ouverts de manière durable, même sous contrainte hydrique. Dans ce cas, la plante s'expose à une perte d'eau importante, et ceci provoque une chute marquée du potentiel hydrique diurne ; on parle alors d'anisohydrie. Si la situation perdure la plante peut mourir (McDowell et al., 2008).

La fermeture stomatique créée par la situation de stress hydrique génère une augmentation de la température du couvert en limitant fortement le processus d'évapotranspiration ; en effet, elle

réduit le flux de chaleur latente de vaporisation entre la végétation et l'air, ce qui modifie le bilan d'énergie et contribue à réchauffer le végétal. Afin de surveiller ce comportement, la variable qui nous intéresse dans le cadre des réactions de l'arbre est la différence entre la température du couvert (notée T_s) et la température de l'air (notée T_a), parfois appelée « dépression de la température de la canopée » (CTD « canopy temperature depression » ; par ex. Karimizadeh et Mohammadi, 2011).

D'une manière générale, il est intéressant de considérer la production agricole dans ses réactions vis-à-vis des situations de contrainte hydrique, à la fois du point de vue du choix des espèces et des variétés, mais également en considérant les différents scénarios de contrainte qui peuvent survenir (plus ou moins intenses, ou durables, selon les climats et l'accès la ressource en eau). De ce point de vue les arbres fruitiers sont a priori dans une situation préservée, car la recherche de rendements élevés et réguliers amène les producteurs à cultiver sous irrigation, notamment en zone méditerranéenne ; néanmoins, même avec l'apport de l'irrigation, on ne peut pas sous-estimer l'importance des effets du changement climatique (contraintes thermiques, sécheresse de l'air, notamment en zone méditerranéenne : cf. Giorgi et Lionello, 2008) ou des aléas de déficit de la ressource, ou encore de pannes du réseau d'irrigation (Regnard, comm. pers.). Ainsi, il est économiquement important de se préoccuper de la réponse des variétés à la contrainte hydrique.

Nous considérerons ici des arbres placés dans une situation plausible de déficit hydrique estival. Notre étude porte donc sur l'effet d'une contrainte hydrique n'ayant pas affecté le développement printanier de la plante, et notamment la croissance de ses rameaux et de son feuillage. Les symptômes étudiés sont ceux d'une réponse à relativement court terme de la part de la plante, en réponse à une suspension estivale des apports en eau pendant une durée d'environ un mois. La question posée est de caractériser le comportement de transpiration dans ce contexte de limitation temporaire.

Phénotypage des caractères quantitatifs

La génétique quantitative est l'étude de l'influence des gènes sur des caractères mesurables. Cette approche s'applique notamment à l'étude de la réponse des plantes aux stress hydriques. On appelle phénotypage la mesure de ce caractère. Elle est à la fois gouvernée par le génotype de l'individu et son interaction avec ses conditions environnementales. L'environnement sera ici pris au sens large, depuis les conditions climatiques jusqu'au pratiques culturales.

Pour chaque variable étudiée, on peut modéliser au premier ordre le phénotype selon la relation suivante :

$$P_{ijkl} = \mu + G_i + E_j + (G^*E)_k + \epsilon_{ijkl}$$

Où P_{ijkl} est la valeur phénotypique expérimentale de la variable d'intérêt pour la répétition l du génotype i dans l'environnement j , μ sa valeur moyenne pour la population observée, G_i la part de variation phénotypique due au génotype i , E_j la part de variation due à l'environnement j , et $(G^*E)_k$ l'interaction éventuelle de ces facteurs. L'effet résiduel est noté ϵ_{ijkl} .

Si le but à long terme est l'analyse de la réponse de chaque génotype, nous nous focaliserons dans le cadre de cette étude sur la détection des différences phénotypiques et leur attribution à un caractère par télédétection.

Application de la télédétection aux couverts végétaux.

Les couverts végétaux présentent un spectre caractéristique de réflectance, en raison de la réponse chlorophyllienne dans les domaines du visible et du proche infrarouge. En effet, on a depuis longtemps caractérisé les bandes d'absorption des différents pigments du feuillage (chlorophylles a et b, caroténoïdes) et le phénomène de « red edge ».

La bande qualifiée de red edge correspond à une portion du proche infrarouge (680-750nm) pour laquelle on observe un rapide changement de réflectance des molécules (elle passe d'environ 5% à 680nm à 50% à 730nm). Le red edge est ainsi utilisé dans la construction de nombreux indices de végétation car sa valeur est caractéristique de la quantité de surface végétale et/ou de son activité.

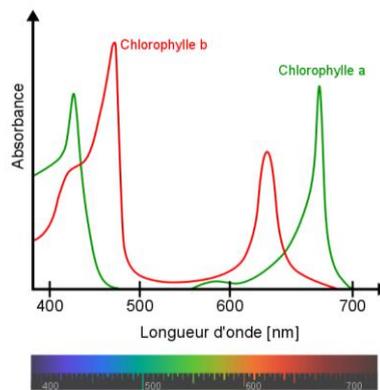


Figure 1: Absorbance des chlorophylles a et b dans le spectre visible (Source: Wikipedia)

Les couverts végétaux sont des structures géométriquement complexes, et des modèles de transfert radiatif ou de rayonnement comme PROSPECT (Jacquemoud & Baret, 1990) ont été développés afin de modéliser le rôle de ces structures sur le rayonnement réfléchi. L'association de ces modèles et des résultats des mesures en proxidtection permettent le calcul d'indices de végétation afin d'évaluer l'impact des différents facteurs sur les spectres.

L'étude des surfaces terrestres par télédétection est construite autour de ces indices spectraux, calculés par combinaison de la réflectance dans différentes bandes spectrales, qui sont supposés évoluer en corrélation avec un élément particulier de la surface étudiée. Il en existe un grand nombre, particulièrement dans le domaine des surfaces végétales, leurs définitions pouvant varier selon les publications et les caractéristiques de la surface étudiée.

En nous inspirant de publications récentes de télédétection (par exemple Zarco-Tejada et al., 2005), nous avons choisi de calculer 3 indices de végétation pour les pommiers étudiés (Tab. 1) : Le premier indice est le plus usuel, il s'agit du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Rouse et al., 1973). Le NDVI est construit par la mesure de différence de réflectance dans le proche infrarouge et le rouge, avec l'équation
$$\text{NDVI} = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

Le NDVI réagit à la structure du couvert (Horler et al., 1983) et aux très faibles concentrations en chlorophylle (Vogelmann, 1993), mais il se montre souvent assez peu adapté à la détection de stress particuliers (ici la sécheresse).

Il a été montré que pour réaliser un suivi de l'évolution de la concentration en chlorophylle des cellules du mésophylle foliaire, suivant l'hypothèse de leur dégradation en conditions de stress, le calcul d'un second index était possible : dans cet objectif le « Green NDVI » est adapté car il est fortement corrélé avec la concentration en chlorophylle (Gitelson et al., 1996). Il est calculé par la combinaison des réflectances mesurées dans l'infrarouge et le vert $GNDVI = \frac{(NIR-V)}{(NIR+V)}$

Nous étudierons également l'indice PRI (Photochemical Reflectance Index ; Gamon et al., 1992) afin de tenter de suivre la variation des pigments du cycle des xanthophylles. Il a été montré que le PRI était un bon prédicteur de l'efficacité photosynthétique, et de la RUE « Radiation Use Efficiency » (Nichol et al., 2006). La réflectance à 531nm étant fonctionnellement liée à une réaction du cycle des xanthophylles, le PRI a été défini par le rapport : $PRI = \frac{(R532-R570)}{(R532+R570)}$ à l'échelle de la feuille (Gamon et al., 1992 ; Inoue & Peñuelas, 2006). Le fait que les pigments du cycle des xanthophylles modulent la distribution d'énergie au centre de la réaction photosynthétique, ils sont un bon indicateur du stress.

Les mesures du PRI comparent donc la réflectance des deux côtés du « creux » d'absorbance verte (« green edge », cf. Fig. 1 sur le spectre d'absorption des chlorophylles), ce qui rend cet indice sensible aux changements du ratio chlorophylle/caroténoïdes en réponse au stress et/ou à la sénescence. Néanmoins, il est possible que de nombreux facteurs, notamment la structure de la canopée, jouent sur ce signal. Ainsi d'après Garbulsky et al. (2011), les valeurs de PRI pour des mesures sur la canopée varient entre -0.12 et +0.01 alors qu'elles varient entre -0.10 et +0.15 pour des feuilles isolées.

Tableau 1: Définition des différents Indices de végétation utilisés dans le cadre de cette étude

	Bandes utilisées	Variable biologique
NDVI	850nm (Proche Infrarouge); 676nm(Rouge)	Structure du couvert
PRI	568nm, 532nm (Vert)	Cycle des xanthophylles ; Ratio chlorophylles/caroténoïdes ; Efficience photosynthétique.
GNDVI	850nm (Proche Infrarouge); 568nm (Vert)	Teneur en Chlorophylles
Température	Infrarouge thermique. (8000-13500 nm)	Fermeture des stomates

Avantages et inconvénients de la télédétection aéroportée

En télédétection, ce qui détermine l'application appropriée d'une méthode sur une autre est l'interaction entre la précision des différentes résolutions et l'application que l'on veut en faire. La

téledétection compte trois types de résolution : une résolution spatiale, qui correspond à la surface couverte par un pixel, une résolution spectrale, qui correspond au nombre et à la largeur des bandes spectrales étudiées, et une résolution temporelle qui va correspondre à la fréquence des mesures (périodicité de l'orbite d'un satellite, nombre de jours entre des mesures successives pour un drone).

Dans le cadre de cette étude, nous désirions accéder à une grande résolution spatiale, afin de pouvoir isoler les arbres individuellement (par rapport au sol et à leur voisin) et séparer le feuillage à l'ombre du feuillage ensoleillé. Les capteurs aéroportés nous permettent d'accéder à une résolution comprise entre 4 cm² (visible) et 100 cm² (thermique), ce qui est bien plus adapté que les capteurs embarqués par satellite (de 1 à 60 m² environ). Dans le cadre de notre étude, la plus grande couverture spatiale des capteurs satellites (2000 km² pour MODIS par exemple) ne présenterait aucun intérêt.

Nous désirons également nous appuyer une résolution spectrale fine afin d'observer des dynamiques de faible amplitude et très localisées dans le spectre, comme dans red-edge ou le green-edge.

Enfin, la télédétection par drone a été privilégiée pour notre étude du fait de ses avantages temporels : en effet, l'utilisation du drone offre une souplesse qui permet des prises de mesures fréquentes à heure solaire constante (ce qui n'est le cas que des satellites héliosynchrones), au prix de l'utilisation de télépilotes qualifiés (ce qui peut être un handicap dans la pratique). Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons surtout aux modifications morphologiques et fonctionnelles de l'arbre soumis à un stress à moyen terme, et des mesures quotidiennes n'étaient pas nécessaires.

Pour l'obtention de valeurs de réflectance au sommet de la canopée (TOC : « Top of canopy »), il nous faut corriger les effets atmosphériques. Les capteurs satellitaires sont calibrés en permanence par des sources de référence, mais un capteur aéroporté nécessite des méthodes de calibration relatives, sur des cibles invariantes. Cela permet de nous affranchir des problèmes atmosphériques ou d'éclairement solaire dans le visible et le proche infrarouge.

Objectif de l'étude

L'objectif de ce travail est d'observer les réponses de différentes variétés de pommier soumises à un stress hydrique estival temporaire par l'intermédiaire d'images multispectrales obtenues par drone. Ce phénotypage doit permettre d'appréhender les réponses des arbres aux stress, et de mieux orienter le choix variétal des arboriculteurs.

Le traitement des données se focalisera sur les différences spectrales obtenues entre les différents individus de la parcelle étudiée, selon les variétés et les traitements hydriques. Pour ce faire, l'utilisation d'indices spectraux de végétation est nécessaire, et nous testerons les indices réagissant à ce type de stress.

Afin de tester la robustesse des relations entre certaines valeurs phénotypiques de type physiologiques (potentiel hydrique, température des feuilles) et les indices spectraux obtenus par télédétection, nous évaluerons par différents tests statistiques l'influence des différents facteurs (variétés, régimes hydriques) sur les bandes spectrales étudiées. Une fois ces relations établies, nous pourrions évaluer la pertinence et la sensibilité de cette méthode.

Matériel et méthodes

Site d'étude

Notre étude a été réalisée sur une parcelle du CEHM, Centre Expérimental Horticole, située sur la commune de Marsillargues (43°37'N 4°10'E.), dans l'Hérault, France.

Géométrie du verger et répartition des pommiers

La parcelle étudiée comprend 5 variétés de pommiers, distribuées sur une surface de 100mx50m environ, et implantée en rangées selon un axe Nord-Sud (Fig. 2a) Les variétés étudiées sont : CrimsonCrisp® Coop 39^{COV}, Juliet® Coop 43^{COV}, Mandy® Inolov^{COV}, Goldkiss® Gradiyel^{COV} et Story® Inored^{COV}. Les abréviations suivantes seront utilisées dans ce travail : « CrimsonCrisp », « Juliet », « Inolov », « Goldkiss », et « Story », conformément à la pratique professionnelle.



Figure 2a : Position des différentes variétés sur la parcelle du CEHM. Chaque cercle correspond aux zones d'intérêt sélectionnées. La couleur du cercle dépend du traitement hydrique et de la variété (voir légende).

Les distances de plantation entre les rangs sont de 4m, et d'environ 1m20 sur le rang, ce qui donne une densité de peuplement de 2080 arbres / ha. Tous les pommiers de l'essai sont greffés sur des porte-greffes de type M9, et conduits en haie fruitière palissée. Les arbres sont adultes et parvenus à l'état de pleine production, ayant été plantés en 2005 (Crimson Crisp, Story), 2006 (Juliet) ou 2007 (Inolov, Goldkiss). La hauteur maximale de la cime est de 2.5 à 3.5m, selon les variétés.

