



**Maison de l'Agriculture
Site Agroparc – Bâtiment A
84912 AVIGNON Cedex 9**

Région



Provence-Alpes-Côte d'Azur

**CONSEIL REGIONAL Provence Alpes Côte d'Azur
Service Agriculture et Agro-Alimentaire
27, place Jules Guesde
13481 MARSEILLE Cedex 20**

CONVENTION REGION P.A.C.A. - n° 2016_01712

COMPTE-RENDU D'ACTIVITE

**PROGRAMME DE RECHERCHE 2016
TOMATE D'INDUSTRIE**

TOM'ABILITY

**Stress hydrique et Transformation de la tomate
d'industrie.**

Stress hydrique et Transformation de la tomate d'industrie.

En 2016, la filière française se maintient, comme depuis les 5 dernières années, autour de 180 à 200000 tonnes de tomates fraîches. L'objectif qui vise à mieux valoriser la production nationale de qualité, mise en œuvre par les entreprises industrielles françaises, reste donc toujours d'actualité. Cela passe forcément par le développement accru des pratiques culturales raisonnées respectueuses de l'environnement notamment en matière d'irrigation. Par ailleurs, dans ce contexte économique très concurrentiel et largement internationalisé, il est vital pour les entreprises industrielles de pouvoir diversifier leur fabrication et, par conséquent, être approvisionné en différentes qualités d'usage de la matière première « tomate fraîche ». Les travaux engagés en 2016 doivent viser à prédire cette qualité par les nouveaux outils à base d'Infra-Rouge en fonction du système de culture étudié et notamment du stress hydrique associé.

1. Objectifs

- **Partie agronomique (SONITO-PSH-SQPOV)** : Étude des interactions « qualité à la récolte – qualité du concentré de tomate : influence de l'irrigation sur cette relation – application d'une contrainte hydrique aux champs, et mesure des conséquences sur la qualité de la matière première et sur la qualité organoleptique des protocoles de stress hydriques. Utilisation du modèle prédictif IR développé en 2014/2015 pour prédire les compositions des tomates produites (protocole de calibration du modèle pour coller aux données 2016)

- **Partie Transformation/Techno (SONITO-CTCPA-INRA)** : Influence du procédé sur la qualité : impact de la température de break : recherche de marqueurs biochimiques corrélés à la qualité des concentrés de tomates – plasticité de la relation en fonction de la réactivité des matières premières (interaction avec l'essai agronomique ci-dessus). Recherche de marqueurs ciblés de modification de la texture (Enzymo PG PME, état des pectines) utilisation de l'IR comme outils de discrimination des produits transformés (recherche de marqueurs précoce utilisation pour développement de modèles de prédiction de la qualité par infrarouge).

A terme, le modèle prédictif IR et son outil associé pourront être développés pour les autres filières de fruits et légumes en recherche de valorisation qualitative de la matière première dans leur système de culture (gestion de l'eau et des intrants, date de récolte idéale) tout en préservant l'environnement.

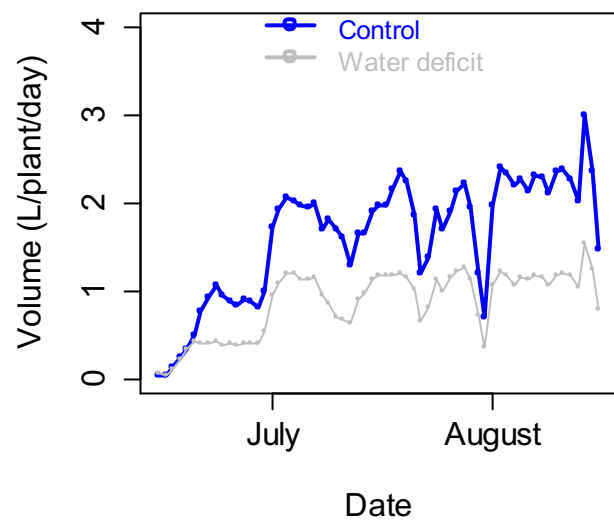
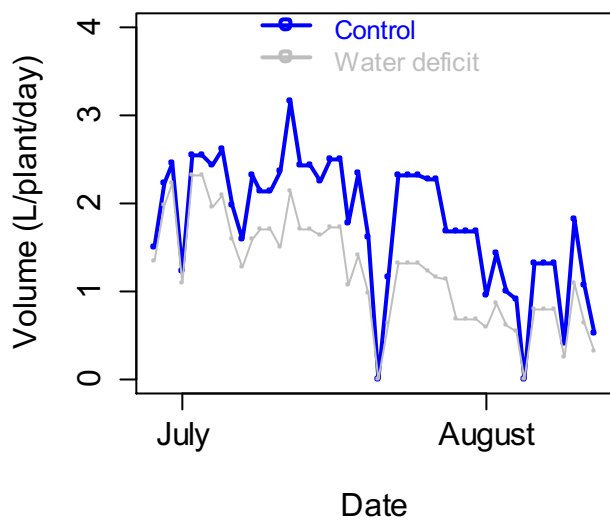


Figure 1. A, Représentation de 2 régimes d'irrigation de juin à août 2016 en plein champ. Les plantes témoins ont été arrosées à 100% de l'ETP ce qui correspond à un volume de 0 à 3 l par plante et par jour tout au long de l'expérimentation (ligne bleue). Pour les plantes sous stress hydrique, l'irrigation a été réduite à 60% de l'ETP (ligne grise).
 B, Idem sous serre. Les plantes témoins ont été arrosées à 100% de l'ETP ce qui correspond à un volume de 0,02 à 3 l par plante et par jour tout au long de l'expérimentation (ligne bleue). Pour les plantes sous stress hydrique, l'irrigation a été réduite à 50% de l'ETP (ligne grise).

2. Matériels et Méthodes

2.1. Plantes de tomates

4 variétés de tomates *Solanum lycopersicum* déterminées : 'H1015', 'H1311', 'Miceno' et 'Terradou', ont été choisies pour leur contraste en ce qui concerne la couleur, la viscosité et le pourcentage de Matière Sèche Soluble ou degré Brix.

2.2. Expérimentation en plein champ

L'essai a été mis en place à Orange (43°54'N 4°52'E), France. Les 4 variétés ont été implantées en 2 blocs et soumises à 2 régimes d'irrigation distribués dans les 2 répétitions. Toutes les plantes ont été élevées selon les mêmes conditions : 900 plantes par génotype ont été plantées le 17 mai 2016 à une densité de 6 plantes.m⁻², la fertilisation (86 kg.ha⁻¹ de N, 33 kg.ha⁻¹ de P et 198 kg.ha⁻¹ de K) a été apportée tout au long du cycle et les bioagresseurs ont été contrôlés selon les pratiques usuelles. L'irrigation a été calculée sur la base de l'Evapotranspiration (ETP) selon l'équation de Penman-Monteith (Monteith, 1965). L'eau a été apportée tous les jours à 100% de l'ETP. Après un mois, 2 régimes d'irrigation ont été appliqués : (1) Stress en eau (60% de l'ETP) et (2) régime d'irrigation normal pour 100% de l'ETP (**Figure 1**). To reproduce production conditions, irrigation was stopped one week before harvest. The soil water potential was recorded hourly using Watermark soil moisture sensors (six per water regime), which were installed at 25 cm and 50 cm depths. The records showed reduced soil humidity at 25 cm depth when compared to the control (**Figure 2**). Trois échantillons indépendants de 15 fruits pour chaque condition et génotype ont été récoltés à 40, 47 et 55 jours après l'anthesis (JAA) pour les analyses de qualité.

