



Comment piloter au champ la qualité de la tomate d'industrie? : impact du déficit hydrique, du génotype et des procédés sur la qualité finale des produits transformés

Alexandre Arbex de Castro Vilas Boas

► To cite this version:

Alexandre Arbex de Castro Vilas Boas. Comment piloter au champ la qualité de la tomate d'industrie? : impact du déficit hydrique, du génotype et des procédés sur la qualité finale des produits transformés. Sciences agricoles. Université d'Avignon, 2018. Français. NNT : 2018AVIG0701 . tel-02132173

HAL Id: tel-02132173

<https://theses.hal.science/tel-02132173>

Submitted on 16 May 2019

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.

THESE

Présentée pour obtenir le grade de **Docteur en Sciences**
de l'université d'Avignon et des pays de Vaucluse

Spécialité : Sciences Agronomiques

**Comment piloter au champ la qualité de la tomate d'industrie ?
Impact du déficit hydrique, du génotype et des procédés sur la
qualité finale des produits transformés**

Par **Alexandre Arbex de Castro Vilas Boas**

Soutenue publiquement le 17 décembre 2018 devant le jury composé de

Huguette SALLANON	Professeur UAPV, Avignon	Présidente du Jury
Marc LAHAYE	Directeur de Recherche INRA, Nantes, BIA	Rapporteur
Vanessa VERNOUD	Chargée de Recherche INRA, Dijon, GEAPSI	Rapporteur
Mickaël DALAIRE	Enseignant Chercheur Agro Campus Ouest, Rennes	Examinateur
Giana ALMEIDA	Maître de conférences AGRO PARIS TECH, Paris	Examinatrice
Marion PRUDENT	Chargée de Recherche INRA, Dijon, GEAPSI	Examinatrice
Nadia BERTIN	Directrice de Recherche INRA, Avignon, PSH	Directrice de Thèse
Anne-Laure FANCIULLINO	Chargée de Recherche INRA, Avignon, PSH	Co-directrice de Thèse
David PAGE	Chargé de Recherche INRA, Avignon, SQPOV	Co-directeur de Thèse

Ecole doctorale

Agro sciences et Sciences (ED536), Sciences, Technologie, Santé

Laboratoire

INRA-UR 1115 Plantes et Systèmes de culture Horticoles (PSH), Avignon

INRA-UMR 408 Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale (SQPOV), Avignon

Partenaire financier

Capes – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior

MEC – Ministério da Educação / Governo do Brasil

TERSYS

SONITO - Société National Interprofessionnelle de a Tomate

REMERCIEMENTS

À ma famille et à mes amis qui ont toujours été à mes côtés, même s'ils se trouvent à plus de 10 000 kilomètres. À mes parents qui m'ont toujours confié ce défi et qui, malgré la distance, m'ont soutenu à chaque instant de ma vie.

À CAPES et le gouvernement fédéral du Brésil pour la subvention financière afin que cette thèse puisse être réalisée.

Je tiens à remercier infiniment mes directeurs de thèse, qui m'ont donné l'opportunité de faire ce doctorat dans cette institution reconnue dans le monde entier et qui m'ont fait confiance pour mener ce travail.

À Anne-Laure qui m'a accompagné dès le début et qui m'a aidé tout le temps pendant ces trois ans et demi. Nadia pour toutes les connaissances partagées avec moi au cours de cette période.

À David pour tous les enseignements à l'intérieur et à l'extérieur de l'INRA, les chemins perdus dans le Sud-Ouest, les fromages présentés, les voyages effectués, les conseils de voyages dans toute la France et l'Europe.

Merci également à Robert Giovinazzo pour son accompagnement, son aide et son amitié acquise à cette époque. À Sophie Colvine pour tous les échanges d'informations et opportunités de connaissance au cours de cette thèse. À Diane Barret pour toutes les connaissances transférées et les aides pendant les périodes de collecte et d'analyse de données.

Patrice Reiling, qui a été avec moi depuis mon premier jour à l'INRA et surtout hors de l'INRA, où nous avons pu partager les mêmes passions sportives, et m'a permis de vivre des expériences inimaginables tout au long de cette période et que je prendrai comme ami toute ma vie.

À tous ceux qui ont pu contribuer à ce projet de quelque manière que ce soit, qu'ils soient techniciens ou chercheurs : Sylvie Bureau, JF Maingonnat, Mariele Boges, Carolina Garcia, Nicolas Biau, Guillaume Garcia, José Fabre, Michel Pradier, Ouatarra, Khadija, etc.

À tous les amis que j'ai fait ici et que je ne garderai en mémoire que des souvenirs positifs: Chiara, Thibault, Gaetean, Wael, Lena, Alexandra, Carla, Tiago, Vitor, Coffi, Blanche, Camille, Léandro, Justine, Stéphanie, etc.

Je vous remercie énormément pour tout ce temps et espère que chacune des personnes à qui j'ai eu l'occasion de vivre cette étape de ma vie avec moi pourra également prendre quelque chose de moi pour le reste de ma vie.

Merci beaucoup

Alê

ABREVIATIONS

AsA	Ascorbate
AT	Acidité titrable
Bw	Bostwick;
CB	Cold Break
DMC	Dry Matter Content
ETP	Evapotranspiration
HP	High Pressure
JAA	Jours Après Anthèse
JAS	Jours Après Semée
Kc	Coefficient de Culture
MS	Matière Sèche
TA	Titratable Acidity
P	Pluviométrie
PG	Polygalacturonase;
PME	Pectin Methyl-Esterase;
SSC	Soluble Solid Content
TEP	Tomate Entière Pelée
TENP	Tomate Entière Non Pelée
TNPNE	Tomate Non Pelée Non Entière
VIP	Variable Important in Projection
WD	Water Deficit

SOMMAIRE

AVANT PROPOS.....	09
INTRODUCTION GENERALE.....	12
QUESTIONS DE RECHERCHE ET DEMARCHE.....	14
1. Analyse Bibliographique.....	16
1.1 La tomate d'industrie dans le monde et en France	16
1.2 La culture de la tomate d'industrie	20
1.2.1 Cycle de production de la tomate d'industrie et pratiques culturales	21
1.2.2. La recherche de la qualité au sein de la filière tomate d'industrie en France	24
1.2.3 Impact de l'environnement et des pratiques culturales sur la qualité des fruits	27
1.3 Les procédés de transformation	29
1.3.1 Gammes de produits manufacturés à base de tomates	29
1.3.2. Les étapes clés d'un protocole de production de concentrés.....	31
1.3.2.1 Récolte et transport :	31
1.3.2.2 Agréage / déchargement:.....	31
1.3.2.3 Lavage/broyage :	32
1.3.2.4 Le break :	32
1.3.2.5 Raffinage :.....	33
1.3.2.6 Chambrage/concentration :	33
1.3.2.7 Concentration :	33
1.3.2.8 Conditionnement/stockage :	33
1.3.3 La qualité des jus 2002 et des concentrés de tomate	34
1.3.3.1 Consistance	34
1.3.3.2 Couleurs.....	34
1.3.3.3 Saveur	35
1.3.3.4 Valeur nutritionnelle	35
Résumé.....	40
2. Analyse de la production de tomates d'industrie en France et détermination des principaux facteurs influençant la qualité des produits frais et transformés.....	41
Introduction.....	41
Matériels et méthodes.....	42
Données climatiques et pratiques culturales	42
Analyse du rendement	45

Analyse de la qualité des fruits.....	46
Transformation des tomates et qualité des purées.....	46
Analyse des données.....	46
Résultats et discussion	47
Le choix variétal et le contexte pédoclimatique affectent le rendement et la qualité à la récolte...	48
La qualité des purées dépend surtout du cultivar et du procédé de cuisson indépendamment de la zone de production	53
Conclusions.....	58
Remerciements.....	58
REFERENCES	59
3. Combined effects of irrigation regime, genotype, and harvest stage determine tomato fruit quality and aptitude for processing into purees.....	60
ABSTRACT :	60
Introduction.....	60
Materials and Methods.....	63
Open-Field Experiment	63
Glasshouse Experiment.....	64
Plant and Fresh Fruit Physiological Measurements.....	65
Fresh Fruit Quality	66
Tomato Processing and Quality	67
Data Analysis	68
Results.....	68
Yield and Fruit Composition Were Not Much Affected by Water Deficit, Despite Significant Plant Responses.....	68
Genotype and Maturity Stage Controlled Puree Quality While WD Improved Rheological Properties.	71
Discussion.....	75
Moderate Effects of WD on Fruit Yield and Quality Are Observed in Glasshouse Conditions Only Irrespective of the Genotype.....	77
Water Deficit Improves Puree Rheological Properties	79
Fruit Lycopene Content Rather Than Dry Matter Content Controls Puree Quality.....	82
Author Contributions	83
Funding.....	83
Acknowledgements	84
REFERENCES	84
4. Genotype, water deficit and cooking process affect the structure and viscosity of purees.....	88
ABSTRACT:.....	88

Introduction.....	88
Material and methods	91
Plant material and processing conditions	91
Fresh fruit SSC and DMC	91
Fresh fruits cells number	91
Manufacture of purees	92
Puree/serum viscosity.....	92
Enzymatic activity	92
Repartition of the dry matter of purees into serum and different particle-size classes.....	93
Particles sizes measurement	94
Fraction rheological measurements.....	94
Data analyses.....	94
Results and Discussion	94
Fresh fruit characteristics are controlled by the water deficit implemented	94
Genotype, water deficit and cooking controls the rheological properties	96
Sources of the differences on tomato puree rheology	101
Serum viscosity:	101
Effects of particle distribution:	102
Effects of particle size:.....	104
Conclusions.....	108
Acknowledgements	108
REFERENCES	108
5. Conclusions et Perspectives.....	111
ANNEXES.....	116
ANNEXE 1 – Chapitre 3	117
RESUME.....	125
ABSTRACT.....	126

AVANT PROPOS

Ce travail a été réalisé au sein de l'unité Plantes et Systèmes de culture Horticoles en collaboration avec l'unité Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale et la Société Nationale Interprofessionnelle de la Tomate. Une partie de ce travail a déjà fait l'objet d'une valorisation sous forme d'article, posters ou de communications orales.

Articles publiés

- Arbex A.A.C.V., Page D, Giovinazzo R, Bertin N, Fanciullino A-L. (2017) **Combined Effects of Irrigation Regime, Genotype, and Harvest Stage Determine Tomato Fruit Quality and Aptitude for Processing into Puree.** Front. Plant Sci. 8:1725. doi: 10.3389/fpls.2017.01725

Communications orales en congrès

- Vilas Boas, A.A.C., Page, D, Giovinazzo, R., Fanciullino, A-L., Bertin, N. 13th World Processing Tomato Congress and 15th International Symposium on Processing Tomato. July, 11 – 15, 2018. Greece. **“Tomato fruit quality and processing ability are impacted by irrigation regime as well as genotype and maturity stage”**

Posters

- Vilas Boas, A.A.C., Page, D, Fanciullino, A-L., Bertin, N. 2nd Euro-Mediterranean Symposium on Fruit and Vegetable Processing. 4-6 avril 2016 - Université d'Avignon, Avignon, France. Poster **“Relevant parameters to follow the impact of water stress on tomato fruit quality including technological traits”**
- Bureau, S., Vilas Boas, A.A.C., Giovinazzo, R., Page, D. 13th World Processing Tomato Congress and 15th International Symposium on Processing Tomato. July, 11 – 15, 2018. Greece. **“Implementation of infrared tools at key steps along the process may improve the quality management of tomato based products”**

Articles acceptés ou soumis

- Bureau, S., Vilas Boas, A.A.C., Giovinazzo, R., Page, D. Toward the Implementation of Mid-Infrared Spectroscopy along the processing chain to improve quality of the tomato based products. Food Control.
- Vilas Boas, A.A.C., Page, D, Giovinazzo, R., Fanciullino, A-L., Bertin, N. **“Tomato fruit quality and processing ability are impacted by irrigation regime as well as genotype and maturity stage”**. 13TH WORLD PROCESSING TOMATO CONGRESS AND 15TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PROCESSING TOMATO. Acta Horticulturae.
- Page, D, Vilas Boas, A.A.C., Giovinazzo, R., Bertin, N., Fanciullino, A-L. and Biau, N. **“Selecting tomato not only for their taste, viscosity and color potential but also for their ability to react and conserved their quality during the process”** 13TH WORLD PROCESSING TOMATO CONGRESS AND 15TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PROCESSING TOMATO. Acta Horticulturae.
- Bureau, S., Vilas Boas, A.A.C., Giovinazzo, R., Page, D. 13th World Processing **“Implementation of infrared tools at key steps along the process may improve the quality management of tomato based products”** 13TH WORLD PROCESSING TOMATO CONGRESS AND 15TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PROCESSING TOMATO. Acta Horticulturae.

INTRODUCTION GENERALE

La tomate est le deuxième légume le plus consommé dans le monde et la plus grande partie est consommée sous forme transformée, comme le jus de tomate, la pâte, la purée, le ketchup, la sauce et les tomates en conserve (Mirondo and Barringer 2015). La tomate d'industrie est une culture majeure qui représente une source importante de phytonutriments tels que le β -carotène et le lycopène (Dorais, Ehret et al. 2008). C'est aussi et surtout une base alimentaire qui rentre dans de nombreuses recettes à travers le monde: sauces, fond de pizza, ketchup, etc. Les aliments à base de tomate sont produits par une industrie mondialisée et très structurée autour des moyens de productions. La tomate d'industrie représente donc une filière à part au sein des filières tomate, qui requiert une production spécifique (culture en plein champ), récoltée à la machine pour la grande majorité, et proche d'usines de transformation fonctionnant 24h/7j durant toute la période de production. Les opérations de transport sont minimisées, et il n'y a pas de stockage. Il y a donc un lien direct entre l'amont agricole (production), et l'aval industriel (transformation). Même si de nombreux travaux visant à optimiser ce lien existent, mieux adapter la production face aux contraintes climatiques en évolution reste un challenge pour la filière, et c'est dans ce contexte que ce situe ce travail de thèse.

L'eau est un facteur majeur qui impacte le rendement et la qualité des tomates (Kuscu, Turhan et al. 2014). Or la tomate d'industrie est typiquement une culture à haute valeur ajoutée, exigeante en eau et dont la production se situe majoritairement en zone méditerranéenne, confrontée à des périodes de sécheresse de plus en plus fréquentes, et contrainte, dans le contexte de changement climatique, à réduire le prélèvement des ressources en eau pour son agriculture. Aussi, la compréhension des mécanismes impliqués dans les réponses de la plante à une réduction des apports d'eau est nécessaire pour le développement de pratiques, de variétés et de procédés de transformation adaptés. Le procédé de transformation consiste essentiellement à évaporer de l'eau; donc plus le jus initial est riche en matière sèche, moins l'industrie aura besoin d'énergie pour atteindre les consignes de concentration. Cependant, le déficit en eau peut affecter d'autres propriétés physicochimiques tissulaires et cellulaires du fruit, par exemple sa texture, sa composition en composés à forte valeur nutritive ou la taille des cellules de son péricarpe (Dumas, Dadomo et al. 2003). Ainsi

dans le cadre d'une démarche ciblée sur la qualité, l'identification des traits de qualité affectés par le déficit hydrique au moment de la récolte, et leur impact sur la réactivité des matrices au cours de la transformation est un enjeu important, qui est au cœur de cette thèse.

La qualité de la purée de tomates est construite tout au long de la chaîne de production et de transformation. Pourtant, très peu de travaux ont analysé simultanément les facteurs affectant la qualité des fruits pendant la période de croissance in planta et ceux qui agissent pendant la transformation. Actuellement, les outils d'aides à la décision sont principalement orientés vers l'élaboration du rendement et de la qualité du fruit frais d'une part ou sur l'optimisation des procédés d'autre part. A notre connaissance, aucune étude n'intègre les interactions entre critères sur l'ensemble de la chaîne du champ à la conserve et ne permet de cibler une qualité au champ par rapport à un processus de transformation cible. Par exemple, la réactivité de la matrice et la valeur nutritionnelle des produits à base de tomate sont peu prises en compte. Cette dimension industrielle est importante dans un contexte où l'industrie de la tomate en Europe, tend vers un paiement à la qualité, qui tient compte de la maturité et de l'état sanitaire de la tomate, mais également de plus en plus de son degré Brix (teneur en solides dissouts). Les limites de cette approche sont que les critères retenus par l'industrie (maturité, Brix) ne permettent pas de prédire la viscosité des produits (Boas, Page et al. 2017). Dans la chaîne des produits transformés, une faible viscosité, ainsi qu'une bonne rétention de la couleur naturelle et de la saveur sont importantes pour certains produits à base de tomates comme la soupe et le jus; au contraire, une viscosité finale supérieure est essentielle pour les produits tels que le ketchup et la sauce tomate (Chong, Simsek et al. 2009). Il apparaît donc nécessaire d'élargir la gamme de caractères physiques, structuraux et biochimiques pris en compte pour évaluer la qualité des fruits avant et après transformation. Une gestion pragmatique des conditions de culture et en particulier de l'irrigation, ciblée sur des traits bien identifiés de qualité technologique est donc un enjeu crucial pour cette filière.

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse est d'analyser au cours de la chaîne de production et de transformation, l'impact de facteurs agronomiques (variété, irrigation, stade de récolte) et technologiques (procédé de transformation) sur la qualité des purées de tomate, et d'identifier au cours de cette chaîne des leviers pour améliorer la qualité gustative, nutritionnelle et environnementale du produit fini.

QUESTIONS DE RECHERCHE ET DEMARCHE

L'objectif finalisé de la thèse est de fournir des connaissances agronomiques et technologiques pour optimiser la qualité du fruit à la sortie du champ et d'adapter les procédés à la qualité du fruit entrant à l'usine afin de mieux gérer la qualité des produits transformés. Pour atteindre cet objectif nous avons identifié 3 questions majeures auxquelles nous avons cherché à répondre:

- Quels les principaux facteurs agronomiques et technologiques responsables de la variabilité de la qualité des fruits frais et transformé au sein des zones de production française de tomates d'industrie ?
- Quels sont les effets de la variété, des apports en eau, du stade de développement et du procédé sur la qualité des fruits frais et leur aptitude à la transformation ?
- Quels sont les processus/traits responsables des modifications de la qualité technologique de la tomate lorsqu'on change de variété, de mode d'irrigation ou de procédés ?

Pour répondre à ces questions la démarche générale de ce travail a été de caractériser dans un premier temps la production française de tomate d'industrie afin d'identifier des sources de variations de la qualité des produits transformés (climat, terroir, génotype, mode d'irrigation) au cours de l'année 2015. Dans un second temps, nous avons réalisé des expérimentations au champ en condition de production (années 2016 et 2017) et en serre en conditions contrôlées (2016) afin de mieux comprendre les relations qui existent entre les paramètres physiologiques du fruit et les facteurs qui impactent les caractéristiques rhéologiques et structurales des purées de tomate.

Nous nous sommes focalisés sur un produit à base de purée de tomates broyées : le concentré, parce que c'est le premier tonnage produit, c'est un produit « simple » et homogène, et donc plus adapté à notre étude. Cela est cohérent avec un objectif de réduction des apports d'eau au champ, car la plus importante consommation énergétique du procédé consiste à évaporer l'eau.

La thèse est donc organisée autour de 3 chapitres correspondant à ces trois axes :

- Analyse globale des deux grands bassins de production français (sud-est et sud-ouest) présentant différentes conduites et différents climats pour identifier la variabilité de la qualité en frais et après transformation, un outil infrarouge a été utilisé pour une mesure plus rapide de la variabilité.
- Analyse des effets combinés de quatre génotypes, de deux niveaux d'irrigation, de trois stades de développement et de deux procédés sur la qualité de la tomate en conditions semi-contrôlées et en plein champ. Etude de deux campagnes de production en collaboration avec la SONITO.
- Utilisation de la variabilité des purées issues des différents modes de production et de transformation pour étudier les processus déterminant la viscosité des purées en collaboration avec CTCPA.

1. Analyse bibliographique

1.1 La tomate d'industrie dans le monde et en France

Selon les données disponibles pour l'année 2016, sur un total d'environ 175Mt de tomates produites, environ 38Mt, soit 22%, sont destinés à la transformation industrielle. Au niveau mondial, les principaux producteurs de tomates pour l'industrie sont la Californie-EUA (9,4 Mt), la Chine (6,2 Mt), l'Italie (5,2 Mt), l'Espagne (3,3 Mt) et la Turquie (1,9 Mt), alors que la France est au 10^{ème} rang avec une production d'environ 0,195 Mt en 2017 (Figure 1) (Source : WPTC, 2017) (Figure 1).

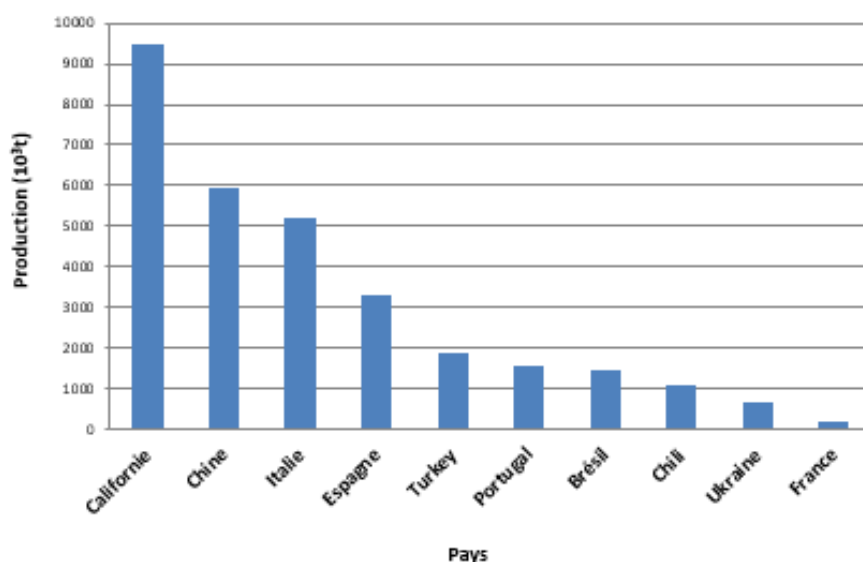


Figure 1. Production mondiale de la tomate d'industrie en 2017 (Source : WPTC, 2017)

Concernant la production française, sur les 0,195Mt de tomates destinées à l'industrie, près de 64% des tomates transformées à l'échelle nationale sont réceptionnées dans les usines du sud-est, dans la région de Provence Alpes Côte d'Azur (PACA), et 34% restants sont traités dans les usines de la région sud-ouest (figure 2) (Source : FranceAgriMer, 2017).

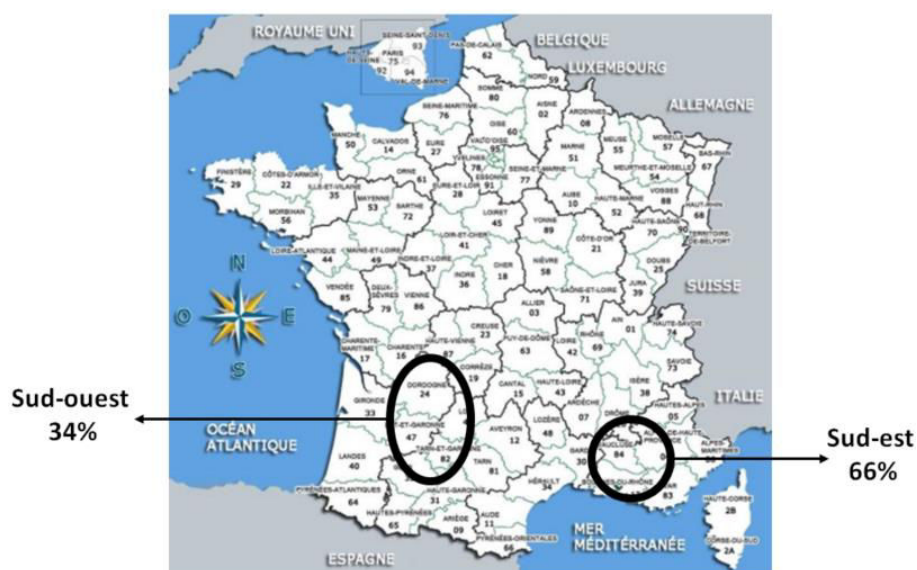


Figure 2. Division régionale de la production française de tomate d'industrie en 2017.

Sur l'ensemble des usines, cette production n'est pas suffisante pour répondre à la consommation française de produits à base de tomates, ce qui place la France au 3^{ème} rang mondial des pays importateurs, avec un déficit de production qui s'élève à plus de 1,16 Mt de tomates transformées (en équivalent frais) par an et qui s'aggrave de 3% par an sur les cinq dernières années (figure 3). Ainsi, en 2016, la France a importé 573 .000 t (équivalent frais) de concentrés de tomate, 141.000t (équivalent frais) de conserves et 450 .000 t (équivalent frais) de sauces et de Ketchup, essentiellement auprès de l'Italie pour les conserves (56 %) et les concentrés (46 %), et de l'Espagne pour les sauces et Ketchup (42 %) (Source : Tomato News, 2017).

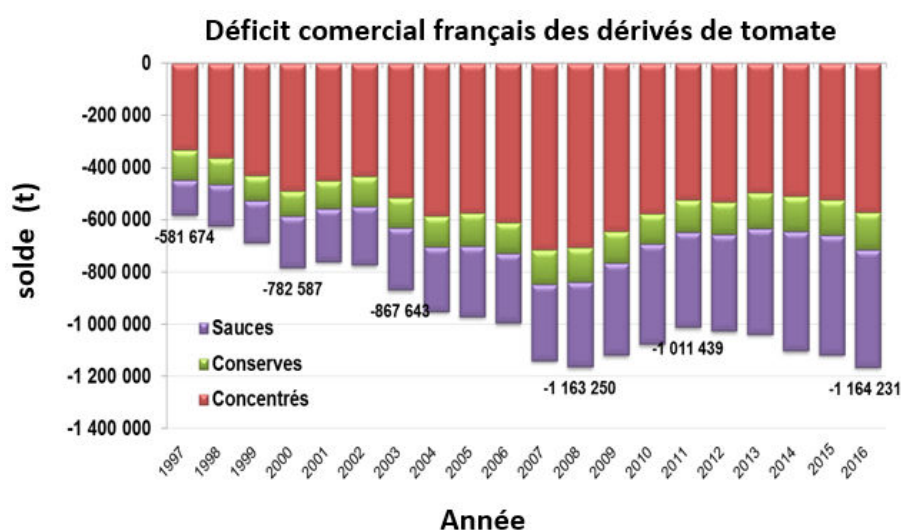


Figure 3. Balance commerciale française des dérivés de tomate des 1997 à 2016

En se basant sur le rapport production/consommation, la production nationale française ne couvre que 14% des besoins de la consommation nationale apparente (Sonito, 2017) (figure 4) et l'objectif de la Société Nationale Interprofessionnelle de la Tomate d'Industrie (SONITO) est d'atteindre une production équivalente à 50% des besoins français d'ici 5 ans.

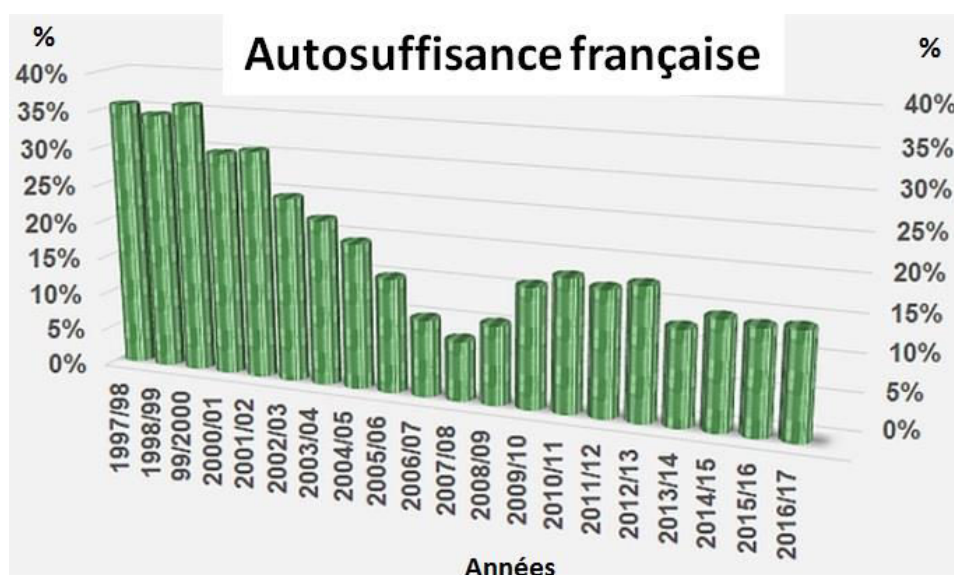


Figure 4. Autosuffisance française de production des dérivés de tomate des 1997 à 2017

D'après les données de la saison 2017, atteindre cet objectif nécessiterait une augmentation de la production de tomates fraîches de 0,483 Mt, ce qui correspondrait à une production totale de 0,678 Mt. Avec un rendement moyen en France de 79 t/ha, une augmentation de la surface cultivée en tomates d'industrie d'environ 6100 ha serait nécessaire, portant la superficie totale à plus de 8500 ha sur le territoire français (aujourd'hui la surface totale est de 2400 ha). Si l'on prend en compte les chiffres obtenus par la plus grande usine de transformation de tomates de France en 2017, avec une recette de 83000 t de tomates fraîches, 24070 t de produits transformés ont été générés. Il faudrait donc installer 28 usines de même taille sur le territoire français pour atteindre les 50% d'autosuffisance visés dans cinq ans (Sonito, 2017). Encore en se basant sur ces données de la consommation française en 2017, pour avoir une production 100% française de dérivées de tomates d'industrie, ces chiffres devraient encore doubler, passant à une production de 1,355 Mt de tomates fraîches, qui serait obtenue avec une superficie totale de 17128 ha.