Les vols de drone sur ce site ont été réalisés entre le 30 Juin et le 28 Juillet 2015, lors de journées ensoleillées, sans nuages. Le Drone Irstea a survolé l'essai le 30 Juin, les 7, 20 et 28 Juillet 2015, et le drone HiPhen le 27 Juillet 2015. Ces appareils volaient à une altitude moyenne de 40m, et à une vitesse maximale de 7m/sec (25 km/h). Le plan de vol du drone Irstea comprenait des points d'arrêt (waypoints) prédéfinis à une distance de 6 mètres dans l'axe des rangs, permettant des prises de vue rapprochées et un taux de recouvrement élevé entre les clichés.

L'irrigation dans la parcelle a été conduite pour induire deux régimes hydriques différenciés, sous la forme de la suppression de l'apport hydrique par rapport aux arbres correctement irrigués, sur environ la moitié des arbres de chaque génotype. On notera le traitement de contrainte hydrique « WS » et le traitement témoin sans contrainte hydrique « WW ». Ce traitement WS est le résultat d'un arrêt de l'irrigation entre le 30 juin et le 30 juillet, avec une ré-irrigation partielle le 18 juillet, tandis que le traitement WW est piloté pour maintenir les arbres dans un sol humide (Annexe 1). Ces deux traitements forment les modalités de notre variable environnementale « E ». Chacune des parcelles représentant une combinaison Génotype * Environnement comprend 5 à 25 individus, qui seront considérés comme des réplicats biologiques. Le dispositif ne comprend pas de randomisation.

Météorologie

Les conditions climatiques de l'été 2015 ont été très sèches et l'apport en eau par les précipitations peut être négligé. La température moyenne à midi pour la période d'étude a été d'environ 32°C, avec un maximum de 37°C le 23/07 et un minimum de 30°C le 16/07 (cf. Tab. 2, et Annexe 1).

Tableau 2: Températures minimale (Tmin), moyenne (Tmoy) et maximale (Tmax) pour chacun des jours de mesure

	Tmin (°C)	Tmoy (°C)	Tmax (°C)
30-juin (J1)	17.1	23.83	29.9
07-juil(J2)	20.9	25.78	31.0
20-juil(J3)	20.4	28.61	35.4
27-juil(J4)	19.2	26.14	32.2

Une station météo du Centre Expérimental acquiert les données météo de manière continue, et lors des jours de vols, tandis qu'une acquisition micro-météo de proximité est assurée par la mise en place d'une Centrale Campbell Scientific CR 1000 équipée de capteurs de température et humidité relative de l'air, d'un anémomètre ultrasonique, d'un capteur de PAR et d'un pyranomètre. Ce suivi de proximité permet de connaître avec précision (et selon un pas de temps court : 10 secondes) la température de l'atmosphère à 1,50m du sol lors des vols. De plus, plusieurs mesures de potentiel hydrique de tige ont été effectuées sur les arbres juste après le vol, pour caractériser l'état de stress ; malheureusement nous ne disposons pas de données suffisamment fiables pour la variété Juliet.

Acquisition des images par drones.

Les acquisitions se sont déroulées avec deux drones différents :

Le drone Irstea est un drone octo-moteur de type multi-rotor, de marque MikroKopter. Il peut emporter une charge utile de 1.5 à 2kg avec une autonomie de vol de 6 à 10 minutes.

Ce drone emmène 3 capteurs : 2 appareils photo numériques Sigma DP1 (14.06 MPixels et capteur Foveon X3) à focale 28mm ; l'un de ces appareils a été modifié selon la méthode développée par Lebourgeois et al. (2008) pour acquérir des images dans le proche infrarouge (750-850nm), l'autre captant dans le visible (400-700nm) de façon standard. Le drone emporte aussi un capteur infrarouge thermique (micro-caméra infrarouge thermique Thermoteknix Miricle 307 K, de résolution 640*480) fixé à la nacelle. Tous ces capteurs sont orientés pour acquérir des images en vue zénithale.

Le drone HiPhen est un drone hexacoptère ONYXSTAR®/MikroKopter Fox C8, pouvant emporter une charge de 1.5 à 2.5kg pendant une quinzaine de minutes. Sa particularité est d'être équipé d'une caméra multispectrale UAV-CAM6, dont les bandes spectrales ont été choisies (Baret, 2014) afin de pouvoir calculer différents indices de végétation. Ainsi, nous avons pu disposer d'images fixes acquises dans les bandes spectrales de 450, 532, 568, 675, 730 et 850 nm (cf. Tab. 3 et 4). Les valeurs de réflectance ont été normalisées radiométriquement par rapport à la bande de 850nm prise comme témoin (Verger et al., 2014 ; Gómez-Candón, comm. pers.).

Tableau 3: Bandes spectrales et largeurs spectrales associées de la caméra multispectrale embarquée dans le drone Hiphén. Source: fiche technique du drone Hiphén (<http://www.hiphén-plant.com/>)

Bande spectrale	Name	Centre bande (nm)	Largeur spectrale (FWHM, nm)	Utilisation
Bleu	Blue	450	25	glaucescence
vert	PRI1	532	10	PRI, chlorophylle, structure
vert	PRI2	568	10	PRI, chlorophylle, structure
Rouge	Red	675	25	Chlorophylle, structure
Red-edge	RE	730	10	Chlorophylle, structure
Proche infrarouge	NIR	850	50	Chlorophylle, structure

Le drone HiPhen emporte également une caméra FLIR® TAU2 pour l'acquisition de l'infrarouge thermique, d'une résolution de 640*512 pixels. Il est à noter que nous n'avons pas exploité les données thermiques de ce capteur, qui a montré une nette dérive thermique lors du vol.

Tableau 4: Comparaison du matériel embarqué dans les drones Hiphén et Irstea, ainsi que leur application supposée.

	Drone Hiphén	Drone Irstea	But
Dates de vol	27/07/2015	30/06; 7/07; 14/07; 28/07/2015	Evolution du stress
GPS	Oui	Oui	Création des images
RGB et NIR	N/A	Oui	Indice de végétation (bande large)
Thermique	N/A	Oui	Ouverture des stomates
Multispectral	Oui, 6 bandes	Non	Indices de végétation, pigments foliaires

Le capteur thermique permet de connaître la température de brillance de notre couvert végétal, que nous assimilons ici à un corps noir en raison de son émissivité élevée (plus de 0.9). A la résolution choisie (pixel de 10 cm d'arête pour un vol effectué à 40m d'altitude) l'hypothèse simplificatrice de départ est que le couvert n'a pas de direction préférentielle d'émission et qu'il est assimilé à une surface lambertienne.

Le drone Irstea dispose d'un pico-ordinateur embarqué lié à une carte GPS, programmé pour acquérir des images NIR et RGB sur les repères de balisage (waypoints) du vol, soit une trentaine de photos par vol pour chaque appareil, ce qui nous donne des valeurs de recouvrement d'environ 80%.

Les caméras infrarouge ont été lancées en mode vidéo peu avant le début de chaque vol. La caméra Miricle effectuant des auto-calibrations en vol lors du passage au-dessus des waypoints, nous avons sélectionné manuellement une cinquantaine d'images par vol, choisies juste après ces calibrations en utilisant le logiciel VirtualDub©.

Orthorectification, géoréférencement et mosaïquage

Les images obtenues lors des différents vols ont été traitées d'une manière unique (cf. Annexe 2).

Dans un premier temps, nous avons sélectionné un assez grand nombre de photos sur des critères de netteté. Nous avons ensuite, à l'aide du logiciel Photoscan©(Agisoft), sommé toutes ces images afin de construire une image mosaïquée de toute la parcelle. Ce processus comporte plusieurs étapes : détection automatique et manuelle de points d'intérêt, construction d'une structure 3D, projection des photos sur cette structure et enfin construction de l'image ortho rectifiée finale. Nous avons ensuite eu besoin de géoréférencer les images, c'est-à-dire d'attribuer à chacun des pixels une coordonnée dans le référentiel de notre choix, ici la projection conique Lambert93. Pour cela, nous utilisons le logiciel ERDAS Imagine© 2013 en attribuant à nos cibles GPS leur coordonnées Lambert93 ce qui permet au logiciel de projeter notre image sur le référentiel.

Extraction des données de température

Afin de calibrer la caméra thermique Thermoteknix Miricle 307K (Vol Irstea), quatre cibles ont été placées au sol à proximité de la zone de décollage/atterrissage du drone (Fig. 2b). L'une est une plaque de bois recouverte de polystyrène de couleur blanche, l'autre une planche de bois peinte en noir mat. Sont également ciblées en cours de vol une zone de sol nu sec et une zone de sol de nu humide. Ces différentes cibles sont supposées isotropes, bien qu'il soit possible que la cible noire le soit plus faiblement. Les températures de brillance de ces cibles sont suivies par des thermoradiomètres Campbell Scientific IR 120 suspendus à une hauteur de 2m, connectés à une centrale d'acquisition Campbell CR1000. La procédure mise au point par Gómez-Candón et al. (in press) consiste à coupler les valeurs de température fournies par ces capteurs et la valeur numérique issue de l'image thermique. Afin de corriger la dérive interne de la caméra infrarouge thermique, des acquisitions d'images sur les cibles ont été faites lors du survol au décollage et à l'atterrissage, à une altitude de 40m. On établit ensuite des régressions linéaires par relation entre la valeur moyenne des pixels des cibles et les données des sondes IR 120, ce qui nous permet d'obtenir les différentes équations de calibration utilisées pour calculer les valeurs de température.

Radiance et réflectance

Comme dans beaucoup d'études de télédétection (par ex. Slater et al., 1987), les mesures ne sont pas des mesures de réflectance directe, mais des mesures de radiance (luminance énergétique), ce qui peut modifier les résultats obtenus. En effet, la radiance prend en compte les effets directionnels de la surface considérée, l'émissivité du corps dans le domaine spectral considéré, mais elle est également influencée par les zones ombragées. Ces effets peuvent être clairement observés dans nos résultats (Fig. 3), où l'on observe de grands écarts-types autour d'une valeur moyenne : cela correspond à la position d'un côté ou de l'autre du sommet de la canopée, ce qui semble entraîner des effets directionnels importants.

Une procédure de classification des pixels est en cours de mise au point au laboratoire afin d'analyser uniquement les pixels bien éclairés du sommet du couvert (Gómez-Candón, comm. pers.).

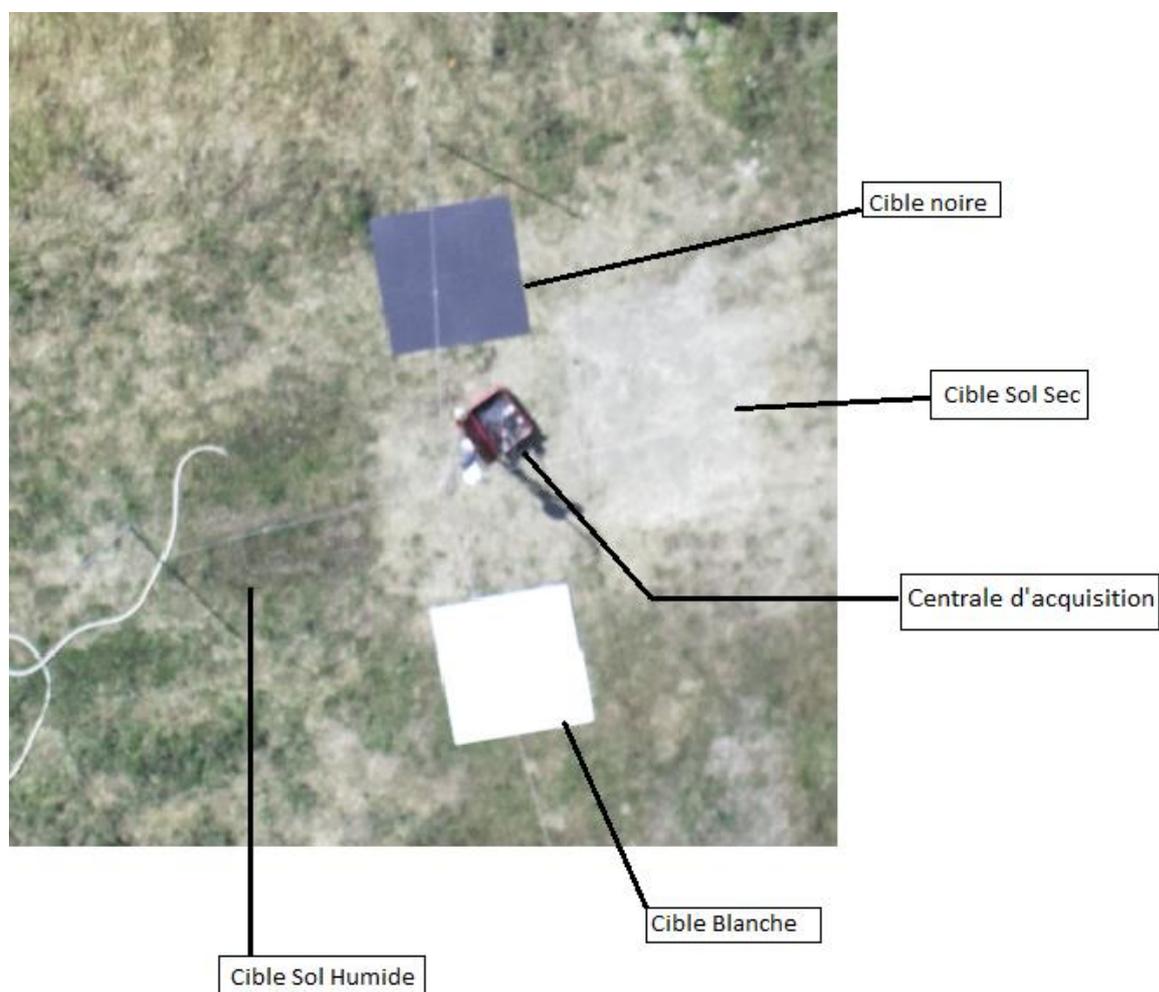


Figure 2b : Disposition des cibles radiométriques (vue zénithale, campagne de mesure 2015)

Extraction des données spectrales

Une fois le géoréférencement effectué, nous avons pu former une « méta-image » contenant les informations de toutes les bandes spectrales d'un vol. En revanche, afin de garder cette « méta-image » à une taille raisonnable (c'est à dire traitable par nos ordinateurs), nous avons dû dégrader la résolution des images à une résolution de 25cm^2 ($5*5\text{cm}^2$). La méthode de dégradation choisie est

celle des Plus Proches Parents (« nearest neighbors »), qui consiste à considérer chaque pixel « fils » comme la moyenne des pixels proches (considérés comme « parents »).