2.3. Expérimentation sous serre

8 plantes par génotypes ont été élevées en pots de 4 L remplis de compost (substrat 460, Klasmann, Champety, France) à une densité de 1.8 plantes.m⁻² sous serre et près d'Avignon (43°54'N 4°52'E), France. Le contrôle des températures de jour et nuit a été établi comme suit : 25 – 15°C ; et l'humidité de l'air mesurée entre 30 and 95%. La radiation solaire dans la serre a varié de 7265 to 26244 KJ.m⁻².jour⁻¹. Les plantes ont été nourries tous les jours avec une solution nutritive (Liquoplant Rose, Plantin, Courthézon, France) diluée entre 0.4‰ and 0.8‰ selon le stade de développement, et selon une moyenne de conductivité de 1.8 mS.cm⁻¹. Les plantes ont été d'abord irriguées selon les pratiques courantes, pour maintenir l'humidité du sol et le drainage à respectivement 70% (maximum de capacité de rétention en eau du substrat) et 15%. Toutes les plantes ont été irriguées pour atteindre 100% de l'ETP. Après 30 jours (anthesis des premières fleurs), le déficit en eau a été appliqué pour la moitié des plantes. Pendant 91 jours (jusqu'à la fin de la maturation), l'irrigation a été réduite de 50% de l'ETP pour les plantes sous stress et 100% de l'ETP pour les autres. L'humidité relative du sol a été mesurée chaque semaine entre 9h et 10h dans chaque pot en utilisant des sondes (WCM-control, rodan, Roermond, The Netherlands). La Figure 2 montre le changement dans l'humidité relative du sol pendant l'expérimentation. Les pots sous stress hydrique montrent une humidité relative du sol significativement plus basse que les témoins.

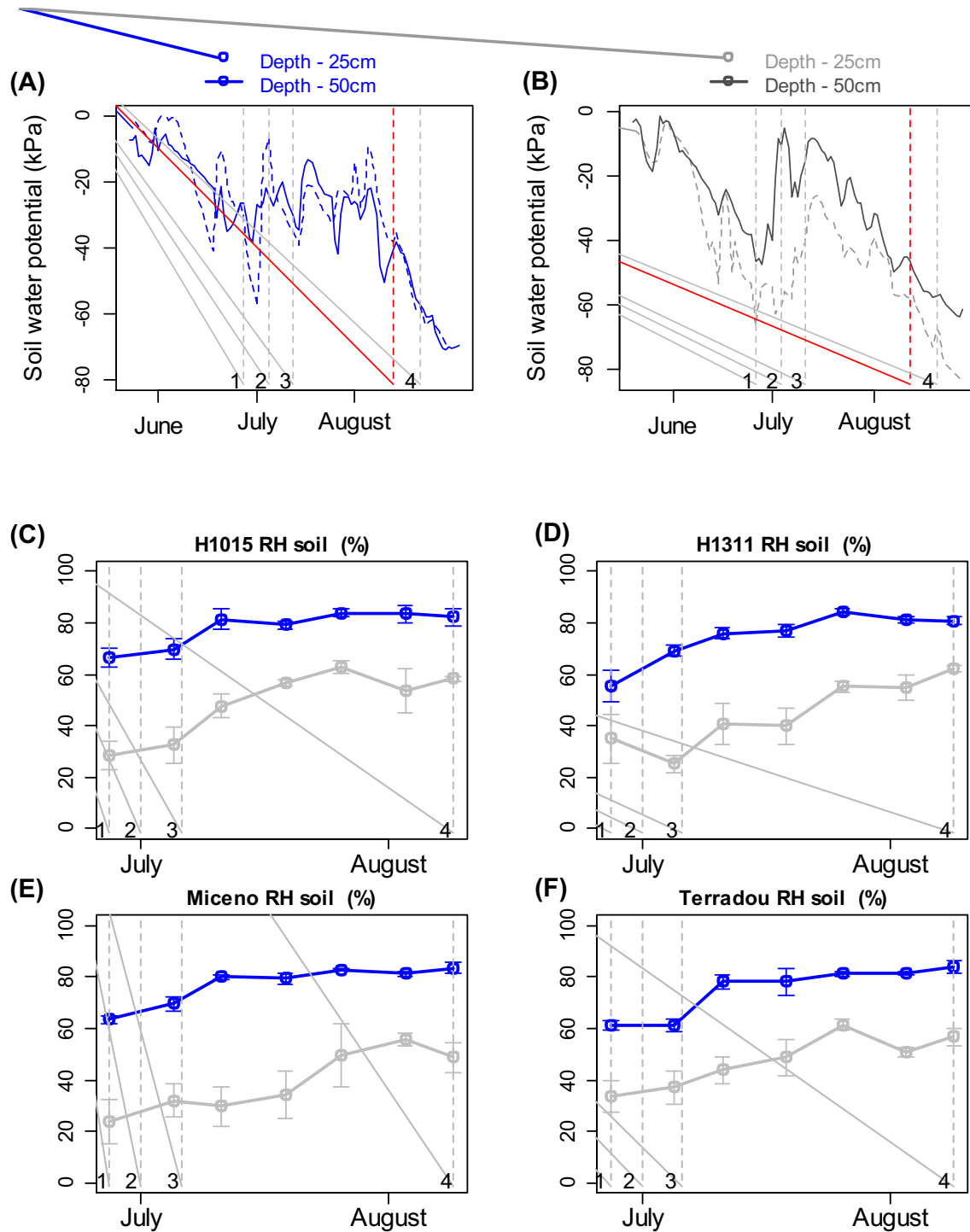


Figure 2. Variation de l'humidité du sol en plein champ (A and B) et sous serre (C, D, E et F). A, et B, le potentiel hydrique du sol a été mesuré par 6 sondes Watermark installées à 25 et 50 cm de profondeur pour le régime à 100% (lignes bleues) et le régime sous stress hydrique (lignes grises). C, D, E et F, l'humidité relative du sol (RH) a été déterminée chaque semaine dans 9 pots des 4 variétés ('H1015', 'H1311', 'Miceno', et 'Terradou') et pour les 2 régimes : 100% (lignes bleues) et 50% (lignes grises). Sur A, B, C, D, E, et F, les lignes verticales grises avec les numéros 1, 2, 3 et 4 indiquent l'anthesis des premiers, second et troisième bouquet et respectivement la récolte de ces bouquets. La ligne verticale rouge sur A, et B indique la fin de l'irrigation.

La conductivité des 2 régimes a été mesurée entre 1 and 2 m.s.cm⁻¹ pendant la première phase et 2 and 3 durant la seconde phase.

Pour les analyses de qualité des fruits, 4 échantillons indépendants de 15 fruits ont été récoltés sur 9 plantes à 3 stades : 40 JAA, 47 JAA, et 55 JAA.