En conclusion, atteindre un niveau d'autosuffisance de 50% d'ici 5 ans sera difficile, étant donné que le nombre d'usines est insuffisant pour réceptionner une production assez grande, et que le nombre de producteurs (aujourd'hui le nombre total de producteurs en France est de

188) et le nombre d'hectares de production de tomate d'industrie sont au même niveau depuis 2009 (figure 5).

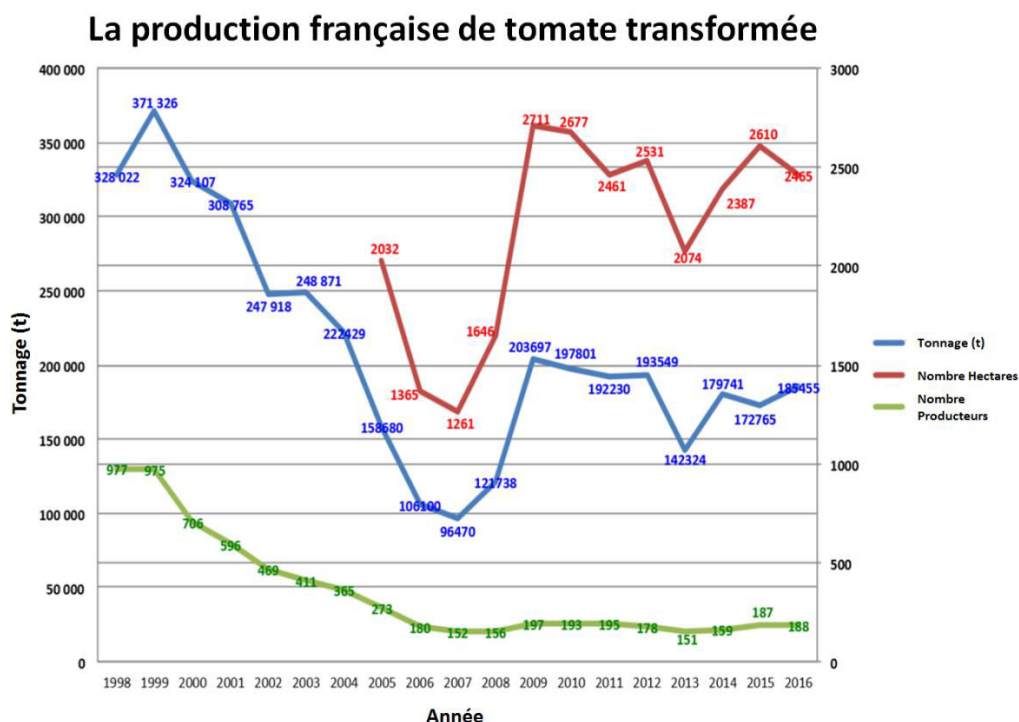


Figure 5. Evolution de la production française de produits dérivés de la tomate d'industrie, du nombre de producteurs et du nombre d'hectares cultivés en France.

Ces derniers devraient augmenter de façon vertigineuse le rendement tout en limitant les apports d'eau déjà critiques dans les régions productrices, surtout dans la région PACA, région méditerranéenne et principal producteur de tomates d'industrie en France. Actuellement, l'industrie française de la tomate se lance dans une autre stratégie : la différenciation du produit national par la diversification et la qualité par rapport aux autres pays producteurs de tomate d'industrie dans le monde. Des pays comme les États-Unis et la Chine font du concentré leur plus gros marché, alors que des pays comme l'Italie, et d'autres pays de l'Union Européenne, y compris la France, essaient de miser sur des produits à plus haute valeur ajoutée, comme les doubles concentrés. La production française est aujourd'hui basée sur la production de cinq produits principaux : pur jus, coulis, sauces et les concentrés à 28 et 35%.

La diversification est la clé de sortie pour l'industrie de la tomate française, qui a une petite industrie de tomate, et qui cherche à améliorer la qualité des produits en ajoutant des valeurs technologiques pour se différencier des autres pays producteurs et cibler un marché de

niche spécifique, en se concentrant principalement sur la transparence de la production, en soulignant la traçabilité des produits d'origine France. Pour cela il est toutefois indispensable de maîtriser cette qualité et donc de mieux comprendre l'impact des conditions de culture et des pratiques sur la qualité technologique du fruit à l'entrée d'usine ainsi que les interactions entre pratiques et procédés sur la qualité du produit fini.

1.2 La culture de la tomate d'industrie

La tomate est une plante dicotylédone du genre *Solanum* (appartenant à la famille des Solanacées) et autogame (Spooner, Anderson et al. 1993), qui peut être de croissance indéterminée ou déterminée. Pour la culture de tomates d'industrie, les plantes utilisées sont à croissance déterminée. Dans ce cas, les segments sympodiaux développent un faible nombre de nœuds jusqu'à ce que la pousse soit terminée par deux inflorescences consécutives (figure 6) (Pnueli, Carmel-Goren et al. 1998). Le nombre d'inflorescences par plante est donc plus moins fixe et déterminé sur une période limitée du développement de la plante.

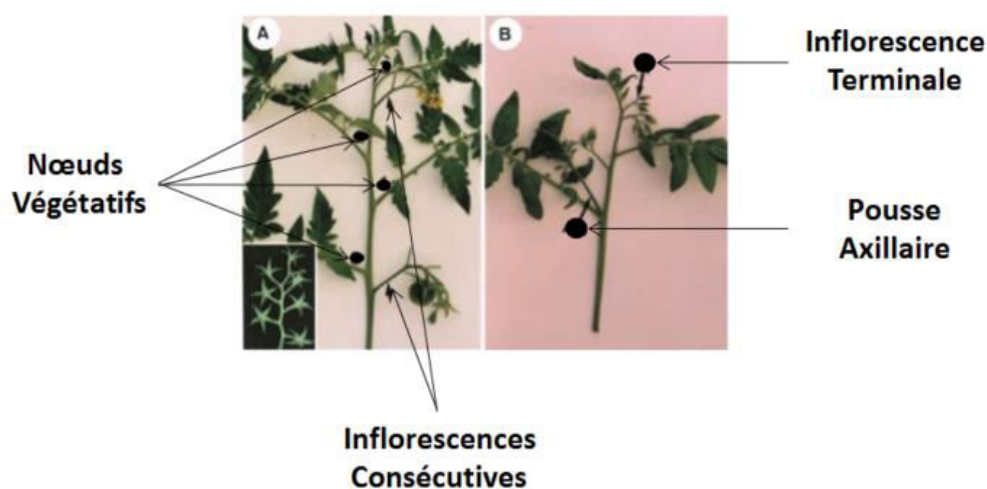


Figure 6. Représentation des deux types différents de plantes de tomates, selon le mode de croissance : indéterminée (A) ou déterminée (B) (Gould 1991). La pousse "indéterminée" montre un segment sympodial de taille normale. Il se compose de trois feuilles et d'une inflorescence terminale. La troisième feuille d'une telle unité apparaît au-dessus de l'inflorescence parce qu'elle est unie à la nouvelle unité sympodiale à croissance rapide. L'insert comporte une inflorescence de tomate scorpioïde (zig-zag) (figure 6A). Chez les variétés « déterminées » une seule feuille nodale sépare les deux premières inflorescences et une pousse axillaire se développant sous l'inflorescence plus ancienne (figure 6B) (Pnueli, Carmel-Goren et al. 1998).

1.2.1 Cycle de production de la tomate d'industrie et pratiques culturales

La date de mise en place de la culture et la date de récolte sont planifiées par rapport à la date de livraison de la tomate à l'usine, ce qui fait que ces dates changent d'une région à l'autre. En effet, les tomates ne sont pas stockées à l'usine mais rentrent directement dans une chaîne de production, et elles ne peuvent pas non plus attendre trop longtemps dans les champs. Ainsi, la plantation doit être planifiée en début de culture en fonction des machines de récolte disponibles et de la capacité de réception des usines. Dans le cas de la France, plus précisément dans le sud-est, où se concentre la production, ces dates vont de début avril à mi-juin pour la mise en place de la culture et du 20 août au 10 septembre pour la récolte.

Les variétés destinées à la transformation sont spécifiques puisque leurs caractéristiques répondent aux exigences de l'industrie et la récolte se fait de façon mécanique. La mise en place de la culture se fait soit en semis direct soit par transplantation après le travail du sol, la fumure, la confection des planches, la désinfection du sol, le désherbage. La transplantation, qui est largement la plus fréquente, consiste à repiquer des plants âgés de 30 jours après semis sur une « planche » d'une dizaine de centimètres de hauteur, qui vise à assurer un meilleur réchauffement du sol, à éviter l'asphyxie racinaire due aux excès d'humidité éventuels et les maladies du collet et à limiter, en fin de culture, le développement de pourritures des fruits en réduisant l'humidité des premiers centimètres du sol au contact des fruits (Bezert, Giovino et al. 1999) (figure 7).

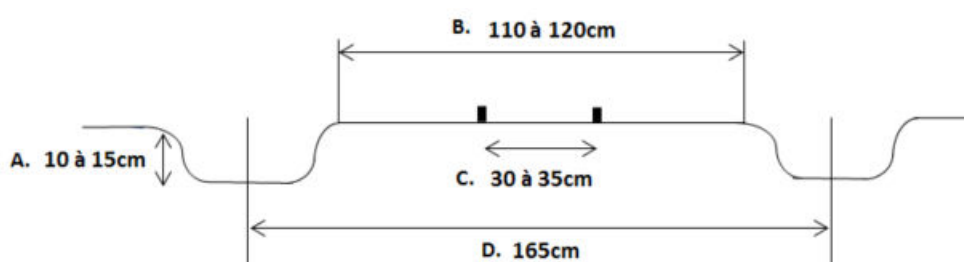


Figure 7. Schéma d'une planche plate pour la production de tomates d'industrie où se voit la hauteur de la planche (A), la largeur de la planche (B), la distance entre les deux lignes de plantation (C) et la largeur totale d'une planche y compris le passages entre les planches (D)

La densité de plantation dépend des variétés choisies. La plupart des variétés dans le monde s'utilise à 36000 plants/ha en double rang (Gould, 1991). La distance entre les deux rangs est de 30 à 35 cm au plus et les plants sont disposés tous les 33 cm sur chaque rang. Cela fait donc six plants au mètre linéaire (Bezert, Giovino et al. 1999) (figure 8).

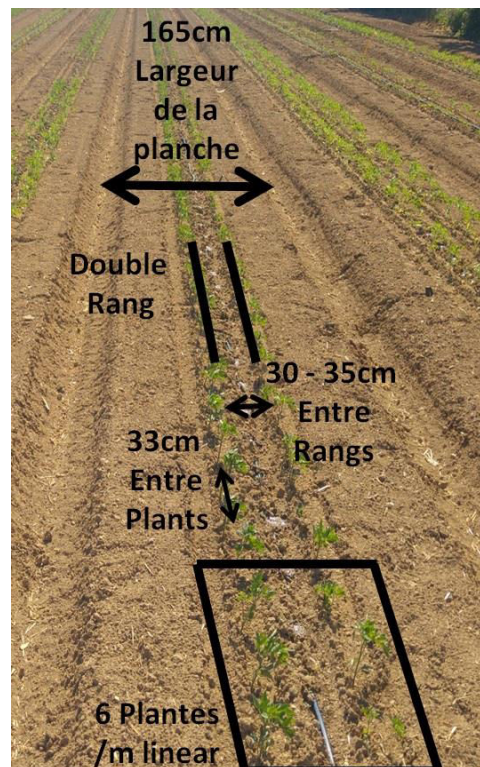


Figure 8. Schéma d'une parcelle de production de tomate de croissance déterminée en plein champ sur planches et en double rang. Une planche mesure en moyenne 165cm de large où les plantes sont disposées à une distance de 33cm entre elles et de 30 à 35cm entre rangs, ce qui donne une densité de 6 plantes par mètre linéaire, générant une population totale de 36000 plantes / ha.

En général, pour la tomate, la production de masse verte, y compris tiges et feuilles, produite sur un hectare de culture, au champ ou en serre, peut facilement dépasser 150t.

Les tomates d'industrie ont des besoins en eau importants (Kuscu, Turhan et al. 2014). L'irrigation est pilotée en fonction de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et d'un coefficient de culture (K_c) (Tableau 1), qui est lié au développement de la plante et dépendant des espèces végétales, de la profondeur de racines, de l'état de croissance, etc. Les besoins totaux en eau après la transplantation d'une culture de tomate indéterminée cultivée au champ pendant 90 à 120 jours, sont de 400 à 600 mm, selon le climat (source : FAO, 2018). Dans le sud de la France, les besoins en irrigation nette (évapotranspiration de la culture – apports par pluviométrie) se situent entre 350 et 450 mm par an (Bezert, Giovinazzo et al. 1999).

STADES DE LA CULTURE	Kc
PLANTATION A PARAPLUIE	0,4
PLANTATION A PARAPLUIE	0,4
PARAPLUIE A 3ème BOUQUET APPARENT	0,6
3ème BOUQUET APPARENT A 1er BOUQUET FLEURI	0,8
1er BOUQUET FLEURI A 1ers FRUITS VERTS	0,9
1ers FRUITS VERTS A 2 BOUQUETS NOUES	1
2 BOUQUETS NOUES A PLEINE FLORAISON	1,1
PLEINE FLORAISON	1,2
PLEINE FLORAISON-NOUAISON	1,2
PLEINE FLORAISON-NOUAISON	1,2
PLEINE FLORAISON A 1ers FRUITS MURS	1,1
1ers FRUITS MURS A 10% MATURITE	1
10% MATURITE A 25% MATURITE	0,8
20% MATURITE A 50% MATURITE	0,5

Tableau 1. Moyenne de coefficient de culture (Kc) pour la culture de la tomate d'industrie utilisée en France pour un cycle de culture normal.

Un apport d'eau adéquat et précoce est nécessaire au début de la croissance des plantes, et à la nouaison des fruits. Si l'eau est limitante pendant l'une de ces périodes, la maturité du fruit peut ne pas être uniforme (Gould, 1991). Ainsi, après plantation, les plantes sont irriguées et alimentées en éléments minéraux par goutte à goutte jusqu'au stade 45 - 50% de fruits mûrs, soit environ deux semaines avant la récolte. A partir de ce moment, l'irrigation est arrêtée pour favoriser la maturation et l'augmentation de la concentration en composés solubles dans les fruits.

La durée de développement des fruits est d'environ 55 jours à partir de l'anthèse mais cette durée peut varier selon la précocité des variétés. La croissance des fruits comprend trois phases classiques de division cellulaire, d'expansion cellulaire et de maturation (figure 9). Les niveaux de production sont très variables en fonction de l'environnement, de la technique de culture et de la variété. Ils se situent entre 40 et 110t par hectare pour les tomates industrielles et entre 100 et 200t pour la production en serre de tomates indéterminées (Gould, 1991).

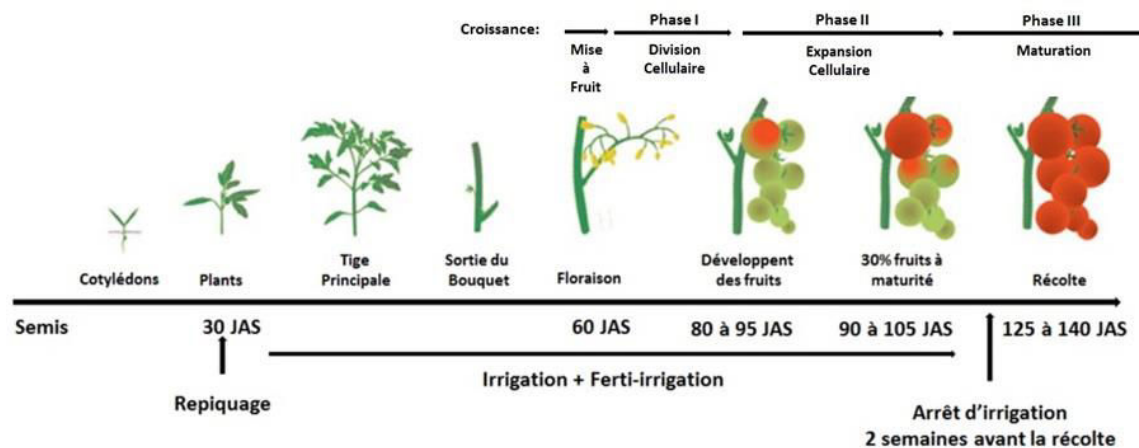


Figure 9. Phase de développement du fruit de la tomate de la mise au fruit jusqu'à maturation complète. Dans une première phase le nombre d'ovules fécondés, correspondant au nombre de graines, va influencer le taux de divisions cellulaires par l'intermédiaire d'hormones (Varga and Bruisman 1996). La deuxième étape, à la fin de la période de grandissement cellulaire, les graines sont arrivées à maturité et le fruit a quasiment atteint sa taille finale, avec des cellules dont la taille aura pu être multipliée par dix, en fonction du génotype (Gillapsy, Ben-David et al. 1993; Bertin, Causse et al. 2009). Une troisième phase est déclenchée par un pic de respiration, liée à une augmentation de la synthèse d'éthylène, toutes deux caractéristiques des fruits climactériques. Pendant cette phase d'une dizaine de jours, le fruit va subir des changements physiologiques et biochimiques majeurs (Grasselly, Navez et al. 2000).

1.2.2. La recherche de la qualité au sein de la filière tomate d'industrie en France

Les producteurs et la filière française de tomates d'industrie poursuivent certains critères de qualité pour commercialiser leurs produits de façon différenciée. Le premier critère pour la production de concentrés de tomates, est une teneur en matière sèche (MS) élevée. Afin d'inciter les agriculteurs à accroître la teneur en MS des fruits, l'industrie a mis en place un paiement au brix à l'entrée usine, étant supposée que la teneur en Brix soit corrélée à la teneur en MS. Cette mesure est utilisée pour déterminer indirectement la quantité de composés solubles dans une solution. Toutefois le Brix n'est pas le seul critère de qualité. La texture (liquide pour les jus, ou visqueux pour une sauce) doit également être maîtrisée. Ainsi pour améliorer la qualité des fruits dans une perspective de transformation, les principaux critères de qualité technologique sont une valeur de Brix élevée et une couleur rouge assez forte pour accroître l'attractivité des produits, ainsi que des propriétés des fruits permettant de fournir une viscosité ciblée en fonction du procédé choisi.

Le fruit de tomate est une baie structurée en deux parties principales : le péricarpe, et la pulpe (figure 10). La pulpe est constituée du placenta et du tissu loculaire (gel) renfermant

les graines. Le péricarpe peut être divisé en péricarpe interne (ou columelle), péricarpe radial (ou septum) et péricarpe externe. Dans ce dernier, trois parties sont identifiables : l'épicarpe (peau ou cuticule), le mésocarpe (partie charnue) et l'endocarpe (bordant les loges). Chacun de ces tissus possède des caractéristiques physicochimiques particulières conférant ainsi au fruit sa qualité (Gillapsy, Ben-David et al. 1993).

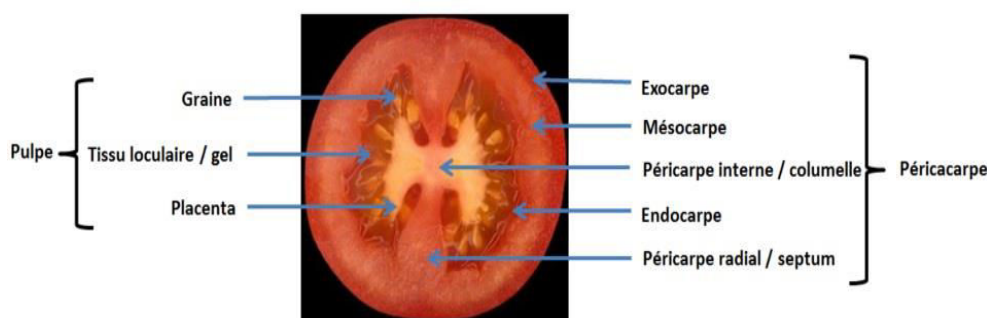


Figure 10. Structure du fruit de la tomate à partir d'une coupe longitudinale. Figure adaptée à partir de Prudent, 2009.

La matière sèche d'un fruit de tomate représente environ 5-10% de la masse totale du fruit et elle est composée majoritairement de sucres (48%) qui se présentent principalement sous la forme fructose, glucose, et saccharose (figure 11) (Davies and Hobson 1981).

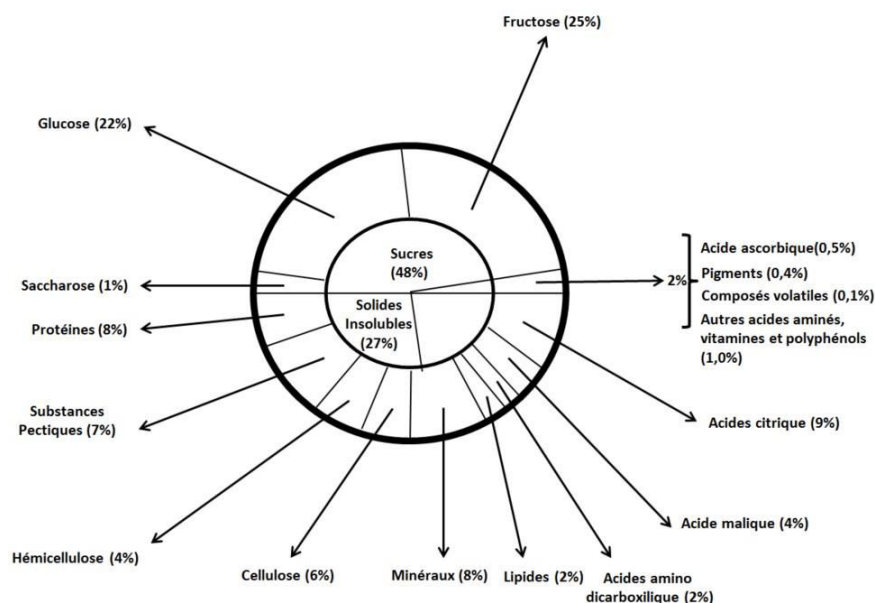


Figure 11. Composition moyenne du fruit de la tomate à maturité. Les proportions des différents constituants sont exprimées en pourcentage de matière sèche du fruit. Figure adaptée depuis (Davies and Hobson 1981).

Au cours de la première moitié du développement des fruits, une partie des sucres est stockée sous forme d'amidon, une réserve de carbone osmotiquement inactive, dont la taille

est liée à la teneur finale en sucres (Ho, Grange et al. 1987; Bertin, Causse et al. 2009). L'acide citrique est l'acide le plus abondant dans le fruit mûr de tomate, suivi de l'acide malique (Grasselly, Navez et al. 2000). Les teneurs en sucres et en acides sont soumises à de nombreuses régulations; ainsi leur évolution au cours de la maturation du fruit est dépendante des conditions de culture et des variétés (Bénard 2009). La cellulose et l'hémicellulose représentent environ 10% de la MS et les acides organiques 13% (Blanc 1986). La coloration rouge du fruit est due à l'accumulation de caroténoïdes, principalement le lycopène et le bêta-carotène (Davies and Hobson 1981). Chez tous les cultivars de tomates examinés, le pH augmente au cours de la maturation. L'acidité titrable atteint un maximum au début du processus de maturation, puis diminue (Anthon, LeStrange et al. 2011). Les solides solubles augmentent pendant la maturation, puis restent constants avec une maturité excessive. Des résultats contradictoires ont été obtenus pour l'effet de la maturité sur la consistance du jus, où il a été démontré que les valeurs de Bostwick augmentent ou diminuent avec la maturité. (Anthon, LeStrange et al. 2011).

L'amélioration de la qualité des fruits a toujours été un objectif des sélectionneurs, mais cette notion a évolué au fil des années (Bertin and Genard 2018): la texture, les arômes et la saveur sont des critères majeurs. La texture est principalement caractérisée par la fermeté du fruit. L'arôme du fruit est défini par la concentration en composés aromatiques volatiles, sachant que plus de 400 composés ont été identifiés chez la tomate, que leurs concentrations et leurs interactions varient d'une variété à l'autre (Ursem, Tikunov et al. 2008) et que seul un petit nombre de ces composés est indispensable pour constituer l'arôme caractéristique de la tomate (Petro-Turza 1987). Pour la saveur, il est communément admis que le rapport sucres/acides est un bon indicateur de la perception du goût de la tomate par le consommateur (Gautier, Diakou-Verdin et al. 2008). L'intérêt nutritionnel de la tomate sur la santé est lié à la présence de caroténoïdes provitamines A (β -carotène, précurseurs de la vitamine A) et antioxydants (lycopène, phytoène, phytofluène et lutéine) et d'une large diversité de vitamines du groupe B (B3, B5, B9) (Tableau 2).

(g)	Variations	Minéraux (mg)	Variations	Vitamines (mg)	Variations
Eau	93,4 - 95,2	Ca	9,7 - 15,0	Provitamine A	0,5 - 0,8
Protides	0,9 - 1,1	K	202 - 300	B1	0,04 - 0,06
Lipides	trace - 0,3	Na	03 - 11	B2	0,02 - 0,05
Glucides	2,8 - 4,7	P	20 - 27	B9	0,08 - 0,01
Fibres	0,5 - 1,5	Fe	0,2 - 0,6	C	15 - 23
Minéraux	0,6	Mg	03 - 11	E	0,04 - 1,2

Tableau 2. Composition du fruit de la tomate à maturité en g ou mg/100g matière fraîche (Grasselly, Navez et al. 2000).

La tomate représente également un apport considérable de vitamine C pour notre organisme (Bhowmik, Kumar et al. 2012). Du point de vue de la transformation, la qualité du fruit se décline ainsi :

- Uniformité de la couleur et mûrissement uniforme
- Peu ou pas de graines
- Haute teneur en solides (minimum de 5,5% de soluble jusqu'à 7,0%)
- Haute teneur en acide (minimum de 0,35% et jusqu'à 0,55% souhaité)
- pH bas (maximum de 4,4 et préférable si tous les fruits sont à 4,2 ou moins)
- Teneur élevée en vitamine C (minimum de 20mg pour 100g)

1.2.3 Impact de l'environnement et des pratiques culturales sur la qualité des fruits

L'environnement et les pratiques culturales impactent le rendement et la qualité des fruits. La planification de l'irrigation est un levier essentiel pour piloter le rendement et la qualité des tomates. Un apport d'eau trop important peut influencer négativement la teneur en solides solubles et le pourcentage de sucres réducteurs présents dans les fruits (Ripoll, Urban et al. 2014). À l'inverse, des volumes d'irrigation limités peuvent augmenter les teneurs en solides solubles, diminuer la taille et le poids des fruits frais et donc le rendement, et induire une sénescence précoce des plantes. La diminution de rendement peut également être due à une réduction du nombre de fleurs puis du nombre de fruits noués lorsque le déficit hydrique intervient au cours des premières phases de développement de la plante. De plus, la consistance (indice de Bostwick) et les paramètres de couleur du fruit semblent être influencés positivement par une disponibilité élevée en eau pour les plantes, tandis que la teneur en acide ascorbique est positivement affectée par des irrigations moins fréquentes (Favati, Lovelli et al. 2009).

Une augmentation de la température peut modifier la qualité de la tomate en modifiant les propriétés physiques (taille, couleur, etc.) du fruit, ainsi que sa qualité sensorielle et nutritionnelle (Hernandez, Hellin et al. 2015). Le taux de synthèse du lycopène est inhibé à des températures élevées ($> 30^{\circ}\text{C}$) et basses ($< 12^{\circ}\text{C}$) (Dumas, Dadomo et al. 2003) et, en cas de températures élevées, la formation d'autres caroténoïdes donne une couleur jaune à orange aux fruits (Tilahum, Park et al. 2017). Gautier et al. (2008) ont aussi observé une forte réduction de la teneur en précurseur du lycopène (principalement du phytoène, du phytofluène

et du neurosporène) lorsque la température passe de 21 à 26°C ou de 27 à 32°C. Quand la température augmente de 21 à 26°C la teneur en β -carotène et du précurseur de contenu sont réduite, en revanche, quand la température de mûrissement augmente de 27 à 32°C, réduit la teneur en précurseur de lycopène et la teneur en lycopène, mais pas en β - ni γ - carotène. Ces données corroborent que la synthèse du lycopène est inhibée au-dessus de 32°C, alors que la synthèse du β -carotène ne l'est pas, mais elles révèlent également que l'accumulation de certains carotènes est déjà inhibée à 26°C comparé à 21°C. Il est également observé que les vitamines B s'accumulent à des concentrations plus élevées à 10-15°C dans les légumes verts, mais que dans les tomates, l'accumulation est maximale à 27-30°C (Weston and Barth 1997). Des températures élevées accélèrent la production végétale, entraînant une teneur plus élevée en solides solubles (Helyes, Lugasi et al. 2012). Selon Walker and Ho (1977), des températures allant de 26 à 30°C entraînent une augmentation des solides solubles lorsqu'elles ont été appliquées durant la division et la maturation des fruits en raison des changements dans l'activité des enzymes du métabolisme des glucides (Walker and Ho 1977). Gautier et al (2008) ont observé qu'une augmentation de température de 21 à 26°C, réduit l'acidité titrable (AT) jusqu'à 25%, sans doute en lien avec une diminution de l'accumulation d'acide malique vacuolaire. Par conséquent, l'augmentation de la température peut améliorer la qualité gustative des fruits car elle diminue le taux d'acides organiques du fruit.