Des zones d'intérêts ont été créées à partir des coordonnées GPS du centre des différents arbres suivis, en considérant tous les pixels situés dans un rayon de 50cm (superficie de 7850cm²) autour de ce centre comme faisant partie du feuillage de l'arbre considéré. Nous avons ensuite extrait tous les pixels des différentes bandes spectrales appartenant à ces zones d'intérêt avec le logiciel ERDAS Imagine©. On note que l'étape de dégradation de l'image se déroule lors de la même étape que la découpe des zones d'intérêt, et que nous sélectionnons donc les pixels avec une bonne résolution initiale avant de dégrader l'information dans les zones d'intérêt.

Potentiel hydrique de tige

Le potentiel de tige est une mesure de l'état hydrique du végétal traduisant l'état de tension de l'eau dans ses tissus. Sa valeur est considérée comme assez peu variable en fonction de la position de la feuille dans l'arbre (Naor, 2006). Nous avons utilisé les données acquises en 2015 dans l'essai. Les mesures ont été réalisées à la chambre à pression (Soilmoisture Equipt. Corp., modèle 3000), 2 heures après avoir enveloppé les feuilles dans des pochettes en plastique aluminisé, chaque pochette ayant pour effet d'isoler la feuille de la lumière et de la confiner, ce qui provoque la fermeture des stomates. La valeur mesurée sur la feuille est alors équivalente à un potentiel de xylème (à l'équilibre). En fonction de l'expertise de l'équipe d'accueil, nous avons considéré que les valeurs diurnes de potentiel hydrique Ψ inférieures à -1,5 MPa traduisaient un état de stress de la plante, tandis que les potentiels de -0,1 à -1,4 MPa reflétaient des variations diurnes normales du potentiel de tige pour les arbres en situation de confort (WW).

Analyses statistiques

La plupart des analyses statistiques ont été effectuées sous Matlab©, ainsi que sous R. Les analyses en composantes principales (ACP) et les analyses de variances (ANOVA) de premier ordre ont été faites sous Matlab. Les Anova à deux facteurs (selon le Traitement (E) et le Génotype(G)) ont été effectuées sous R pour des raisons de commodité. Chaque arbre ayant subi des contraintes différentes, nos individus sont élémentaires et sans répétition, et nous effectuons donc des tests Anova sur les répétitions Variété*Régime Hydrique en considérant les individus comme des répétitions d'un même génotype. Nos variables ne suivent pas réellement des lois normales, mais il est communément admis que le test de l'Anova est très robuste et peut s'appliquer à des distributions s'en écartant modérément.

Résultats

Pour toutes les analyses qui suivent, nous avons choisi d'assimiler la réflectance ou la température d'un individu à la moyenne des pixels de la zone d'intérêt délimitée au centre de sa canopée. Ce choix est justifié par la façon dont les valeurs de réflectance se répartissent dans les zones d'intérêt : en effet on obtient des valeurs réparties approximativement selon une loi gaussienne en fonction de leur position par rapport à la cime. On voit dans la figure 3 que nos individus n'ont pas tous exactement le même comportement, mais on observe une répartition plutôt constante. Ainsi cette dépendance spatiale est particulièrement observée pour les valeurs de température, le coté ensoleillé de chaque arbre présentant des températures plus élevées.

Cela s'explique par le fait que nos capteurs réagissent à la luminance d'un objet, ils ne prennent pas directement de mesure de la réflectance : un objet sombre très éclairé peut avoir la même valeur qu'un objet clair situé à l'ombre.

En raison de l'horaire des images acquises et traitées (10h UTC), la surface de couvert à l'ombre est à peu près identique à celle exposée à la lumière, et l'utilisation de la moyenne nous permet ainsi de prendre en compte la participation des pixels à l'ombre et au soleil.

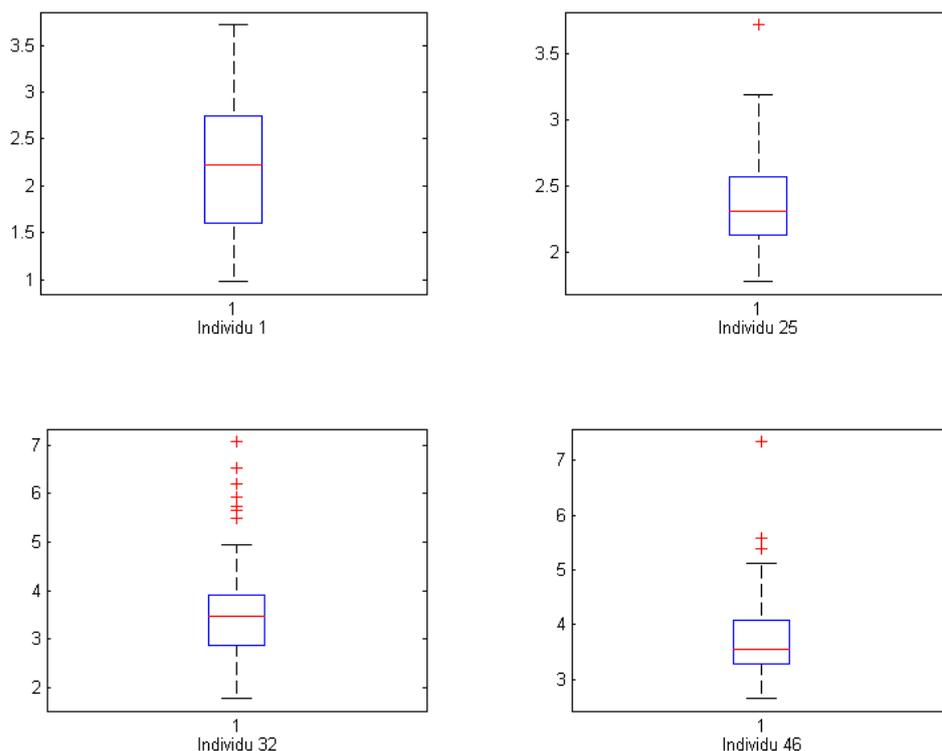


Figure 3: Boite à moustaches des valeurs de Ts-Ta des individus 1(Crimson Crisp WW), 25(Juliet WS), 32(Juliet WW) et 46(Goldkiss WW). Le trait rouge correspond à la médiane, et la boîte au deuxième et troisième quartiles. Chaque individu est représenté par environ 300 pixels.

Comparaison des températures de couvert (Jours 1-4)

Evolution de la température lors des différentes prises de mesure

Les vols réalisés avec le drone Irstea nous permettent de surveiller l'évolution de la différence de température Ts-Ta entre les différentes journées de la période de l'essai, c'est-à-dire selon l'état de

stress dans lequel se trouve la végétation. On observe des différences positives de température pour tous les individus pour les jours de vol 1, 2 et 4, avec un maximum le jour 4 avec une différence de +3.38°C. On observe en revanche des différences négatives le jour 3, avec une moyenne de -3.5°C (Tableau 5).

Les valeurs moyennes, toutes variétés et traitements hydriques confondus présentent une anomalie, puisqu'en effet le jour 3 présente une différence T_s-T_a négative (Tab. 5, Fig. 4)), qui peut être due à plusieurs facteurs : ce troisième jour de vol correspond en effet à un maximum de la température et de déficit de pression de vapeur, et à une date située 3 jours après une ré-irrigation partielle. On remarque également que la population des arbres WS présente une température plus élevée que les arbres de la population WW à partir du 07/07/2015, conformément au comportement attendu d'une population soumis à un stress hydrique.

Tableau 5: Températures moyennes des arbres des populations WW et WS pour les différents jours de vol

	T de surface moyenne (T_s , °C)	T de l'air moyenne (T_a , °C)	T_s-T_a moyenne (°C)	T_s-T_a WW (°C)	T_s-T_a WS (°C)
30/06/2015	30.97	28.5	+2.47	3.32	2.64
07/07/2015	31.94	30.11	+1.83	1.72	2.07
20/07/2015	31.70	34.27	-2.57	-3.84	-2.85
28/07/2015	30.99	27.60	+3.41	2.83	3.96

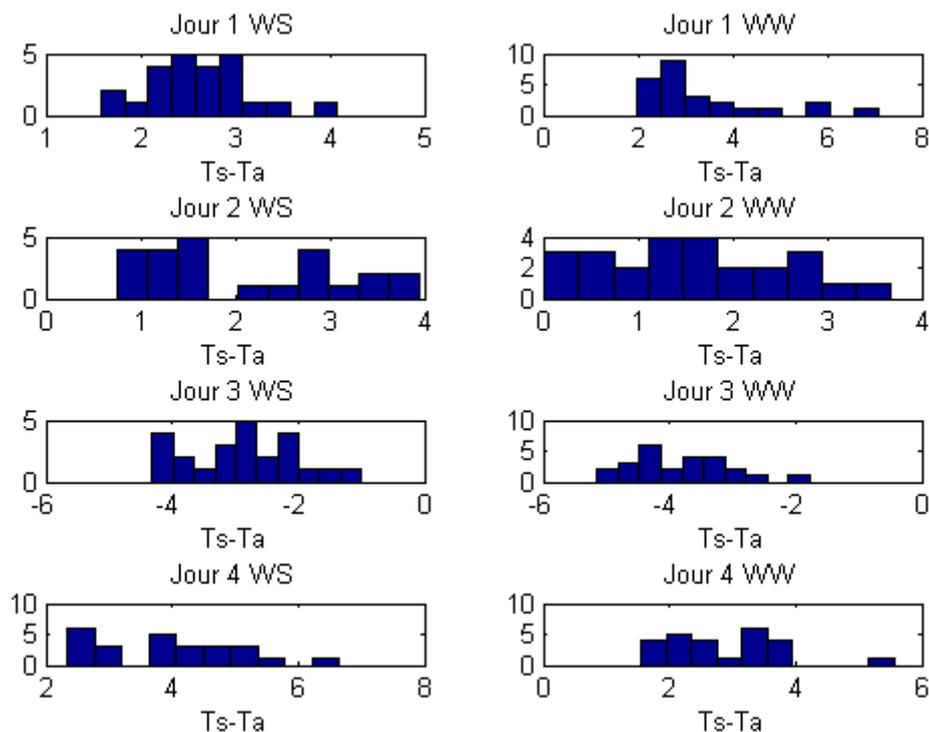


Figure 4: Histogramme des valeurs T_s-T_a (différence de T entre la surface de la canopée des arbres et l'atmosphère) selon le traitement hydrique et le jour (5 variétés confondues).

Tableau 6: Valeurs de la variable Ts-Ta (°C) pour le vol Irstea du 28/07/15, selon le génotype et le traitement hydrique (Valeurs moyennes (°C) ± écarts-types)

	CrimsonCrisp	Story	Juliet	Goldkiss	Inolov	Moyenne
WW	2.05 ± (0.37)	1.96 ± (0.26)	2.63 ± (0.56)	4.01 ± (0.88)	3.47 ± (0.20)	2.82 ± (0.94)
WS	2.82 ± (0.59)	4.22 ± (0.40)	2.84 ± (0.42)	5.39 ± (0.79)	4.36 ± (0.42)	3.95 ± (1.09)
WS-WW	0.77 ± (0.84)	2.26 ± (0.44)	0.21 ± (0.83)	1.38 ± (0.46)	0.89 ± (0.37)	1.13 ± (1.30)

Températures du J4 (28/07/2015, 10h UTC) :

Pour le vol du 27 juillet, date à laquelle les arbres présentent en principe un stress maximum, les valeurs moyennes de Ts-Ta pour les arbres du traitement WS sont plus élevées de 1,1°C en moyenne que celles de la population des arbres WW (Tableau 6). Nous analyserons par la suite si cette différence est significative et si elle nous permet de conclure à la réussite de la détection du stress par surveillance de la température du couvert. Il est déjà possible de constater que les valeurs les plus élevées de Ts-Ta (et les valeurs les plus élevées de l'effet du stress sur Ts-Ta, par différence entre les populations d'arbres WW et WS) ont été observées pour les variétés Story et Goldkiss, tandis que Juliet et Crimson Crisp montrent des valeurs plus faibles pour cette variable.

Evolution du potentiel hydrique de tige

Le potentiel hydrique de tige des arbres étudiés, témoin de leur état hydrique, évolue de manière différente selon la variété et le traitement hydrique (Fig. 5) : globalement, les arbres semblent réagir qualitativement de la même manière, pour les 4 variétés : ainsi, on observe que les arbres privés d'eau au cours du mois de juillet voient leur potentiel hydrique de tige (mesure entre 10h et 11h UTC) diminuer progressivement, ce qui témoigne de l'installation d'un stress dans le traitement WS ; par contraste, les individus non stressés (traitement WW) tendent vers une valeur commune (environ -0.8MPa à 10h UTC). En fonction des seuils de stress définis plus haut, les arbres des variétés Story et Crimson Crisp semblent être stressés, tandis que les arbres des variétés Inolov et Goldkiss ne montrent qu'une amorce de stress.