2.4. Mesures physiologiques des plantes et fruits

Pour déterminer l'effet du déficit hydrique sur le fonctionnement des plantes, nous avons effectué des mesures de conductance des feuilles et de croissance des fruits entre 9h et 10h tandis que les mesures de potentiel hydrique étaient effectuées entre 12h et 13h. Chaque semaine, 12 nouvelles feuilles adultes de 6 plantes étaient marquées pour chaque génotype et chaque traitement. La moitié était utilisée pour les mesures de conductances des feuilles (g_s) et le potentiel hydrique dans les feuilles à midi ($\psi_{L\text{midday}}$) tandis que les six autres feuilles étaient recouvertes d'une feuille d'aluminium et de sac plastique pour permettre aux potentiels hydriques des tiges et feuilles de s'équilibrer au moins 2 heures avant les mesures du potentiel hydrique de la tige ($\psi_{S\text{midday}}$). Un poromètre AP4 (Delta-T Devices Ltd, Cambridge, England) a été utilisé pour mesurer la conductance des feuilles. Le potentiel tige et feuille de midi a été déterminé par une chambre de pression (Scholander et al. 1965). Le développement des fruits a été suivi chaque semaine sur 3 fruits de 3 différents bouquets par plante ($n = 3 \times 18 = 54$ fruits par génotype et traitement). Ces feuilles ont été échantillonnées à la fin de l'essai pour déterminer leur surface spécifique (SLA). Les bouquets ont été bagués à l'anthèse et les variations du diamètre des fruits ont été suivies chaque semaine sur 10 fruits par génotype, par traitement et par bloc. Les bouquets à l'anthèse au champ ont été marqués à 3 différentes dates (26 juin, 4 et 11 juillet) pour collecter les fruits à 3 stades autour de la maturité à une même date en Août. Pour reproduire les conditions de croissance au champ, les fleurs ont été baguées à l'anthèse à 3 dates différentes (22 juin, 1^{er} et 7 juillet) sous serre pour collecter les fruits le même jour en Août à 3 stades autour de la maturité. Ainsi, tous les fruits récoltés ont été sous le même régime d'irrigation de l'anthèse à la récolte. Pendant le déficit hydrique, de juin à août, les potentiels eau des tiges et feuilles et la croissance des fruits ont été enregistrés pour les plantes témoins et sous stress.

2.5. Qualité des fruits frais

La couleur des fruits, la matière sèche, l'amidon, les sucres solubles, les acides organiques et caroténoïdes ont été analysés pour les 2 essais plein champ et sous serre. La couleur a été mesurée par un Minolta CR.400 calibré standard. 3 fruits de 3 échantillons ont été testés 3 fois à un point toujours équidistant du plan équatorial du fruit. La teneur en matière sèche a été mesurée à partir de 3 grammes de péricarpe avant et après dessiccation à 70°C. Pour les analyses biochimiques, des bouts de péricarpe ont été conservés congelés à -80°C. Les sucres solubles, l'amidon et les acides organiques ont été extraits selon la méthode décrite par Gomez et al. (2002) et analysés par HPLC (Waters 410, Part WAT070390, Milford, U.S.A.). Les caroténoïdes ont été extraits selon la méthode décrite par Serino et al. (2009) et modifiée par Page et al. (2012) pour la quantification (apo_8'carotenal) après séparation en HPLC sur une colonne C30 (Develosil® C30-UG-3, Nomura chemical CO., Seto, Japan) avec un détecteur UV-visible (SPD-M20A; Shimadzu, Kyoto, Japan).

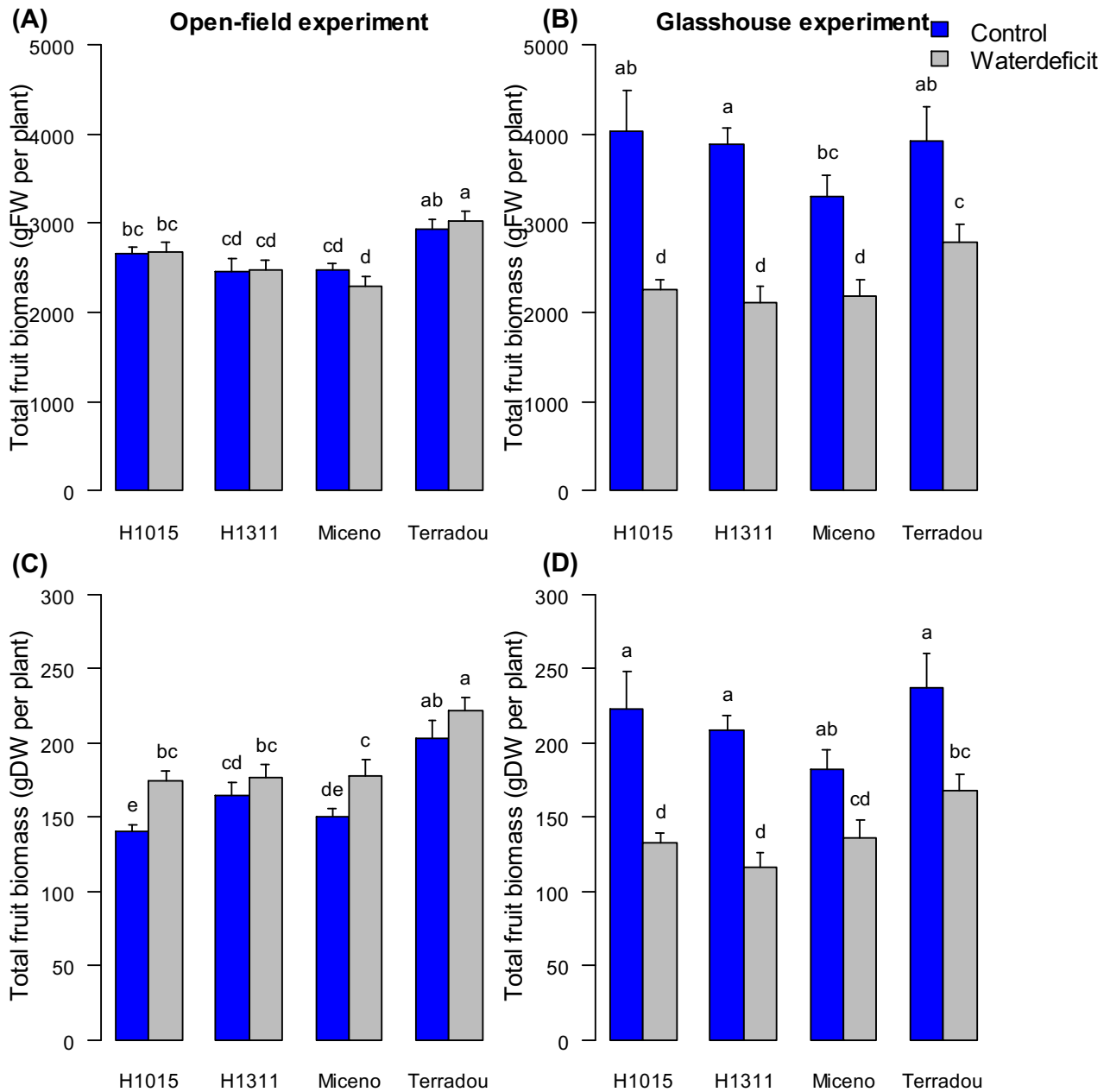


Figure 4. Impact du déficit hydrique et du génotype sur le rendement en matière fraîche (A and B) et sèche (C and D) exprimé en biomasse totale des fruits (g) par plante au champ (A and C) et sous serre (B and D). Le code couleur est bleu pour les plantes irriguées à 100% et gris pour les plantes sous stress. Les différentes lettres indiquent les valeurs de différences significatives ($\alpha = 0.05$).

A la fin août, 4 plantes par conditions ont été échantillonnées pour mesurer le rendement frais et sec. Sous serre, une analyse supplémentaire consistait en la mesure du nombre de cellules par péricarpe après dissociation des tissus selon la méthode adaptée de Büniger-Kibler and Bangerth (1983). Les cellules ont été comptées au microscope équipé d'une caméra (QImaging, Surrey, Canada) et du logiciel Qcapture Pro 6.0 (QImaging, Surrey, Canada) (Bertin et al., 2002).