Les tomates sont sensibles aux conditions de faible luminosité. Elles exigent un minimum de 6 heures d'ensoleillement direct pour fleurir. Toutefois, en cas de trop grande intensité du rayonnement solaire, des fentes, des brûlures solaires et une coloration inégale peuvent apparaître au stade mature. L'intensité de la lumière affecte la couleur des feuilles, la mise à fruits et la couleur des fruits et peut avoir de profonds effets sur le rendement et la qualité des cultures (Gould, 1991). Des études réalisées avec des tomates produites en plein soleil ou à l'ombre ont montré que les tomates produites en plein soleil contenaient plus de sucres et de matière sèche que celles cultivées à l'ombre (Winsor 1979; Weston and Barth 1997). La lumière agit de façon quantitative et qualitative et est corrélée à une augmentation des teneurs en composés phénoliques et plus particulièrement de flavonoïdes dans les tissus (Macheix, Fleuriet et al. 2005). La lumière a également été démontrée comme étant nécessaire pour la formation de β -carotène dans les tomates et les coups de soleil ou une forte lumière ultraviolette peuvent déclencher la production de β -carotène au détriment du lycopène (Taber, Perkins-Veazie et al. 2008). Une faible intensité lumineuse réduit la synthèse des pigments, entraînant une coloration inégale des plantes, bien que la formation de caroténoïdes dans les

fruits mûrs ne nécessite pas d'induction par la lumière. De fait la teneur en caroténoïdes des fruits ombragés est plus faible (Dorais, Gosselin et al. 2001).

La teneur en vitamine C est également régulée par l'environnement lumineux. En général, plus l'intensité lumineuse est faible, plus la teneur en acide ascorbique dans les tissus végétaux est faible (Weston and Barth 1997). Les résultats obtenus par Tamaoki et al (2003) démontrent l'importance de la régulation de la lumière de l'expression des gènes liés à la synthèse de l'AsA (ascorbate), à court et à long terme, dans les feuilles et les fruits (Tamaoki, Mukai et al. 2003). Ces gènes régulés par la lumière pourraient expliquer une partie des modifications de la teneur en T-AsA (ascorbate transcriptionnel) induites par la lumière, mais d'autres niveaux de régulation par la lumière pourraient également exister au stade post-transcriptionnel (Gautier, Massot et al. 2009). Tilahun et al (2017) ont démontré une augmentation de 60% de la teneur en acide ascorbique des fruits mûrs lorsque les plantes sont transférées de l'ombre au soleil au stade vert mature.

La qualité et le rendement dépendent également du génotype. Les critères de choix de la variété sont : le rendement, la résistance aux maladies et aux ravageurs et une teneur élevée en éléments solubles (sucres et acides organiques) des fruits, exprimée en °Brix. Le facteur génétique détermine aussi la teneur en lycopène et sa distribution dans les tomates n'est pas homogène dans les variétés traditionnelles (Toor, Savage et al. 2006). Ces types de tomates contiennent des concentrations de lycopène plus élevées dans la peau du fruit que dans la chair du fruit (Ilahy, Hdider et al. 2011; Helyes, Lugasi et al. 2012).

1.3 Les procédés de transformation

1.3.1 Gammes de produits manufacturés à base de tomates

Il existe six grands types de produits de première transformation codifiés, référencés et fabriqués à partir de la tomate d'industrie. On distingue les produits contenant encore des tomates ou morceaux de tomate entières et ceux contenant des tomates broyées plus ou moins concentrées (jus, purées et concentrés). Pour les premières, on les classifie sous les appellations : tomates entières pelées (TEP), tomates pelées non entières (TPNE) et enfin tomates non pelées non entières (TNPNE). A part ces dernières, les tomates sont pelées, généralement par vapeur (étape qui sert également au blanchiment), mises sous pression /

dépression (pour décoller la peau), puis les résidus de peau sont éliminés par des rouleaux contrarotatifs en caoutchouc. Les tomates ainsi préparées sont (éventuellement) coupées en cubes ($1 \text{ à } 2\text{cm}^3$ suivant les préparations), ou emboîtées entières. Les boîtes sont alors complétées avec un jus de couvrement (généralement un jus de tomate standard), puis stérilisées par autoclavage. Nous n'aborderons pas la qualité de ces produits dans ce document, car ils ne représentent que 5% environ des productions françaises, et 17% à l'international), et que les critères de qualité qui les concernent sont majoritairement les défauts d'aspect et la bonne capacité des tomates à être pelées. Goût, texture et couleur restent aujourd'hui peu ou pas pris en compte.

Nous aborderons plus en détails les produits issus de tomates broyées et plus ou moins raffinés. Ces produits se distinguent par leur niveau de concentration (que l'on exprime à l'aide du degré Brix), en partant du jus brut (ou « jus 2009 »), qui possède la même concentration en eau que le fruit frais (généralement Brix 5 à 6), les purées, « passata » et produits dits de « basses concentrations » ou « jus 2002 », dont le degré brix ($^{\circ}\text{Brix}$) s'étend de 8 à 12/14, et les doubles et triples concentrés (respectivement 28 et 32 $^{\circ}\text{Brix}$). Ces produits sont principalement destinés à la fabrication de sauces d'accompagnement (après ajout d'aromates), de fonds de sauces pour les plats cuisinés et pizza, et pour la fabrication de spécialités comme le ketchup. Les concentrés et jus 2002 dominent largement le marché (respectivement 26 et 37 % du marché) (voir tableau de la SONITO ci-dessous). Les étapes de fabrication de ces produits seront détaillées dans le chapitre suivant.

Les concentrés sont destinés majoritairement aux exportations (pour économiser le transport de l'eau). Ils sont alors remis en œuvre dans les usines de transformations secondaires (plats cuisinés, sauces d'accompagnement) par dilution pour atteindre le degré Brix inscrit dans leur cahier des charges. Cette dilution a pour but d'atteindre une consistance standard. Néanmoins, le passage par les étapes de concentration et dilution fournit des produits généralement moins visqueux (voir chapitre « qualité » ci-dessous), et ainsi, les producteurs européens essaient de favoriser les produits de basse concentration, pour lesquels, la concentration cible est directement atteinte à l'usine, dans un souci de maîtrise de la texture. Il y a alors un gain substantiel de qualité organoleptique, et de texture. Mais ces produits sont plus coûteux à transporter. Les concentrés et jus 2002 bruts sont alternativement mis en boîtes ou bouteilles pour vente directe, ou stockés dans des futs ou des « big bags » de 250 à 500 kg, remplis stérilement à l'usine et remis en œuvre dans les chaînes de fabrication des usines de 2nd transformation. Les échanges commerciaux se font sur la base d'une

consistance garantie. Les futs et big bags peuvent être stockés durant une période pouvant excéder un an, et font l'objet d'un commerce mondialisé (sources : SONITO 2016).

Ventilation des fabrications en 2016		
TYPE	Tonnes	%
CONCENTRE	15 961,17	26,7%
CONCENTRE BIO	21,40	0,0%
Jus 2002	22 395,99	37,5%
Jus 2002 BIO	1 001,68	1,7%
Jus 2009	10 323,11	17,3%
Jus 2009 BIO	1 306,30	2,2%
TEP	1,80	0,0%
TEP BIO	0,00	0,0%
TPNE	4 956,28	8,3%
TPNE BIO	0,00	0,0%
TNPNE	3 763,66	6,3%
TNPNE BIO	0,00	0,0%
Total	59 731,39	100%

Tableau 3: volume et part des différents produits manufacturés fabriqués à partir de tomate d'industrie en France (source : Sonito 2016)

1.3.2. Les étapes clés d'un protocole de production de concentrés

Les étapes clés pour la production de concentrés de tomate sont les suivantes :

1.3.2.1 Récolte et transport : la tomate est très majoritairement récoltée avec une récolteuse mécanique, munie d'une barre de coupe, qui sectionne et récolte la plante entière, puis sépare les fruits des tiges par vibration et brossage de la végétation. Les fruits verts sont éliminés sur la machine par tri optique, et les fruits dits « sains, loyaux et marchands » (donc au stade de maturité tournant à rouge) sont transférés par tapis roulant vers une benne de transport qui suit la machine dans le champ. La hauteur de chargement n'excède généralement pas 2m, pour minimiser les phénomènes d'écrasement. La benne est ensuite directement prise en charge par un camion routier, et transféré à l'usine sans opération de déchargement intermédiaire.

1.3.2.2 Agréage / déchargement: A l'arrivée à l'usine, les bennes sont pesées et identifiées, puis un échantillon d'une trentaine de kilos est prélevé au cœur de la

benne par carottage aléatoire. L'échantillon prélevé est trié pour la présence de fruits verts, pourris, de corps étrangers (cailloux, petits animaux), puis un lot d'une dizaine de fruits sains est prélevé de façon aléatoire par l'opérateur, et introduit dans une machine qui broie et mesure automatiquement l'indice de réfractométrie du jus produit. Une décision de conformité (ou de rejet) est prise à cette étape, ainsi que le calcul du prix d'achat par l'usine, en fonction des résultats du test d'agrégé. Les bennes sont alors stockées sur le carreau de l'usine, normalement pour un temps n'excédant pas une demi/journée (sauf aléa de production). En fonction du planning de l'usine, les bennes sont réceptionnées sur le quai de déchargement, remplies d'eau (eau recyclée par la station d'épuration de l'usine), puis déchargées par flottaison. Les fruits sont acheminés à l'usine par un lit d'eau pour éviter de les abimer, et pour une première opération de lavage et de tri (les fruits pourris et trop écrasés tombent en font de cuve et sont éliminés).

1.3.2.3 Lavage/broyage : les fruits sont mirés (visée optique et opérateur manuel) sur le tapis à l'entrée de l'usine pour une dernière élimination des corps étrangers/fruits pourris/tiges, lavés par aspersion d'eau propre, puis concassés par un broyeur à came (ou broyeur à marteau), et introduits dans la boucle de chauffage (ou boucle de break),

1.3.2.4 Le break : C'est une étape cruciale du procédé duquel dépend une bonne partie de la consistance finale de la purée. Le break consiste en une boucle de chauffage tubulaire qui contient déjà du produit chaud, à la température de consigne. Ainsi, les fruits passent immédiatement de la température ambiante à la température de consigne (ou température de break) sans délais, si tant est que la vitesse d'introduction des tomates est adaptée à la puissance de chauffe de la machine. Si la température de break est inférieure à 70°C (température compatible avec l'activité enzymatique) on parle de broyage à froid (ou Cold Break). A l'inverse, si la température est à 95°, on parle de broyage à chaud ou hot break. Ces deux procédés sont très impactant sur la texture : l'activité enzymatique des fruits réduit la viscosité durant une opération cold break. La chute de viscosité dépend de la réactivité enzymatique des fruits.

- 1.3.2.5 Raffinage :** le produit est poussé à travers des tamis circulaires par l'intermédiaire d'un dispositif de type « vis sans fin ». La pulpe est extraite vers le circuit de chauffage secondaire, et les drèches (c'est-à-dire les morceaux de peaux supérieurs à la taille du tamis, et les pépins) restent dans la circulation pour être éliminés. Les mailles du tamis sont au choix, de 0.2 à 0.8 mm en fonction de la texture recherchée. Une maille fine sert à faire des produits très lisses.
- 1.2.3.6 Chambrage/concentration :** la pulpe est alors chouffée à 95°C pour une durée correspondant à la valeur pasteurisatrice de la tomate (généralement le produit passe 5 minutes environ à cette température). Après cette étape, le produit est stérile.
- 1.3.2.7 Concentration :** le produit chaud est introduit dans des enceintes sous vide partiel, afin d'atteindre une évaporation de l'eau à basse température (entre 40 et 50°C). Il existe plusieurs types de dispositifs, ils fonctionnent tous sur le même principe : plusieurs enceintes successives (ou des tubes proches qui permettent des échanges de chaleur) sont reliées et la chaleur du produit entrant est utilisée pour réchauffer du produit plus en amont. Le vide est de plus en plus poussé pour atteindre l'ébullition à des températures de plus en plus faibles. Ainsi, on limite l'apport d'énergie tout en limitant la détérioration thermique du produit. En pilote, la concentration se fait dans une « boule de concentration », le produit (environ 40 l) est agité dans une enceinte sphérique placée sous vide.
- 1.3.2.8 Conditionnement/stockage :** Dans la majeure partie des cas le produit est conditionné stérilement : comme il est stérile dans les installations depuis l'étape de chambrage, il est introduit dans des emballages stériles (généralement des poches plastiques aluminisées qui rentrent à l'intérieur des futs ou des « big-bags » en toile); Pour cela, la poche aseptique est munie d'un opercule stérilisable et la ligne de transformation se termine par une tête de conditionnement aseptique qui est stérilisée à la vapeur, puis maintenue sous flux de vapeur pendant toute la phase de remplissage. Les produits sont donc stériles et stables à température ambiante.

1.3.3 La qualité des jus 2002 et des concentrés de tomate

Pour répondre aux exigences de qualité des consommateurs, l'industrie s'intéresse à trois grands critères de qualité pour la pâte de tomate: la consistance, la couleur, et la saveur (Hayes, Smith et al. 1998). La composition nutritionnelle a aussi fait l'objet de nombreuses études mais n'a encore pas été trop utilisée comme argument commercial.

1.3.3.1 Consistance

Comme la plupart des purées de fruits, la purée de tomate s'assimile à un liquide continu non Newtonien, c'est-à-dire un liquide dont la viscosité varie en fonction des forces de cisaillement qu'on lui applique. Néanmoins, à une échelle plus petite, elle se compose d'unités élémentaires qui constituent la pulpe (aussi appelée fraction solide par certains auteurs) en suspension dans une phase aqueuse continue, le sérum, contenant des éléments solubles (Barrett, 1998). De nombreux travaux portent sur la texture des produits à base de tomate. Les effets de modes de cuisson, d'homogénéisation et de raffinage à différentes mailles de tamis, d'homogénéisation par les hautes pressions ont permis de mettre en évidence une relation entre la taille et la forme des particules présentes dans la purée et sa viscosité (Gould 1992; Barrett, Garcia et al. 1998; Sánchez, Valencia et al. 2002; Moelants, Cardinaels et al. 2014; Moelants, Cardinaels et al. 2014; (Santiago, Jamsazzadeh Kermani et al. 2017). Par contre, des essais de substitution du sérum par de l'eau montrent chez la tomate une grande importance de la viscosité du sérum pour les propriétés rhéologiques de la purée (Moelants, Cardinaels et al. 2014), contrairement à la purée de pomme où celui-ci ne contribue que faiblement à la texture générale (Leverrier, Almeida et al. 2017). La purée de tomate est à ce titre qualifiée de gel faible (Santiago, 2017). Les propriétés rhéologiques du sérum dépendent essentiellement de la concentration et de la dégradation de la pectine soluble qui se retrouve dissoute dans ce compartiment lors du procédé (Barrett, Garcia et al. 1998; Diaz, Anthon et al. 2009) Les opérations de concentration ont également tendance à modifier la conformation des pectines et à les compacter, faisant perdre une partie de la viscosité du sérum, et donc de la purée, lorsque celle-ci est remise en condition à partir de concentré (Diaz, Anthon et al. 2009). Ces éléments seront présentés plus en détails dans le chapitre 3.

1.3.3.2 Couleurs

Les déterminants de la couleur de la sauce tomate restent très mal connus. Généralement, les modifications de couleurs sont attribuées à des modifications de teneur en lycopène, comme évoqué plus haut (Barrett, Garcia et al. 1998), mais les opérations unitaires

de transformation ont également une influence en modifiant les tailles de particules et certainement la façon dont la lumière interagit avec la matière (Lukhmana, Kong et al. 2018). Les modifications sont généralement mesurées mais restent mal expliquées, et notamment sur la relation entre les microstructures contenant le lycopène (formes cristallines ou non). Certains auteurs font l'hypothèse de présence de systèmes hydro-colloïdaux entre pectines et lycopène, hypothèse appuyée par la déstabilisation de la couleur de la purée lorsqu'elle est traitée par des pectinases (Jazaeri, Mohammadi et al. 2018).

1.3.3.3 Saveur

La saveur des jus 2002 dépend en tout premier lieu du niveau de concentration en composés solubles, les produits utilisés pour les sauces étant par exemple des produits dont le degré Brix varie de 12 à 14 °C (source : SONITO). Le goût et les arômes des produits sont peu pris en compte jusqu'à présent par les consommateurs, certaines études sensorielles montrant même que la connaissance de la marque du produit serait plus importante que la couleur ou l'odeur pour la discrimination hédonique des produits. Les arômes de tomate sont bien décrits pour les fruits frais, avec 21 molécules majeures impactant la perception sensorielle, et avec des effets matrices avérés sur la rétention sélective d'arômes (Bezman, Mayer et al. 2003). Mais peu d'explications sont disponibles pour en expliquer le fondement. Certaines études montrent un impact de différentes méthodes de concentration sur les arômes et la saveur (Rodriguez, De la Torre et al. 2001)

1.3.3.4 Valeur nutritionnelle

La valeur nutritionnelle de la tomate fraîche a été beaucoup documentée en lien avec ses teneurs en vitamines, en fibres et micronutriments, dont le lycopène potentiellement impliqué dans la valeur santé vis-à-vis des maladies cardiovasculaires (Tyssandier, Reboul et al. 2003; Costa-Rodrigues, Pinho et al. 2018). Néanmoins peu d'études portent sur l'impact propre du procédé et l'évolution de la valeur nutritionnelle depuis le champ jusqu'au produit fini (Page, Labadie et al. 2013). En revanche, l'impact positif des procédés sur la bio-accessibilité du lycopène est relativement bien commenté (Lemmens, Colle et al. 2014) et en particulier du traitement HB (Page, Van Stratum et al. 2012). Cet effet serait dû à la destruction partielle des structures cellulaires participant à la séquestration cellulaire du lycopène (Lemmens, Colle et al. 2014), ou à leurs modifications biochimiques (Page, Labadie et al. 2019).

REFERENCES

- Anese, M., P. Falcone, et al. (2002). "Effect of equivalent thermal treatments on the color and the antioxidant activity of tomato purees." Journal of Food Science **67**(9): 3442-3446.
- Anthon, G. E. and D. M. Barrett (2002). "Kinetic parameters for the thermal inactivation of quality-related enzymes in carrots and potatoes." Journal of Agricultural and Food Chemistry **50**(14): 4119-4125.
- Anthon, G. E., M. LeStrange, et al. (2011). "Changes in pH, acids, sugars and other quality parameters during extended vine holding of ripe processing tomatoes." Journal of the Science of Food and Agriculture **91**(7): 1175-1181.
- Augusto, P. E. D., V. Falguera, et al. (2013). "Viscoelastic Properties of Tomato Juice: Applicability of the Cox-Merz Rule." Food and Bioprocess Technology **6**(3): 839-843.
- Barrett, D. M., E. Garcia, et al. (1998). "Textural modification of processing tomatoes." Critical Reviews in Food Science and Nutrition **38**(3): 173-258.
- Bénard, C. (2009). Etude de l'impact de la nutrition azotée et des conditions de culture sur le contenu en polyphénols chez la tomate Université de Lorraine. **Sciences Agronomiques**.
- Bertin, N., M. Causse, et al. (2009). "Identification of growth processes involved in QTLs for tomato fruit size and composition." Journal of Experimental Botany **60**(1): 237-248.
- Bertin, N. and M. Genard (2018). "Tomato quality as influenced by preharvest factors." Scientia Horticulturae **233**: 264-276.
- Bezert, J., R. Giovinazzo, et al. (1999). Guide cultural de la tomate d'industrie, Sonito.
- Bezman, Y., F. Mayer, et al. (2003). "Differential Effects of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) Matrix on the Volatility of Important Aroma Compounds." Journal of Agricultural and Food Chemistry **51**(3): 722-726.
- Bhowmik, D., S. Kumar, et al. (2012). "Tomato-A Natural Medicine and Its Health Benefits." Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry **1**: 33-43.
- Blanc, D. (1986). "The influence of cultural practices on the quality of production in protected cultivation with special references to tomato production." Acta Horticulturae **191**: 85-98.
- Boas, A., D. Page, et al. (2017). "Combined Effects of Irrigation Regime, Genotype, and Harvest Stage Determine Tomato Fruit Quality and Aptitude for Processing into Puree." Frontiers in Plant Science **8**.
- Chong, H. H., S. Simsek, et al. (2009). "Analysis of cell-wall pectin from hot and cold break tomato preparations." Food Research International **42**(7): 770-772.
- Costa-Rodrigues, J., O. Pinho, et al. (2018). "Can lycopene be considered an effective protection against cardiovascular disease?" Food Chemistry **245**: 1148-1153.
- Davies, J. N. and G. E. Hobson (1981). "THE CONSTITUENTS OF TOMATO FRUIT - THE INFLUENCE OF ENVIRONMENT, NUTRITION, AND GENOTYPE." Crc Critical Reviews in Food Science and Nutrition **15**(3): 205-280.
- Diaz, J. V., G. E. Anthon, et al. (2009). "Conformational Changes in Serum Pectins during Industrial Tomato Paste Production." Journal of Agricultural and Food Chemistry **57**(18): 8453-8458.
- Dorais, M., D. L. Ehret, et al. (2008). "Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: from the seed to the consumer." Phytochem. Rev. **7**: 231-250.
- Dorais, M., A. Gosselin, et al. (2001). Greenhouse tomato fruit quality. Hortic. Rev. **26**: 239-306.
- Dumas, Y., M. Dadomo, et al. (2003). "Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes." Journal of the Science of Food and Agriculture **83**(5): 369-382.

- Errington, N., G. A. Tucker, et al. (1998). "Effect of genetic down-regulation of polygalacturonase and pectin esterase activity on rheology and composition of tomato juice." Journal of the Science of Food and Agriculture **76**(4): 515-519.
- Favati, F., S. Lovelli, et al. (2009). "Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling." Scientia Horticulturae **122**(4): 562-571.
- Foolad, M. R. (2007). "Genome mapping and molecular breeding of tomato." Int. J. Plant Genomics **2007**:64358.
- Garcia, C. and C. Renard (2014). "Validation des dosages enzymatiques des sucres (glucose, fructose, saccharose) et acides (acide citrique et malique) par un spectrophotomètre avec lecteur de microplaques." Cahier des techniques de l'INRA **81** ((1)): 18.
- Gautier, H., V. Diakou-Verdin, et al. (2008). "How does tomato quality (sugar, acid, and nutritional quality) vary with ripening stage, temperature, and irradiance?" Journal of Agricultural and Food Chemistry **56**(4): 1241-1250.
- Gautier, H., C. Massot, et al. (2009). "Regulation of tomato fruit ascorbate content is more highly dependent on fruit irradiance than leaf irradiance." Annals of Botany **103**(3): 495-504.
- Gillapsy, G., H. Ben-David, et al. (1993). "Fruits: A Developmental Perspective " The Plant Cell **5**: 1439-1451.
- Gould, W. A. (1991). Tomato production, processing & technologie, CTI Publications.
- Grasselly, D., B. Navez, et al. (2000). "Tomate, pour un produit de qualité." **112**.
- Halinska, A. and C. Frenkel (1991). "ACETALDEHYDE STIMULATION OF NET GLUCONEOGENIC CARBON MOVEMENT FROM APPLIED MALIC-ACID IN TOMATO FRUIT PERICARP TISSUE." Plant Physiology **95**(3): 954-960.
- Hayes, W. A., F. G. Smith, et al. (1998). "The production and quality of tomato concentrates." Critical Reviews in Food Science and Nutrition **38**(7): 537-564.
- Helyes, L., A. Lugasi, et al. (2012). "Effect of irrigation on processing tomato yield and antioxidant components." Turkish Journal of Agriculture and Forestry **36**(6): 702-709.
- Hernandez, V., P. Hellin, et al. (2015). Increasing yield and quality of tomato cultivated under high temperature conditions through the use of elicitors. Agriculture and Climate Change - Adapting Crops to Increased Uncertainty. D. Edwards and G. Oldroyd. Amsterdam, Elsevier Science Bv. **29**: 184-184.
- Ho, L. C., R. I. Grange, et al. (1987). "AN ANALYSIS OF THE ACCUMULATION OF WATER AND DRY-MATTER IN TOMATO FRUIT." Plant Cell and Environment **10**(2): 157-162.
- Ilahy, R., C. Hdider, et al. (2011). "Phytochemical composition and antioxidant activity of high-lycopene tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivars grown in Southern Italy." Scientia Horticulturae **127**(3): 255-261.
- Jazaeri, S., A. Mohammadi, et al. (2018). "Characterization of lycopene hydrocolloidal structure induced by tomato processing." Food Chemistry **245**: 958-965.
- Katerji, N., P. Campi, et al. (2013). "Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region." Agricultural Water Management **130**: 14-26.
- Kuscu, H., A. Turhan, et al. (2014). "The response of processing tomato to deficit irrigation at various phenological stages in a sub-humid environment." Agricultural Water Management **133**: 92-103.
- Lemmens, L., I. Colle, et al. (2014). "Carotenoid bioaccessibility in fruit- and vegetable-based food products as affected by product (micro) structural characteristics and the presence of lipids: A review." Trends in Food Science & Technology **38**(2): 125-135.

- Leverrier, C., G. Almeida, et al. (2017). "Design of Model Apple Cells Suspensions: Rheological Properties and Impact of the Continuous Phase." Food Biophysics **12**(3): 383-396.
- Lukhmana, N., F. Kong, et al. (2018). "Rheological and structural properties of tart cherry puree as affected by particle size reduction." Lwt-Food Science and Technology **90**: 650-657.
- Macheix, J. J., A. Fleuriet, et al. (2005). Les composés phénoliques des végétaux : un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. Lausanne, Presses Polytechniques et Unuversitaires Romandes.
- Mirondo, R. and S. Barringer (2015). "Improvement of Flavor and Viscosity in Hot and Cold Break Tomato Juice and Sauce by Peel Removal." Journal of Food Science **80**(1): S171-S179.
- Moelants, K. R. N., R. Cardinaels, et al. (2014). "A Review on the Relationships between Processing, Food Structure, and Rheological Properties of Plant-Tissue-Based Food Suspensions." Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety **13**(3): 241-260.
- Monteith, J. L. (1965). "Evaporation and environment." Symp. Soc. Exp. Biol. **19**: 205 - 234.
- Page, D., C. Labadie, et al. (2013). Evolution of the Nutritional Value of Tomato Products from the Field to the Cans: Impact of Harvesting and Processing Methods on Macro- and Micro-Element Contents and Lycopene Bioaccessibility. Xii International Symposium on the Processing Tomato. M. Camara, L. Guitong and S. Colvine. Leuven 1, Int Soc Horticultural Science. **971**: 189-194.
- Page, D., C. Labadie, et al. (2019). "Increased diffusivity of lycopene in hot break vs. cold break purees may be due to bioconversion of associated phospholipids rather than differential destruction of fruit tissues or cell structures." Food Chemistry **274**: 500-509.
- Page, D., E. Van Stratum, et al. (2012). "Kinetics of temperature increase during tomato processing modulate the bioaccessibility of lycopene." Food Chemistry **135**(4): 2462-2469.
- Patane, C., S. Tringali, et al. (2011). "Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions." Scientia Horticulturae **129**(4): 590-596.
- Petro-Turza, M. (1987). " Flavor of tomato and tomato products." Food Review International **2**: 309-351.
- Pnueli, L., L. Carmel-Goren, et al. (1998). "The SELF-PRUNING gene of tomato regulates vegetative to reproductive switching of sympodial meristems and is the ortholog of CEN and TFL1." Development **125**(11): 1979-1989.
- Ripoll, J., L. Urban, et al. (2014). "Water shortage and quality of fleshy fruits-making the most of the unavoidable." Journal of Experimental Botany **65**(15): 4097-4117.
- Rodriguez, A., R. De la Torre, et al. (2001). Sensory evaluation of tomato paste samples from two different concentration methods. Proceedings of the Seventh International Symposium on the Processing Tomato. T. K. Hartz. Leuven 1, International Society Horticultural Science: 283-288.
- Santiago, J. S. J., Z. Jamsazzadeh Kermani, et al. (2017). "The effect of high pressure homogenization and endogenous pectin-related enzymes on tomato purée consistency and serum pectin structure." Innovative Food Science & Emerging Technologies **43**(Supplement C): 35-44.
- Santiago, J. S. J., Z. J. Kermani, et al. (2017). "The effect of high pressure homogenization and endogenous pectin-related enzymes on tomato puree consistency and serum pectin structure." Innovative Food Science & Emerging Technologies **43**: 35-44.