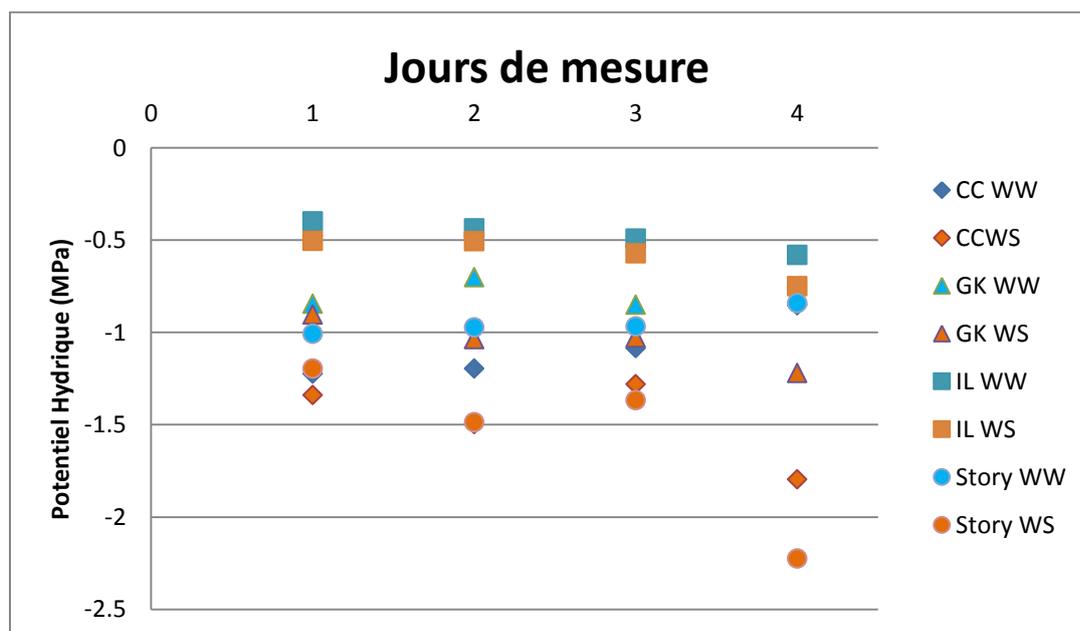


Figure 5: Evolution du potentiel hydrique de tige selon la date de prise de mesure (J1 à J4) pour les quatre génotypes subissant les deux traitements hydriques.

Spectres obtenus

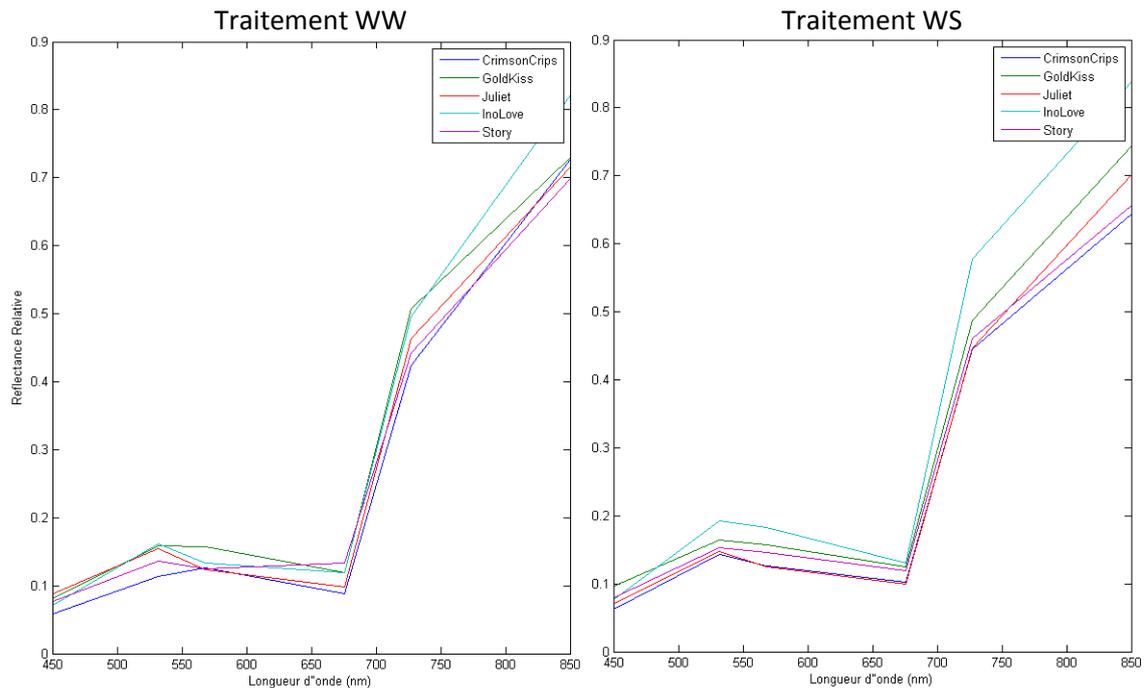


Figure 6: Spectres de réflectance moyenne de chacun des géotypes étudiés, pour les conditions WW et WS, obtenus avec les capteurs multispectraux pour le vol effectué par le drone Hiphen le 27/07/2015

Différence G^*E

Les spectres obtenus (Fig. 6) correspondent à des spectres standard de végétation (par ex. Zarco-Tejada et al., 2005), et on observe en effet une augmentation de la réflectance dans le vert « green edge », ainsi qu'une forte augmentation dans le « red-edge » et le NIR. Les différents spectres émis par les arbres WS présentent tous des valeurs de réflectance légèrement supérieures aux arbres WW, pour toutes les bandes spectrales considérées (à l'exception notable de la réflectance à 850nm). Nous analyserons par Anova quelles bandes sont modifiées de manière significative.

Différence G

On observe (Fig 6) que les géotypes présentent des spectres de réflectance différents pour les individus WW, mais qu'en raison de l'écart-type important, il est difficile de conclure. Nous n'avons trouvé aucune référence sur le spectre type de réflectance de la feuille de pommier, en dehors de la thèse de C. Massonnet (2004) réalisée dans l'équipe. On peut tout de même remarquer que la plus grande différence entre les géotypes se trouve dans le « red-edge » et le NIR.

Indices de végétation

Nous analyserons ici rapidement les moyennes de nos indices de végétation en fonction du traitement hydrique, pour plus de détails sur la variation entre variété, se référer à l'annexe N°3.

Tableau 7 : Valeurs des indices de végétation moyens calculés à partir des données du vol de drone Hiphen du 27/07/2015 (variétés et traitements hydriques confondus)

	NDVI	PRI	GNDVI
Moyenne	0.7243	0.1367	0.6506
Ecart type	0.0400	0.0600	0.0400

NDVI

Pour les zones d'intérêt choisies, nous obtenons, selon les géotypes et les traitements hydriques, des valeurs comprises entre 0.6 et 0.8, avec une moyenne de 0.7243 (Tab. 7). C'est une valeur plutôt faible si l'on considère que les pixels ont été sélectionnés pour n'être que des pixels de la canopée. Cela semble indiquer une structure de canopée relativement ouverte (Myneni et Williams, 1994) et une contribution du sol non-nulle, c'est-à-dire une FAPAR (fraction de rayonnement solaire photosynthétiquement actif) inférieure à 100%.

GNDVI

Les valeurs observées du GNDVI sont relativement stables (écart-type = 0.04) entre tous les individus (Tab. 7), ce qui semble indiquer que nos populations ne montrent pas une modification importante dans la concentration de chlorophylle entre géotypes et entre individus stressés ou non.

PRI

Les valeurs du PRI (Tab. 7) sont dans la plage de variation attendue (Garbulsky et al., 2011), et on remarque une variation notable pour les arbres du géotype Story, arbres stressés (WS), où des valeurs de PRI nettement plus faibles ($PRI_{\text{Story-WS}}=0.036 \ll PRI_{\text{Story-ww}}=0.12$) sont calculées, ce qui pourrait indiquer pour cette variété une réponse au stress dans le fonctionnement photosynthétique des feuilles.

Tableau 8: Moyennes et écarts-types des variables phénotypiques pour les populations WW et WS ; la couleur de la différence WW-WS exprime le sens et l'intensité de celle-ci (Orange = différence positive, Bleu=différence négative) (pour plus de détails, se reporter en Annexe 3)

	Moy WW	Std WW	Std/Moy WW (%)	Moy WS	Std WS	Std/Moy WS (%)	Moy WW-Moy WS
450nm	0.0753	0.0141	18.73	0.0765	0.0154	20.13	-0.0012
532nm	0.1480	0.0250	16.89	0.1553	0.0263	16.93	-0.0073
568nm	0.1375	0.0204	14.84	0.1419	0.0280	19.73	-0.0044
676nm	0.1088	0.0188	17.28	0.1192	0.0236	19.80	-0.0105
727nm	0.4701	0.0579	12.32	0.4769	0.0772	16.19	-0.0068
850nm	0.7302	0.0880	12.05	0.7236	0.0876	12.11	0.0066
Ts-Ta	2.827	0.944	33.390	3.951	1.086	27.490	-1.124
NDVI	0.7347	0.0399	6.68	0.7127	0.0405	17.59	0.0220
PRI	0.1424	0.0566	39.75	0.1310	0.0752	5.74	0.0114
GNDVI	0.6579	0.0464	6.91	0.6416	0.0338	18.98	0.0163

Analyses statistiques

Nous observons certaines différences entre les individus WW et WS (Tab. 8), ainsi qu'entre les génotypes, mais ces résultats sont-ils significatifs ? Quel est le facteur qui joue le plus sur ces différences, le traitement hydrique ou le génotype ? Quelle est la bande spectrale où l'on observe le plus de différences ? Peut-on détecter une interaction entre le génotype et le traitement ?

Les analyses de variance (ANOVA) permettent pour chaque variable, de vérifier l'appartenance des moyennes des échantillons à une même population ; ceci revient à tester si les échantillons suivent une même loi normale. On pose pour toutes les ANOVAs l'hypothèse nulle $H_0 =$ « Nos groupes suivent une loi normale identique » ; cette hypothèse nulle est rejetée si la statistique du test est supérieure à la valeur critique lue dans la table de Fisher. Concrètement, nous utiliserons l'ANOVA pour repérer les différences significatives entre les différents génotypes et/ou les traitements.

Pour les différents paramètres étudiés, nous procédons à des ANOVAs en plusieurs étapes. Nous procédons dans un premier temps à une ANOVA mono-factorielle, qui ne prend en compte que le traitement hydrique, pour en apprécier l'effet général, et dans un deuxième temps une ANOVA bi-factorielle qui prendra en compte les facteurs traitement (E) et génotype (G).

Anova mono-factorielle sur l'effet du traitement hydrique

En ne considérant que le facteur traitement hydrique comme jouant sur le spectre considéré, on pose l'hypothèse que tous les génotypes réagissent de la même manière. En repartant du modèle statistique : $P = \mu + G + E + (G \cdot E) + \epsilon$, en supposant la contribution analogue des génotypes, notre modèle devient : $dP = \mu + dE + \epsilon$, c'est-à-dire qu'une différence significative entre deux valeurs de réflectance (ou entre deux valeurs d'indices) est nécessairement due à une différence dans la réaction de la population au traitement hydrique.

Tableau 9 : Résultats de l'ANOVA monofactorielle (facteur E) pour le jeu de données composé des valeurs de réflectance, de la variable Ts-Ta et des indices de végétation.

	450nm	532nm	568nm	676nm	727nm	850nm
p>F	0.7595	0.5400	0.9742	0.0943	0.9196	0.4808
	Ts-Ta	NDVI	PRI	GNDVI		
p>F	0.0040	0.0404	0.3532	0.2144		

On observe principalement trois résultats significatifs (Tab. 9) : on confirme une différence significative dans la différence de température Ts-Ta des populations WW et WS (WS>WW, cf. Tab. 8 de comparaison des moyennes), ce qui nous permet de dire que la mesure de température de brillance par caméra infrarouge thermique permet de détecter des différences significatives entre les arbres des populations WW et WS.

Le deuxième résultat est intéressant : il existe une différence très faiblement significative ($p < 10\%$) au niveau de la réponse dans la bande spectrale du rouge (676nm) entre les traitements (la réflectance des individus WS dans le rouge est plus élevée que celle des individus WW, cf. Tab. 6).

La conséquence de cette différence est l'effet significatif ($p < 5\%$) du traitement hydrique sur l'indice NDVI ; les valeurs de cet indice sont plus faibles pour le traitement WS que pour le WW (cf. Tab. 8).

Le stress subi par les arbres au mois de juillet semble donc avoir eu un impact mesurable sur le couvert, au plan structurel (taux de couverture) ou fonctionnel (ici : régulation stomatique).

Anova Bi-factorielle (Traitement hydrique, génotype et interaction)

Cette ANOVA bifactorielle utilise deux facteurs explicatifs, le génotype et le traitement hydrique. Nous utilisons ici un modèle statistique avec interaction : nous traitons le jeu de données selon ces deux facteurs, et nous recherchons les bandes spectrales pour lesquelles le stress, le génotype et leur éventuelle interaction ont un effet significatif (Tab. 10).

Tableau 10: Résultats de l'ANOVA bifactorielle (E, G, E*G) sur le jeu de données composé des valeurs de réflectance, de la différence de température Ts-Ta et des indices de végétation.

	450nm	532nm	568nm	676nm	727nm	850nm
p>f(Stress)	0.7057	0.1573	0.3518	0.0378	0.6785	0.644
p>f(Genotype)	6.96E-05	5.15E-06	8.27E-06	9.00E-05	1.84E-03	8.94E-05
P>f (Stress*Genotype)	0.0326	0.00919	0.000458	0.8717	0.47252	0.237

	Ts-Ta	NDVI	PRI	GNDVI
p>f(Stress)	1.63E-09	0.0187	0.4151	0.0629
p>f(Genotype)	6.97E-12	0.000103	3.54E-05	3.92E-02
P>f(Stress*Genotype)	0.000743	0.356533	0.0231	5.08E-05

Les résultats de cette Anova montrent que le génotype, davantage que le stress, est le facteur qui influence de façon prépondérante la forme du spectre de réflectance. Cela signifie que la caractérisation phénotypique de notre individu et sa réponse au stress passe nécessairement par sa comparaison avec un individu « témoin » (ici WW) de même génotype.

On remarque que l'on retrouve les résultats de l'Anova mono-factorielle : le stress a un effet plus net sur la température du couvert et sur la réflectance à 676nm que sur les autres variables.

On observe également une interaction significative entre le génotype et le traitement hydrique pour les réflectances à 532 et 568nm (vert), c'est-à-dire dans la bande de moindre absorbance de la chlorophylle. En analysant plus finement le jeu de données, nous pouvons voir que les génotypes peuvent réagir de manière très différente dans cette bande. Par exemple, la réflectance à 568nm augmente avec le stress pour génotype Crimson Crisp alors qu'elle diminue pour le génotype Story. (Fig. 7).