2.6 Qualité du process des tomates

Les purées ont été préparées à la fois en hot break (HB) et cold break (CB) selon une méthode à l'échelle laboratoire décrite par Page et al. (2012) avec quelques modifications. Les fruits ont été coupés en gros bouts (autour de 2 cm³), mixés ensemble, et étalés dans 2 lots identiques de 400 g chacun. Pour le HB, un lot a été d'abord chauffé à température d'ébullition dans un four micro-ondes (900w, pleine puissance, 0.9 s.g⁻¹ de tomate), puis broyé 30 sec dans un blender Waring®. Pour le CB, l'autre lot a été d'abord broyé à température ambiante pendant 30 sec avec le même blender Waring® puis chauffé sur la même durée et condition que le HB. Les 2 purées ont ensuite été passées à travers un broyeur à pomme de terre à main avec un tamis de 2 mm pour enlever peaux et graines, mises dans un flacon de 500 ml en verre avec un couvercle scellé, stérilisées 15 min à 100°C dans un autoclave de laboratoire, et stockées à 4°C avant analyse. L'étape de broyage à température ambiante sur le process CB permet la réaction des enzymes intrinsèques des fruits (surtout polygalacturonase et pectin-methyl esterase) sur les cellules des parois, et ainsi, conduit à une moindre consistance des purées comparées à celles sous HB. Le calcul de la différence de consistance entre HB and CB dans nos conditions standards nous permet d'avoir une estimation indirecte du potentiel enzymatique des fruits. La couleur des purées a été mesurée avec un Minolta CR.400 en utilisant une cuvette spécifique pour la couleur des liquids ou des pates. Les résultats ont été exprimés en espace de couleur CIE L * a * b. Ces coordonnées de couleurs ont été utilisées pour le calcul de l'angle hue (H°), qui identifie la couleur à 360° (McGuire 1992). La teneur en matière sèche a été déterminée par la pesée de 3 g de purée de fruits avant et après 3 jours de dessiccation à 85°C. La teneur en sucres solubles (SSC) a été mesurée par réfractométrie avec un réfractomètre digital ATAGO PR-1000 à température automatiquement compensée à 25 °C et les résultats exprimés en degrés Brix selon l'AOAC (2002). Le comportement rhéologique des purées a été mesuré selon 2 techniques : 1) Consistomètre Bostwick (CSC Scientific Company, Fairfax, USA) exprimé en unité Bostwick (Bw) selon le manuel. Plus la mesure est basse, plus la consistance est haute ; 2) Viscosimètre Anton Paar MCR 301 (Graz, Austria), la viscosité est calculée sur une mesure d'état stationnaire., avec une double roue à rouleaux (avec un rayon interne 11 mm, un pas de 45 mm, une longueur de 45 mm et une coupe stationnaire externe d'un rayon externe de 14.46 mm). Une courbe d'écoulement est enregistrée entre 0.1 and 100 s⁻¹, 50 points et 5 secondes par point. Les propriétés d'écoulement sont décrites par le modèle de Herschel-Bulkley (Espinosa, To et al. 2011).

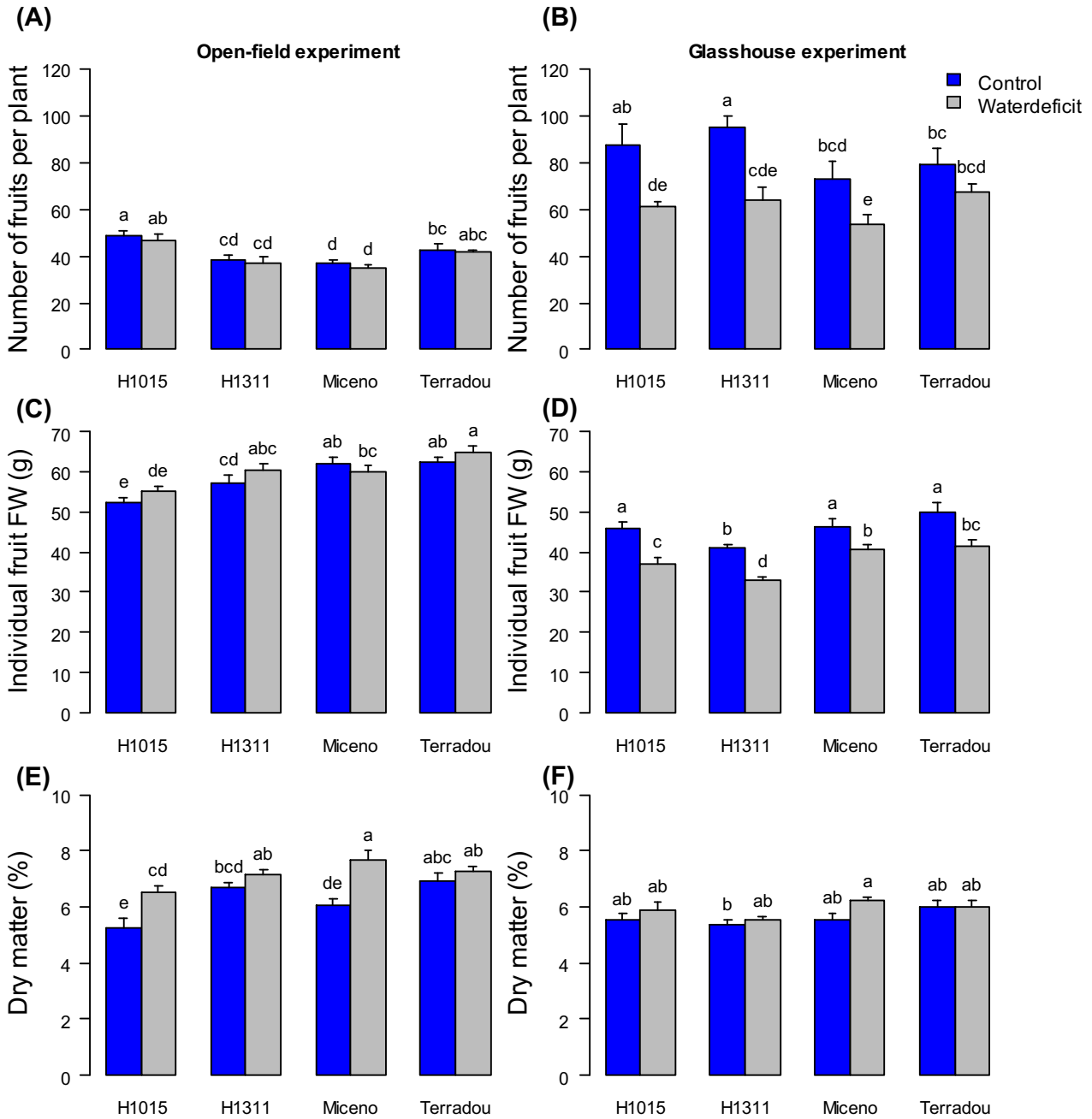


Figure 5. Changement dans les traits liés au rendement pour les 4 variétés au champ (A, C, et E) et sous serre (B, D, et F) et sous 2 régimes hydriques (témoin en bleu et stressé en gris) : nombre de fruits par plante (A et B), poids des fruits frais (FW) (C et D) et teneur en matière sèche du péricarpe des fruits collectés à 55 JAA (E et F). Pour A, B, C et D, moyenne \pm SE, $n \geq 8$. Pour E et F, moyenne \pm SE, $n \geq 4$. Les différentes lettres indiquent les valeurs significativement différentes ($\alpha = 0.05$).

2.5. Analyse des données

Les données ont été analysées par le logiciel statistique R (<http://www.R-project.org>). Les traits physiologiques, les données de rendement, et les traits de qualité ont été analysés par une ANOVA (the agricolae R package and aov function). Pour l'expérimentation au champ, quand le test ANOVA ne montre pas de différence significative entre les moyennes des 2 blocs, celles-ci sont regroupées. Une comparaison multiple des moyennes a été faite en utilisant le test Least Significant Differences (LSD) ($\alpha = 0.05$) ou le test non paramétrique Kruskal-Wallis avec $\alpha = 0.05$. Pour l'Analyse des Composantes Principales (ACP) (**Figure. 6**) les données étaient composées de 7 variables de composition de fruits (teneurs exprimées sur la base de poids de MS) et 48 observations (4 variétés x 3 stades x 2 conditions de culture x 2 régimes hydriques). Les données (moyennes de 4 répétitions biologiques) ont été centrées par variable.