- Spooner, D. M., G. J. Anderson, et al. (1993). "CHLOROPLAST DNA EVIDENCE FOR THE INTERRELATIONSHIPS OF TOMATOES, POTATOES, AND PEPINOS (SOLANACEAE)." American Journal of Botany **80**(6): 676-688.
- Taber, H., P. Perkins-Veazie, et al. (2008). "Enhancement of tomato fruit lycopene by potassium is cultivar dependent." Hortscience **43**(1): 159-165.
- Tamaoki, M., F. Mukai, et al. (2003). "Light-controlled expression of a gene encoding L-galactono-gamma-lactone dehydrogenase which affects ascorbate pool size in *Arabidopsis thaliana*." Plant Science **164**(6): 1111-1117.
- Thakur, B. R., R. K. Singh, et al. (1996). "Quality attributes of processed tomato products: A review." Food Reviews International **12**(3): 375-401.
- Tilahum, S., D. S. Park, et al. (2017). "Effect of cultivar and growing medium on the fruit quality attributes and antioxidant properties of tomato (*Solanum lycopersicum* L.)." African Journal of Biotechnology **16**(32): 1678-1687.
- Toor, R. K., G. P. Savage, et al. (2006). "Seasonal variations in the antioxidant composition of greenhouse grown tomatoes." Journal of Food Composition and Analysis **19**(1): 1-10.
- Tyssandier, V., E. Reboul, et al. (2003). "Processing of vegetable-borne carotenoids in the human stomach and duodenum." American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology **284**(6): G913-G923.
- Ursem, R., Y. Tikunov, et al. (2008). "A correlation network approach to metabolic data analysis for tomato fruits." Euphytica **161**(1-2): 181-193.
- Varga, A. and J. Bruisman (1996). Tomato. S. M., ed. CRC Handbook of Fruit Set and Development. Boca Raton, FL, CRC Press: 461-491.
- Walker, A. J. and L. C. Ho (1977). "Carbon Translocation in the Tomato: Effects of Fruit Temperature on Carbon Metabolism and the Rate of Translocation " Annals of Botany **41**: 825-832.
- Weston, L. A. and M. M. Barth (1997). "Preharvest factors affecting postharvest quality of vegetables." Hortscience **32**(5): 812-816.
- Winsor, G. W. (1979). "Some factors affecting the quality and composition of tomatoes." Acta Hort. **93**: 335-341.

2. Analyse de la production de tomates d'industrie en France et détermination des principaux facteurs influençant la qualité des produits frais et transformés

Résumé : La tomate d'industrie est une culture à forte valeur ajoutée. La France est au 10^{ième} rang mondial des pays producteurs (0,195 Mt) mais au 3^{ème} rang des pays importateurs (0.573 Mt). Ces tomates sont produites et transformées dans deux régions: 64% des tomates transformées à l'échelle nationale sont réceptionnées dans les usines du sud-est, dans la région de Provence Alpes Côte d'Azur (PACA), et 34% restants sont traités dans les usines de la région sud-ouest. Aujourd'hui face à la concurrence, l'une des clés pour maintenir la filière française est de miser sur des produits de haute qualité pour se différencier des autres pays producteurs et cibler un marché de niche spécifique. La qualité du concentré de tomates est développée tout au long de la chaîne de production, depuis le choix du génotype, des propriétés pédoclimatiques du site de plantation, des pratiques culturales jusqu'au type de transformation effectuée sur les fruits. Ainsi, en 2015, nous avons mené une étude dans les deux régions productrices de tomates françaises (sud-est et sud-ouest) afin i) d'évaluer l'impact du contexte pédoclimatique et des modes de production sur la qualité des fruits frais et des produits transformés et ii) d'identifier les principaux leviers de contrôle de la qualité des concentrés en sortie d'usine. Pour cela, 46 cultivars ont été étudiés sur les deux sites sur des parcelles de producteurs. Le rendement, les paramètres de qualité des fruits (acidité titrable, teneur en matière sèche du péricarpe, teneur en sucres solubles et acides organiques) ont été analysés. Ensuite les fruits ont été transformés au laboratoire selon deux types de procédés couramment utilisés par l'industrie et la couleur et la viscosité des produits finis ont été mesurées. Les résultats ont montré qu'avec une irrigation supposée non limitante, le rendement a été influencé par le choix du cultivar, la densité de plantation et la durée du cycle de production, mais les différences de climat enregistrées entre le sud-est et le sud-ouest n'ont pas eu d'effet sur le rendement puisque l'effet zone de production correspondait majoritairement à un effet densité. Par ailleurs des variations significatives de qualité des fruits ont été observées entre les deux zones de production. Si la teneur en matière sèche des fruits n'était pas affectée, l'acidité titrable et les concentrations en glucose et acide citrique ont été influencées par la zone de production. Cet effet sur la qualité semble être lié à une durée du cycle de production supérieure, c'est-à-dire un stade de maturité des fruits à la récolte plus avancé, dans le sud-ouest. De même, l'analyse des purées a souligné l'importance du cultivar, du stade de maturité des fruits et du procédé de cuisson qui sont donc des facteurs déterminant pour la couleur et la viscosité.

Introduction

La tomate est l'un des légumes le plus populaire et le plus largement cultivé dans le monde. C'est aussi un légume parmi les plus importants de l'industrie alimentaire et sa consommation est importante et largement incluse dans l'alimentation humaine (Augusto, Falguera et al. 2013). Les tomates sont consommées à l'état frais ou principalement sous forme de produits transformés (Anese, Falcone et al. 2002). Les produits à base de tomate constituent une source essentielle de vitamine C, de potassium et d'antioxydants (principalement du lycopène) (Barrett, Garcia et al. 1998; Hayes, Smith et al. 1998).

Selon les données disponibles pour l'année 2016, sur un total d'environ 175 Mt de tomates produites dans le monde, environ 38 Mt ont été destinés à la transformation industrielle, et les principaux producteurs sont la Californie (9,4 Mt), la Chine (6,2 Mt), l'Italie (5.2 Mt), l'Espagne (3,3 Mt) et la Turquie (1,9 Mt), alors que la France est au 10^{ème} rang avec une production d'environ 0,195 Mt en 2017 (source : WPTC, 2017). Concernant la production française, sur ces 0,195 Mt de tomates destinées à l'industrie, près de 64% des tomates transformées à l'échelle nationale sont réceptionnées dans les usines du sud-est, dans la région de Provence Alpes Côte d'Azur (PACA), tandis que les 34% restants sont traités dans les usines de la région sud-ouest (source : FranceAgriMer, 2017). Ces deux régions de production françaises diffèrent largement par le type de sol, les caractéristiques environnementales et les pratiques culturelles.

Les tomates sont couramment transformées en divers produits alimentaires tels que les soupes, les sauces, les jus et les purées (Santiago, Kermani et al. 2017). Les producteurs et la filière française de tomates d'industrie essayent de fournir des produits de qualité et de plus haute valeur ajoutée comme les doubles concentrés (entre 12/14° Brix). La couleur, le Brix et la viscosité ou plus largement les propriétés rhéologiques sont des critères essentiels de qualité du produit fini, qui sont affectés par et l'utilisation de traitements de conservation thermique (Barrett, Garcia et al. 1998). Ces variables physicochimiques dépendent des structures biologiques des tissus du fruit et de leur réactivité au processus de transformation. Par exemple, la température de rupture est actuellement utilisée pour moduler la consistance des produits à base de tomates: un traitement à haute température (hot break: HB 90 ° C) immédiatement après le concassage produit des purées beaucoup plus visqueuses que le traitement à froid (cold break : CB) où les fruits sont d'abord écrasés puis macérés à température modérée (70°C) (Moelants, Cardinaels et al. 2014).

Pour commercialiser leurs produits de façon différenciée, les producteurs et la filière française de tomates d'industrie visent certains critères de qualité. Premièrement, pour produire des concentrés de tomates, il est nécessaire de produire des fruits avec une teneur en matière sèche élevée, qui est directement reliée à la teneur en sucres totaux. La couleur et la texture doivent également être maîtrisées. En ce qui concerne la viscosité du produit transformé, la déshydratation pendant le traitement a une influence majeure. Afin d'inciter les agriculteurs à accroître la teneur en matière sèche des fruits, l'industrie a mis en place un paiement au Brix à l'entrée usine, supposant une bonne corrélation entre Brix et aptitude à la transformation. En conséquences, la qualité de la tomate destinée à la transformation n'est administrée actuellement que par la couleur et le Brix, alors que d'autres caractéristiques affectant la rhéologie sont négligées (Barrett, Garcia et al. 1998; Boas, Page et al. 2017) en partie à cause du manque de connaissances sur les facteurs déterminants au cours de la production.

Afin de mieux comprendre l'élaboration de la qualité du produit final, le concentré de tomate, et de déterminer des leviers pour piloter la qualité au champ et à l'usine, nous avons réalisé une étude globale sur les deux bassins de production française. Un échantillonnage de parcelles a été réalisé pour représenter ces deux bassins et c'est ainsi que 8 parcelles et 46 cultivars ont été pris en compte dans cette étude qui a porté sur la saison 2015. Les différents cultivars provenant des deux régions ont été soumis aux deux procédés (HB, CB) couramment utilisés dans l'industrie. Les paramètres de qualité ont été analysés sur fruits frais et après transformation. Les résultats montrent que cette approche est intéressante et permet de bien décrire les sources de variation de la production en quantité et en qualité et elle mériterait d'être élargie à un ensemble de descripteurs plus important.

Matériels et méthodes

Données climatiques et pratiques culturales

Une analyse descriptive de la production de tomate d'industrie a été réalisée dans les deux principales régions représentatives de la production française : le sud-est (dans un rayon de 50 km autour d'Avignon) et le sud-ouest (dans un rayon de 50 km autour d'Agen). Pour caractériser la production dans ces deux zones, nous disposons, au total, de 8 parcelles appartenant à 8 producteurs, et de 46 cultivars (la liste des cultivars est fournie dans le tableau 1 de l'annexe 1). Cette étude globale a été mise en place par la SONITO. Toutes les données

sur les pratiques culturales ont été recueillies auprès de cette dernière. Les données climatiques sont issues de la base de données INRA CLIMATIK regroupant les données météorologiques des stations du réseau AgroClim. Le tableau 1 synthétise les données disponibles.

Durant la période de production à Avignon (avril-septembre), les températures minimales ont varié de 2 à 26°C et les températures maximales de 14 à 37°C. A Agen, durant la même période, les températures minimales ont été comprises entre -1 et 22°C et les maximales entre 13 et 40°C (figure 1 A et B, courbes en gris et noir). Le cumul des précipitations, durant la période avril-septembre, s'élevait à 282 mm à Avignon, et à 338 mm à Agen (figure 1 A et B, les précipitations sont représentées par des diagrammes bleus).

Tableau 1. Liste des données climat et pratiques culturales disponibles dans le sud-est et le sud-ouest de la France

	Climat	Parcelles	Cultivars	Type d'irrigation	Date de plantation/date de récolte
Sud-est	Données journalières, station d'Avignon: température (°C), rayonnement global (Joules/cm ²), hauteur de précipitation (mm), humidité de l'air (%), évapotranspiration (mm)	Nombre:5 Densité: de 30000 à 32000 plants/ha Double ou simple rang	37 cultivars 10 à 17 cultivars par parcelle et 20 à 24 m/cultivar	Goutte à goutte	Plantation: du 08/04/2015 au 28/05/2015 Récolte: du 20/07/2015 au 15/09/2015
Sud-ouest	Données journalières, station d'Agen: température (°C), rayonnement global (Joules/cm ²), hauteur de précipitation (mm), humidité de l'air (%), évapotranspiration (mm)	Nombre:3 Densité: de 28000 à 30000 plants/ha Double ou simple rang	45 cultivars 12 à 17 cultivars par parcelle et 20 m/cultivar	Goutte à goutte ou aspersion	Plantation: du 22/04/2015 au 21/05/2015 Récolte: du 28/07/2015 au 09/09/2015

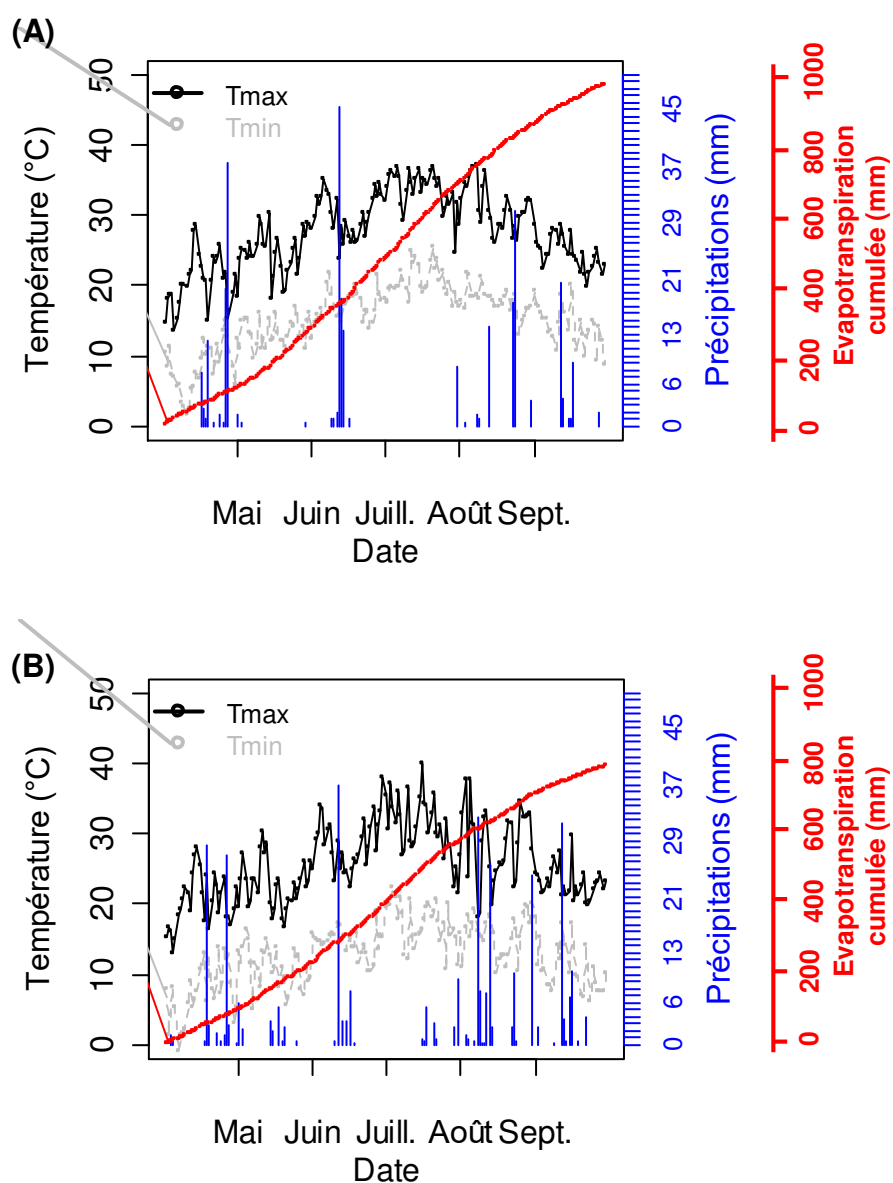


Figure 1. Digrammes climatiques pour Avignon (A) et Agen (B) d'avril à septembre 2015. Les températures minimales et maximales sont représentées respectivement en gris et noir, les précipitations par des diagrammes bleus et le cumul de l'évapotranspiration en rouge.

Le cumul d'évapotranspiration (ETP) calculée d'après l'équation de Penman-Monteith (Monteith 1965), était de 971 mm à Avignon et de 792 mm à Agen (figure 1 A et B, courbes en rouge) sur la période de production. La région sud-ouest était donc caractérisée par des amplitudes thermiques et des précipitations plus importantes sur la durée du cycle de production que la région sud-est et par une ETP plus faible.

Les quantités d'eau apportées par irrigation n'ont pas été relevées chez les différents producteurs. Il faut noter que toutes les parcelles/producteurs du sud-est possédaient un système d'irrigation par goutte à goutte et que dans le sud-ouest, sur les trois parcelles étudiées, deux bénéficiaient d'un système goutte à goutte et une d'un système d'irrigation par aspersion. Pour toutes les parcelles, un arrêt d'irrigation a été pratiqué 10 jours avant la récolte afin d'accélérer la maturation des fruits et d'homogénéiser les stades de maturité. Nous avons fait l'hypothèse que toutes les parcelles étaient irriguées de sorte à couvrir les besoins de la culture. Regroupant les informations sur les pratiques et les données météorologiques, nous avons calculé les besoins en irrigation nets pour un cultivar de pleine saison, en ne tenant pas compte des réserves en eau du sol (données indisponibles). Ainsi, pour une plantation le 25 avril, une récolte le 25 août, un arrêt de l'irrigation 10 jours avant la récolte, les besoins en irrigation nets étaient de 332 mm à Avignon et de 203 mm à Agen. Les besoins en irrigation nets ont été calculés de la façon suivante :

$$\text{Besoins} = \text{ETc} - \text{P}$$

$$\text{ETc} = \text{Kc} * \text{ETP}$$

avec ETc, évapotranspiration maximale de la culture, P, précipitations

Kc, coefficient de culture variant de 0,4 à 1 sur le cycle de culture

ETP, l'évapotranspiration calculée d'après l'équation de Penman-Monteith

Analyse du rendement

En fonction du cultivar et de la parcelle, les fruits ont été récoltés par la SONITO et l'INRA entre 94 et 124 jours après plantation, et au stade de maturité correspondant à la pratique des producteurs, c'est-à-dire 70% de fruits mûrs. Le rendement total en fruits et en fruits commercialisables a été déterminé sur 4 plantes par variété et par micro-parcelle, chaque parcelle comprenant 3 micro-parcelles ou blocs. La masse fraîche moyenne d'un fruit a été déterminée sur 25 fruits pour chaque variété et chaque bloc.

Analyse de la qualité des fruits

Trois à quatre lots de 15 fruits ont été récoltés par variété et par parcelle. Pour chacun des lots, la qualité des fruits à la récolte a été caractérisée par, la teneur en solides solubles (°Brix, réfractomètre Atago), l'acidité titrable, la teneur en matière sèche du péricarpe, la teneur en sucres solubles, et acides organiques. Un spectre infrarouge (MIR) d'un broyat de fruits a été pris pour chaque lot. L'acidité titrable a été déterminée par titrage jusqu'à pH 8,1 avec NaOH 0,1 N et exprimée en mmol H⁺ / kg de poids frais en utilisant un autotitracteur (Methrom, Herisau, Suisse). La teneur en matière sèche des fruits a été calculée en pesant 3 g de péricarpe de fruits (tranche prélevée au niveau équatoriale) avant et après passage à l'étuve à 85°C. Les restes de péricarpe ont ensuite été placés à -20°C jusqu'aux analyses biochimiques. Les sucres solubles et acides organiques ont été dosés par analyse enzymatique en utilisant un spectrophotomètre SAFAS avec lecteur de microplaques d'après le protocole décrit par Garcia et Renard, 2014 (Garcia and Renard 2014).

Transformation des tomates et qualité des purées

Chaque lot a été soumis à deux types de procédés : « Hot Break (HB) » et « Cold Break (CB) » afin d'explorer l'interaction « matières premières » x « procédés ». La transformation standard au laboratoire est caractérisée par un procédé HB/CB de 2x400g de chaque lot de fruits et par un procédé utilisant un four micro-ondes. En HB, les fruits sont chauffés (95°C) directement sans broyage initial. La montée en température est rapide et permet l'inhibition des enzymes. En CB, les fruits sont broyés pendant 30 secondes à température ambiante pour permettre une macération enzymatique. Puis ils sont chauffés à la micro-onde pour stopper la réaction enzymatique et cuire la purée. L'objectif du HB est de mesurer les propriétés intrinsèques non enzymatiques du fruit pour leur capacité à fournir de la viscosité et de la couleur. L'objectif du CB est de mesurer la réactivité enzymatique, c'est-à-dire la capacité à perdre de la texture pendant l'étape de macération à température ambiante. Chaque purée obtenue a été caractérisée pour sa viscosité (au rhéomètre et au bostwick), sa couleur, son taux de matières sèches, la quantité de lycopène diffusable.

Analyse des données

Une base de données a été constituée intégrant 12 variables mesurées sur les 16 cultivars de référence, répétés dans les 2 zones de production et dans les différentes parcelles. Pour chaque observation, l'écart entre la moyenne de la zone et la moyenne de la parcelle a été calculé, et ensuite ajouté ou soustrait à l'observation pour s'affranchir de l'effet parcelle.

Une *heat map* a été réalisée avec le logiciel R (<http://www.R-project.org>, package *gplots* et fonction *heatmap*) à partir de cette base de données. Les données ont été centrées et réduites. Les deux classifications obtenues sont basées sur les distances Euclidiennes.

Des analyses de variance (ANOVA) ont été réalisées avec le logiciel R (package *agricolae* et fonction *aov*) afin de déterminer l'effet des facteurs cultivar, zone de production et de l'interaction cultivar x zone sur les variables de rendement et de qualité pour les 16 cultivars de référence en utilisant la base de données établie. Des tests d'homogénéité des variances (test de Bartlett) et de normalité des résidus (test de Shapiro) ont été effectués avant l'évaluation du modèle. Lorsque les tests de conformité étaient respectés, une comparaison multiple des moyennes a été réalisée avec le test de Tuckey HSD (Honest Significant Differences), seuil $\alpha = 0,05$. Dans le cas contraire, les moyennes ont été comparées avec un test non paramétrique, Kruskal-Wallis, suivi d'un test de comparaisons multiples sur les rangs studentisés avec la p-value ajustée avec la méthode Benjamini-Hochberg, seuil $\alpha = 0,05$.

Des ANOVAs ont également été réalisées pour connaître l'effet des facteurs cultivar, zone de production et procédés de cuisson et des interactions cultivar x zone, cultivar x procédés, zone x procédés et cultivar x zone x procédés sur la qualité des purées.

Le « package » R Factomine et la fonction « plot PCA » ont été utilisés pour la réalisation d'une analyse en composantes principales. La base de données était composée de 12 variables mesurées sur les fruits et sur les purées et de 130 observations. Les données ont été centrées réduites par variable.

Résultats et discussion

La qualité des fruits est élaborée tout au long de la chaîne de production, à partir du choix du génotype, du site de plantation, des propriétés pédoclimatiques de chaque région et enfin du type de transformation effectuée sur les fruits. La France a deux régions distinctes de production de la tomate d'industrie, qui diffèrent par le type de sol, le climat, la température et les types de pratiques culturales. Ces différences régionales ont un impact sur les caractéristiques des fruits par rapport au Brix, aux teneurs en matière sèche, sucres et acides organiques et par la viscosité. Ces caractéristiques ont un impact sur le produit final à traiter par l'industrie, puisque le paiement est effectué en fonction du contenu en Brix du lot reçu, qui est supposé lié à la quantité d'eau à retirer pendant le processus de transformation et à la viscosité des produits finis. Par conséquent, les interactions entre les facteurs régionaux qui

déterminent la qualité des fruits au cours de leur production au champ et ceux qui seront agissent au cours du processus de transformation doivent être bien comprises. Dans ce travail, nous avons étudié la qualité des fruits produits dans les deux régions productrices de tomates en France et leurs impacts sur la qualité des pures obtenues par les procédés HB et CB.

Le choix variétal et le contexte pédoclimatique affectent le rendement et la qualité à la récolte

La figure 1 et le Tableau 1 détaillent les caractéristiques des deux régions étudiées. Nous avons observé une ETP et des besoins en irrigation nets plus faibles (- 64%) dans le sud-ouest par rapport au sud-est. Dans le sud-ouest, ces besoins sont couverts par un système goutte à goutte ou par aspersion tandis que dans le sud-est toutes les parcelles présentaient un système goutte à goutte (Tableau 1). Des différences entre les deux régions sont aussi à noter pour la densité de plantation (des densités plus faibles dans le sud-ouest par rapport au sud-est, en moyenne -13%), et la durée du cycle de production (107 jours en moyenne dans le sud-ouest versus 103 jours dans le sud-est).

Pour analyser les effets de la variété et du contexte pédoclimatique sur le rendement et la qualité, nous avons construit une base de données avec 16 cultivars de référence (répétés dans chaque zone et sur chaque parcelle) et soustrait l'effet « parcelle » pour les différentes observations. Nous avons ensuite utilisé cette base de données pour construire une cartographie ou *heat map* des 16 cultivars dans le sud-est (observations en violet) et dans le sud-ouest (observations en vert) (Figure 2). Les valeurs pour les 12 variables sont représentées par un code couleur : du bleu pour les faibles valeurs en allant vers le rouge pour les fortes valeurs comme défini par l'échelle représentée sous la *heat map* (Figure 2). Deux classifications ont été réalisées : l'une montre les relations entre les 12 variables de rendement et de qualité des fruits à la récolte, et l'autre les liens entre les variétés cultivées et les deux zones de productions (Figure 2).

Le nombre de jours après plantation (ou durée du cycle de production) est relié aux variables de rendement : rendement (en T/ha ou g/plante), poids moyen d'un fruit (en g), et matière sèche structurale (en g). Toutes les variables de composition des fruits sont classées dans un deuxième groupe. Les observations sont regroupées par zone de production et par cultivar.

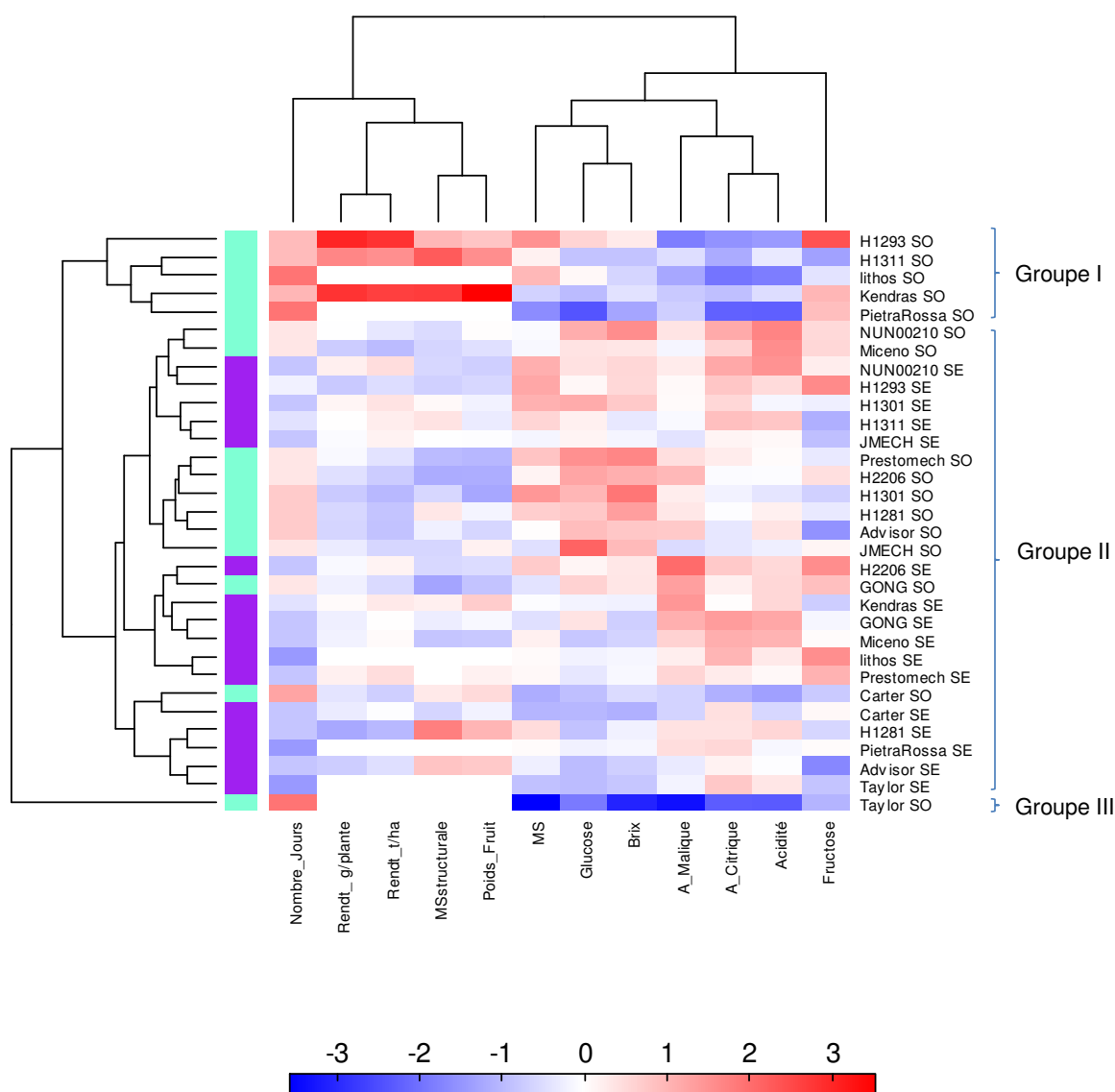


Figure 2. Heatmap représentant les variations de 12 variables caractérisant les fruits à la récolte (Nombre de jours après plantation, rendement total en g/plante et en t/ha, Matière sèche structurale en g, Poids moyen du fruit en g) et la composition des fruits (teneur en matière sèche en %, concentration en Glucose en g/100gMF, °Brix, concentrations en Acide malique, Acide citrique et Fructose en g/100gMF, et acidité titrable en meq./L) pour 32 observations: 16 cultivars de référence cultivés dans le sud-est (SE) et sud-ouest (SO). Une couleur a été attribuée à chaque valeur: du bleu pour les faibles valeurs au rouge pour les fortes valeurs. Ces valeurs correspondent à la moyenne de 3 à 5 données. Les variétés cultivées dans le sud-est apparaissent en violet et celles cultivées dans le sud-ouest en vert. Les deux classifications sont basées sur les distances Euclidiennes.