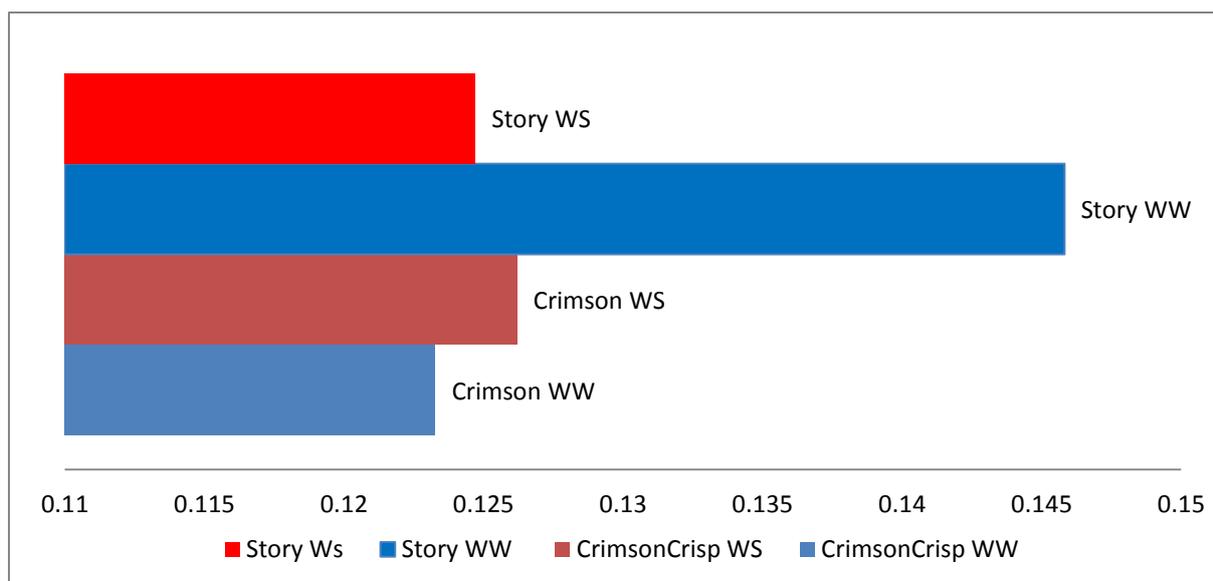


Figure 7: Réflectances moyennes à 568nm pour les différents individus de Crimson Crisp et Story, en interaction avec le stress. On observe une réponse différente au traitement selon le génotype.

L'idée de pouvoir distinguer les génotypes pour leur éventuelle différence de réponse au stress étant intéressante, nous avons essayé de pousser cette réflexion dans plusieurs axes : dans un premier temps, nous avons comparé les populations WW et WS de chaque génotype indépendamment (cf. Annexe 3), mais il est très difficile d'en tirer des résultats concluants pour l'ensemble des variables, car la température semble la seule qui montre un effet significatif du traitement hydrique, pour quatre génotypes sur cinq (la variété Juliet fait exception : $p=0.53$, n.s. ; cf. Tab. 11), les autres variables ne semblant répondre significativement que pour un ou deux génotypes à la fois.

Tableau 11 : Résultats de l'ANOVA monofactorielle (facteur G) pour le jeu de données des valeurs de réflectance, de la différence de température T_s-T_a et des indices de végétation.

$p>f(\text{Stress})$	CrimsonCrisp	Story	Juliet	GoldKiss	InoLov
450nm	0.2329	0.6185	0.0147	0.0817	0.2353
532nm	0.0004	0.1692	0.6209	0.4539	0.0119
568nm	0.9472	0.1185	0.9219	0.9919	0.0001
676nm	0.0610	0.8506	0.9576	0.4736	0.1508
727nm	0.4929	0.4804	0.6617	0.4875	0.0626
850nm	0.0943	0.5345	0.7232	0.5697	0.7862
T_s-T_a	0.0400	0.0000	0.5286	0.0316	0.0029
NDVI	0.0057	0.8628	0.8045	0.8185	0.0306
PRI	0.2318	0.1758	0.9640	0.5289	0.2323
MCARI2	0.0080	0.8488	0.9800	0.7244	0.9457
GNDVI	0.0002	0.0746	0.6904	0.8560	0.0114

Analyse en composantes principales (ACP)

A la suite de ces Analyses de variance, nous avons également effectué une Analyse en Composantes Principales des réflectances et des indices spectraux sur les populations de pommiers en séparant les individus uniquement selon le génotype (on mélange donc les traitements WW et WS). Il apparaît que plus de 90% de la variance de nos échantillons est expliqué par la première composante principale, qui est elle-même très corrélée à la température.

Nous avons effectué deux analyses en composantes principales sur l'intégralité du jeu de données, afin de hiérarchiser les composantes déterminantes et les variables pertinentes associées. Dans un premier temps, nous avons utilisé les dix variables pour construire une ACP complète, puis dans un deuxième temps nous ne conservons que les indices de végétations et la température.

La matrice des corrélations nous permet d'observer que les valeurs de réflectance sont très corrélées deux à deux (corrélations positives). On remarque également une corrélation entre la réflectance à 676nm et la différence de température, que nous pouvions déjà observer sur les ANOVAs.

On observe de fortes corrélations entre le NDVI, et le PRI et le GNDVI, tandis que le NDVI est corrélé négativement avec la température (cf. Tab. 12), ce qui indiquerait encore une fois une modification de la couverture foliaire avec la température du couvert. On remarque également PRI et le GNDVI sont corrélés négativement : s'il est peu probable que cette relation négative reflète un lien direct entre ces deux variables, il est possible qu'un troisième facteur (le traitement hydrique subi par un génotype, par exemple) agisse sur ces deux indices de végétation de manière contraire.

Tableau 12 : Tableau de corrélations entre chacune des valeurs de réflectance, la différence Ts-Ta et les indices de végétation.

	450nm	532nm	568nm	676nm	727nm	850nm	Ts-Ta	NDVI	PRI	GNDVI
450nm	1									
532nm	0.5359	1								
568nm	0.4438	0.7195	1							
676nm	0.6233	0.6071	0.5251	1						
727nm	0.5089	0.7931	0.7233	0.5661	1					
850nm	0.3583	0.5729	0.4995	0.3831	0.8043	1				
Ts-Ta	0.3487	0.3550	0.4052	0.5254	0.2891	0.2459	1			
NDVI	-0.3609	0.3249	-0.2985	-0.7996	-0.0895	0.2115	-0.4149	1		
PRI	-0.0329	0.3249	0.1127	-0.5147	0.1499	0.1021	-0.1994	0.7444	1	
GNDVI	-0.3082	-0.7038	-0.4569	-0.4119	-0.2481	0.1609	-0.2329	0.5961	-0.4039	1

L'ACP portant sur les dix variables exprime 95% de la variabilité avec les quatre premières composantes (Fig 8).

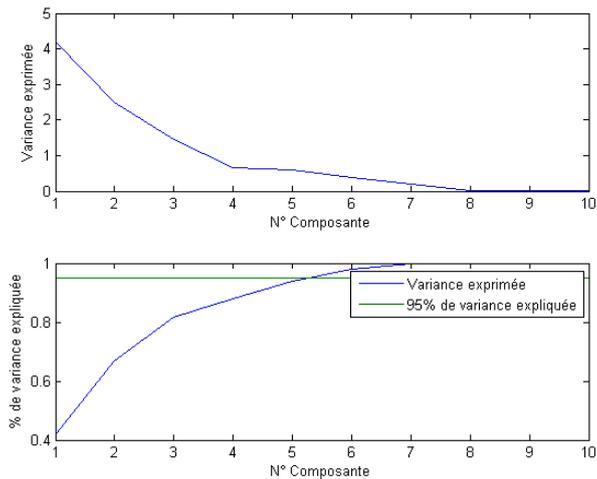


Figure 8: Part de la variance exprimée par les composantes de l'ACP à 10 variables.

La représentation des composantes 1 et 2 (Fig. 9) de cette ACP fait ressortir la corrélation importante (souvent négative) entre les indices de végétation et les valeurs de réflectance dans les bandes spectrales. On retrouve en Fig. 9 un faisceau de vecteurs ayant un poids conséquent sur l'axe 1 formé par les différentes valeurs de réflectance, comme attendu par le tableau de corrélation (tableau 10), tandis que les indices de végétation sont plus ou moins regroupés. On observe également une opposition entre les variables Ts-Ta, R676nm et le groupe d'indices PRI, NDVI et GNDVI.

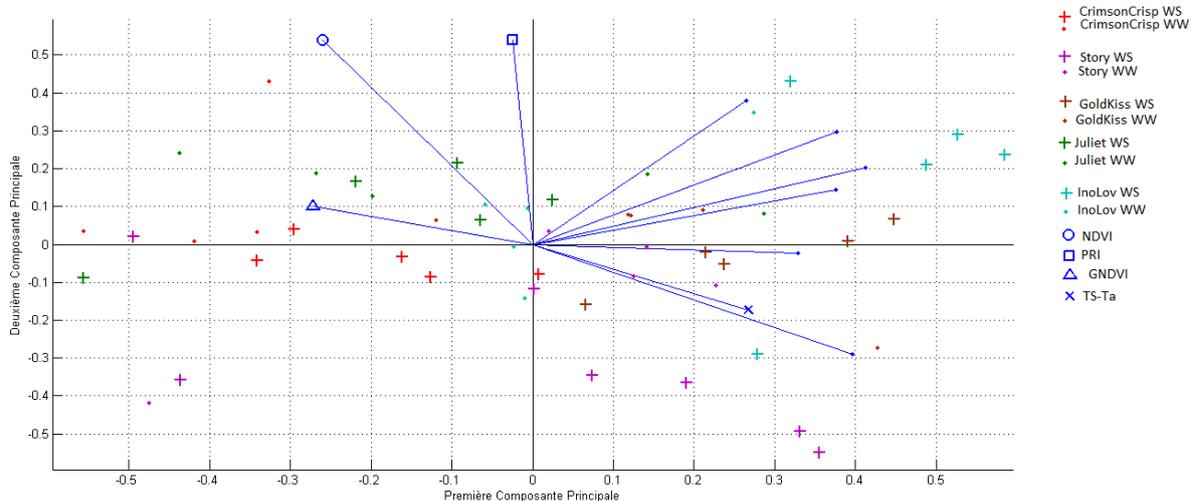


Figure 9: Analyse en composantes principales portant sur les 10 variables phénotypiques. Les axes 1 et 2 relatifs aux deux premières composantes, expriment 70% de la variance (40% et 30% respectivement).

Dans la figure 10, on observe également que le GNDVI et le PRI semblent avoir un poids important sur la troisième composante (valeur propre au carré de 0.42 et 0.21 respectivement), tandis que la température, le GNDVI et les valeurs de réflectance (dont R676nm) sont les variables qui ont le plus de poids sur l'axe 1 (vp^2 de 0,1 à 0,15 pour les réflectances et de l'ordre de 0,02 pour Ts-Ta et GNDVI). On observe une quasi indépendance entre les valeurs du GNDVI et de Ts-Ta ($r^2=-0.23$). Les

indices PRI et GNDVI semblent indépendants dans ce plan. On observe enfin une certaine structuration entre les différentes variétés selon la première composante.

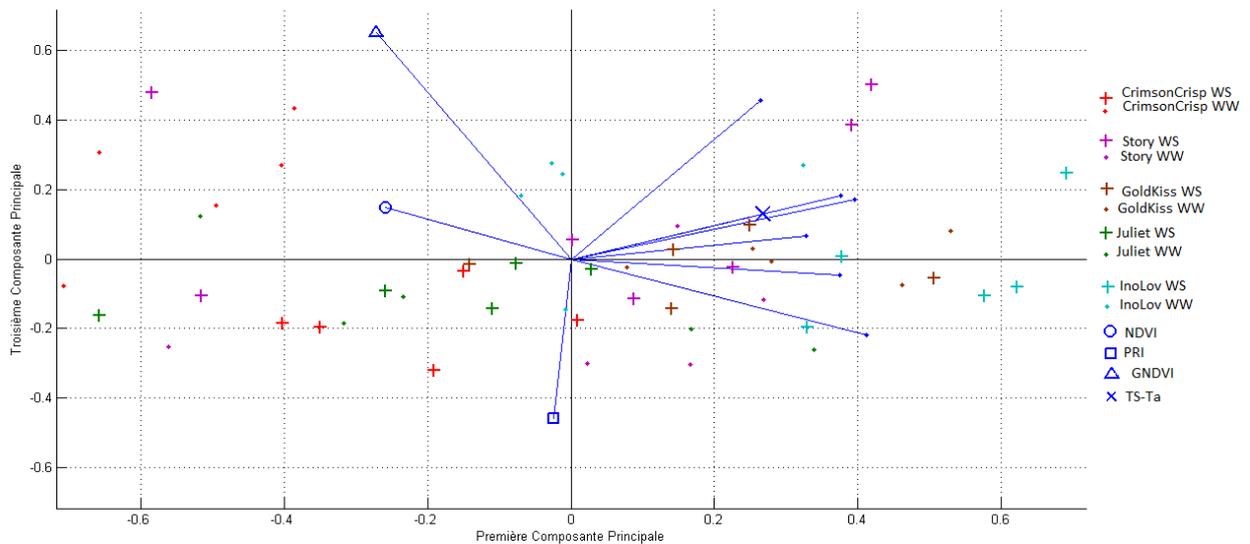


Figure 10: Analyse en composantes principales portant sur les 10 variables phénotypiques. Les axes 1 et 3 relatifs à la première et à la troisième composante, expriment 55% de la variance (40% et 15% respectivement).

Dans la figure 10, on retrouve l'opposition entre un groupe de variables formé de la différence de température Ts-Ta et des valeurs de réflectance, et les indices de végétation. On observe que dans ce plan, le GNDVI et le PRI montrent les signes de leur corrélation négative.

De la même manière, on fait une ANOVA des composantes principales de l'ACP à 10 variables (Tab. 13).

Tableau 13: Résultat de l'ANOVA bifactorielle selon les 3 premières composantes de l'ACP à 10 variables

Composante	N°1	N°2	N°3
p>f(Stress)	0.0369	0.0472	0.6187
p>f(Génotype)	3.80E-06	2.98E-05	0.1915
p>f(Stress*Génotype)	0.1121	0.3094	0.0001

La composante 3 étant significativement reliée à un seul des paramètres expérimentaux, nous avons voulu savoir quelles étaient les variables les plus utilisées pour la formation des composantes.