3. Résultats

3.1. La composition des fruits frais et le rendement ne sont pas autant affectés par le stress en eau, que les caractéristiques intrinsèques des plantes

Les mesures d'humidité du sol (**Figure 2**, A and B) indiquent que les plantes témoins (A) ont une meilleure utilisation du potentiel hydrique du sol que celles sous le stress (B) à 25 cm de profondeur (lignes pointillées). Sous de bonnes conditions d'irrigation, 50% des données (entre la partie haute et basse du quartile) sont comprises entre -38 et -13 kPa alors que sous stress hydrique, 50% sont comprises entre -57 et -27 kPa. A 50 cm de profondeur, le potentiel hydrique du sol semble similaire pour les 2 régimes (**Figure 2**, A et B, lignes entières). Sous serre (**Figure 2**, C, D, E, et F) une large réduction de l'humidité relative du sol a été observée sur l'ensemble des pots sous le régime de déficit hydrique (lignes grises) de 25 à 60% de réduction. Durant le déclin de l'humidité du sol, une diminution de 50% de la conductance des stomates (gs) a été observée pour toutes les variétés en plein champ comme sous serre. Pour toutes les variétés, il y a une différence significative des potentiels hydriques des tiges et feuilles de midi ($\psi_{Lmidday}$ and $\psi_{Smidday}$) lorsque nous comparons les plantes sous les 2 régimes hydriques sous serre. La plus grande variation enregistrée pour $\psi_{Lmidday}$ est comprise entre -0.7 et -0.5 MPa pour les témoins et -1 à -0.6 MPa pour les plantes sous stress hydrique.

Donnée intéressante, une réduction de 40% de l'irrigation dans les conditions de plein champ ainsi que des variations de fonctionnement des plantes n'impactent pas le rendement en matière fraîche exprimé en biomasse totale des fruits par plante mais augmente légèrement le rendement en matière sèche (+ 27% pour 'H1015') (**Figure 4**, A et C). De plus, 'Terradou' présente les plus hautes valeurs en rendements en matières fraîches et sèches, tandis que 'Miceno' présente les plus basses aux 2 régimes. Les conditions sous serre augmentent significativement le rendement en matière fraîche et sèche pour les plantes sous irrigation à 100%, peu importe la variété, comparé aux valeurs de plein champ (+ 50% pour le rendement en matière fraîche) (**Figure 4**, A et B). Cette différence résulte d'un plus grand nombre de fruits par plante et pas de fruits plus gros pour des plantes cultivées sous serre (**Figure 4** A, B, C, et D). Les hautes valeurs de rendements en matières fraîches et sèches sont aussi atteintes par 'Terradou' sous les 2 régimes sous serre.

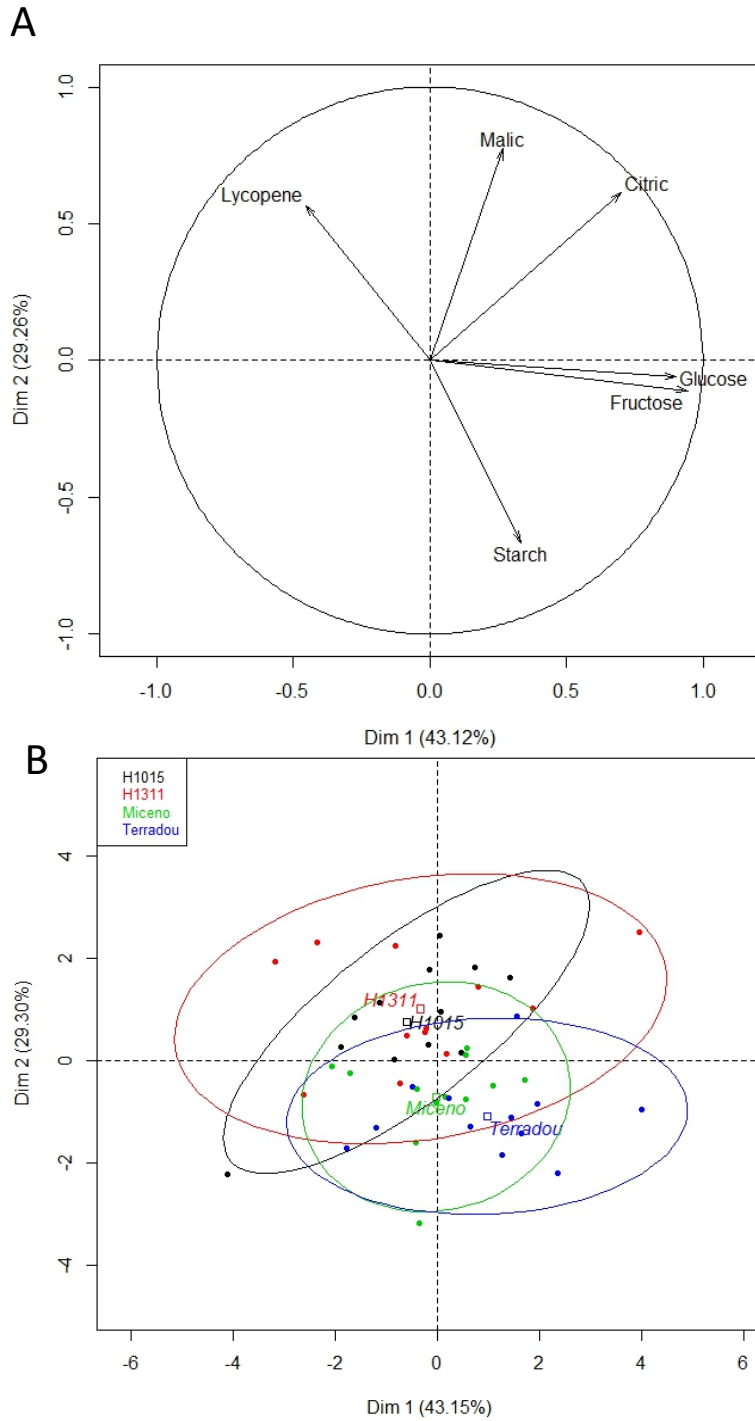


Figure 6. Représentation des résultats de l'ACP pour les traits de qualité des fruits sur la dimension 1 (43,12% de la variance totale) et 2 (29,26% de la variance totale). Les proportions des variabilités expliquées sont indiquées sur chaque axe ; A: projection des variables prises en compte ; B : projection des individus labellisés par génotype. L'Ellipse réunit 95% des individus autour du barycentre représentant la moyenne des compositions de chaque génotype.

Sous ces conditions, le déficit hydrique diminue significativement les rendements en matières fraîches et sèches de toutes les variétés (de - 34 à - 44% pour le rendement en matière fraîche et de - 25 à - 47% pour le rendement en matière sèche **Figure 4**, B et D). Le taux de matière sèche du péricarpe des fruits ne change pas significativement en comparant les 2 régimes d'irrigation sous serre mais augmente pour "H1015" et "Miceno" au champ sous stress hydrique (**Figure 5**, E et F). Le faible impact du déficit hydrique sur le rendement au champ nous a incité à calculer la productivité en fruits frais (en g) par kilogramme d'eau utilisée pour l'irrigation sous les 2 régimes. La productivité est comprise entre 25 et 29 (suivant les variétés) g de fruit par kg d'eau sous le régime à 100% et de 33 à 41 g de fruit par kg d'eau sous le régime stressé. Cette productivité est restée la plus haute (de 38 à 50) sous serre compare à celle des témoins (de 32 à 39).