En effet, nous pouvons distinguer trois groupes: le premier groupe (groupe I), comprenant 5 échantillons, provenant tous du sud-ouest, est caractérisé par un cycle de production long, de forts rendements, des teneurs en matière sèche et sucres solubles élevées mais de faibles concentrations en acides organiques ; le groupe II comprend 26 échantillons provenant du sud-ouest et du sud-est et le groupe III, composé d'un seul cultivar produit dans le sud-ouest, est caractérisé par une longue durée du cycle de production, une faible teneur en matière sèche ainsi que de faibles concentrations en sucres et acides solubles (Figure 2). Le groupe II est divisé en trois-sous-groupes. Le sous-groupe le plus large contient 13 échantillons (8 du sud-ouest et 5 du sud-est) et présente des valeurs faibles à moyennes pour la durée du cycle, pour les variables liées au rendement, et pour les teneurs en acides organiques et fructose, mais des valeurs élevées pour les teneurs en matière sèche et glucose. Les deux autres sous-groupes comprennent respectivement 7 cultivars (1 seul provenant du sud-ouest) et 6 cultivars (1 seul provenant du sud-ouest) et sont caractérisés par des valeurs faibles pour la durée du cycle (sauf pour les deux cultivars provenant du sud-ouest), des valeurs faibles à moyennes pour les variables liées au rendement, et les teneurs en matière sèche et glucose, mais des valeurs élevées pour les acides organiques et l'acidité titrable (Figure 2). Il est intéressant de noter que les variétés du groupe I, cultivées dans le sud-ouest, se comportent de manières très différentes dans le sud-est. Plus généralement, peu de variétés sont classées dans le même groupe et sous-groupe lorsqu'elles sont cultivées dans le sud-est ou le sud-ouest ce qui laisse présager une forte interaction cultivar x zone.

Pour étudier plus en détails l'effet des facteurs, cultivar, zone de production, et de l'interaction cultivar x zone, nous avons réalisé des ANOVAs (Tableau 2). Dans tous les tests effectués, le facteur cultivar a un effet significatif ($P < 0.05$), sauf sur la concentration en fructose. L'effet du facteur zone de production est significatif sur le rendement, le glucose et les variables liées à l'acidité du fruit (acidité titrable et concentration en acide citrique) ($P < 0.05$). Une interaction cultivar x zone est significative pour ces deux dernières variables (Tableau 2). A noter, le facteur zone contrôle le rendement exprimé en t/ha (36% de la variance associée à la zone de production) mais pas le rendement exprimé en g/plante (4% de la variance) (Tableau 2). En moyenne, les rendements, exprimés en t/ha, sont plus faibles dans le sud-ouest par rapport au sud-est (en moyenne 90 t/ha, - 10% par rapport au sud-est). Cependant, les rendements, exprimés en g/plante, ont tendance à être plus élevés dans le sud-ouest (+ 2%) sans que cela ne soit significatif. Ceci est dû à des différences de densité de plantation qui sont plus faibles dans le sud-ouest (- 13% par rapport au sud-est). De plus, les

fruits produits dans les deux zones de production présentent des différences de composition (Figure 2 et Tableau 2). Dans le sud-ouest les fruits concentrent plus de glucose (en moyenne 1,6 g/100 g_{MF} et + 7% par rapport au sud-est) et moins d'acide citrique (en moyenne 0,34 g/100 g_{MF} et – 22%). Les plus grandes teneurs en acides relevées dans le sud-est, nous ont conduit à calculer la sucrosité des fruits (rapport [sucres solubles]/[acides solubles], critère important de la qualité gustative. La figure 3 montre les différences de sucrosité entre les deux zones de production pour 16 cultivars. Les fruits du sud-ouest présentent des sucrosités 1 à 3 fois supérieures à celles du sud-est (Figure3).

Comme détaillé ci-dessus, avec une irrigation supposée non limitante, le rendement a été influencé par le choix du cultivar, la densité de plantation et la durée du cycle de production. Dans ces conditions d'irrigation, les différences de climat enregistrées entre le sud-est et le sud-ouest n'ont pas eu d'effet sur le rendement puisque l'effet zone de production correspondait majoritairement à un effet densité. D'après Foolad (2007) la sélection de cultivars de tomate d'industrie aux Etats-Unis est pour 50% responsable du gain de rendement, de 10,1 t/ha à 72,4 t/ha, enregistré entre les années 1920 et 1990(Foolad 2007) et depuis les années 2000, le rendement moyen aux Etats-Unis est supérieur à 100 t/ha (Foolad 2007). Ces niveaux de rendement sont atteints dans le sud-est, grâce à des densités de plantation de 31000 plants/ha en moyenne, et aussi dans le sud-ouest pour trois cultivars particulièrement performants: 'H1293', 'H1311', et 'Kendras', avec des cycles de production supérieurs à 110 jours après plantation. De plus, nous avons observé que les fortes densités étaient légèrement pénalisantes pour le rendement à l'échelle de la plante.

Tableau 2. Synthèse des analyses de la variance à deux facteurs (cultivar et zone) pour 7 variables mesurées à la récolte. SC, sommes des carrés des écarts.

Facteurs	Cultivar			Zone			Intéraction (CultivarxZone)			Résidus	
	SC	Valeur P	SCx/SCt otale %	SC	Valeur P	SCx/SC totale %	SC	Valeur P	SCx/SCt otale %	SC	SCx/SCto tale %
Variables											
Rendement total (t/ha)	2208	0,00504 **	22,23	3603	2,8e-08 ***	36,28	1072	0,16001	10,79	3049	30,70
Rendement total (g/plante)	2332045	0,00562 **	33,70	249955	0,08823	3,61	1064328	0,2023	15,38	3274269	47,32
Teneur en matière sèche du fruit (%)	22,54	0,022 *	27,51	0,59	0,371	0,72	5,5	0,932	6,71	53,29	65,05
Glucose (g/100gMF)	2,063	0,0563 .	22,46	0,32	0,0463 *	3,48	1,124	0,5015	12,24	5,677	61,81
Fructose (g/100gMF)	2,539	0,28	18,63	0,002	0,912	0,01	0,921	0,961	6,76	10,164	74,59
Acidité titrable (meq./L)	57	2,50e-11 ***	50,41	8,59	2,45e-05 ***	7,60	16,61	0,00334 **	14,69	30,88	27,31
Acide citrique (g/100gMF)	0,2704	2,60e-05 ***	26,87	0,2372	2,79e-10 ***	23,57	0,1745	0,00332 **	17,34	0,3243	32,22

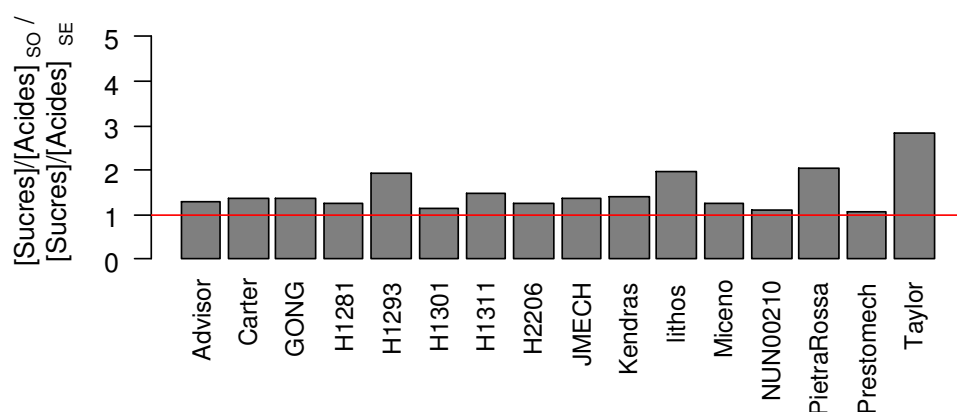


Figure 3. Comparaison du rapport concentration totale en sucres / concentration totale en acides des fruits entre le sud-ouest et le sud-est pour 16 cultivars.

Par ailleurs des variations significatives de qualité des fruits ont été observées entre les deux zones de production. Si la teneur en matière sèche des fruits n'est pas affectée, l'acidité titrable et les concentrations en glucose et acide citrique sont influencées par la zone de production. Cependant étant donnés les rendements atteints dans le sud-est (en moyenne 100 t/ha) et l'effet connu d'un déficit hydrique du sol sur le rendement et la teneur en matière sèche de la tomate d'industrie (Patane, Tringali et al. 2011; Katerji, Campi et al. 2013), il est peu probable que les besoins en eau n'aient pas été couverts pour la majeure partie du cycle de production dans le sud-est. D'après Gould (1991), le pH et l'acidité titrable de la tomate varient en fonction de nombreux facteurs dont les pratiques culturales et les variations saisonnières (Gould 1991). Il est possible que l'acidité titrable et la teneur en acide citrique aient été influencées par une durée de production plus faible dans le sud-est avec pour conséquence des fruits récoltés à un stade de maturité moins avancé. D'après Anthon et al. (2011), une diminution de l'acidité titrable et de la teneur en acide citrique est observée chez la tomate d'industrie avec augmentation de la maturité des fruits (Anthon, LeStrange et al. 2011). Ces variations peuvent être dues à une conversion des acides organiques en sucres solubles au cours de la maturation (Halinska and Frenkel 1991). Un effet stress hydrique a pu se cumuler à cet effet stade de maturité puisque, la fin de maturation des fruits a lieu en condition de déficit hydrique après interruption de l'irrigation 10 jours avant récolte et que les pluies ont été moins abondantes dans le sud-est en fin de cycle (figure 1).

La qualité des purées dépend surtout du cultivar et du procédé de cuisson indépendamment de la zone de production

Nous avons ensuite testé l'effet des facteurs cultivar, zone de production et procédé de transformation ainsi que des différentes interactions sur les variables caractérisant la qualité des purées (coloration caractérisée par l'angle de teinte Hue, teneur en matière sèche, viscosité et lycopène diffusable). Le tableau 3 synthétise les résultats des ANOVAs effectuées. Aucune des interactions testées n'était significative. Par conséquent, ces résultats ont été omis du tableau 3. Les variables viscosité et lycopène diffusable n'apparaissent pas dans ce tableau car les tests de conformité n'étaient pas respectés. Les ANOVAs montrent que le cultivar contrôle la qualité des purées puisque l'effet de ce facteur est significatif et que 33 à 51% de la variance lui sont associés. La zone de production et la cuisson ne modifient que l'angle de teinte Hue. La figure 4 permet de comparer les valeurs de l'angle de teinte Hue entre le sud-ouest et le sud-est pour 6 cultivars et les deux procédés de transformation.

Tableau 3. Synthèse des analyses de la variance à trois facteurs (cultivar, zone, et procédé de cuisson) pour 2 variables déterminées sur des purées. Les interactions non significatives ont été omises. SC, sommes des carrés des écarts.

Facteurs	Cultivar			Zone			Cuisson			Résidus	
	SC	Valeur P	SCx/SCtotale %	SC	Valeur P	SCx/SCtotale %	SC	Valeur P	SCx/SCtotale %	SC	SCx/SCtotale %
Variables											
Angle de teinte Hue (°)	328,1	3,97e-07 ***	50,59	23,9	0.030759 *	3,68	84,4	0,000186 ***	13,01	139,5	21,51
Teneur en matière sèche de la purée (%)	11,946	0,00582 **	33,31	0,003	0,94312	0,01	1,097	0,17961	3,06	17,437	48,65

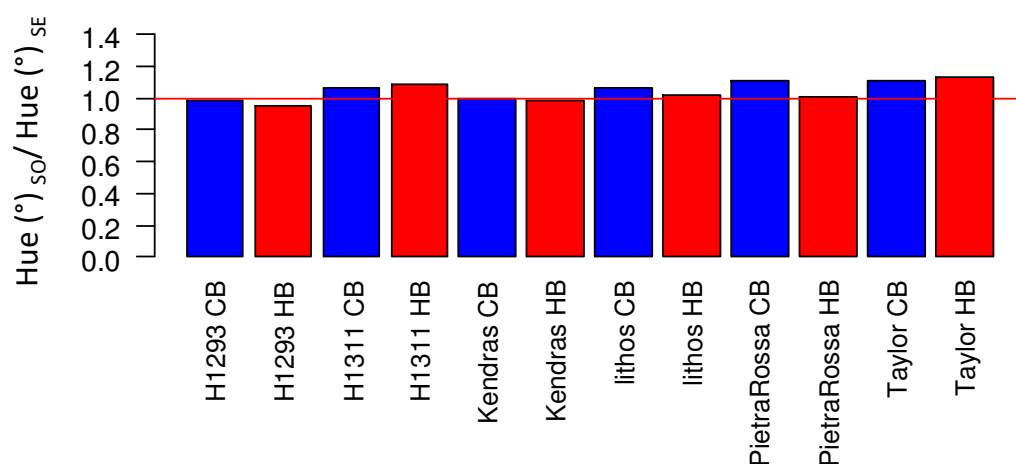


Figure 4. Comparaison de l'angle de teinte Hue (°) mesuré sur des purées provenant du sud-ouest et le sud-est pour 6 cultivars et deux procédés de cuisson CB (en bleu) et HB (en rouge).

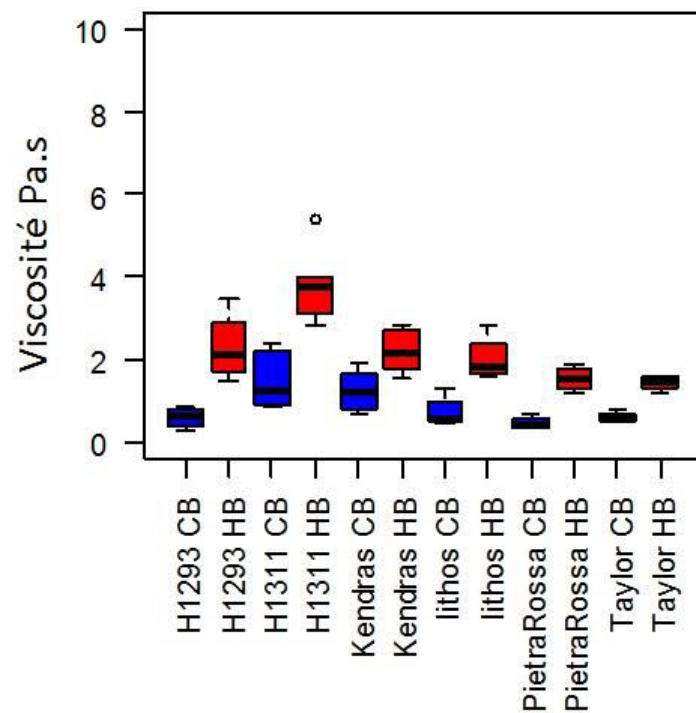


Figure 5. Variations de la viscosité des purées obtenues à partir de 6 cultivars et deux modes de cuisson Cold Break (CB, en bleu) et Hot Break (HB, en rouge)

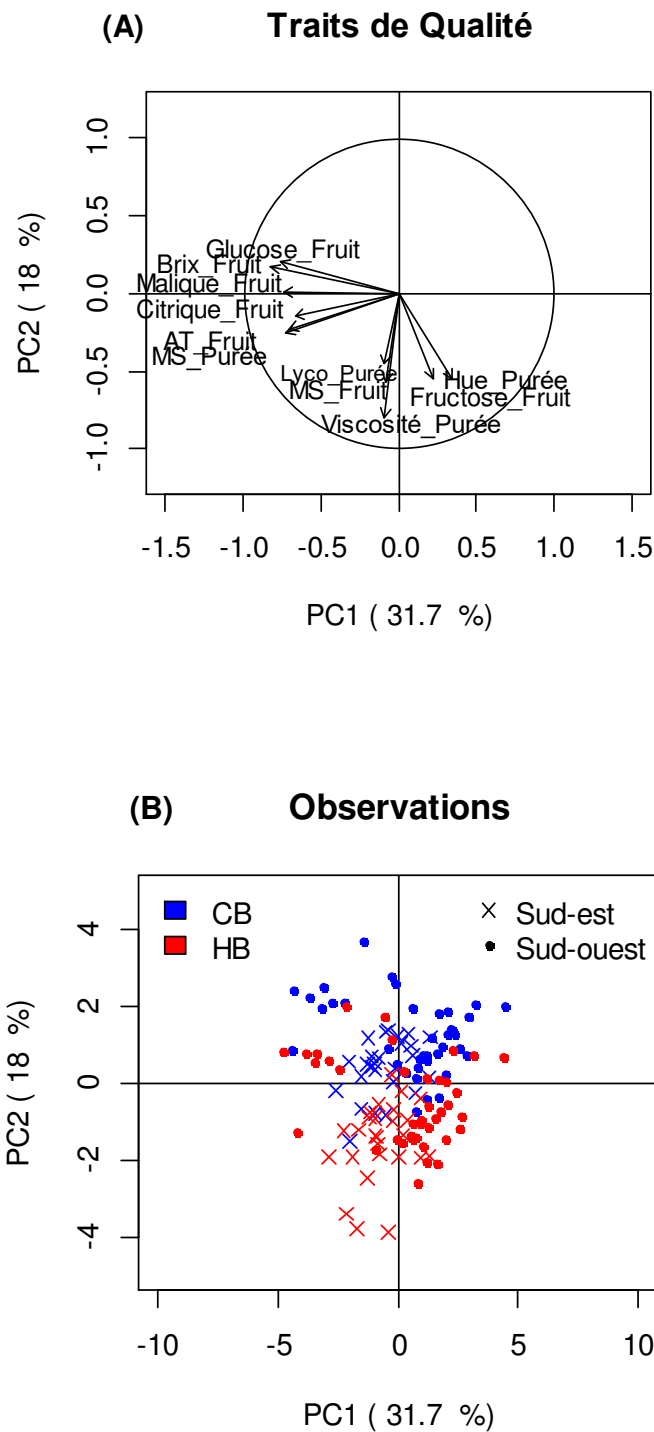


Figure 6. Résultats de l'Analyse en composantes principales des traits de qualité mesurés sur fruits et purées selon les deux composantes (PC1 et PC2) représentant 49,7% de la variance totale. (A) Projection des variables de qualité et (B) projection des 230 observations. Les zones de production sont séparées selon la composante 1 tandis que la composante 2 permet de séparer les deux procédés de transformation.

La valeur Hue des purées provenant du sud-ouest est légèrement supérieure (jusqu'à 1,2 fois) à la valeur Hue des purées produites dans le sud-est sauf pour le cultivar H1293 après transformation « hot break » (en rouge sur la Figure 4). La viscosité des purées dépend du cultivar et de la cuisson comme l'indiquent les données présentées en figure 5 pour six cultivars. La plus forte valeur de viscosité est obtenue pour le cultivar H1311 et la cuisson « hot break » quelle que soit la zone de production.

La figure 6 synthétise les résultats de l'ACP obtenue sur la qualité des fruits et des purées. Les variables concentration en glucose du fruit, Brix du fruit, acide malique du fruit, acide citrique du fruit, acidité titrable du fruit et teneur en matière sèche des purées sont corrélées avec les valeurs négatives de la composante ou axe 1. Les variables teneur en matière sèche du fruit, viscosité des purées, fructose du fruit et angle de teinte des purées sont corrélées avec les valeurs négatives de l'axe 2 (Figure 6A). La figure 6B montre les projections de 230 observations sur ces deux axes. Les zones de productions sont séparées sur l'axe 1 en lien avec les teneurs en acides des fruits, et les procédés de transformation se séparent sur l'axe 2 en lien avec la viscosité des purées et l'angle de teinte Hue (Figure 6B).

La consistance constitue l'un des principaux traits de qualité des purées de tomates, considérées comme des suspensions de particules insolubles (pulpe) dans une solution aqueuse (sérum) (Moelants, Cardinaels et al. 2014). Hayes et al. (1998) ont démontré que les principaux facteurs régissant la consistance de la pâte de tomate et de la purée sont: les différences de composition entre les cultivars; les variations de la composition d'un cultivar à différents stades de maturité; la teneur totale en matières solides et la teneur en matières solides insolubles; la granulométrie et la forme des particules de la matière insoluble. Nos résultats montrant que le cultivar et la cuisson ont eu un impact majeur sur la viscosité des purées sont en accord avec ces travaux. Nous proposons que les effets du génotype et de la cuisson sur la rhéologie de la purée soient déterminés par des modifications de composition des pectines et par des modifications de taille et de forme des particules de la matière insoluble (Thakur, Singh et al. 1996). La différence rhéologique après les traitements HB et CB est attribuée aux effets de la température sur les enzymes pectinolytiques endogènes, à savoir la polygalacturonase (PG) et la pectine méthyl-estérase (PME) impliquées dans le ramollissement des fruits (Anthon and Barrett 2002; Moelants, Cardinaels et al. 2014) (Anthon et al., 2002; Moelants et al., 2014). L'implication de ces enzymes a été confirmée par le traitement HB / CB des tomates génétiquement modifiées (Errington, Tucker et al. 1998; Boas, Page et al. 2017). La consistance peut également être affectée par le pH (Thakur, Singh

et al. 1996). Nous n'avons pas déterminé cette variable sur les fruits frais ou sur les purées. Cependant, chez la tomate, le pH dépend des teneurs en acides citriques (Anthon, LeStrange et al. 2011). Nous avons souligné que les teneurs en acides organiques des fruits frais prélevés dans le sud-est étaient plus élevées que celles des fruits récoltés dans le sud-ouest probablement en raison d'une maturité plus avancée dans le sud-ouest. Le stade de maturité et la teneur en acides apparaissent donc comme des facteurs majeurs influençant la qualité des purées, bien que l'effet zone de production sur la viscosité des purées ne soit pas significatif dans notre étude. Pour confirmer ces hypothèses une étude du même type incluant plus de critères pédoclimatiques et de critères de qualité des fruits et des purées est nécessaire.

Conclusions

D'après les données analysées, la qualité des fruits était influencée par le choix des cultivars, les pratiques culturales et en particulier la densité de plantation et la durée du cycle de production, mais les différences climatiques (amplitude thermiques et cumul de précipitation), en l'absence de déficit d'irrigation, n'ont pas semblé être un facteur majeur de variation de la qualité en 2015. Sur les paramètres de qualité des purées, nous suggérons que la viscosité des purées dépend du cultivar, du stade de maturité des fruits et de la cuisson qui déterminent les modifications de composition de pectine et les modifications de taille et de forme des particules. Toutefois les données sont insuffisantes pour valider ces hypothèses et pour explorer de manière précise les liens entre traits de qualité du fruit frais, réaction au cours de la transformation et qualité finale des purées. Ce travail a été complété dans le cadre d'une seconde expérimentation au champ et en serre (chapitre 2) et avec des données infrarouges non exploitées dans le cadre de la thèse. Les propriétés rhéologiques des purées ont quant à elle été explorées plus en détail dans le chapitre 3.

Remerciements

AA a été soutenu par une subvention du CAPES et du ministère brésilien de l'éducation. Ce travail a également été soutenu par la Société Nationale Interprofessionnelle de la Tomate (SONITO) et la Structure Fédérative de Recherche Tersys.

REFERENCES

- Anese, M., P. Falcone, et al. (2002). "Effect of equivalent thermal treatments on the color and the antioxidant activity of tomato purees." Journal of Food Science **67**(9): 3442-3446.
- Anthon, G. E. and D. M. Barrett (2002). "Kinetic parameters for the thermal inactivation of quality-related enzymes in carrots and potatoes." Journal of Agricultural and Food Chemistry **50**(14): 4119-4125.
- Anthon, G. E., M. LeStrange, et al. (2011). "Changes in pH, acids, sugars and other quality parameters during extended vine holding of ripe processing tomatoes." Journal of the Science of Food and Agriculture **91**(7): 1175-1181.
- Augusto, P. E. D., V. Falguera, et al. (2013). "Viscoelastic Properties of Tomato Juice: Applicability of the Cox-Merz Rule." Food and Bioprocess Technology **6**(3): 839-843.
- Barrett, D. M., E. Garcia, et al. (1998). "Textural modification of processing tomatoes." Critical Reviews in Food Science and Nutrition **38**(3): 173-258.
- Boas, A., D. Page, et al. (2017). "Combined Effects of Irrigation Regime, Genotype, and Harvest Stage Determine Tomato Fruit Quality and Aptitude for Processing into Puree." Frontiers in Plant Science **8**.
- Errington, N., G. A. Tucker, et al. (1998). "Effect of genetic down-regulation of polygalacturonase and pectin esterase activity on rheology and composition of tomato juice." Journal of the Science of Food and Agriculture **76**(4): 515-519.
- Foolad, M. R. (2007). "Genome mapping and molecular breeding of tomato." Int. J. Plant Genomics **2007**:64358.
- Garcia, C. and C. Renard (2014). "Validation des dosages enzymatiques des sucres (glucose, fructose, saccharose) et acides (acide citrique et malique) par un spectrophotomètre avec lecteur de microplaques." Cahier des techniques de l'INRA **81** ((1)): 18.
- Gould, W. A. (1991). Tomato production, processing & technologie, CTI Publications.
- Halinska, A. and C. Frenkel (1991). "ACETALDEHYDE STIMULATION OF NET GLUCONEOGENIC CARBON MOVEMENT FROM APPLIED MALIC-ACID IN TOMATO FRUIT PERICARP TISSUE." Plant Physiology **95**(3): 954-960.
- Hayes, W. A., F. G. Smith, et al. (1998). "The production and quality of tomato concentrates." Critical Reviews in Food Science and Nutrition **38**(7): 537-564.
- Katerji, N., P. Campi, et al. (2013). "Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region." Agricultural Water Management **130**: 14-26.
- Moelants, K. R. N., R. Cardinaels, et al. (2014). "A Review on the Relationships between Processing, Food Structure, and Rheological Properties of Plant-Tissue-Based Food Suspensions." Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety **13**(3): 241-260.
- Monteith, J. L. (1965). "Evaporation and environment." Symp. Soc. Exp. Biol. **19**: 205 - 234.
- Patane, C., S. Tringali, et al. (2011). "Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions." Scientia Horticulturae **129**(4): 590-596.
- Santiago, J. S. J., Z. J. Kermani, et al. (2017). "The effect of high pressure homogenization and endogenous pectin-related enzymes on tomato puree consistency and serum pectin structure." Innovative Food Science & Emerging Technologies **43**: 35-44.
- Thakur, B. R., R. K. Singh, et al. (1996). "Quality attributes of processed tomato products: A review." Food Reviews International **12**(3): 375-401.

3. Combined Effects of Irrigation Regime, Genotype, and Harvest Stage Determine Tomato Fruit Quality and Aptitude for Processing into Puree

Alexandre Arbex de Castro Vilas Boas¹, David Page², Robert Giovinnazzo³, Nadia Bertin¹ and Anne-Laure Fanciullino^{1*}

¹UR 1115 Plantes et Systèmes de cultures Horticoles, Institut National de la Recherche Agronomique, Centre PACA, Avignon, France

²UMR 408 Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale, INRA, Centre PACA, Université d'Avignon, Avignon, France

³Société Nationale Interprofessionnelle de la Tomate, Avignon, France

ABSTRACT : Industry tomatoes are produced under a range of climatic conditions and practices which significantly impact on main quality traits of harvested fruits. However, the quality of tomato intended for processing is currently addressed on delivery through color and Brix only, whereas other traits are overlooked. Very few works provided an integrated view of the management of tomato puree quality throughout the chain. To gain insights into pre- and post-harvest interactions, four genotypes, two water regimes, three maturity stages, and two processes were investigated. Field and glasshouse experiments were conducted near Avignon, France, from May to August 2016. Two irrigation regimes were applied: control plants were irrigated in order to match 100% of evapotranspiration (ETP); water deficit (WD) plants were irrigated as control plants until anthesis of the first flowers, then irrigation was reduced to 60 and 50% ETP in field, and glasshouse respectively. Fruits were collected at three stages during ripening. Their color, fresh weight, dry matter content, and metabolite contents were determined before processing. Pericarp cell size was evaluated in glasshouse only. Two laboratory-scaled processing methods were applied before structural and biochemical analyses of the purees. Results outlined interactive effects between crop and process management. WD hardly reduced yield, but increased dry matter content in the field, in contrast to the glasshouse. The puree viscosity strongly depended on the genotype and the maturity stage, but it was disconnected from fruit dry matter content or Brix. The process impact on puree viscosity strongly depended on water supply during fruit production. Moreover, the lycopene content of fresh fruit may influence puree viscosity. This work opens new perspectives for managing puree quality in the field showing that it was possible to reduce water supply without affecting yield and to improve puree quality.

Introduction

There is much interest in improving fruit and vegetable quality through sustainable means in order to meet future food needs and tackle environmental challenges. While about 800 million

people are undernourished globally (Welch and Graham, 1999; McGuire, 2015), up to one third of food is never consumed (FAO, 2011), especially fruits and vegetables, which are naturally rich in major phytonutrients. Food losses occur throughout the supply chain: during harvest, during post-harvest handling and storage, during processing and at distribution and consumer levels. Therefore, processing fruits and vegetables represent a strategic approach to meet nutritional needs of the growing population, considering their availability all along the year, and provided that organoleptic and nutritional properties are preserved during processes. Processing tomato is a major crop that represents the principal source of important phytonutrients such as β -carotene and lycopene (Dorais et al., 2008). The most part is consumed as tomato puree, paste, or sauce (Mirondo and Barringer, 2015).