Il apparaît (Tab. 14) que la composante N°2 (effets Génotype et Stress) est formée particulièrement avec les valeurs de NDVI et du PRI. On remarque en effet des corrélations faibles avec le NDVI et le PRI donc aux valeurs de réflectance dans le rouge et dans le « red-edge ». Le génotype et le traitement hydrique expliquent une partie significative des différences et joueraient donc un rôle au niveau de la modification de la structure du couvert et de sa concentration en pigments xanthophylles.

La composante N°3 (effet Interaction) est corrélée faiblement au PRI et moyennement au GNDVI, donc aux valeurs de réflectance prise dans le vert et le proche infrarouge. L'interaction entre le stress et le génotype se ressentirait donc particulièrement dans la modification des pigments.

Tableau 14: Valeurs des composantes principales 1, 2 et 3 de l'ACP à 10 variables, et coefficients de corrélation élevés au carré pour chacune des variables.

	Vecteurs propres			Coefficients de corrélation ²		
	PC 1	PC 2	PC 3	PC 1	PC 2	PC 3
450nm	0.3283	-0.0219	0.0653	0.1078	0.0005	0.0043
532nm	0.4121	0.2024	-0.2190	0.1698	0.0410	0.0480
568nm	0.3750	0.1437	-0.0474	0.1406	0.0206	0.0022
676nm	0.3962	-0.2900	0.1709	0.1570	0.0841	0.0292
727nm	0.3763	0.2961	0.1816	0.1416	0.0877	0.0330
850nm	0.2644	0.3790	0.4562	0.0699	0.1436	0.2081
Ts-Ta	0.2673	-0.1735	0.1290	0.0714	0.0301	0.0166
NDVI	-0.2595	0.5386	0.1476	0.0673	0.2901	0.0218
PRI	-0.0244	0.5403	-0.4589	0.0006	0.2919	0.2106
GNDVI	-0.2718	0.1015	0.6528	0.0739	0.0103	0.4261

Puisque nous voyons que ces composantes dépendent fortement de certains indices de végétation, nous avons finalement réalisé une ACP utilisant quatre variables relativement indépendantes, en nous appuyant sur les résultats de la matrice de corrélation (Tab. 12). Nous utilisons donc ici les trois indices de végétation (NDVI, GNDVI, PRI) ainsi que la différence de température (Ts-Ta).

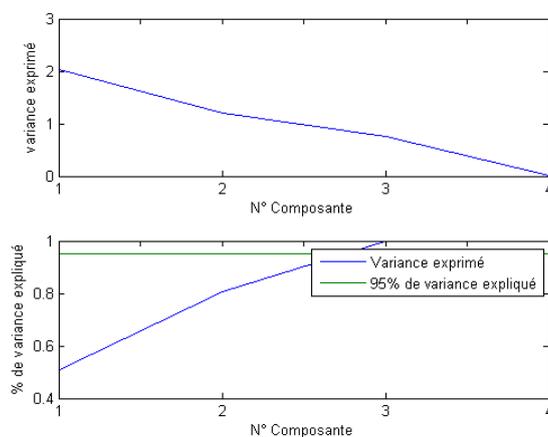


Figure 11: Part de la variance exprimée par les composantes de l'ACP à 4 variables

Dans cette ACP, 95% de la variance est exprimée par 3 composantes (Fig. 11). L'ANOVA bifactorielle selon ces composantes montre que chacune d'elles dépend à la fois du stress et du génotype, avec un effet d'interaction pour la troisième composante (cf. Tab. 15). La représentation des deux premières composantes semble répartir l'effet du stress hydrique selon l'axe horizontal (Fig. 12)

Tableau 15: Résultats de l'ANOVA bifactorielle selon les 3 premières composantes principales de l'ACP à 4 variables

Composante	N°1	N°2	N°3
p>f(Stress)	0.000583	0.47503	0.00448
p>f(Génotype)	1.08E-05	0.00137	1.75E-07
p>f(Stress*Génotype)	0.40659	4.05E-05	0.00035

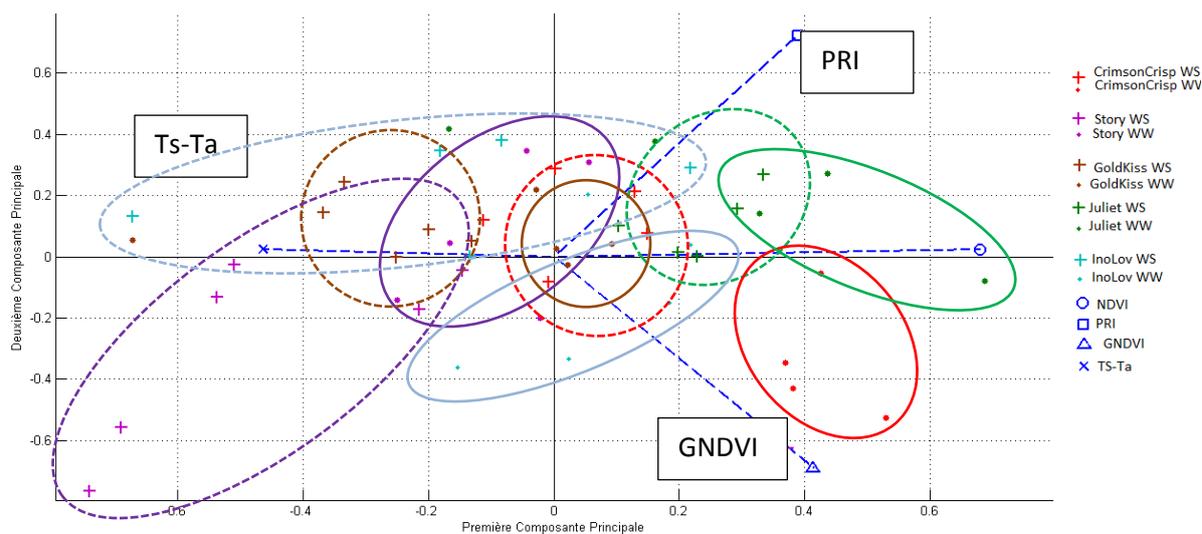


Figure 12 : Analyse en composantes principales des indices de végétation et de la variable Ts-Ta. Les axes 1 et 2 relatifs aux 2 premières composantes, représentent respectivement 50% et 30% de la variance. Les cercles regroupent les individus d'une même variété et d'un même traitement (trait plein : arbres WW, trait pointillé : arbres WS)

Concernant la structure des variables, on note (Fig. 12) que les indices GNDVI et PRI sont quasiment non corrélés, et que NDVI et Ts-Ta ont des sens globalement opposés (quand Ts-Ta augmente, NDVI diminue).

L'axe 1 pourrait être interprété comme un axe de stress hydrique (si on imagine la projection des barycentres des nuages). On observe une répartition des individus de la population WS vers des valeurs plus faibles de la première composante que les individus de la population WW du même génotype. En dehors du génotype Story, dont les individus sont dispersés, les populations WS possèdent également des valeurs plus élevées de la deuxième composante.

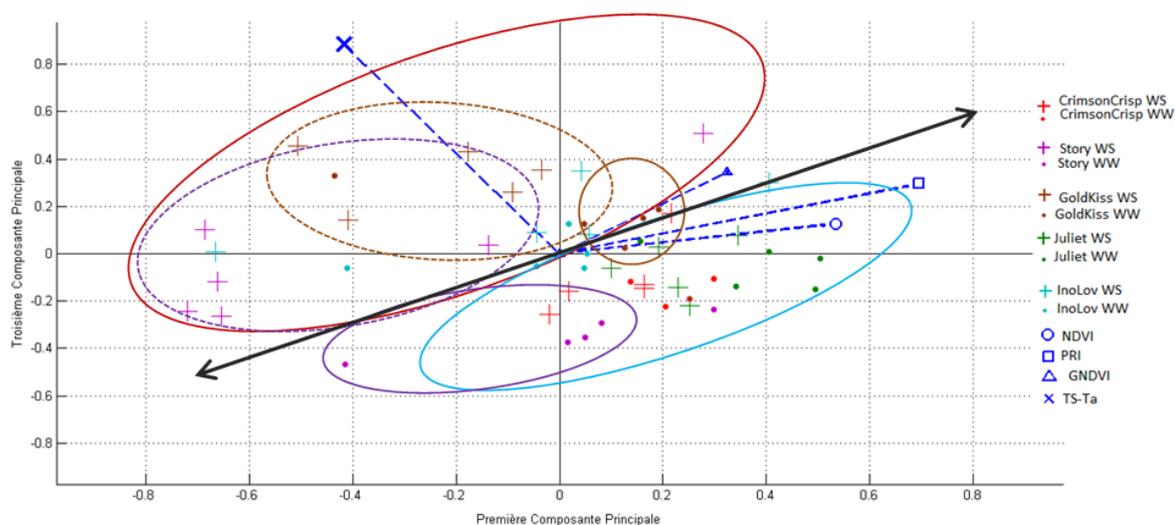


Figure 13: Analyse en composantes principales des indices de végétation et de la variable Ts-Ta. Les axes 1 et 3 relatifs à la première et troisième composante représentent respectivement 50% et 15% de la variance. Les cercles regroupent les individus d'une même variété et d'un même traitement (trait plein : WW, trait pointillé : WS). Le cercle bleu (cyan) regroupe les individus WW tous génotypes confondus, le cercle rouge les individus WS.

Dans la représentation de la même ACP pour les composantes 1 et 3 (Fig. 13), les indices de végétation et la température sont représentés comme indépendants, et on observe une séparation relativement claire entre les populations WW et WS.

Les géotypes se répartissent le long d'un axe formé par la combinaison des différents indices de végétation (flèche sur la figure 13), tandis que le stress se répartit selon l'axe de la différence de température, orthogonalement à cette flèche

Discussion générale

L'analyse des résultats de l'expérimentation 2015 permet de porter un premier regard sur les limites de la méthodologie déployée dans cet essai au champ. Nous avons ainsi noté :

- La difficulté à appliquer un stress hydrique uniforme au champ : la variété rétroagit via sa transpiration sur la quantité d'eau résiduelle dans le sol ; cette difficulté n'est pas facilement contournable pour un essai de pleine terre, alors que la gestion d'un stress uniforme est beaucoup plus facile pour un essai en pots, où l'on peut contrôler précisément la disponibilité en eau du milieu. Une hétérogénéité inter-individus peut aussi en résulter.
- Une deuxième difficulté liée à l'utilisation d'appareils photo numériques, pour le vol du drone Irstea : les appareils Sigma DP1 embarqués, malgré leur bonne qualité optique, ne donnent accès à la réflectance du couvert qu'en fonction de bandes spectrales larges, ce qui limite la précision des indices NDVI et GNDVI, pour lesquels de meilleures résolutions ont été obtenues sur la base des réflectances en bandes étroites. De ce point de vue, l'acquisition multispectrale réalisée par le vol du drone HiPhen, le 27 juillet, a représenté un réel progrès, grâce à la finesse de la résolution spectrale obtenue.
- Une troisième difficulté résultant du choix d'une résolution moyenne, liée au vol à 40 mètres d'altitude au-dessus du sol, ce qui représente un compromis entre la vitesse d'acquisition nécessaire à la pertinence de la mesure dans l'IR thermique (vol de 4 à 6 minutes ; 30 à 50 clichés assemblés), et la résolution obtenue. Nous avons cependant souligné l'intérêt d'une résolution moyenne, pour minimiser les effets directionnels.

Néanmoins, les résultats des analyses permettent de mettre en évidence différents résultats et de poser différentes questions. Nous discuterons ici de la détection du stress (comparaison WW / WS), de la différenciation entre les différents géotypes, et de l'interaction entre les facteurs géotype et condition hydrique.

La détection du stress par mesure à la température par caméra infrarouge embarquée est un succès. Nos résultats montrent que des différences significatives de température sont détectées pour des traitements hydriques différents. L'amplitude de la différence est restreinte (environ 1.1°C), et s'exprime semble-t-il principalement au moment où les arbres WW et WS ont un contraste dans leur régulation stomatique (durant la matinée, principalement ; Gómez-Candón, non publié). La variété Juliet n'a pas répondu de manière significative, et un artefact expérimental est suspecté (le traitement WS semblant partiellement irrigué).

Il est ici nécessaire de rappeler les hypothèses simplificatrices sur le comportement radiatif du couvert. Une première approximation a consisté à utiliser la température de brillance comme une mesure de température classique, certes utilisée en valeur relative, mais en esquivant la prise en compte de l'émissivité réelle, et les effets directionnels du couvert. Or, il a été montré (Maes et Steppe, 2012) que la température mesurée par les méthodes de télédétection dépend de nombreux facteurs : vitesse du vent, humidité atmosphérique, caractéristiques foliaires. Si la variation due aux facteurs environnementaux a été en grande partie intégrée par la méthode de calibration dynamique, les caractéristiques liées à la structure du couvert ne sont pas correctement prises en compte. La méthode de calcul de la moyenne des valeurs des pixels dans les zones d'intérêt semble avoir minimisé ces effets directionnels, mais au prix d'une perte de résolution (dégradation de la finesse des pixels, et travail sur la moyenne des zones d'intérêt).

Les résultats des ANOVA nous permettent également de formuler l'hypothèse que le développement d'un stress modifie le fonctionnement de plusieurs cycles pigmentaires et modifie la réflectance du couvert végétal dans le spectre visible. Comme cela a été proposé par Farooq et al. (2009), le spectre serait modifié par la diminution du taux des chlorophylles a et b comme effet indirect de la déshydratation du sol. L'une des originalités de notre étude est ainsi de proposer que cette diminution soit repérable par capteur multispectral embarqué. Cette modification est apparue de manière différente selon les géotypes, et des analyses plus poussées seraient nécessaires avant de pouvoir espérer avoir un marqueur déterminé du stress dans le domaine du visible.