La composition des fruits a été principalement contrôlée par le génotype, et ni la date de récolte, ni le déficit hydrique ont eu un impact significatif. En effet, une analyse en ACP des teneurs en acides et sucres ne révèle pas de groupes distincts, tandis que 72% de la variabilité est expliquée par les 2 premières dimensions (**Figure 6**). La première dimension est dominée par l'opposition entre la teneur en lycopène et l'amidon, et la seconde par l'opposition entre de nouveau la teneur en lycopène et les teneurs en fructose et glucose (**Figure 5 A**). La projection des individus sur un plan montre les caractéristiques communes des génotypes. H1311, génotype à haute teneur en lycopène était logiquement le plus à gauche. "Terradou", qui montre le plus de teneur en sucres solubles et le moins en lycopène est plutôt situé en bas à droite... Mais aucun groupages spécifiques ou changements de positions n'ont été relevés en fonction des Jours Après Anthèse (JAA) ou du stress. Ces résultats sont confirmés par les calculs de PLS-DA : aucun modèle significatif ne peut être calculé pour la relation entre la composition, le stress ou le JAA. La seule corrélation concerne l'impact du génotype, mais le coefficient de corrélation (r^2) et le paramètre de qualité (Q^2) sont très bas (0.43 and 0.35 respectivement). De manière similaire, la composition de matière sèche des fruits collectés sous serre n'était pas significativement affectée par le stress hydrique, la variété ou le stade de maturité (les données ne sont pas présentées).

3.2 Le stress hydrique affecte le comportement rhéologique des purées de tomates et la réactivité des fruits au process tandis que seuls les génotypes et le stade de maturation ont un impact sur la couleur

Tandis que le génotype et le stade de maturité impactent avec une grande influence le comportement rhéologique des purées, le stress hydrique induit une viscosité et une consistance significativement plus haute pour ces mêmes purées. En effet, la variété a un impact majeur, peu importe le régime hydrique (**Figures 7 A**, et B) ou le stade de maturation (**Figure 7 C**). Le génotype "H1311" présente les plus hautes propriétés rhéologiques pour les purées à tous les stades de maturité (40, 47 and 55 JAA). Par exemple, pour les fruits récoltés à 55 JAA, H1311 montre des valeurs de 3,99 Pa.s⁻¹ pour la viscosité et 9,13 cm pour la consistance Bw des purées produites à partir du régime stressé, et une viscosité de 3,73Pa.s⁻¹ et 9,38 cm de Bw pour des purées produites à partir du régime à 100% de l'ETP. Ces valeurs indiquent une viscosité supérieure de 22.3%, 44.36% et 49.62% dans le groupe du régime stressé en relation avec les génotypes "Miceno", "H1015" et "Terradou", respectivement.

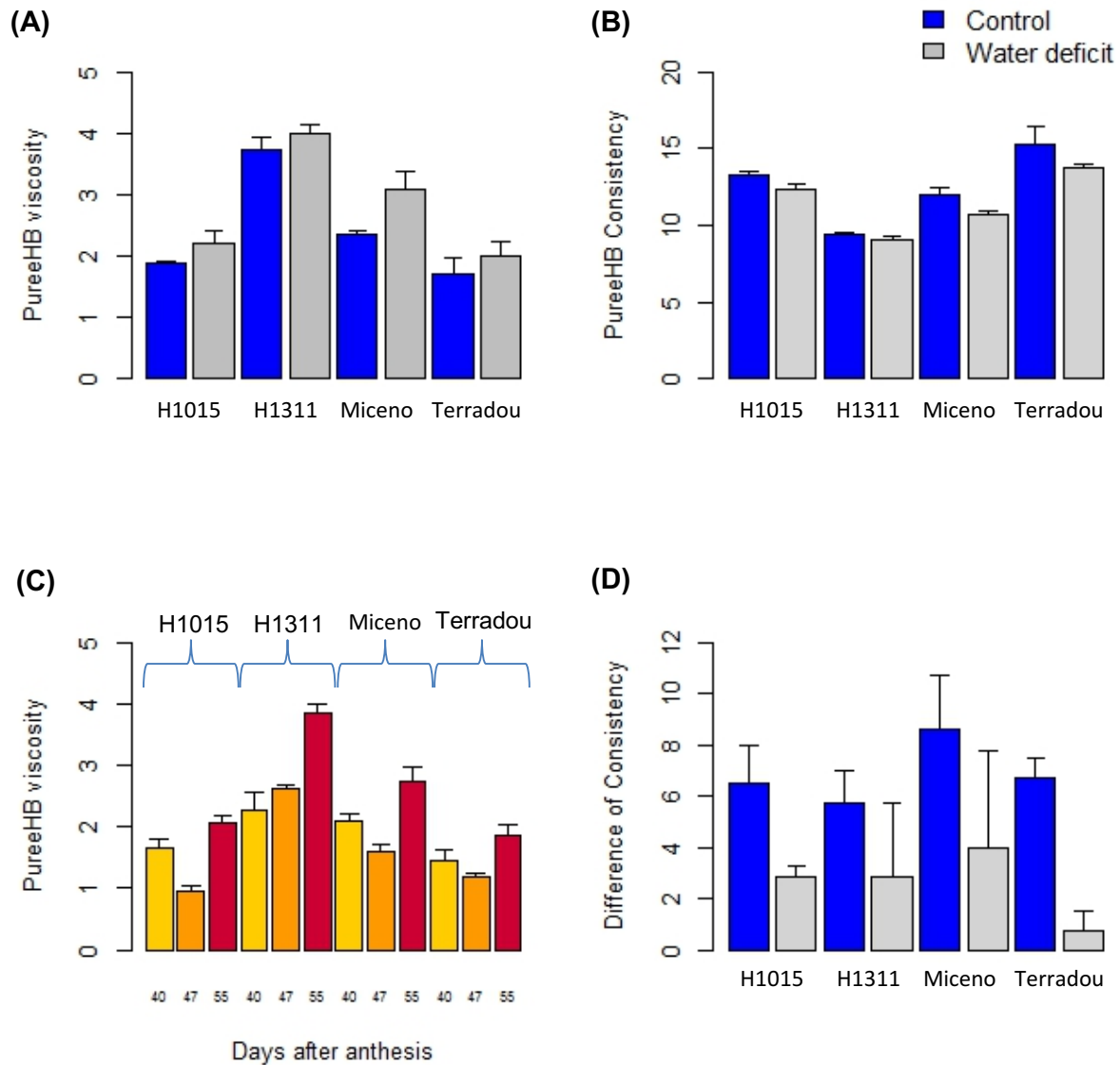


Figure 7. Impact du stress hydrique (A, B, et D), génotype (A, B, C, et D) et stade de maturation (C) sur les paramètres de consistance des purées sous conditions de plein champ. A, et B, changements dans les valeurs de viscosité et Bostwick des purées HB, tous les fruits étant récoltés à 55 JAA. Variations de la viscosité des purées HB quand les fruits sont collectés à 3 stades [40, 47 et 55 JAA] autour de la maturité (C). D, Différence de consistance (mesurée par Bostwick) entre les purées HB et CB obtenues à partir de fruits collectés à 55 JAA. Moyennes \pm SE, $n \geq 2$.

Dans l'autre groupe, la même classification est maintenue et les moyennes de "H1311" sont supérieures de 36.73%, 49.06% et 54.15% comparées aux autres génotypes. En relation avec le Bostwick, les moyennes suivent les mêmes tendances et maintiennent le même classement des variétés.

La date de récolte est le second paramètre d'influence sur les propriétés rhéologiques des purées et les résultats pointent spécialement les derniers jours : la viscosité décline légèrement ou est stable entre 40 et 47 JAA et puis augmente nettement entre 47 et 55 JAA (+100%, **Figure 7 C**).