In addition, a major environmental concern in agriculture is the use of fresh water for irrigation (Postel et al., 1996). Water resources are under threat due to the increase in water demand for agriculture, and the gap between water availability and demand is exacerbated by global climate changes (Afzal et al., 2016). Processing tomato, an intensive production in terms of water use, is highly concerned with this issue (Rinaldi et al., 2007). For example, in Italy, the blue water footprint (ratio of the volume of irrigation to the crop yield) of this production has been estimated at 60 m³ per ton (Aldaya and Hoekstra, 2010). In line with this, considerable efforts have been made for increasing water use efficiency of tomato crop (Stikic et al., 2003; Costa et al., 2007; Rinaldi et al., 2007; Patanè and Cosentino, 2010; Patanè et al., 2016). These works underlined that water deficit (WD) is one of the main limiting factors affecting the yield of processing tomato (Costa et al., 2007; Patanè and Cosentino, 2010). The yield reduction depends on water deficit intensity and duration as well as on its timing during tomato development (Rinaldi et al., 2007; Patanè and Cosentino, 2010). WD reduces the weight of individual fruits more than the number of fruits per plant (Casa and Rouphael, 2014). Because mild WD decreases fruit water accumulation more than dry mass accumulation, the decrease in yield may in fact turn out positive for processing. Indeed, tomato process includes a phase of dehydration/concentration, and reducing water content of raw material makes the process more efficient. In addition, many other traits related to fruit quality (soluble solid content and titratable acidity) and to fruit nutritional value (vitamin C and carotenoids) are affected by WD depending on climatic conditions, cultivars, or fruit developmental stages (Garcia and Barrett, 2006; Patanè and Cosentino, 2010; Anthon et al., 2011; Patanè et al., 2011; Barbagallo et al., 2013). Several works have analyzed the effect of one specific pre-harvest factor on quality traits of both fresh fruits and processed purees.

According to Patanè and Cosentino (2010) WD decreased Bostwick consistency of purees. Large variations in paste quality traits (color, consistency, soluble solid content, pH and titratable acidity) were found among cultivars and among maturity stages (Garcia and Barrett, 2006). Delayed harvesting caused a rise in pH and a loss of citric acid (Anthon et al., 2011). Therefore, considering production management as a levy to monitor the quality of processed fruits may lead to innovative strategies to improve puree quality. High viscosity, fresh flavor and retention of natural color are important quality traits of ketchup and tomato puree (Chong et al., 2009). Interestingly, color shift during processes results from putative modifications of lycopene storage structures (more easily extractable) rather than from variations in lycopene content (Svelander et al., 2010; Page et al., 2012; Makroo et al., 2017). Concerning viscosity, dehydration during processing has a major influence. Relationships between dry matter content and viscosity on one hand, and between dry matter content and soluble solid content (SSC, in °Brix) on the other hand, are well-known from manufacturers since puree price is based on °Brix. However, SSC is not the only factor affecting rheology (Barrett et al., 1998). Processing parameters such as breaking temperature and dynamic sieving modify the water soluble/insoluble solid content ratio, particle sizes and pectin state, which, in turn, affect the puree rheology (Sanchez et al., 2002; Moelants et al., 2014). Those physicochemical variables depend on the biological structures of fruit tissues and their reactivity to the process. For example, breaking temperature is currently used to modulate the consistency of tomato products: a high temperature treatment, immediately after fruit crushing (hot break, HB: 90°C) produces much more viscous purees than cold break (CB) treatment, where fruits are first crushed and then macerated at moderate temperature (70°C; Moelants et al., 2014). The quality of tomato puree is built throughout the food chain. Yet, very few works have simultaneously analyzed factors affecting fruit quality during the growing season and those that operate during processing. Currently, in industry, the quality of processed fruits is assessed through the color and Brix index only, whereas other physical, structural and biochemical traits are overlooked. In order to better understand variations in puree quality, insights into pre- and post-harvest interactions should be gained. To fulfill this objective, we investigated major traits of fruit quality in response to water supply, genotypes and ripening stages, and we assessed their impact on puree quality obtained from HB and CB processes. The response to WD under different climatic conditions was assessed by conducting both field and glasshouse experiments.

Materials and Methods

Two experiments were conducted concurrently in spring and summer 2016, the first in the field according to commercial practices and the second in a glasshouse under controlled climatic conditions. In both experiments, four industry-type (determinate) cultivars of *Solanum lycopersicum*, namely “H1015,” “H1311,” “Miceno,” and “Terradou,” were selected on the basis of a previous study (not published), based on the contrasted purees obtained: from low (“Terradou”) to medium (“H1015” and “Miceno”), or high (“H1311”) lycopene content and from low (“Terradou”) to medium (“H1015” and “Miceno”) or high viscosity (“H1311”). Those four genotypes were studied under two levels of irrigation, control and water deficit (WD). All seeds were germinated under standard glasshouse conditions (25°C day, 15°C night) near Avignon, France, in April 2016.

Open-Field Experiment

Two blocks of 1,800 plants each (450 plants per cultivar) were designed in an experimental field near Avignon (43°54'N 4°52'E), France. Each block was 7 m wide and 90 m long and surrounded by border plants. The four genotypes and the two irrigation regimes were randomly distributed within the two blocks. All plants were grown under identical field conditions: 900 plants per genotype were transplanted in May 2016 at a density of 3.3 plants m⁻², fertilizers (86 kg.ha⁻¹ of N, 33 kg.ha⁻¹ of P, and 198 kg.ha⁻¹ of K) were supplied before transplanting and insects and diseases were controlled according to current practices. The water irrigation was supplied by a drip irrigation system. Irrigation was scheduled daily to compensate the evapotranspiration loss from tomato crop (ETP). ETP was determined daily using reference evapotranspiration estimated from the Penman–Monteith equation (Monteith, 1965) and taking into account crop coefficient (Kc) and precipitations. The variations of Kc during the season are given in Supplementary Figure 1. Daily variations in air temperature, rainfall and solar radiation are reported in Supplementary Figure 2.

Water was first supplied every day in order to fully fit 100% of ETP. Forty-five days after sowing, two levels of irrigation were applied: (1) water deficit (60% replacement of ETP) and (2) well-watered to match 100% replacement of ETP (Supplementary Figure 3). To mimic current production practices, irrigation was stopped 1 week before harvest. The soil water potential was recorded hourly using Watermark (Campbell Scientific, Antony, France) soil moisture sensors (six per water regime), which were installed at 25 and 50 cm depths. The records showed reduced soil humidity at 25 cm depth when compared to the control

(Figure 1). Control plants experienced higher soil water potentials than plants under WD at 25 cm depth (Figure 1A). Under well-watered condition, 50% of the data (between the upper and the lower quartile) ranged from -38 to -13 kPa, while under WD 50% of the data ranged from -57 to -27 kPa. At 50 cm depth, soil water potentials remained similar between the two irrigation treatments (Figure 1B). Three independent samples of 15 fruits from each treatment, genotype, and block were harvested at 40 (light orange), 47 (orange red), and 55 (red ripe) days after anthesis (DAA) for quality analyses and processing.

Glasshouse Experiment

Eighteen plants per genotype were grown in 4 L pots filled with compost (substrate 460, Klasmann, Champety, France) at a density of 1.8 plant.m^{-2} under glasshouse conditions near Avignon ($43^{\circ}54'N$ $4^{\circ}52'E$), France. Day-night temperature controls were set at $25-15^{\circ}C$ and the air humidity ranged between 30 and 95%. Solar radiation inside the glasshouse varied from 7.3 to $26.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (Supplementary Figure 4). Flowers were pollinated three times a week using an electrical bee. Plants were supplied daily with a nutrient solution (Liquoplant Rose, Plantin, Courthézon, France). This solution was diluted between 4‰ (NO -3 , 1.7 mM; NH $+4$, 1.3 mM; P $_2$ O $_5$, 0.5 mM; K $_2$ O, 2.2 mM; MgO, 0.9 mM, and FeEDTA, 15 μ M) and 8‰ (NO -3 , 3.4 mM; NH $+4$, 2.6 mM; P $_2$ O $_5$, 1 mM; K $_2$ O, 4.4 mM; MgO, 1.8 mM, and FeEDTA, 30 μ M) according to the plant developmental stage, which corresponded to an average electro conductivity of 1.8 dS m^{-1} . First, all plants were irrigated in order to match 100% replacement of ETP. ETP was determined daily using reference evapotranspiration estimated from the Penman–Monteith equation (Monteith, 1965) and taking into account Kc. Soil relative humidity and drainage were maintained around 70% (maximum water retention capacity of the substrate) and 15%, respectively. After 30 days (corresponding to the anthesis of the first flowers), a water deficit treatment was applied to half of the plants. The irrigation was reduced to 50% of ETP for plants under WD, while maintained at 100% of ETP for control plants from 30 to 120 days after planting (until end of fruit ripening; Supplementary Figure 3). The drip irrigation system was scheduled to irrigate every 0.25 mm. Soil relative humidity was measured weekly between 9 and 10 a.m. (solar time) in all pots using water content sensors (WCM-control, Grodan, Roermond, The Netherlands). Figures 1C–F shows changes in soil relative humidity during the treatment. A 25–60% reduction in soil relative humidity was monitored in all pots following WD treatment (gray lines). The electro-conductivity of both limited-water and well-watered pots ranged between 1 and 2 dS m^{-1} until 90 days after planting and between 2 and 3 thereafter. For fruit quality analyses and processing, four

independent samples of 15 fruits were harvested from 9 plants at three stages: 40, 47, and 55 DAA.

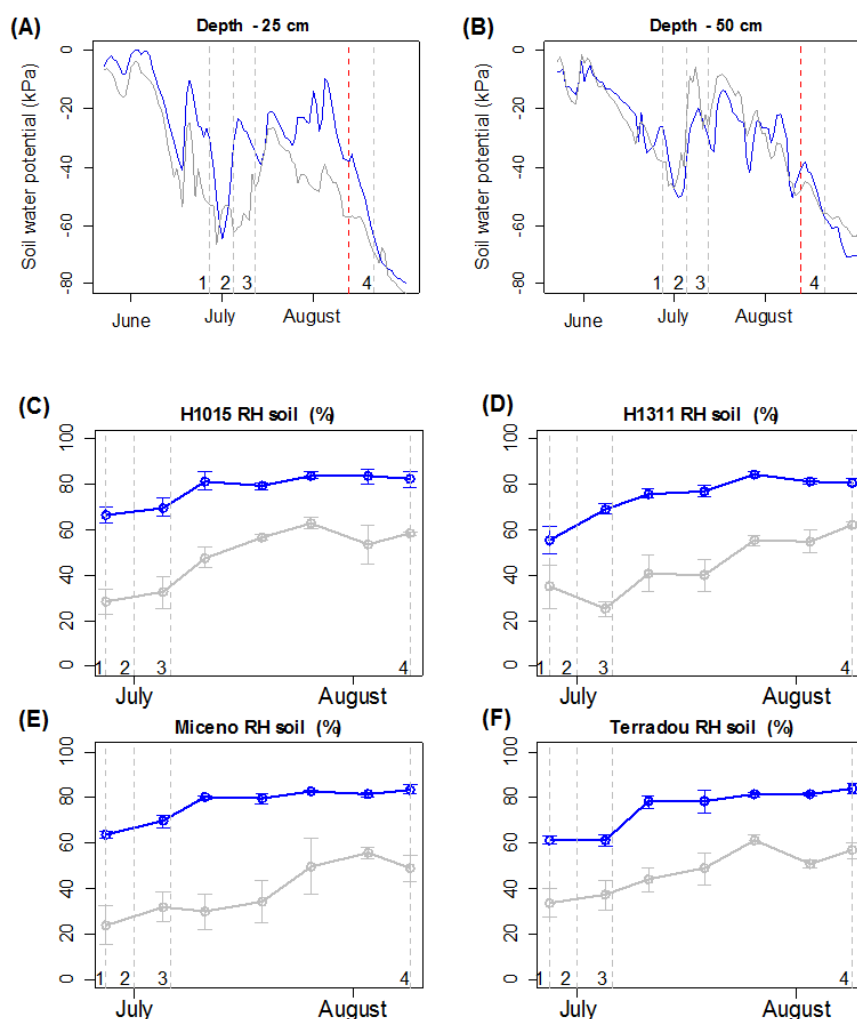


Figure 1. Variations in soil humidity under field (A,B) and glasshouse (C–F) conditions. (A,B) Soil water potentials determined with 6 Watermark sensors installed at 25 (A) and 50 (B) cm depths under the well-watered regime (blue lines) and the water deficit regime (gray lines). (C–F) soil relative humidity (RH) determined weekly in 9 pots for the 4 cultivars (“H1015,” “H1311,” “Miceno,” and “Terradou”) and the 2 water regimes: well-watered (blue lines) and water deficit (gray lines). Note that a RH of 80% corresponds to the maximum of soil water retention. Mean values are reported $\pm$ SE. On (A–F), vertical gray lines with number 1, 2, 3, and 4 indicate anthesis of the first, second, third truss, and the harvest of those trusses respectively. The vertical red line on (A,B) indicates the end of irrigation.

Plant and Fresh Fruit Physiological Measurements

During the WD treatment, from June to August 2016, leaf and stem water potentials, leaf conductance and fruit growth were monitored on control and WD plants. Measurements of leaf conductance were conducted between 9 and 10 a.m. (solar time) using an AP4 porometer

(Delta-T Devices Ltd, Cambridge, England), while measurements of water potentials were performed between 12 and 13 p.m. (solar time) using a pressure chamber (Scholander et al., 1965). Every week, 12 newly mature leaves from six individuals were marked for each treatment, genotype, and block. Half of the marked leaves were used for leaf conductance (g_s) and midday leaf water potential ($\psi_{Lmidday}$) measurements, while six other leaves were covered with aluminum foil and plastic bags to allow leaf and stem water potentials to equilibrate at least 2 h before stem water potential measurements ($\psi_{Smidday}$). At least three mature leaves from three individuals per treatment, per genotype, and per block were sampled at the end of the experiment for specific leaf area (SLA) determination.

Fruit growth was measured weekly with a digital caliper between 9 and 10 a.m. (solar time). Three fruits from three different trusses were monitored on three plants per treatment, per genotype, and per block. Flowers were labeled at anthesis at three different dates, so that fruits at three stages around maturity (light orange, orange red, and red ripe) could be collected on the same day in August. Consequently, all harvested fruits underwent similar environmental conditions from anthesis to harvest (Figure 1).

At the end of the experiment in August, at least four plants per treatment, per genotype, and per block were collected for fresh and dry yield determination.

Fresh Fruit Quality

Fruit color, dry matter, starch, soluble sugar, organic acid, and carotenoid contents were analyzed in both experiments. The color was measured with a Minolta CR.400 calibrated with a standard background. At least three fruits from the three or four samples were tested three times at equidistant points along the equatorial plane. The dry matter content was determined by weighting 3 g of fruit pericarp pieces before and after drying at 85°C. For biochemical analyses, pieces of fruit pericarp were immediately frozen and kept at -80°C. Soluble sugars, starch and organic acids were extracted according to the method described by Gomez et al. (2002) and analyzed by HPLC (Waters 410, Part WAT070390, Milford, U.S.A.). Carotenoids were extracted according to the method described by Sérino et al. (2009) modified by Page et al. (2012) for quantification against internal standard (apo_8'carotenal) after HPLC separation on a C30-column (Develosil® C30-UG-3, Nomura chemical CO., Seto, Japan) with a UV-visible detector (SPD-M20A; Shimadzu, Kyoto, Japan). The pericarp cell number was measured after tissue dissociation according to a method adapted from Bünger-Kibler and

Bangerth (1983). Cells were counted using a microscope equipped with a camera (QImaging, Surrey, Canada) and Qcapture Pro 6.0 software (QImaging, Surrey, Canada; Bertin et al., 2002).

Tomato Processing and Quality

Purees were prepared by either hot break (HB) or cold break (CB) treatment according to a laboratory scaled method described by Page et al. (2012). Fruits were cut into large pieces (around 2 cm³), mixed altogether, and split into two identical batches of 400 g each. For HB, one batch was first heated until boiling temperature in a microwave oven (900 w, full power, 0.9 s g⁻¹ of tomato), then chopped for 30 s in a Waring® blender. For CB, the other batch was first chopped at room temperature for 30 s in the same Waring® blender and then heated for the same duration and conditions than for HB. Both purees were then passed through a hand-held potato masher with a 2 mm grid to remove skins and seeds, stored into a 500 ml glass jar with sealed lid, sterilized for 15 min at 100°C in a laboratory scaled autoclave, and stored at 4°C before analysis. The grinding step at room temperature in CB process allowed for the reaction of fruit intrinsic enzymes (especially polygalacturonase and pectin-methyl esterase) on cell walls, and therefore leads to lower consistency of purees compared to HB ones (Anthon et al., 2002). Consequently, the enzymatic potential of fruits was indirectly estimated as the difference in puree consistency between HB and CB processes, in our standardized conditions. The color of the purees was measured with a Minolta CR.400 using a specific cuvette for measurement of liquid or paste color and calibrated against a white background. Color results were expressed in the CIE L * a * b * color space. Color coordinates were used to calculate the hue angle (H°), which identifies the color at a 360° angle (McGuire, 1992). The dry matter content was determined by weighting around 3 g of fruit puree before and after drying for 3 days at 85°C. The soluble solid content (SSC) was measured by refractometry with an ATAGO PR-1000 digital refractometer with automatic temperature compensation at 25°C and results were expressed in degree Brix, according to AOAC (2002). Rheological behavior of the puree was assessed through two characteristic measurements: (1) consistency was measured using a Bostwick consistometer (CSC Scientific Company, Fairfax, USA) and according to manufacturer's manual, results were expressed as arbitrary Bostwick unit (Bw). The lower the Bostwick value, the higher the puree consistency; (2) the viscosity was calculated from a steady state measurement performed on an Anton Paar MCR 301 viscosimeter (Graz, Austria), with a double ribbon impeller (with an inner radius of 11 mm, a pitch of 45 mm, a length of 45 mm, and an outer stationary cup with an outer radius of

14.46 mm). A flow curve was registered between 0.1 and 100 s⁻¹, 50 points and 5 s per point. Flow properties were described by the Herschel–Bulkley model (Espinosa et al., 2011).

Data Analysis

Data were analyzed using R statistical software (<http://www.R-project.org>). Physiological traits, data of yield, and quality traits were analyzed by analysis of variance (the agricolae R package and aov function; De Mendiburu, 2014). Heteroscedasticity and normality tests were performed before model evaluation. Regarding field experiment, when the ANOVA F-test showed no significant difference in means between the blocks, data from block 1 and 2 were pooled. Tables 1, 2 synthesize results from univariate ANOVAs. Multiple comparison of means was performed using the Least Significant Differences (LSD) test ($\alpha = 0.05$). When heteroscedasticity was detected, we used the Kruskal–Wallis non-parametric test followed by multiple comparisons of means through a t-student test on the ranks ($\alpha = 0.05$).

The Factomine R package and the plot PCA function were used to perform PCA analysis. Data from field were composed of 15 variables of fruit and puree quality and 48 observations (4 cultivars $\times$ 3 stages $\times$ 2 blocks $\times$ 2 irrigation levels). Data (means of 3 biological replicates) were centered and scaled by variables. Data from glasshouse are presented in Supplementary Figure 5. Eigen values and contribution of variables to each dimension are reported in Supplementary Tables 1, 2 for field and glasshouse, respectively.

Pearson correlation was performed to investigate links between fresh fruit and puree quality traits. The corplot package was used to draw the correlation matrix of the quality traits (Wei et al., 2016). The GGMselect, GeneNet, and igraph packages (Schaefer et al., 2013; Csardi and Nepusz, 2014; Bouvier et al., 2016) were used to build a partial correlation network on fruit and puree quality traits based on the residues of the linear regressions (elimination of the genotype and treatment effects). Correlation matrix and partial correlation network were performed independently for field and glasshouse experiments.

Results

Yield and Fruit Composition Were Not Much Affected by Water Deficit, Despite Significant Plant Responses

Univariate ANOVAs were performed on plant traits to analyze the effects of WD, genotype and WD $\times$ genotype interactions in the field and glasshouse experiment, separately

(Table 1). In field, no block effect was found. This factor was omitted in Table 1. None of the WD $\times$ genotype interactions were significant, except for individual leaf dry weight measured in field (Table 1). During the decline in soil humidity in the WD treatment, physiological traits were highly affected by WD ($p \leq 0.001$). A 50% reduction in stomatal conductance (g_s) was observed for all cultivars in both open-field and glasshouse experiments (not shown). Accordingly, significant reductions in individual leaf area (from -22 to -40% according to the genotype) and individual leaf dry weight (from -14 to -39%) were observed under WD treatment in field. These reductions did not result in significant changes in specific leaf area (Table 1).

In glasshouse, all cultivars experienced variations in water status. Differences of midday leaf and stem water potentials ($\psi_{Lmidday}$ and $\psi_{Smidday}$) between control and WD plants were significant ($p \leq 0.001$). The highest variations were registered for $\psi_{Lmidday}$, which ranged from -0.7 to -0.5 MPa for control plants and from -1.0 to -0.6 MPa for WD plants. In the glasshouse, the total plant fresh biomass was reduced under WD treatment (up to -44% for “Miceno”).

Interestingly, under field-grown conditions, WD did not impact the fresh yield, expressed as total fruit biomass per plant, and yield-related traits (number of fruits and individual fruit fresh weight; Table 1), but it slightly increased the dry yield (up to +27% for “H1015”). We further analyzed the interactions between genotype, irrigation t and growing condition (Figures 2, 3). Overall in field under well-watered conditions, all cultivars reached almost similar fresh yields (on average 2,636 g plant⁻¹ or 87 t ha⁻¹), but different dry yields (Figures 2A,C, blue bars). The dry yield was the highest for “Terradou” and the lowest for “H1015” (+46% comparing “Terradou” to “H1015”). Under WD, “Terradou” reached the highest fresh and dry yields (Figures 2A,C, gray bars).

The fruit dry matter content was higher under WD than under control condition, and the difference was significant for “H1015” and “Miceno” (+27% for “H1015” and +26% for “Miceno,” Figure 3E). Under glasshouse conditions, the fresh and dry yields were similar for all cultivars, except “Terradou” which outperformed under WD (Figures 2B,D). In the glasshouse, WD significantly decreased the fresh and dry yields of all cultivars (from -34 to -44% for fresh yield and from -25 to -47% for dry yield Figures 2B,D). This reduction resulted from a decrease in both the number of fruits per plant and the individual fruit fresh weight (Figures 3B,D). Under WD, the dry matter content of fruit pericarp did not

significantly change in glasshouse (Figure 3F). Comparing field and glasshouse experiments, fresh and dry yields of control plants were significantly higher in the glasshouse whatever the cultivar (up to +50% of fresh yield; Figures 2A,B). Overall, the mean fresh mass of individual fruit was lower in the glasshouse than in the field, but the number of fruits per plant was higher, especially under well-watered conditions (−22%, and +101%, respectively) (Figures 3A,C). On the other hand the fruit dry matter content was higher in the field than in the glasshouse, especially under WD (+22%; Figures 3E,F). The genotype effect was higher in field than in glasshouse (between 38 and 43% of the variance associated to genotype in field, Table 1).

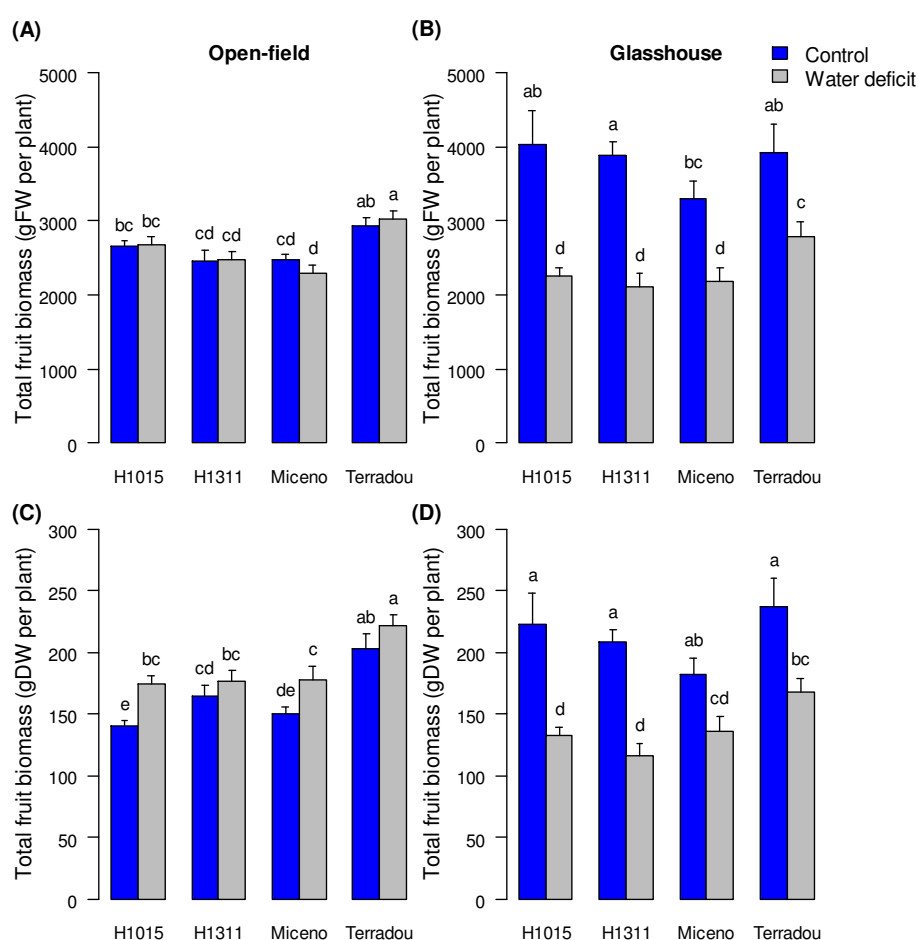


Figure 2. Impact of water deficit and cultivar on fresh (A,B) and dry (C,D) yield expressed as total fruit biomass (g) per plant under field (A,C) and glasshouse (B,D) conditions. Note that the color code is blue for well-watered plants and gray for plants under water deficit. Values are means of $n \geq 8 \pm \text{SE}$. Bars marked by different letters indicate significant different values (Kruskal–Wallis test, $\alpha = 0.05$).

In field, the low impact of WD on yield prompted us to calculate water use efficiency as the ratio between total fresh yield and total water used for irrigation (kg m^{-3}). In field, the water use efficiency ranged from 25 to 29 kg m^{-3} (depending on cultivars) for control plants and from 33 to 41 kg m^{-3} for WD plants. “Terradou” presented the highest values under both water treatments. In the glasshouse, the water use efficiency ranged from 32 to 39 and from 38 to 50 kg m^{-3} for control and WD plants, respectively. The highest value was reached by “H1015” under control, whereas “Terradou” showed the highest efficiency under WD.

Table 2 synthesizes the effects of WD, genotype and maturity stage on quality traits analyzed by univariate ANOVAs. Fruit composition in soluble sugars, organic acids, and carotenoids was determined on a dry weight basis. None of the tests involving WD (including interactions) was significant except for Lycopene and citric acid under glasshouse conditions (Table 2). Fruit composition was mainly controlled by the genotype (between 26 and 57% of the variance associated to genotype in field and between 23 and 64% in glasshouse).

Genotype and Maturity Stage Controlled Puree Quality While WD Improved Rheological Properties

Tomatoes from field and glasshouse experiment were processed through CB and HB methods and puree quality was assessed based on viscosity and color parameters. In all tests, genotype and maturity stage effects were significant. The genotype effect was higher than the maturity stage effect, except for the Hue angle and the viscosity of CB purees from field (Table 2). A highly significant genotype $\times$ stage interaction was found for the viscosity of HB purees (Table 2). We further analyzed the interactions between genotype, maturity stage and irrigation treatment in field, and their effects on puree rheological properties (Figure 4). Cultivar “H1311” produced the most viscous purees in all situations (Figure 4). With regard to the maturity stage impact, viscosity slightly declined or was stable when fruits were harvested between 40 and 47 DAA and then sharply increased for fruits harvested between 47 and 55 DAA (up to +100%, Figure 4C). Interestingly, WD led to significant higher puree viscosity and consistency (Figures 4A,B). Within the WD group, the viscosity of “H1311” purees was 22.3, 44.36, and 49.62% higher than the viscosity of purees from “Miceno,” “H1015,” and “Terradou,” respectively.