Nos analyses ont mis à jour l'existence de différences significatives dans les spectres des différentes variétés. On remarque que ces différences apparaissent dans de nombreuses bandes spectrales et particulièrement dans le NDVI, qui est dépendant de la structure du couvert (Gamon et al., 1995).

Pour autant, il serait prématuré de conclure que l'on pourra identifier le géotype d'un individu à partir de son seul spectre. Il nous faudrait pour cela corriger plus précisément les mesures de réflectance, les multiplier (travailler avec des capteurs hyperspectraux) et disposer d'un plus grand nombre de répétitions. Néanmoins, avec les moyens actuels, il nous est possible de tester empiriquement l'appartenance d'un individu à tel ou tel groupe et de le situer statistiquement.

Les analyses par ACP ont tenté de répondre à la question des relations entre les différentes variables. L'ACP portant sur 10 variables nous a permis deux conclusions : quand les individus sont stressés, le NDVI diminue, ce qui signale une participation plus importante du sol dans le spectre de réflectance pour le traitement WS. Nous observons en fait le résultat de deux effets : le premier est sans doute causé par les différences de port et/ou d'agencement foliaire entre les géotypes (effet G), le deuxième est causé par le traitement hydrique lui-même (effet E), qui peut amener les feuilles à se replier selon la nervure principale, diminuant ainsi à la fraction de couverture du sol (Regnard, comm. pers.). On observe également une relation inverse entre la valeur du GNDVI (marqueur des pigments chlorophylliens) et les valeurs du PRI (marqueur du ratio chlorophylle/caroténoïdes), ce qui correspond à des résultats attendus (par ex. Sims et Gamon, 2002).

L'ACP et la matrice des corrélations associée (pour 10 variables) nous ont également permis d'observer une relation inverse entre le PRI et la différence de température $T_s - T_a$ (comme nous l'observons sur la comparaison des moyennes entre les populations WW et WS). Les caroténoïdes des cycles des xanthophylles agissent comme des régulateurs de la température pour les feuilles

soumises à une énergie incidente en excès (par exemple par manque d'eau) et dangereuse pour le système photosynthétique (cf. par exemple Chaumont, 1995)

Il apparait que la température d'un couvert dépend à la fois du traitement hydrique qui lui est appliqué, mais que le couvert a également une capacité à produire des pigments xanthophylles capables de modérer l'excédent d'énergie radiative qu'il intercepte. Les adaptations constatées qui sont survenues au terme d'une privation d'eau de 1 mois sont intéressantes ; elles semblent dépendre des variétés de pommier, et l'étude de la réponse variétale au stress hydrique nécessiterait donc une analyse de leur capacité intrinsèque (rapidité, quantité, efficacité) à répondre au stress à la fois par la fermeture des stomates et par la production des pigments photoprotecteurs.

Une des questions posées par cette expérimentation était d'évaluer la pertinence du matériel utilisé et sa justification dans le cadre d'une parcelle utilisée dans une optique économique et agronomique. Le paramètre d'intérêt est l'interaction G*E qui permet d'estimer si le stress que les pommiers subissent modifie différenciellement leur phénotype (et ainsi leur rendement). Les résultats obtenus en 2015 nous permettent de conforter sur une base expérimentale solide l'hypothèse que l'on peut relier une valeur physique au stress hydrique (par l'augmentation de température du couvert et la diminution du potentiel hydrique). Nous ne pouvons en revanche que détecter statistiquement l'impact de l'interaction, que l'on sait agir sur les réflectances à 532nm, 568nm et les valeurs du PRI et du GNDVI (donc sur les compositions des feuilles en pigments chlorophylliens) mais dont nous n'avons pas encore identifié l'action en fonction de chaque génotype et de chaque traitement.

La construction d'un modèle prédictif de cette interaction pourra se faire de deux manières : empiriquement, par la collection de données de ce type, ou théoriquement, par la construction d'un modèle de feuillage de pommier et sa modification lors d'une situation de stress hydrique.

Conclusion

Le but de cette étude était de conclure sur l'intérêt de l'utilisation d'imagerie multispectrale par drone pour la surveillance des paramètres phénotypiques d'un verger de pommier. Il s'avère que les données obtenues sont utilisables à différents niveaux selon les bandes spectrales. Les mesures dans l'infrarouge thermique semblent directement reliées à l'état de stress des individus surveillés et peut être utilisé tel quelle. Le capteur multispectral permet quant à lui le calcul d'indices de végétation testés ici, tel que le NDVI et le PRI, ce qui est primordial pour la construction de composantes principales capables de situer les réponses de nos individus sur des graphiques génotype/stress. Les données expérimentales analysées nous ont permis de mettre en évidence des effets hautement significatifs pour les rôles des différents facteurs (G, E, G*E) dans la réponse de réflectance, ce qui indique que nous repérons les modifications dans les concentrations chlorophylliennes et les différences de structure du couvert. A moyen terme, cette étude doit être continuée afin de corriger et tester les hypothèses et approximations radiatives faites ici. A long terme, elle permet d'envisager la mise en place d'un protocole de phénotypage à haut débit par télédétection basse altitude.

Références bibliographiques

- Baret F., 2014. Description de la solution drone développée par le MCP1 pour le phénotypage au champ à très haut débit. *Note technique interne*, INRA (UMR Emmah), pp. 20.
- Bassett C., 2013. Water use and drought response in cultivated and wild apples. In : *Abiotic Stress - Plant Responses & Applications in Agriculture* (Vahdati K. et Leslie C., eds.), InTech, pp. 249-275.
- Chaumont M., 1995. Régulations de la photosynthèse chez la vigne (*Vitis vinifera* L.) dans différentes conditions de l'environnement (Thèse de doctorat, Univ. Paris Sud).
- Cornille A., Gladieux P., Smulders M.J.M., Roldan-Ruiz I., Laurens F., Le Cam B., Nersesyan A., Clavel J., Olonova M., Feugey L., Gabrielyan I., Zhang X.G., Tenaillon M.I. & Giraud T., 2012. New insight into the history of domesticated apple: secondary contribution of the European wild apple to the genome of cultivated varieties? *PlosGenetics*, 8(5), e1002703
- Delzon S. & Cochard H., 2014. Recent advances in tree hydraulics highlight the ecological significance of the hydraulic safety margin. *New Phytologist*, 203(2): 355-358.
- Farooq M., Wahid A., Kobayashi N., Fujita D., Basra S.M.A., 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management, *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1): 185-212.
- Gamon J.A., Peñuelas J. & Field C.B., 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41(1): 35-44.
- Gamon J.A., Field C.B., Goulden M.L., Griffin K.L., Hartley A.E., Joel G., Peñuelas J. & Valentini R., 1995. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation type. *Ecological Applications*, 5(1): 28-41.
- Garbulsky M.F., Peñuelas J., Gamon J., Inoue Y. & Filella I., 2011. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies. A review and meta-analysis. *Remote Sensing of Environment*, 115(2): 281-297.
- Giorgi F. & Lionello P., 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2-3): 90-104.
- Gitelson A., Kaufman Y. & Merzlyak M., 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3): 289-298.
- Gómez-Candón D., Virlet N., Labbé S., Jolivot A. & Regnard J.L. (in press). Field phenotyping of water stress at tree scale by UAV-sensed imagery: new insights for thermal acquisition and calibration. *Precision Agriculture*, DOI 10.1007/s11119-016-9449-6.
- Horler D.N.H., Dockray M. & Barber J., 1983. The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 4(2): 273-288.
- Inoue Y. & Peñuelas J., 2006. Relationship between light use efficiency and photochemical reflectance index in soybean leaves as affected by soil water content. *International Journal of Remote Sensing*, 27: 5109-5114.
- Jacquemoud S. & Baret F., 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34(2): 75-91.
- Jones H.G., 2014. *Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 408.
- Karimizadeh R. & Mohammadi M., 2011. Association of canopy temperature depression with yield of durum wheat genotypes under supplementary irrigated and rainfed conditions. *Australian Journal of Crop Science*, 5(2): 138-146.
- Lakso A.N., 1994. Apple. In : *Handbook of environmental physiology of fruit crops, vol. 1 Temperate crops*, (Schaffer, B. and Andersen, P.C., eds), CRC Press Inc. - University of Florida, pp. 3-35.
- Lauri P.É., Gorza O., Cochard H., Martinez S., Celton J.M., Ripetti V., Lartaud M., Bry X., Trottier C. & Costes E., 2011. Genetic determinism of anatomical and hydraulic traits within an apple progeny. *Plant, Cell and Environment*, 34(8): 1276-1290.

- Lauri P.É., Barigah T.S., Lopez G., Martinez S., Losciale P., Zibordi M., Manfrini L., Corelli-Grappadelli L., Costes E. & Regnard J.L. (in press). Genetic variability and phenotypic plasticity of apple morphological responses to soil water restriction in relation with leaf functions and stem xylem conductivity. *Trees, Structure & Function*. DOI 10.1007/s00468-016-1408-3
- Lebourgeois V., Bégué A., Labbé S., Mallavan B., Prévot L. & Roux B., 2008. Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test. *Sensors*, 8(11): 7300-7322.
- Lopez G., Pallas B., Martinez S., Lauri P.É., Regnard J.L., Durel C.E. & Costes E., 2015. Genetic variation of morphological traits and transpiration in an apple core collection under well-watered conditions: Towards the identification of morphotypes with high water use efficiency. *PlosOne*, 10(12): e0145540.
- Maes W.H. & Steppe K., 2012. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany*, 63(13): 4671-4712.
- McDowell N., Pockman W.T., Allen C.D., Breshears D.D., Cobb N., Kolb T., Plaut J., Sperry J.S., West A., Williams D.G. & Yezzer E.A., 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178(4): 719-739.
- Massonnet C., 2004. Variabilité architecturale et fonctionnelle du système aérien chez le pommier (*Malus domestica* Borkh.): comparaison de quatre cultivars par une approche de modélisation structure-fonction. Thèse de doctorat, ED BSIAE, Ecole Nat. Sup. Agronomique de Montpellier, 184p.
- Myneni R.B. & Williams D.L., 1994. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 49(3): 200-211.
- Naor A., 2006. Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards *Horticultural Reviews*, 32: 111-165.
- Nichol C.J., Rascher, Mastubara S. & Osmond B., 2006. Assessing photosynthetic efficiency in an experimental mangrove canopy using remote sensing and chlorophyll fluorescence. *Trees*, 20: 9-15
- Regnard J.L., Segura V., Merveille N., Durel C.E. & Costes E., 2009. QTL analysis for leaf gas exchange in an apple progeny grown under atmospheric constraints. *Acta Horticulturae*, 814: 369-374.
- Rouse J.W., Hass R.H., Schell J.A. & Deering D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *3rd ERTS Symposium*, NASA SP-351: 309-317.
- Sims D.A. & Gamon J.A., 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3): 337-354.
- Šircelj H., Tausz M., Grill D. & Batič F., 2007. Detecting different levels of drought stress in apple trees (*Malus domestica* Borkh.) with selected biochemical and physiological parameters. *Scientia Horticulturae*, 113(4): 362-369.
- Slater P.N., Biggar S.F., Holm R.G., Jackson R.D., Mao Y., Moan M.S., Palmer J.M. & Yuan B., 1987. Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors. *Remote Sensing of Environment* 22: 11-37.
- Tardieu F. & Simonneau T., 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.
- Tardieu F., 2005. Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress. *Comptes Rendus Geoscience* 337(1-2): 57-67.
- Verger A., Vigneau N., Chéron C., Gilliot J.M., Comar A., Baret F., 2014. Green area index from an unmanned aerial system over wheat and rapeseed crops. *Remote Sensing of Environment*, 152: 654-664.
- Vogelmann T.C., 1993. Plant tissue optics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 44: 231-251.
- Zarco-Tejada P.J., Ustin S.L. & Whiting M.L., 2005. Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal*, 97: 641-653.

Annexes

Annexe 1 : Données Environnementales (Irrigation & Météorologie)

Figure A1 : Teneurs en eau du sol (variété Story) et enregistrement météo

Figure A1.1: Profil des teneurs en eau du sol sur WW (4 profondeurs et cumul)

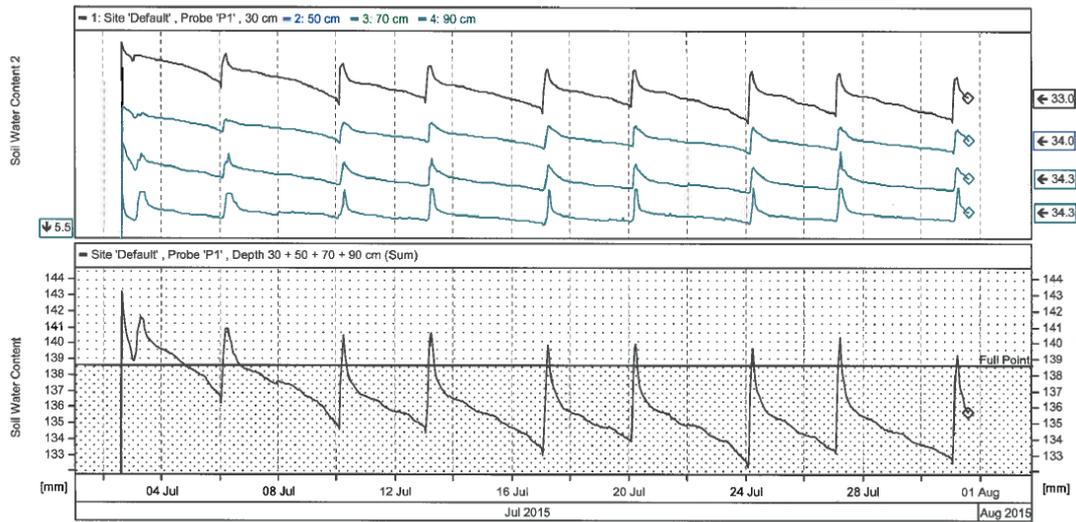


Figure A1.2: Profil des teneurs en eau du sol sur WS (3 profondeurs et cumul)