Un autre constat majeur est que le déficit hydrique influence nettement la réactivité enzymatique des fruits. La différence de consistance entre les purées HB et CB est remarquablement basse pour les purées produites à partir de fruits de tomates récoltés à 55 JAA et sous le stress, comparé aux mêmes purées des fruits témoins et peu importe la variété (**Figure 7 D**), avec une perte entre -48% pour H1311 et -75% pour "Terradou".

Les purées produites à partir de fruits sous serre montrent un comportement parallèle en ce qui concerne le génotype, la date de récolte et le stress hydrique, même si pour ce dernier l'effet soit limité comparé au génotype (valeur F : 6.88 et 39.05 respectivement). Un point intéressant est que les produits issus de la serre sont toujours moins visqueux que ceux du plein champ, peu importe la variété, le régime hydrique et le stade de maturation. Le groupe du régime stressé au champ montre +69,45% et -21,67% de viscosité et Bw, respectivement, tandis que les fruits des témoins, +68,46% de viscosité et 23,40% de Bw.

3.3 Le déficit hydrique n'affecte ni la couleur des fruits frais ni celle des purées

En ce qui concerne le paramètre couleur, les variétés et le stade de maturation ont un impact significatif sur les valeurs d'angle HUE (**Figure 8**). Ces résultats ne sont pas surprenant puisque 40 JAA n'est pas la date de maturité totale des fruits et H1311 est une lignée très riche en lycopène. Le stress hydrique n'a pas affecté ce caractère (Valeur P = 0.62 dans l'essai au champ).

Les données montrent une différence variétale pour la valeur de l'angle HUE (**Figure 7**). La purée HB de 'H1311' présente les plus faibles valeurs ce qui est conforme avec les faibles valeurs sur fruits frais comparé aux autres variétés. Comme supposé, une différence significative est aussi trouvée pour la valeur angle HUE entre le premier stade de maturité et les deux autres., et cela caractérisé par de faibles valeurs d'angles HUE sur les purées HB et les fruits frais. Dans tous les cas, la plus faible valeur était associée à la plus haute teneur en lycopène.

3.4. Il y a corrélation de traits de qualité entre fruits frais et purées

Pour comprendre l'impact des fruits frais sur le produit final, des corrélations entre les traits de qualité des fruits frais et purées ont été analysées dans le détail. La **Figure 9** résume les données obtenues au champ et basées sur le coefficient de corrélation de Pearson entre paires de traits de qualités. La significativité de la corrélation est indiquée par un code couleur : rouge pour une corrélation significativement négative, et bleu pour une corrélation significativement positive. Comme prévu, la couleur des purées HB et CB déterminée par l'angle HUE est corrélée négativement avec la teneur en lycopène des fruits frais.

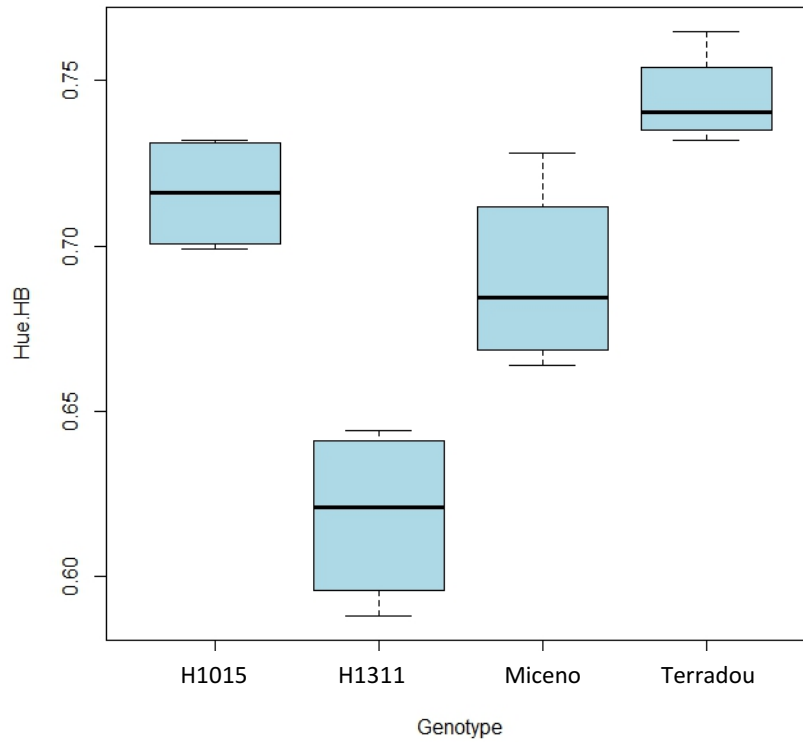


Figure 8 : Impact du génotype sur le calcul de l'angle HUE de couleurs mesurées sur purées HB obtenues à partir de fruits collectés à 55 JAA et en plein champ. Les boîtes à moustaches réunissent les valeurs des fruits sous les 2 régimes d'irrigation, seul le génotype a eu une influence significative sur les changements de couleur.

Par contraste, il n'y a pas de corrélations trouvées entre l'angle HUE des purées et celui des fruits frais. Il est aussi intéressant de noter que la viscosité des purées HB est corrélée positivement avec la teneur en lycopène des fruits frais. Il y a aussi concordance entre l'essai au champ et celui sous serre.

4. Discussion

Grace à la mise en place de sondes Watermarks, il a été possible de conduire l'irrigation en la réduisant à un régime proche de 60% des besoins de la plante durant toute la période entre l'anthèse et la récolte des fruits. Une économie conséquente d'eau a été donc faite sur la parcelle conduite dans ces limites. En serre, nous avons atteint des valeurs légèrement plus drastiques : 50% environ. La conduite avec les sondes permet de réduire l'irrigation de façon progressive et constante tout au long de la période de production, et de tenir compte des aléas climatiques.

Visuellement, les plantes apparaissaient touchées par le déficit hydrique, et nous obtenons ainsi des fruits légèrement plus petits au champ, mais il n'y a pas de différences statistiquement détectables sous serre. Le phénotype du fruit a été respecté malgré l'impact réel du stress hydrique sur la plante. Nous établissons clairement que la plante a été impactée et a dû s'adapter au stress grâce au suivi de constantes agronomiques (potentiel hydrique,...).

Au champ, il n'y a pas d'impact significatif de la réduction d'irrigation sur le rendement en matière fraîche. Et comme les fruits étaient légèrement plus riches en matière sèche, la réduction d'irrigation a même créé une augmentation du rendement en matière sèche par hectare. C'est cette valeur qui est la plus importante pour les industriels qui, eux, évapore l'eau des fruits lors des process. Le gain a donc été double : gain d'irrigation en apportant près de 40% d'eau en moins sur les parcelles, et de plus, on apporte à l'usine des fruits légèrement plus riches en matière sèche, donc gage de meilleur rendement industriel. Sous serre, la réponse a été différente, nous avons une nette baisse de productivité, mais celle-ci a essentiellement été le fait d'une baisse du nombre de fruits produits par plante (voir la **Figure 5**). La légère augmentation du taux de matière sèche ne permet pas de compenser ce manque. Sous serre, les facteurs limitants ne sont pas les mêmes, ils sont plus d'ordre physiologique pour la plante, les conduites de culture étant totalement différentes.

Sur le détail des impacts du déficit hydrique sur les composantes du rendement, nous voyons clairement que les fruits au champ sont un peu plus riches en matière sèche, et que, parmi eux, ceux issus du stress hydrique sont encore plus riches en matière sèche. La construction du rendement au champ et à la serre n'a pas été la même.