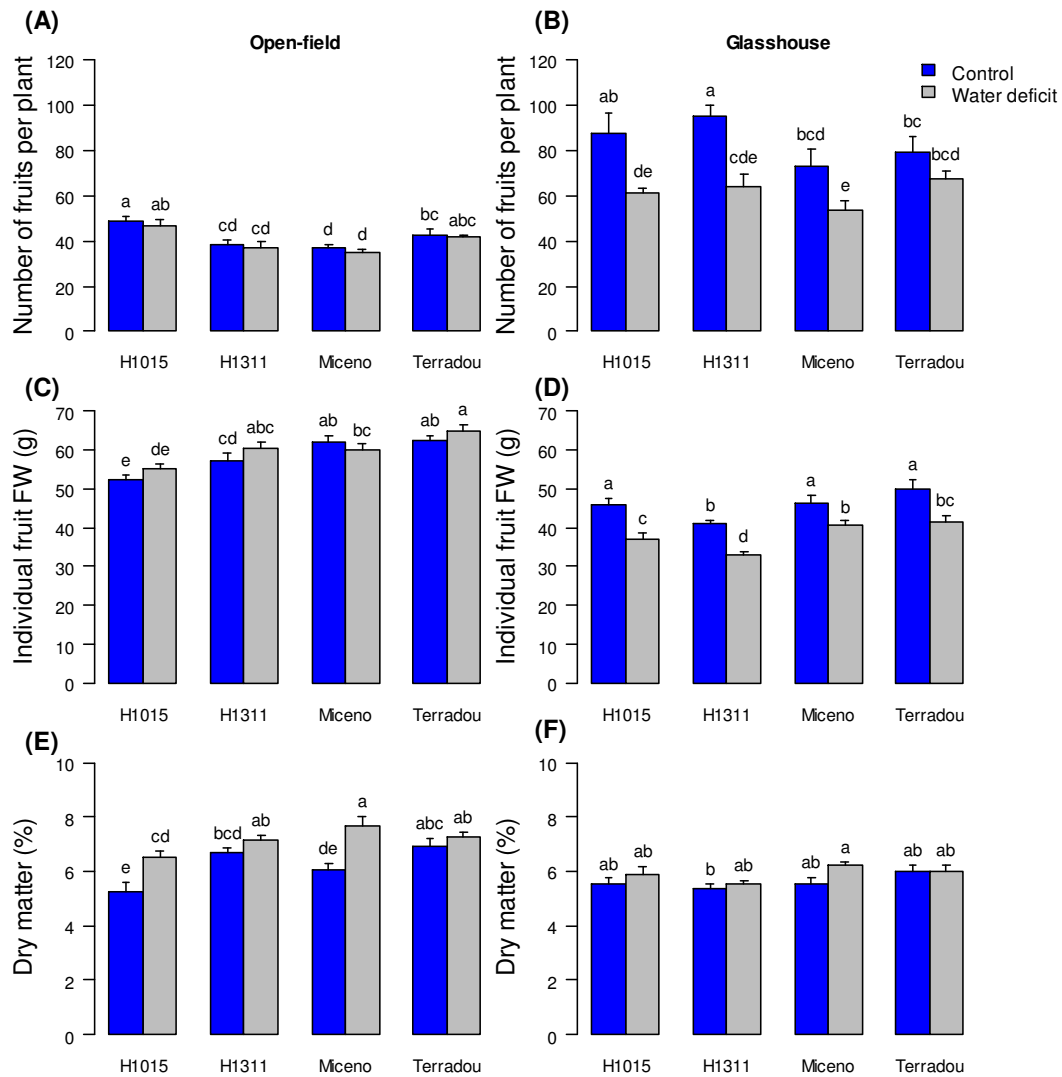


Figure 3. Changes in yield-related traits determined for the four cultivars under field (A,C,E) and glasshouse (B,D,F) conditions and under the two water regimes (control in blue and water deficit in gray): number of fruits per plant (A,B), individual fruit fresh weight (FW) (C,D) and dry matter content of fruit pericarp collected at 55 DAA (E,F). For (A–D), mean $\pm$ SE, $n \geq 8$. For (E,F), mean $\pm$ SE, $n \geq 4$. Bars marked by different letters indicate significant different values (Kruskal–Wallis test, $\alpha = 0.05$).

The ranking of genotypes was similar in the control group and consistent patterns of viscosity and Bw consistency were obtained. Another major finding of our study was that WD significantly influenced the fruit reactivity, assessed through the difference in consistency between HB and CB purees. For all genotypes, the reactivity was remarkably lower for purees produced from WD tomatoes than for purees from control tomatoes (Figure 4D). At 55 DAA, the losses in consistency ranged from -48% for “H1311” to -75% for “Terradou.”

The responses of puree viscosity to genotype, maturity stage and WD treatment were similar when fruits were produced under glasshouse conditions, but they differed in absolute values. Interestingly, purees from the glasshouse production were always less viscous when compared to the field production whatever the cultivar, the water regime or the maturity stage. The puree made from WD fruits produced in open-field showed 69.45% increase in viscosity and 21.67% decrease in Bw, while purees made from control fruits showed 68.46% increase in viscosity and 23.40% decrease in Bw, when compared to the glasshouse.

Regarding the color parameters under field-grown conditions, Hue angle values were significantly affected by genotype and maturity stage only. The hot break purees from “H1311” ripe fruits presented the lowest values (Figure 5), which was consistent with the lowest Hue angle of fresh fruits among cultivars. As expected, Hue angle values significantly varied according to the maturity stage.

The quality traits are plotted on the first two dimensions in (Figure 6A) while (Figures 6B–D) shows the projection of the observations and the centers of gravity for water treatments, genotypes, and maturity stages, respectively. Dim. 1 positively correlated with Hue HB, Hue CB, Hue fresh fruits, fructose, starch, and glucose and negatively correlated with lycopene, viscosity HB and viscosity CB (Figure 6A, and Supplementary Table 1). Fewer traits were well represented on Dim. 2: Brix HB, Brix CB, and Brix fresh fruits correlated with the positive values of Dim. 2 (Figure 6A, and Supplementary Table 1). The dry matter content of the pericarp was poorly represented on Dim. 1, 2, and 3. Citric and malic acids were poorly represented on Dim. 1 and 2, but contributed to Dim. 3 (Figure 6A, and Supplementary Table 1). The projection of individuals (Figures 6B–D) confirmed the effects of genotypes and maturity stages on fruit and puree quality (Figure 6). dimensions. Consequently, Pearson correlation correlations between fresh fruit and puree quality traits were analyzed further. Figure 7 summarizes data obtained under field (Figure 7A) and glasshouse (Figure 7B) conditions.

Factors	WD		Genotype		Interaction (WD × Genotype)		R ² (%)
	p-value	SSx/SStotal%	p-value	SSx/SStotal%	p-value	SSx/SStotal%	
FIELD							
Stomatal conductance g _s	<2e-16***	55.65	0.14	2.68	0.96	0.14	58.47
Individual leaf dry weight	6.82e-10***	50.79	0.00371**	12.27	0.04935*	6.62	69.68
Individual leaf area	<2e-16***	76.61	0.26302	1.69	0.40959	1.20	79.51
Specific leaf area	0.3428	1.62	0.0342*	16.75	0.1278	10.59	28.96
Total fruit biomass (g FW per plant)	0.865	0.03	5.19e-06***	38.03	0.608	2.01	40.07
Total fruit biomass (g DW per plant)	0.000315***	12.02	6.1e-08***	41.52	0.583241	1.60	55.14
Total fruits (number per plant)	0.298	1.15	1.41e-06***	40.97	0.987	0.14	42.27
Individual fruit fresh weight	0.174	1.88	5.15e-07***	42.75	0.368	3.20	47.83
GLASSHOUSE							
Leaf water potential ψ _L	<2e-16***	52.72	5.95e-07***	4.63	0.352	0.46	57.81
Stem water potential ψ _S	<2e-16***	28.79	0.00351**	3.08	0.39672	0.66	32.53
Stomatal conductance g _s	<2e-16***	33.88	0.0453*	1.72	0.822	0.19	35.79
Total plant biomass (g FW per plant)	0.000543***	16.27	0.371852	3.91	0.784159	1.31	21.49
Total plant biomass (g DW per plant)	0.441	0.83	0.126	8.19	0.573	2.77	11.79
Total fruit biomass (g FW per plant)	1.23e-10***	44.74	0.135	4.39	0.415	2.20	51.33
Total fruit biomass (g DW per plant)	3.2e-09***	38.01	0.0255*	8.01	0.4095	2.36	48.39
Total fruits (number per plant)	1.02e-06***	27.85	0.0447*	8.12	0.371	3.04	39.01
Individual fruit fresh weight	1.95e-09***	33.14	5.91e-06***	22.58	0.743	0.85	56.57
R ² (%) Proportion of total variance explained by the model. SS, Sum of squares; SSx/SStotal %, the proportion of the explained variance. Significance codes: 0 **** 0.001 *** 0.01 **							

Table 1. Results of univariate analyses of variance (ANOVAs) for the plant traits measured under field and glasshouse conditions.

Factors	WD		Genotype		Stage		Interaction (WD x Genotype)		Interaction (WD x Stage)		Interaction (Genotype x Stage)		Interaction (WD x Genotype x Stage)		R ²
	p-value	SSx/ SStotal %	p-value	SSx/ SStotal %	p-value	SSx/ SStotal %	p-value	SSx/ SStotal %	p-value	SSx/ SStotal %	p-value	SSx/ SStotal %	p-value	SSx/ SStotal %	
FIELD															
Brix Fresh Fruit	0.45581	0.15	0.45581	2.35	1.594e-07***	56.13	0.64208	1.48	0.57835	0.98	0.04545*	13.45	0.52889	4.56	79.10
Starch	0.1858229	1.50	0.0001169***	26.03	0.0003225***	18.55	0.2854716	3.25	0.5404158	1.02	0.0018167***	24.45	0.3486161	5.75	80.56
Glucose	0.612931	0.30	0.000515***	28.86	0.021832*	10.23	0.49786	2.78	0.256552	3.27	0.051573*	16.94	0.213701	10.37	72.75
Fructose	0.7798865	0.09	0.0004726***	29.67	0.0136013*	11.89	0.5626139	2.41	0.3868617	2.27	0.0687178*	15.81	0.2269084	10.22	72.38
Citric	0.6517	0.42	0.1284	12.59	0.3449	4.47	0.8127	1.91	0.8508	0.65	0.2421	17.32	0.3436	14.38	51.76
Malic	0.58157	0.73	0.03647*	21.10	0.21523	6.92	0.74182	2.65	0.9773	0.10	0.4821	11.98	0.8321	5.81	49.29
Hue Fresh Fruit	0.9673	0.00	0.7357	0.37	1.909e-14***	89.00	0.643	0.49	0.912	0.05	0.539	1.48	0.451	1.72	93.10
Lycopene	0.2719442	0.85	4.95e-08***	56.71	0.0009003***	12.79	0.9728094	0.15	0.9099104	0.13	0.0406639*	10.68	0.6972749	2.58	83.89
Brix CB	0.069902	1.50	2.737e-11***	74.70	0.001186**	7.52	0.478907	1.06	0.410176	0.77	0.262013	3.45	0.864551	1.03	90.92
Hue CB	0.8297	0.02	3.839e-07***	33.64	5.163e-09***	46.87	0.5709	1.03	0.9863	0.01	0.2021	4.68	0.7433	1.74	87.99
Viscosity CB	0.0283*	4.60	0.0512*	7.55	5.739e-06***	61.00	0.782	0.91	0.2575	2.42	0.8803	1.96	0.9506	1.31	79.75
Brix HB	0.12391	1.23	1.926e-10***	71.87	0.01765*	4.63	0.40413	1.47	0.12056	2.23	0.30448	3.70	0.3727	3.29	88.42
Hue HB	0.6248	0.12	1.425e-06***	28.44	7.613e-10***	56.24	0.61	0.91	0.8623	0.15	0.7356	1.74	0.9766	0.56	88.17
Viscosity HB	1.266e-06***	5.63	8.655e-15***	51.50	9.928e-13***	29.64	0.84965	0.11	0.02576	1.17	3.026e-05***	7.51	0.25536	1.15	96.71
GLASSHOUSE															
Brix Fresh Fruit	0.05954*	2.88	8.08e-05***	19.60	0.28507	2.01	0.31688	2.82	0.95269	0.08	0.56471	3.83	0.02538*	12.18	43.39
Starch	0.9717	0.00	0.5116	2.26	0.0183*	8.23	0.2386	4.20	0.2652	2.63	0.2636	7.65	0.5288	5.02	29.98
Glucose	0.14498	1.51	2.931e-07***	29.19	0.6562	0.59	0.52891	1.55	0.26001	1.91	0.07321*	8.46	0.11715	7.40	50.61
Fructose	0.06437*	1.87	1.246e-11***	42.14	0.57975	0.58	0.3772	1.66	0.16636	1.95	0.02459*	8.25	0.09310*	6.02	62.46
Citric	0.40156	0.36	1.639e-13***	49.78	0.23954	1.46	0.41953	1.43	0.02681*	3.81	0.1827	4.58	0.42107	3.05	64.47
Malic	0.421899	0.48	1.165e-05***	22.63	0.746217	0.44	0.228504	3.28	0.214946	2.33	0.74837	2.56	0.004073**	15.70	47.41
Hue Fresh Fruit	0.023877*	2.74	0.000181***	11.69	6.856e-12***	38.65	0.908774	0.28	0.249043	1.46	0.291466	3.86	0.237691	4.24	62.92
Lycopene	0.03946*	1.53	< 2e-16***	63.96	0.33174	0.78	0.21975	1.57	0.34003	0.76	0.07845*	4.14	0.36543	2.31	75.03
Brix HB	3.023e-05***	14.06	1.278e-05***	21.41	0.01586*	6.23	0.60554	1.31	0.869	0.20	0.71807	2.61	0.62031	3.14	48.97
Hue HB	0.0311284*	1.70	2.761e-12***	30.22	3.275e-12***	27.51	0.0007376***	6.66	0.4658811	0.54	0.0430425*	4.87	0.1988222	3.12	74.64
Viscosity HB	0.010617*	2.44	3.327e-13***	33.90	3.258e-12***	27.75	0.428888	1.00	0.720723	0.23	0.001505**	8.62	0.966472	0.48	74.43

R² (%) Proportion of total variance explained by the model. SS, Sum of squares; SSx/SStotal %, the proportion of the explained variance. Significance codes: 0 **** 0.001 *** 0.01 ** 0.05 *.

Table 2. Results of univariate analyses of variance (ANOVAs) for the quality traits measured under field and glasshouse conditions.

Significant correlations are indicated by a color code: red for negative significant correlation and blue for positive significant correlation. Of the 120 pairs of traits, there were 32 significant correlations ($P < 0.01$) under field conditions (vs. 18 significant correlations among 105 pairs of traits under glasshouse conditions). As expected, color of CB and HB purees, determined by Hue angle values, positively and negatively correlated with, respectively, Hue values and lycopene contents of fresh fruits (Figure 7A). Brix of CB and HB purees positively correlated with Brix of fresh fruits. Some correlations were also found among fruit traits, such as individual sugars, individual acids, and sugar-acid balance or among puree traits such as CB and HB viscosities. Surprisingly, no correlation was found between puree viscosity and fruit dry matter content, starch, or Brix. It was also interesting to note that viscosity of HB purees positively correlated with lycopene contents of fresh fruits. There was a concordance between field and glasshouse experiments.

However, the positive correlations between Hue angle of HB purees and Hue angle of fresh fruits or between Brix of purees and Brix of fresh fruits were not significant under glasshouse conditions (Figure 7B). On the other hand, a positive correlation was observed between the average pericarp cell size and the Hue angle of the puree.

A partial correlation network was built on fruit and puree quality traits, based on the residues of the linear regression (elimination of the genotype and treatment effects) to determine traits that were functionally related (Figures 8A,B). Partial correlation analysis was performed independently for the field (Figure 8A) and the glasshouse (Figure 8B) experiments. Correlations among fruit and puree quality traits were confirmed for color and Brix (Figure 8A). However, puree viscosity was not related to any trait of fruit quality (Figure 8A). Under glasshouse conditions, puree quality was unrelated to fresh fruit traits (Figure 8B).

Discussion

The quality of tomatoes intended for processing is currently addressed on delivery through color and Brix, whereas other traits are overlooked. In the field, irrigation is currently stopped 1 week before harvest in order to increase the fruit dry matter content. During processing, part of the water is removed and the matrix is submitted to thermal treatments in order to control more or less empirically the final puree viscosity. Yet very few works provided an integrated view of the management of tomato puree quality from field to can.

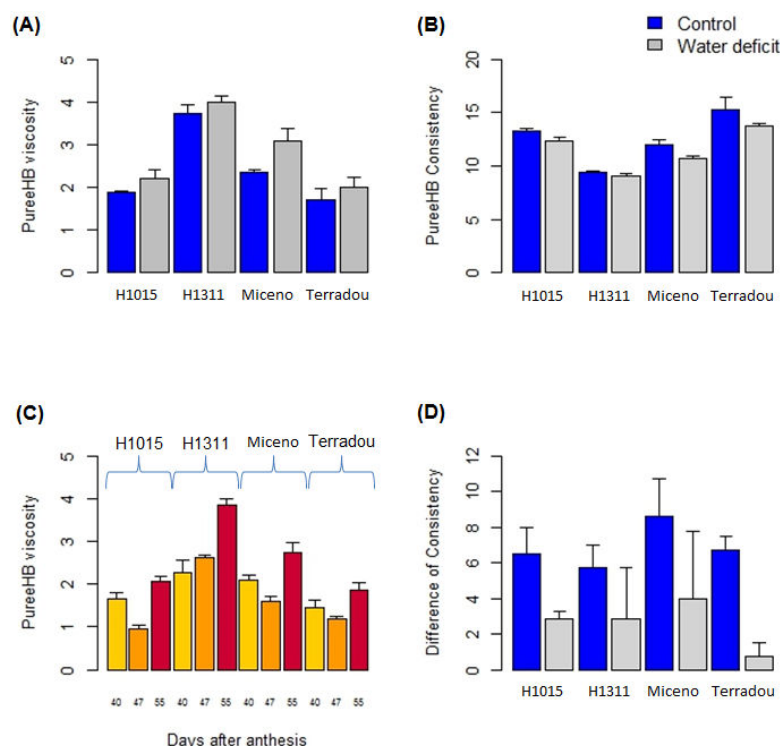


Figure 4. Impact of water deficit (A,B,D), genotype (A–D) and maturity stage (C) on the rheology of puree, under field-grown conditions. (A,B) Changes in Hot break puree viscosity and Bostwick value, all fruits were collected at 55 DAA. (C) Variations in Hot break puree viscosity obtained with fruit when fruits were collected [40, 47, and 55 days after anthesis] (C). (D) Difference of consistency (measured by Bostwick device) between Cold break and Hold break purees obtained from fruits collected at 55 DAA. Values are mean $\pm$ SE, $n \geq 2$.

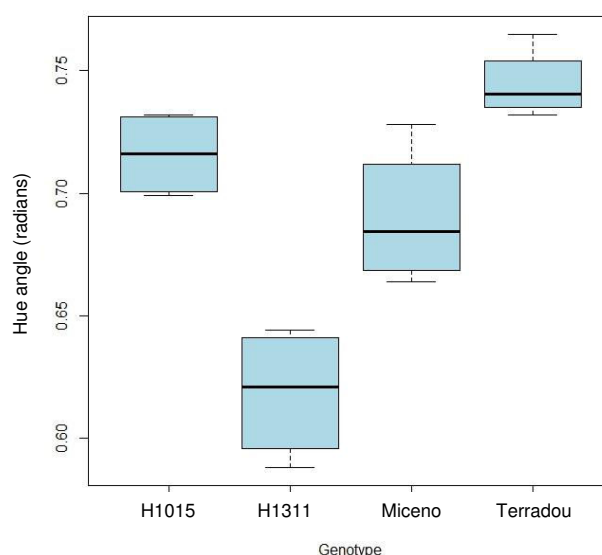


Figure 5. Impact of genotype on Hue angle calculated from color coordinates measured on Hot break puree obtained from fruits collected at 55 DAA and grown in open-field. Boxplots gather the values from fruits grown under the two water regimes since only genotype had a significant influence on color changes.

For this purpose insights into interactions between factors that drive fruit quality during the growing season and those that operate during processing should be gained. In this work we investigated fruit quality in response to water supply, genotypes and ripening stages, and we assessed their impact on puree quality obtained from HB and CB processes.

Moderate Effects of WD on Fruit Yield and Quality Are Observed in Glasshouse Conditions Only Irrespective of the Genotype

Water availability is one of the main factor impacting plant growth and consequently harvestable yield (Boyer, 1982; Tardieu et al., 2011; Katerji et al., 2013; Ripoll et al., 2014). For all genotypes, under glasshouse conditions, the effect of WD, as reflected by changes in water status and stomatal conductance, resulted in reductions in total plant biomass, fruit setting, and fruit fresh mass. The reduction of plant growth observed under WD is likely to originate from a sink, hydromechanical limitation rather than a source, photosynthetic limitation since growth is generally more affected by drought than carbon assimilation (Muller et al., 2011). Nonetheless, carbon supply could also represent a significant growth limitation in the fruit, where carbon-rich osmotica are required for sustaining expansive growth (Pantin et al., 2013). In addition, impairment of carbon supply may have been determinant for fruit set (D'Aoust et al., 1999). Under field conditions, WD reduced leaf area and total plant biomass, did not impact the total fresh yield, but slightly increased the total dry yield, and in average, increased the water use efficiency by 20% compared to control condition. The average total fresh yield obtained in this study corresponded to total yields commonly observed in France under well-watered conditions (80 t ha⁻¹, <http://www.sonito.fr>). Total fresh and dry yields were genotype-dependent. These results are in agreement with previous works on the effects of moderate deficit irrigation on processing tomato. According to Patanè et al. (2011) a deficit irrigation at 50% ET_c from flowering does not significantly reduce the total or marketable yields, but increases water use efficiency by about 40%. Similarly, Stikic et al. (2003) have shown that partial root drying (PRD) induces a significant reduction of total plant biomass without affecting fruit diameter and fresh mass. Accordingly, water use efficiency at crop level is increased by PRD treatment (Stikic et al., 2003). Under glasshouse conditions, the effect of WD on yield was higher than the effect measured in field. In addition, substantially higher yields were achieved in glasshouse than in field. It may result from lower plant density and temperatures in glasshouse (Poorter et al., 2016).

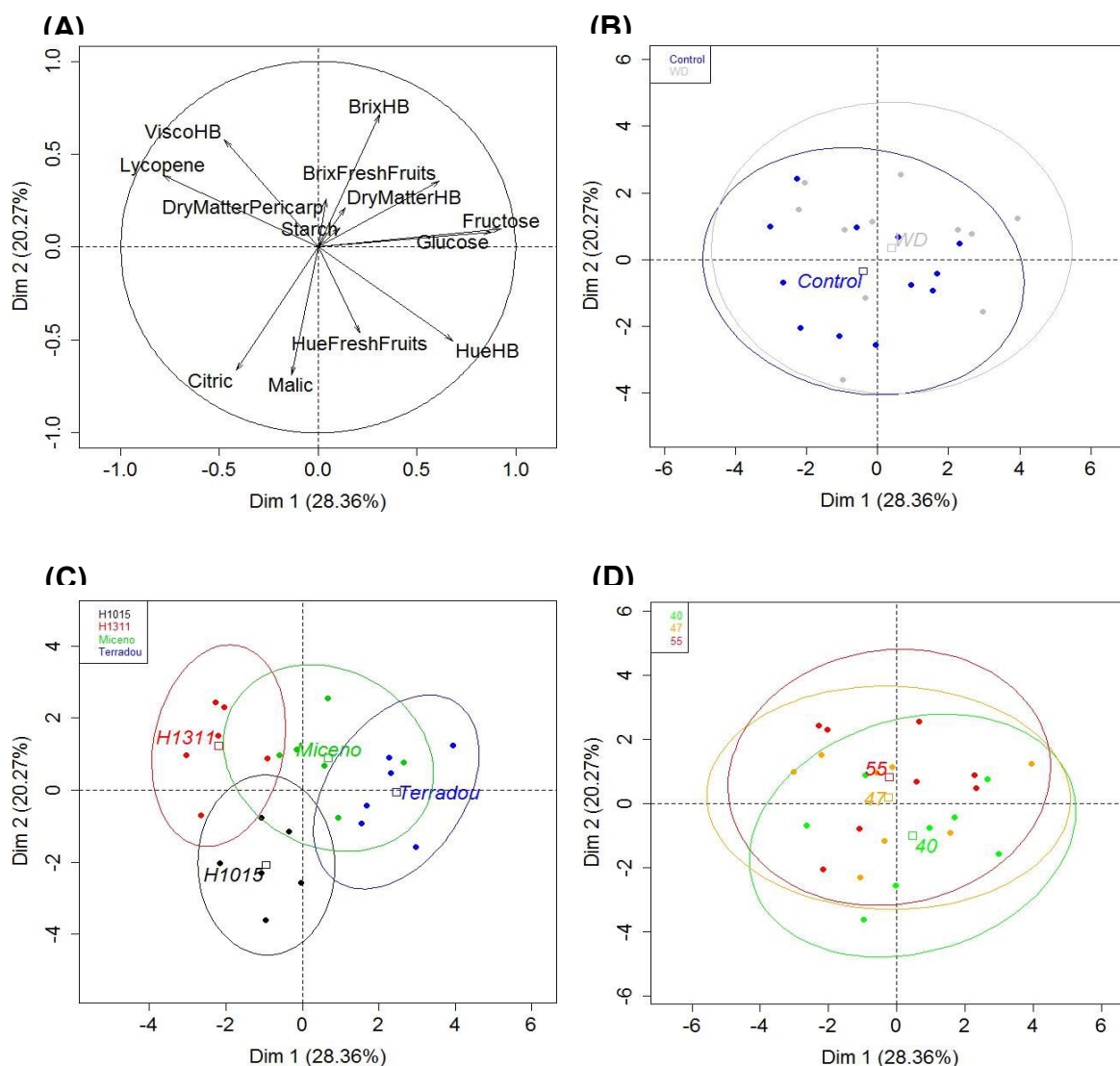


Figure 6. PCA results of fruit quality traits ($^{\circ}$ Brix of fresh fruits, dry matter content of pericarp, Hue angle of fresh fruits, starch, glucose, fructose, citric and malic acids, and lycopene determined on dry weight basis) and puree quality traits ($^{\circ}$ Brix, Hue angle, and viscosity of purees obtained after CB and HB processes) in field according to dimension 1 and 2 (53.88% of the total variance). The proportions of explained variability are indicated for each axis. **(A)** Projection of the quality traits taken into account; **(B–D)** Projection of individuals. Each point corresponds to the mean of three replicates. **(B)** Centers of gravity for water treatments, **(C)** Centers of gravity for genotypes, and **(D)** Centers of gravity for maturity stages.

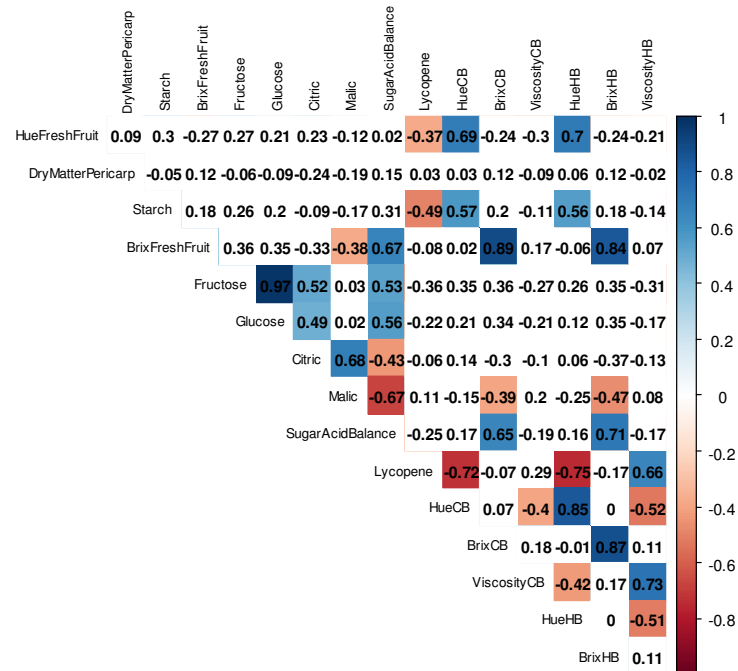
In glasshouse, inter-cultivar variations in total yields were observed under WD only. This suggests that the ranking of genotypes resulted from differential adaptation to WD in glasshouse and to abiotic factors other than WD in field (density or temperature).

In contrast to the negative effect on plant growth and fruit fresh mass, moderate water deficit has been reported to improve fruit quality of tomato (Pernice et al., 2010; Patanè et al., 2011; Barbagallo et al., 2013; Ripoll et al., 2016). The increase in fruit dry matter content in response to WD is well-known (Ripoll et al., 2014). However, whatever the genotype, we did not observe any change in sugar, acid, and lycopene contents, expressed on a dry weight basis, in response to WD. Ripoll et al. (2016) have already underlined that beneficial effects of moderate WD on fruit sugar, acid and carotenoid contents, reported on a fresh weight basis, mainly results from a dehydration effect, which is confirmed by our study. In addition, effects of WD on fruit dry matter composition strongly depend on genotype and stress intensity (Ripoll et al., 2016). In our study, the ranking of genotype in terms of fruit composition was not modified by the WD applied from flowering to harvest.

Water Deficit Improves Puree Rheological Properties

Consistency constitutes one of the main quality traits of tomato purees, which are considered as suspensions of insoluble particles (pulp) into an aqueous solution (serum) (Moelants et al., 2014). In tomato, fruit dry matter encompasses soluble (mainly sugars and acids) and insoluble (such as pectins and other polysaccharides) solids (Foolad, 2007). Insoluble solids are thought to determine puree viscosity (Davies et al., 1981). However, the precise role of the physicochemical properties of these solids remains unrevealed. Pectin composition and degradation were stressed out as major parameters, while some authors put solid particle size and shape on first stage (Sanchez et al., 2002; Lin H. et al., 2005; Moelants et al., 2014). All those parameters are regulated during fruit maturation and genetic control (Sanchez et al., 2002 Foolad, 2007; Anthon et al., 2011). Our results are in agreement since cultivar and maturity stage had major impacts on puree viscosity (Figure 5). Interestingly, the WD applied in our experiment improved puree viscosity of all cultivars, despite no change in fruit composition (on a dry weight basis) and no correlation between fruit dry matter content and puree viscosity. We propose that the effect of WD on puree rheology was driven by changes in pectin composition, and by changes in particle size and shape. Indeed, transcriptome analysis have revealed that plant response to drought includes differential cell wall synthesis and remodeling (Tenhaken, 2014).