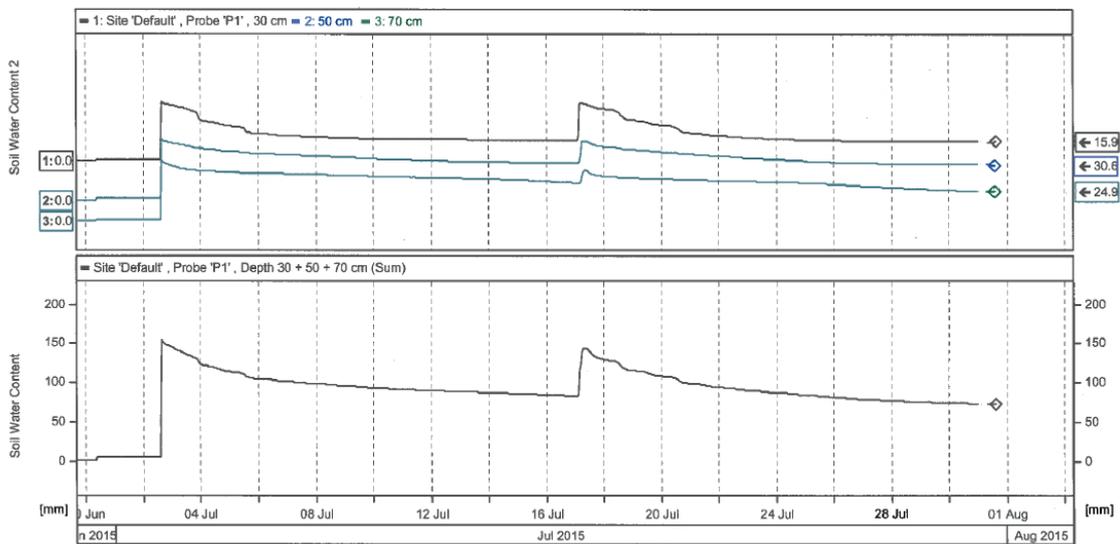
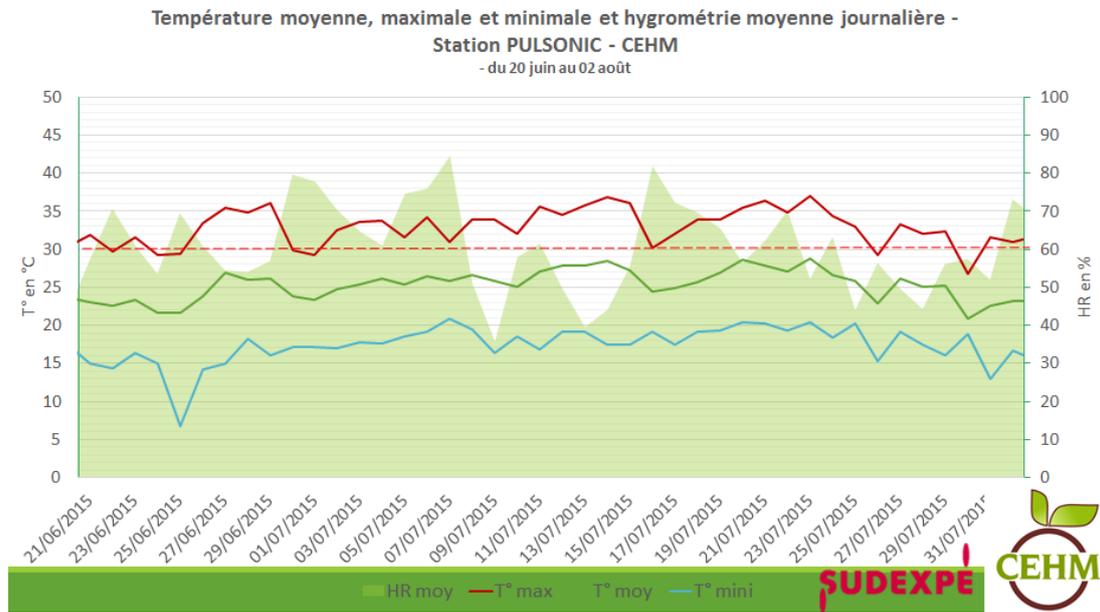
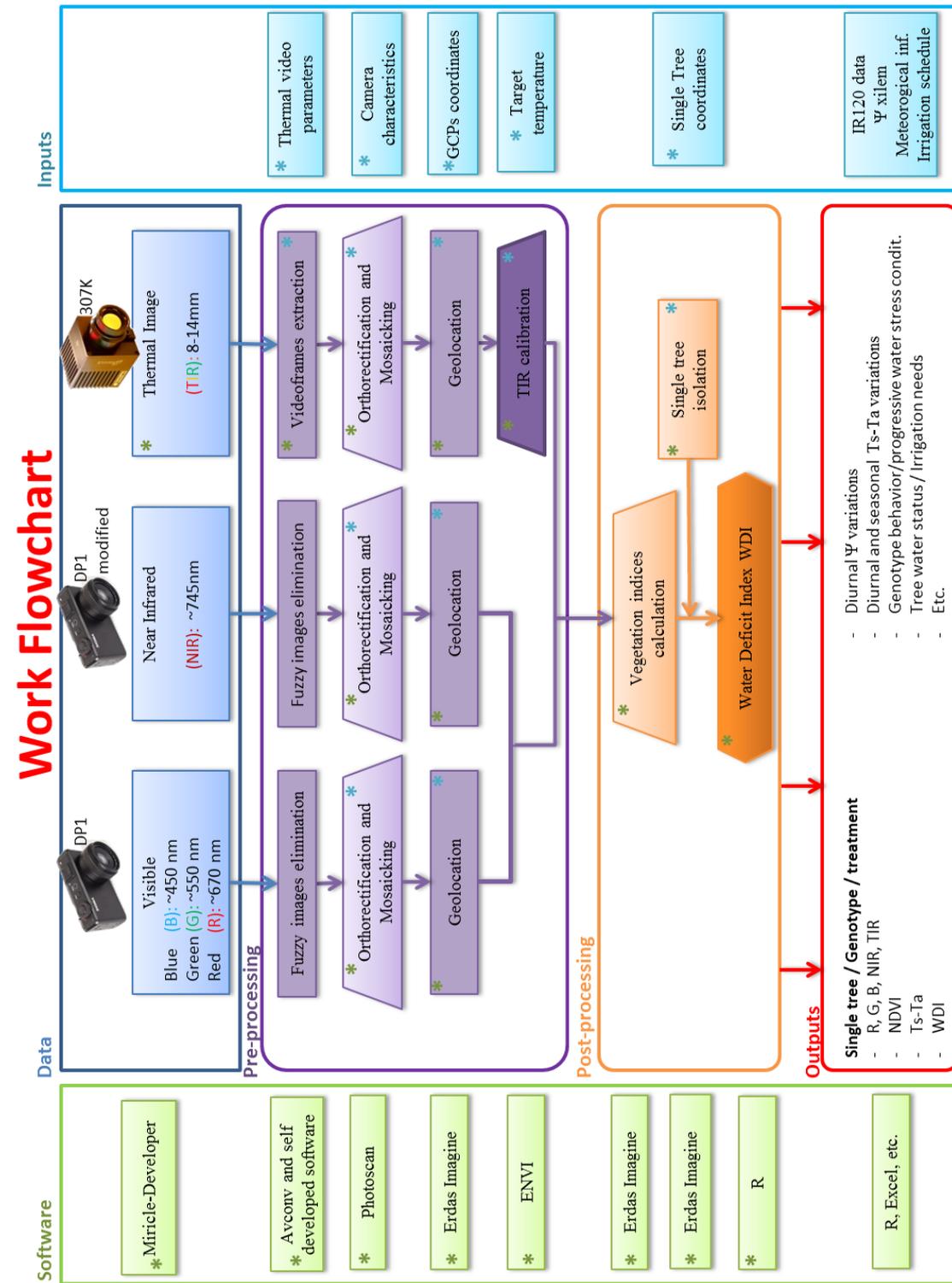


Figure A1.3 : Températures moyenne, maximale et minimale et hygrométrie moyenne journalière
(Station PULSONIC CEHM) du 20 juin au 2 août 2015.



Annexe 2: Diagramme de la méthode d'obtention des images, pour les capteurs du visible, proche infrarouge et infrarouge thermique (Gómez-Candón et al., non publié)



Annexe 3: Valeurs phénotypiques moyennes pour les individus WW et WS de chacun des géotypes étudiés.

Trait	Genotype	450nm	532nm	568nm	676nm	727nm	850nm	TsTa	NDVI	PRI	GNDVI
WS	Crimson Crisp	0.0627534	0.143748	0.126202	0.1023596	0.445036	0.643902	2.82216	0.720566	0.15682	0.631904
WW	Crimson Crisp	0.05825325	0.113305	0.1232825	0.087144	0.4314025	0.7392	1.97355	0.7801275	0.125749	0.72561
Moyenne	Crimson Crisp	0.06050333	0.1285265	0.12474225	0.0947518	0.43821925	0.691551	2.397855	0.75034675	0.1412845	0.678757
WS	Story	0.07696729	0.13609771	0.12471571	0.13348186	0.44269571	0.69928	4.22911429	0.68061143	0.03613514	0.66557429
WW	Story	0.0790094	0.152654	0.145826	0.1193368	0.459876	0.656288	1.95888	0.691212	0.1205504	0.618856
Moyenne	Story	0.07798834	0.14437586	0.13527086	0.12640933	0.45128586	0.677784	3.09399714	0.68591171	0.07834277	0.64221514
WS	Juliet	0.0705218	0.14715	0.12482	0.0992354	0.44584	0.70237	2.84008	0.749936	0.181232	0.651824
WW	Juliet	0.0879042	0.154776	0.1236258	0.0987006	0.463892	0.715738	2.63344	0.754516	0.210906	0.64254
Moyenne	Juliet	0.079213	0.150963	0.1242229	0.098968	0.454866	0.709054	2.73676	0.752226	0.196069	0.647182
WS	GoldKiss	0.0962248	0.164072	0.157696	0.125042	0.4869	0.743482	5.39412	0.710454	0.151618	0.63543
WW	GoldKiss	0.0804702	0.158598	0.157798	0.119386	0.507126	0.730488	4.01226	0.714386	0.141027	0.637636
Moyenne	GoldKiss	0.0883475	0.161335	0.157747	0.122214	0.497013	0.736985	4.70319	0.71242	0.1463225	0.636533
WS	InoLov	0.075764	0.193164	0.183126	0.13042	0.5779	0.838486	4.35662	0.71466	0.1668844	0.613868
WW	InoLov	0.0703842	0.161322	0.133604	0.118756	0.495206	0.821384	3.47248	0.736658	0.1177738	0.667296
Moyenne	InoLov	0.0730741	0.177243	0.158365	0.124588	0.536553	0.829935	3.91455	0.725659	0.1423291	0.640582

Résumé

A partir des données issues d'une campagne d'imagerie haute résolution aéroportée par drone réalisée au cours de l'été 2015 sur un verger d'essai de comportement de variétés de pommiers, ce mémoire a pour objet d'étudier l'apport de l'imagerie multispectrale dans l'étude de l'évolution de la réflectance de ce couvert végétal en réponse à l'imposition d'un stress hydrique pendant une durée de 1 mois. L'évolution des conditions de l'humidité du sol, et du statut hydrique des arbres (suivi par potentiel de base et potentiel de tige) a démontré la réalité de la situation de stress pour deux des cinq variétés mises en essai : notamment Story® Inored^{COV}. Le document rapporte en détail la procédure de vol pour l'acquisition des images, à 40m au-dessus du sol, ainsi que les méthodes de pré- et de post-traitement de ces images. A partir de celles-ci, diverses variables spectrales ont été extraites, et des indices de télédétection ont été calculés : NDVI, GNDVI, et PRI. Une acquisition en mode vidéo a permis parallèlement à l'imagerie multispectrale d'acquérir des images dans l'infrarouge thermique sur l'ensemble de la parcelle d'essai. Le traitement des données a révélé l'intérêt de combiner les bandes du rouge (676nm) et du proche infrarouge (850nm) pour le calcul du NDVI, qui s'avère négativement impacté par le stress hydrique, et il a confirmé que l'image thermique de la parcelle traduisait aussi l'état de stress de certains arbres, avec une élévation de la température de 1,1°C en moyenne pour les arbres privés d'eau. Une analyse en composantes principales construite sur la base des trois indices de végétation et de la variable Ts-Ta (température de surface moins température de l'air) a permis de montrer une relative indépendance des variables, et de les différencier les individus génétiquement et par rapport à la contrainte hydrique subie. L'expérimentation démontre ainsi le potentiel de l'imagerie multispectrale et thermique pour contribuer aux efforts de phénotypage non invasif sur couvert d'arbres fruitiers.

Mots-clés : pommier, stress hydrique, phénotypage, imagerie de télédétection, capteur multispectral, température du couvert

Abstract

Using data from an airborne high resolution imaging drone campaign conducted during the summer 2015 on an apple variety behavior experiment, this memory aims to highlight the contribution of multispectral imagery in the study of changes in the reflectance of the vegetation cover in response to the imposition of water stress during a period of 1 month. Changing conditions of soil moisture and water status of trees (followed by predawn water potential and stem potential) demonstrated the reality of the situation of stress for two of the five varieties studied, including Story® Inored^{COV}. The document relates in detail the flight procedure for image acquisition, at 40m above the ground, as well as methods of pre- and post-processing of these images. From these, various spectral variables were extracted, and remote sensing indices were calculated: NDVI, GNDVI, and PRI. An acquisition in the thermal infrared (video mode) enabled in parallel with the multispectral imaging the acquisition of images on the entire test plot. The data processing showed the interest of combining the bands of red (676nm) and near infrared (850nm) to calculate the NDVI, which turned out negatively impacted by water stress, and confirmed that the plot thermal image also reflected the state of stress of some trees, with a temperature rise of 1.1° C on average for water stressed trees. A principal component analysis built on the basis of the three vegetation indices and variable Ts-Ta (surface temperature less air temperature) showed the relative independence of variables, and differentiated individuals genetically and relative to the water regime. The experiment thus demonstrated the potential of multispectral and thermal imaging to contribute to the efforts of non-invasive phenotyping of fruit trees cover.

Keywords: apple, water stress, phenotyping, remote sensing imagery, multispectral sensor, cover surface temperature.