L'analyse de la composition des fruits avec une ACP ne permet pas de distinguer ceux produits en conditions limitantes. Ils ont sensiblement la même composition. Cette dernière est essentiellement contrôlée par le génotype, et par le stade de développement. Ici, également, les résultats indiquent que la tomate « protège » le phénotype de ses fruits malgré le déficit hydrique.

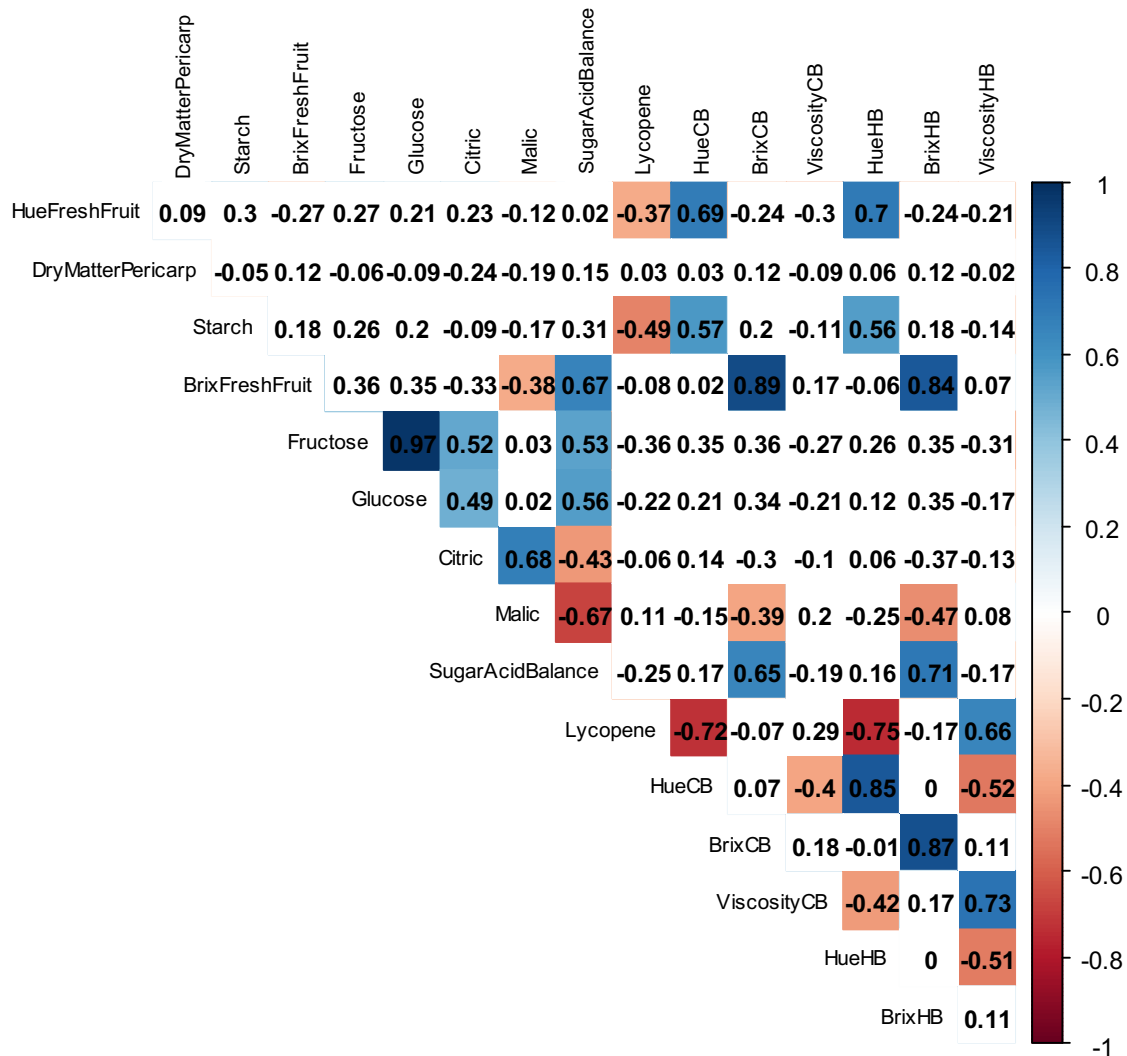


Figure 9. Matrice de Corrélation des fruits [angle HUE des fruits frais, teneur en MS du pericarpe, Brix, amidon, fructose, glucose, teneur en acide citrique, malique, et lycopène exprimés sur la base du poids de MS, nombre et volume des cellules du péricarpe] et purées [angle HUE du CB ou du HB, Brix CB ou HB, et viscosité CB ou HB], traits de qualité en conditions de plein champ. Un code couleur est associé au coefficient de corrélation de Pearson, de rouge (corrélacion négative) à bleu (corrélacion positive) quand les corrélacions sont significatives.

Concernant l'impact sur les produits industriels et notamment la viscosité des purées produites à partir des fruits de l'essai, il n'y a pas d'impacts majeurs du déficit hydrique sur les viscosités (mesurées avec un rhéomètre de laboratoire : A), ni sur la consistance telle qu'on la mesure de façon traditionnelle en usine (Bostwick: B). En revanche, nous mettons bien en évidence l'impact du stade de maturité du fruit. Il y a un gain majeur entre le 40ème et le 47ème jour après anthesis sur la viscosité. Cela démontre l'importance de disposer d'un indicateur, dans le futur, permettant de cueillir les fruits à l'optimum de leur maturité.

En revanche, il semble que nous ayons fortement touché un paramètre important pour les industriels : la réactivité des fruits au process. En effet, les industriels utilisent cette réactivité, principalement les enzymes intrinsèques des fruits qui permettent de faire chuter la viscosité, pour faire chuter cette viscosité des fruits par des process permettant la macération (process CB). Or, ici, nous montrons clairement que les fruits conduits sous déficit hydrique ont une baisse importante de leur capacité à perdre de la viscosité durant le process. Des investigations plus précises doivent être menées pour savoir si nous avons réduit l'activité enzymatique ou s'il s'agit d'un changement de structuration des tissus du fruits, modification de nature des pectines, par exemple.

Pour la couleur, il n'y a pas d'impact significatif du déficit hydrique. C'est le génotype qui reste le paramètre le plus significatif pour expliquer le changement de couleur.

5. Conclusion

Cette première année d'étude nous permet de mettre en évidence les premiers résultats de l'impact du stress hydrique sur la transformation des tomates d'industrie. Au champ, il est possible de réduire l'irrigation de 40% et de ne pas avoir d'impact sur le rendement, mieux encore, cela permet d'apporter plus de matière sèche à l'usine.

L'analyse de la composition des fruits n'indique pas de différence significative suivant les régimes hydriques. Les plantes semblent se prémunir du déficit et ne se trouvent pas changées. En revanche, nous mettons bien en évidence l'impact du stade de maturité du fruit sur la viscosité, paramètre important pour les industriels dans l'élaboration de leurs produits transformés. Cela démontre l'importance de disposer d'un indicateur du type IR, dans le futur, permettant de cueillir les fruits à l'optimum de leur maturité.

A l'issue de cette première étude, une question se pose car nous montrons clairement que les fruits conduits sous déficit hydrique ont une diminution importante de leur capacité à perdre de la viscosité durant le process. Il faudra mener d'autres travaux pour savoir si nous avons réduit l'activité enzymatique ou s'il s'agit d'un changement de structuration des tissus du fruits, et une modification de nature des pectines, par exemple.

A terme, le modèle prédictif IR et son outil associé pourraient même être développés pour les autres filières de fruits et légumes en recherche de valorisation qualitative de la matière première dans leur système de culture (gestion de l'eau et des intrants, date de récolte idéale) tout en préservant l'environnement.