(A)



(B)

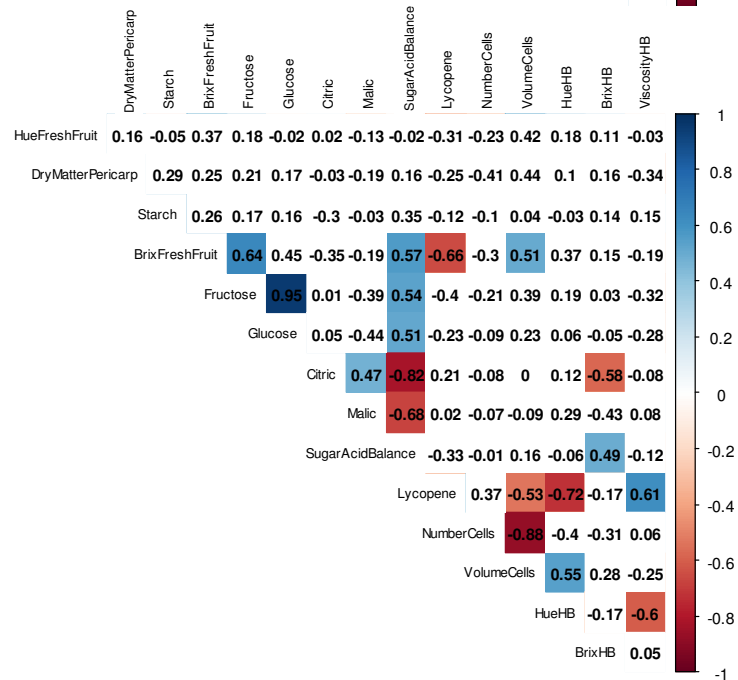


Figure 7. Correlation matrix of quality traits measured on fruit [Hue angle of fresh fruit, dry matter content of the pericarp, Brix, starch, fructose, glucose, citric, malic, and lycopene contents expressed on the dry weight basis, number and volume of cells of the pericarp] and on puree [Hue angle from cold break (CB) or hot break (HB) process, Brix CB or HB, and viscosity CB or HB] under field (A) and glasshouse (B) conditions. A color was associated to Pearson correlation coefficients from red (negative correlation) to blue (positive correlation) when correlations were significant ($P < 0.001$).

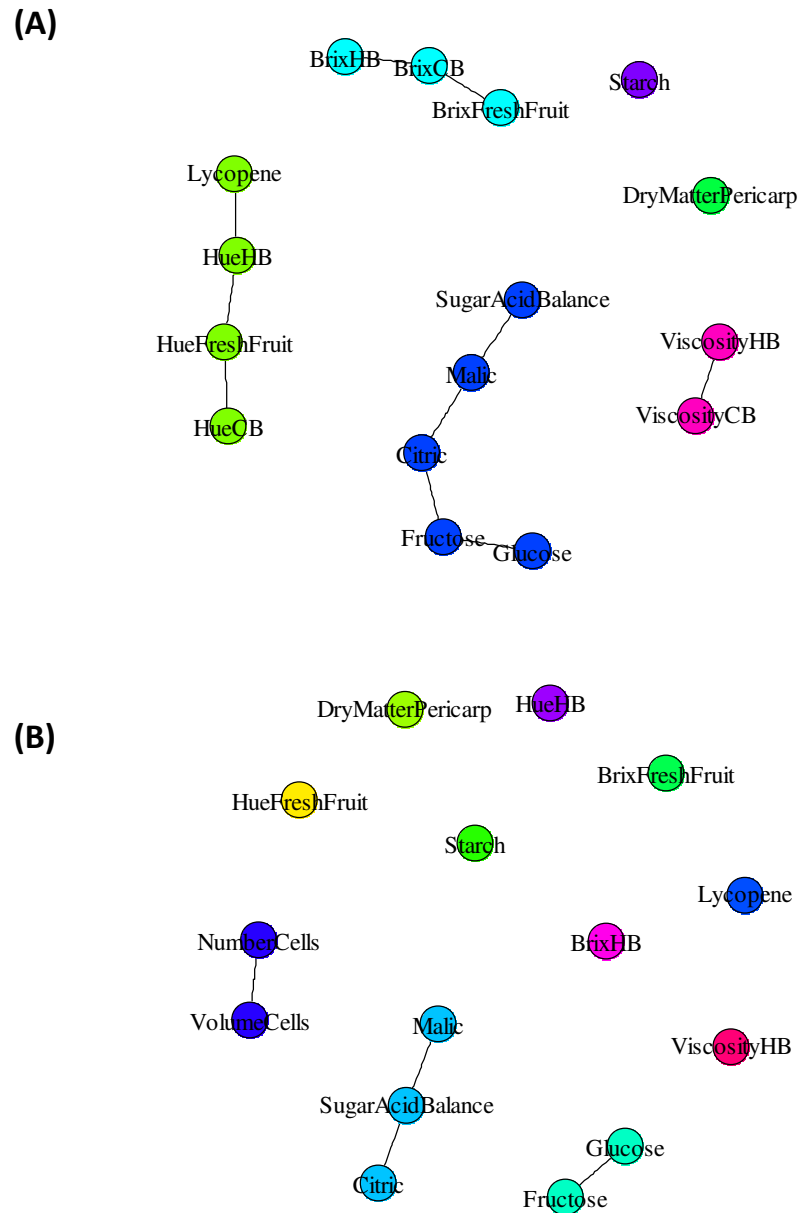


Figure 8. Partial correlation network for fruit quality and puree quality under field **(A)** or glasshouse **(B)** conditions. Lines indicate correlations between variables ($P < 0.001$).

In addition, we found that WD decreased the loss of viscosity between HB and CB purees which suggests that the activity of pectin-degrading enzymes in fruits, produced under WD, was modified. The difference in rheology after HB and CB treatments is attributed to temperature effects on endogenous pectinolytic enzymes, namely polygalacturonase (PG) and pectin methyl-esterase (PME) involved in fruit softening (Anthon et al., 2002; Moelants et al., 2014). The involvement of these enzymes has been confirmed by HB/CB processing of genetically modified tomatoes (Errington et al., 1998), but the exact relationship between PG, PME and rheology remained partially obscure. Indeed CB treatment leads to different biochemical and physical properties of water soluble pectins when compared to HB (Lin H. et al., 2005; Lin H. J. et al., 2005). The proportion of water insoluble solids is not significantly different between CB and HB purees (Sanchez et al., 2002), but particle size and shape are also impacted by the breaking temperature (Errington et al., 1998). It has been shown in other plant species, that pectin-degrading enzymes can be down-regulated by water stress (Le Gall et al., 2015). Thus, the activity of pectin-degrading enzymes in response to WD should be analyzed in further details to disentangle the effect of pectinolytic enzymes from the effect of particles.

Fruit Lycopene Content Rather Than Dry Matter Content Controls Puree Quality

Lycopene is the main pigment of red tomato cultivars (Fraser et al., 1994). It is well-established that color parameters measured with a chromameter provide a robust evaluation of lycopene contents determined by HPLC (Arias et al., 2000). So the strong correlations between fruit lycopene, fruit color parameters, and puree color parameters were not surprising. On the contrary the correlation between lycopene content of fresh fruits and puree viscosity is new.

Several studies reported relations between puree viscosity and fruit dry matter or soluble solid contents (Davies et al., 1981). However, such correlation was not observed in our study. Moelants et al. (2014) have reviewed relationships between food structure and rheological properties of plant-tissue-based food suspensions. Besides the importance of particle concentration already mentioned, particle size and particle morphology also appear to be key structural parameters controlling the rheological properties (Moelants et al., 2014), and especially, particle size distribution (Leverrier et al., 2016). Lycopene is known to be included in membrane-shaped structures of chromoplasts (Egea et al., 2010). The correlation between lycopene content of fresh fruit and the puree viscosity prompts us to suggest that lycopene

content improves puree rheological properties by enhancing the proportion of small particles of lycopene.

Our study demonstrated that challenging tomato producers to reduce water withdrawal could be eased by a better integration of the manufacturing requirements. Previous studies indicated that tomato fruit growth and quality were weakly impacted by moderate WD in glasshouse production, and our study confirmed that this result could be transposed in field production. A reduction of water supply from 100 to 60% of the ETP, increased the water use efficiency by 20% on average and may enhance the dry yield depending on genotype. This result holds out some progress margin for the industry that spends most of its energy in water removal from raw material. We also found that WD modified the reactivity of tomato fruits to process. As a whole, the strong impact of genotype on puree's viscosity and the lack of correlation between puree viscosity and fruit soluble solid content or dry matter content, open interesting perspectives to better understand the links between crop and process management. Yield or fruit dry matter content matter a lot, but yet the condition of fruit production and their ability to produce high quality and stable industrial products should be considered as well.

Supplementary data

Annexe 1

Author Contributions

DP, NB, and AF: Planned and designed the research. AA, DP, RG, and AF: Performed experiments. AA, DP, NB, and AF: Analyzed the data and wrote the manuscript.

Funding

AA was supported by a grant from CAPES and from the Brazilian Ministry of Education. This work was also supported by the Société Nationale Interprofessionnelle de la Tomate (SONITO) and the Structure Fédérative de Recherche Tersys.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Acknowledgements

We thank Marielle Bogé, Béatrice Brunel, Julie Duboue, Caroline Garcia, Guillaume Garcia, Patrice Reiling, and Sylvie Sérino for their technical assistance.

REFERENCES

- Afzal, M., Battilani, A., Solimando, D., and Ragab, R. (2016). Improving water resources management using different irrigation strategies and water qualities: field and modelling study. *Agric. Water Manage.* 176, 40–54. doi: 10.1016/j.agwat.2016.05.005
- Aldaya, M. M., and Hoekstra, A. Y. (2010). The water needed for Italians to eat pasta and pizza. *Agric. Syst.* 103, 351–360. doi: 10.1016/j.agry.2010.03.004
- Anthon, G. E., LeStrange, M., and Barrett, D. M. (2011). Changes in pH, acids, sugars and other quality parameters during extended vine holding of ripe processing tomatoes. *J. Sci. Food Agric.* 91, 1175–1181. doi: 10.1002/jsfa.4312
- Anthon, G. E., Sekine, Y., Watanabe, N., and Barrett, D. M. (2002). Thermal inactivation of pectin methylesterase, polygalacturonase, and peroxidase in tomato juice. *J. Agric. Food Chem.* 50, 6153–6159. doi: 10.1021/jf020462r
- AOAC (2002). *Official Methods of Analysis of AOAC International, 17th Edn.* Gaithersburg, MD: AOAC International.
- Arias, R., Lee, T. C., Logendra, L., and Janes, H. (2000). Correlation of lycopene measured by HPLC with the L*, a*, b* color readings of a hydroponic tomato and the relationship of maturity with color and lycopene content. *J. Agric. Food Chem.* 48, 1697–1702. doi: 10.1021/jf990974e
- Barbagallo, R. N., Di Silvestro, I., and Patanè, C. (2013). Yield, physicochemical traits, antioxidant pattern, polyphenol oxidase activity and total visual quality of field-grown processing tomato cv. Brigade as affected by water stress in Mediterranean climate. *J. Sci. Food Agric.* 93, 1449–1457. doi: 10.1002/jsfa.5913
- Barrett, D. M., Garcia, E., and Wayne, J. E. (1998). Textural modification of processing tomatoes. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 38, 173–258. doi: 10.1080/10408699891274192
- Bertin, N., Gautier, H., and Roche, C. (2002). Number of cells in tomato fruit depending on fruit position and source-sink balance during plant development. *Plant Growth Regul.* 36, 105–112. doi: 10.1023/A:1015075821976
- Bouvier, A., Giraud, C., Huet, S., and Bouvier, M. A. (2016). *Package ‘GGMselect’*.
- Boyer, J. S. (1982). Plant productivity and environment. *Science* 218, 443–448. doi: 10.1126/science.218.4571.443
- Bünger-Kibler, S., and Bangerth, F. (1983). Relationship between cell number, cell size and fruit size of seeded fruits of tomato and those induced parthenocarpically by the application of plant growth regulators. *Plant Growth Regul.* 1, 143–154.
- Casa, R., and Rouphael, Y. (2014). Effects of partial root-zone drying irrigation on yield, fruit quality, and water-use efficiency in processing tomato. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 89, 389–396. doi: 10.1080/14620316.2014.11513097
- Chong, H. H., Simsek, S., and Reuhs, B. L. (2009). Analysis of cell-wall pectin from hot and cold break tomato preparations. *Food Res. Int.* 42, 770–772. doi: 10.1016/j.foodres.2009.02.025
- Costa, J. M., Ortu-o, M. F., and Chaves, M. M. (2007). Deficit irrigation as a strategy to save water: physiology and potential application to horticulture. *J. Integr. Plant Biol.* 49, 1421–1434. doi: 10.1111/j.1672-9072.2007.00556.x

- Csardi, G., and Nepusz, T. (2014). *The Igraph Software Package for Complex Network Research*. R Package Version 0.6. 6. Available online at: <http://cran.r-project.org/web/packages/igraph/>
- D'Aoust, M. A., Yelle, S., and Nguyen-Quoc, B. (1999). Antisense inhibition of tomato fruit sucrose synthase decreases fruit setting and the sucrose unloading capacity of young fruit. *Plant Cell* 11, 2407–2418. doi: 10.1105/tpc.11.12.2407
- Davies, J. N., Hobson, G. E., and McGlasson, W. B. (1981). The constituents of tomato fruit — the influence of environment, nutrition, and genotype. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 15, 205–280. doi: 10.1080/10408398109527317
- De Mendiburu, F. (2014). *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research*. R package version 1, 1–6. Available online at: <http://CRAN.R-project.org/package=agricolae>
- Dorais, M., Ehret, D. L., and Papadopoulos, A. P. (2008). Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: from the seed to the consumer. *Phytochem. Rev.* 7, 231–250. doi: 10.1007/s11101-007-9085-x
- Egea, I., Barsan, C., Bian, W., Purgatto, E., Latché, A., Chervin, C., et al. (2010). Chromoplast differentiation: current status and perspectives. *Plant Cell Physiol.* 51, 1601–1611. doi: 10.1093/pcp/pcq136
- Errington, N., Tucker, G. A., and Mitchell, J. R. (1998). Effect of genetic down-regulation of polygalacturonase and pectin esterase activity on rheology and composition of tomato juice. *J. Sci. Food Agric.* 76, 515–519. doi: 10.1002/(SICI)1097-0010(199804)76:4<515::AID-JSFA979>3.0.CO;2-X
- Espinosa, L., To, N., Symoneaux, R., Renard, C., Biau, N., and Cuvelier, G. (2011). “Effect of processing on rheological, structural and sensory properties of apple puree,” in *11th International Congress on Engineering and Food*, eds G. Saravacos, P. Taoukis, M. Krokida, V. Karathanos, H. Lazarides, N. Stoforos, C. Tzia, and S. Yanniotis (Amsterdam: Elsevier Science Bv), 513–520. doi: 10.1016/j.profoo.2011.09.078
- FAO (2011). *Global Food Losses and Food Waste – Extent, Causes and Prevention*.
- Foolad, M. R. (2007). Genome mapping and molecular breeding of tomato. *Int. J. Plant Genomics* 2007:64358. doi: 10.1155/2007/64358
- Fraser, P. D., Truesdale, M. R., Bird, C. R., Schuch, W., and Bramley, P. M. (1994). Carotenoid biosynthesis during tomato fruit development (evidence for tissue-specific gene expression). *Plant Physiol.* 105, 405–413. doi: 10.1104/pp.105.1.405
- Garcia, E., and Barrett, D. M. (2006). Evaluation of processing tomatoes from two consecutive growing seasons: quality attributes, peelability and yield. *J. Food Process. Preserv.* 30, 20–36. doi: 10.1111/j.1745-4549.2005.00044.x
- Gomez, L., Rubio, E., and Auge, M. (2002). A new procedure for extraction and measurement of soluble sugars in ligneous plants. *J. Sci. Food Agric.* 82, 360–369. doi: 10.1002/jsfa.1046
- Katerji, N., Campi, P., and Mastrorilli, M. (2013). Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agric. Water Manage.* 130, 14–26. doi: 10.1016/j.agwat.2013.08.005
- Le Gall, H., Philippe, F., Domon, J. M., Gillet, F., Pelloux, J., and Rayon, C. (2015). Cell wall metabolism in response to abiotic stress. *Plants* 4, 112–166. doi: 10.3390/plants4010112
- Leverrier, C., Almeida, G., Espinosa-Muñoz, L., and Cuvelier, G. (2016). Influence of particle size and concentration on rheological behaviour of reconstituted apple purees. *Food Biophys.* 11, 235–247. doi: 10.1007/s11483-016-9434-7

- Lin, H., Qin, X., Aizawa, K., Inakuma, T., Yamauchi, R., and Kato, K. (2005). Chemical properties of water-soluble pectins in hot-and cold-break tomato pastes. *Food Chem.* 93, 409–415. doi: 10.1016/j.foodchem.2004.12.009
- Lin, H. J., Aizawa, K., Inakuma, T., Yamauchi, R., and Kato, K. (2005). Physical properties of water-soluble pectins in hot- and cold-break tomato pastes. *Food Chem.* 93, 403–408. doi: 10.1016/j.foodchem.2004.09.036
- Makroo, H. A., Rastogi, N. K., and Srivastava, B. (2017). Enzyme inactivation of tomato juice by ohmic heating and its effects on physico-chemical characteristics of concentrated tomato paste. *J. Food Process. Eng.* 40:e12464. doi: 10.1111/jfpe.12464
- McGuire, R. G. (1992). Reporting of objective color measurements. *HortScience* 27, 1254–1255.
- McGuire, S. (2015). FAO, IFAD, and WFP. The state of food insecurity in the World 2015: Meeting the 2015 international hunger targets: taking stock of uneven progress. Rome: FAO, 2015. *Adv. Nutr.* 6, 623–624. doi: 10.3945/an.115.009936
- Mirondo, R., and Barringer, S. (2015). Improvement of flavor and viscosity in hot and cold break tomato juice and sauce by peel removal. *J. Food Sci.* 80, S171–S179. doi: 10.1111/1750-3841.12725
- Moelants, K. R. N., Cardinaels, R., Van Buggenhout, S., Van Loey, A. M., Moldenaers, P., and Hendrickx, M. E. (2014). A review on the relationships between processing, food structure, and rheological properties of plant-tissue-based food suspensions. *Compr. Rev. Food. Sci. Food Saf.* 13, 241–260. doi: 10.1111/1541-4337.12059
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19, 205–234.
- Muller, B., Pantin, F., Génard, M., Turc, O., Freixes, S., Piques, M., et al. (2011). Water deficits uncouple growth from photosynthesis, increase C content, and modify the relationships between C and growth in sink organs. *J. Exp. Bot.* 62, 1715–1729. doi: 10.1093/jxb/erq438
- Page, D., Van Stratum, E., Degrou, A., and Renard, C. (2012). Kinetics of temperature increase during tomato processing modulate the bioaccessibility of lycopene. *Food Chem.* 135, 2462–2469. doi: 10.1016/j.foodchem.2012.06.028
- Pantin, F., Fanciullino, A. L., Massonnet, C., Dauzat, M., Simonneau, T., and Muller, B. (2013). Buffering growth variations against water deficits through timely carbon usage. *Front. Plant Sci.* 4:483. doi: 10.3389/fpls.2013.00483
- Patanè, C., and Cosentino, S. (2010). Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate. *Agric. Water Manage.* 97, 131–138. doi: 10.1016/j.agwat.2009.08.021
- Patanè, C., Scordia, D., Testa, G., and Cosentino, S. L. (2016). Physiological screening for drought tolerance in Mediterranean long-storage tomato. *Plant Sci.* 249, 25–34. doi: 10.1016/j.plantsci.2016.05.006
- Patanè, C., Tringali, S., and Sortino, O. (2011). Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Sci. Hortic.* 129, 590–596. doi: 10.1016/j.scienta.2011.04.030
- Pernice, R., Parisi, M., Giordano, I., Pentangelo, A., Graziani, G., Gallo, M., et al. (2010). Antioxidants profile of small tomato fruits: effect of irrigation and industrial process. *Sci. Hortic.* 126, 156–163. doi: 10.1016/j.scienta.2010.06.021
- Poorter, H., Fiorani, F., Pieruschka, R., Wojciechowski, T., Putten, W. H., Kleyer, M., et al. (2016). Pampered inside, pestered outside? Differences and similarities between plants growing in controlled conditions and in the field. *New Phytol.* 212, 838–855. doi: 10.1111/nph.14243

- Postel, S. L., Daily, G. C., and Ehrlich, P. R. (1996). Human appropriation of renewable fresh water. *Science* 271:785. doi: 10.1126/science.271.5250.785
- Rinaldi, M., Ventrella, D., and Gagliano, C. (2007). Comparison of nitrogen and irrigation strategies in tomato using CROPGRO model. A case study from Southern Italy. *Agric. Water Manage.* 87, 91–105. doi: 10.1016/j.agwat.2006.06.006
- Ripoll, J., Urban, L., Brunel, B., and Bertin, N. (2016). Water deficit effects on tomato quality depend on fruit developmental stage and genotype. *J. Plant Physiol.* 190, 26–35. doi: 10.1016/j.jplph.2015.10.006
- Ripoll, J., Urban, L., Staudt, M., Lopez-Lauri, F., Bidet, L. P., and Bertin, N. (2014). Water shortage and quality of fleshy fruits—making the most of the unavoidable. *J. Exp. Bot.* 65, 4097–4117. doi: 10.1093/jxb/eru197
- Sanchez, M. C., Valencia, C., Gallegos, C., Ciruelos, A., and Latorre, A. (2002). Influence of processing on the rheological properties of tomato paste. *J. Sci. Food Agric.* 82, 990–997. doi: 10.1002/jsfa.1141
- Schaefer, J., Opgen-Rhein, R., and Strimmer, K. (2013). *GeneNet: Modeling and Inferring Gene Networks*. R package version 1.2. 5. Available online at: <http://CRAN.R-project.org/package=GeneNet>
- Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., and Hammel, H. T. (1965). Sap pressure in vascular plants. *Science* 148, 339–346. doi: 10.1126/science.148.3668.339
- Sérino, S., Gomez, L., Costagliola, G., and Gautier, H. (2009). HPLC assay of tomato carotenoids: validation of a rapid microextraction technique. *J. Agric. Food Chem.* 57, 8753–8760. doi: 10.1021/jf902113n
- Stikic, R., Popovic, S., Srdic, M., Savic, D., Jovanovic, Z., Prokic, L., et al. (2003). Partial root drying (PRD): a new technique for growing plants that saves water and improves the quality of fruit. *Bulg. J. Plant Physiol.* 29, 164–171.
- Svelander, C. A., Tiback, E. A., Ahrne, L. M., Langton, M. I., Svanberg, U. S., and Alminger, M. A. (2010). Processing of tomato: impact on *in vitro* bioaccessibility of lycopene and textural properties. *J. Sci. Food Agric.* 90, 1665–1672. doi: 10.1002/jsfa.4000
- Tardieu, F., Granier, C., and Muller, B. (2011). Water deficit and growth. Co-ordinating processes without an orchestrator? *Curr. Opin. Plant Biol.* 14, 283–289. doi: 10.1016/j.pbi.2011.02.002
- Tenhaken, R. (2014). Cell wall remodeling under abiotic stress. *Front. Plant Sci.* 5:771. doi: 10.3389/fpls.2014.00771
- Wei, T., Simko, V., and Wei, M. T. (2016). Package ‘corrplot’. *Statistician* 56, 316–324.
- Welch, R. M., and Graham, R. D. (1999). A new paradigm for world agriculture: meeting human needs - Productive, sustainable, nutritious. *Field Crops Res.* 60, 1–10. doi: 10.1016/S0378-4290(98)00129-4

4. Genotype, water deficit and cooking process affect the structure and viscosity of tomato purees

Alexandre Arbex de Castro Vilas Boas¹, David Page², Robert Giovino³, Nadia Bertin¹ and Anne-Laure Fanciullino¹

¹UR 1115 Plantes et Systèmes de cultures Horticoles, Institut National de la Recherche Agronomique, Centre PACA, Avignon, France

²UMR 408 Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale, INRA, Centre PACA, Université d'Avignon, Avignon, France

³Société Nationale Interprofessionnelle de la Tomate, Avignon, France

ABSTRACT: Tomatoes can be eaten in a variety of ways, from fresh fruit to sauces, juice and ketchup. In the case of processed products, the viscosity of tomato puree is a parameter considered very important by the industry. The processed products can be made from a higher temperature shock, Hot-Break (HB), or lower, Cold-Break (CB). Each form of processing has a different impact on the enzymatic activities and the particles that are directly linked to that viscosity of the product. In order to better understand the variations in the tomato puree quality, the present work aimed to investigate the characters that generate the viscosity differences and identify which technological characteristics vary according to each factor. The tomato purees were obtained from two different genotypes, two water treatments and two processes of cooking (HB and CB) during two year in a row. Their dry matter content, soluble solids content, puree viscosity, serum viscosity, particles distribution, particles sizes and enzymatic activities (PG and PME) were studied. Results obtained showed that pulp concentration and particle size may be identified as the key structural parameters having a large effect on the rheological properties of tomato puree properties. This work opens new perspectives for managing puree quality in the industries and to improve puree quality.

Introduction

Tomatoes are commonly processed into dispersed food systems (Barrett, Garcia et al. 1998; Moelants, Cardinaels et al. 2014) to obtain different derivatives, such as juice, puree, pulp, paste, that can be directly consumed or used as ingredients in many food formulations. As industrial ingredient, tomato products have to reach quality requirements, and among them, a controlled consistency, depending in which context they are used: more liquid for beverage and soups or highly viscous for sauces (Moelants, Cardinaels et al. 2014). Such products are generally obtained through a standard processing route consisting in an initial grinding, an enzymatic stabilization by a first fast heating step called “the break”, then refining through sieves of different sizes according to the objectives of fineness of the product, and as a last step, products are chambered and sterilized. Break temperature and

refining are the main unit operation acting on the consistency. The break will influence the viscosity of the serum by acting on the degradation of the pectin of the cell walls and their solubilisation (Leverrier, Almeida et al. 2016). When its temperature reach at least 90°C immediately after fruit crushing in process called “Hot Break” (HB), the intrinsic pectinolytic enzyme polygalacturonase (PG) and et pectin methylesterase (PME) are immediately inhibited, avoiding the pectin degradation and the corresponding purees remained viscous. On the other hand when fruits are first crushed and then macerated at moderate temperature (70°C), the process is called “Cold Break” (CB), it allow the pectin dissolution by intrinsic enzymes and produce low viscosity (Moelants, Cardinaels et al. 2014). Those two enzymes were identified as the main ones for the loss of texture during the CB process, by processing tomatoes carrying depleted genes for PG and PME. Sanchez et al (2003) showed that processed tomatoes exhibited no difference compared to the control when processed in a HB way, while only controls, carrying the functional enzymes lose their texture during CB processing. The heat treatment also influences the viscosity of the serum by the degradation/dissolution of the pectin (Leverrier, Almeida et al. 2016).

The refining can also modify the properties of the purees but it's more about a mechanical modification, acting mainly on the size and shape of the particles. Globally, tomato purees, as most fruit purees, behaves as a continuous non Newtonian liquid, but more into detail, purees are suspensions of particles in a continuous serum (Santiago, Kermani et al. 2017). In apple purees, for example, the particle size is a determining factors for the viscosity, showing that the larger they are, the more viscous the products are (Espinosa-Munoz, Symoneaux et al. 2012; Leverrier, Almeida et al. 2016) but in tomatoes the size/viscosity relationship is not as clear (Tanglertpaibul and Rao 1987). The apparent viscosity is higher for larger aperture of the sieve for the refining, which gives larger particles, but it's also observed that the smaller openings can also cause an increase in viscosities, which may be due to more surface interactions when particle size decreases, and a better compaction to create a more cohesive network. Sanchez et al. (2002) also showed that purees made from the HB process have a higher viscosity, even if the particles found in the products are thinner. The refining carried out on purees influences the size and the morphology of the particles (Leverrier, Almeida et al. 2016) and hence modify their flow properties (Espinosa, To et al. 2011) and particle properties, shape and size influence the texture of purees (Servais, Jones et al. 2002). About the morphology, particles that are not regular and therefore less spherical have more mechanical interaction and therefore produce more viscous purees (Barnes 2000). The size

and shape of particles may also depends on how tomato tissues are disintegrated by blending and/or other mechanical treatments like high pressure homogenization that alters the microstructure (Moelants, Cardinaels et al. 2014; Moelants, Cardinaels et al. 2014; Santiago, Kermani et al. 2017). These processing parameters modify the water soluble/insoluble solid content ratio, particle sizes and pectin state, which, in turn, affect the puree rheology (Sanchez, Valencia et al. 2002; Moelants, Cardinaels et al. 2014; Boas, Page et al. 2017). In fact, it is mainly the operation of concentration operated on juices that modifies the amount of serum and thus increases the viscosity. The reduction of water in the purees reduces the amount of serum and makes the particles more restricted and the forces of interactions between them are important, which increases the viscosity (Leverrier, Almeida et al. 2016). But the change in the amount of serum can also be observed for an equivalent concentration process (i.e. yielding the same dry matter content); it may be due to changes in cell destruction, which releases the juice. Therefore the genotype or WD effect may have an effect on this serum to pulp ratio, but of lesser amplitude that a concentration process.

All these unit operations result in a complex food system composed of insoluble pulp/particles dispersed in a continuous liquid/serum phase (Barrett, Garcia et al. 1998; Santiago, Kermani et al. 2017). It is also demonstrated that an increase in pectin solubilization coincides with the decrease in serum viscosity (Goodman, Fawcett et al. 2002; Diaz, Anthon et al. 2009). In a closer scale, this behavior results from the interaction between both the particle properties of the dispersed phase and the properties of the serum phase (especially of the solubilized pectin).

All those factors influencing consistency also depends on agronomic variables such as the variety and ripening stage of the fruits (Espinosa, To et al. 2011) whereas ripeness can plays a major role on pectin degradation (Ripoll, Urban et al. 2016) because generally, the size of the pectins decreases as a function of maturation of the fruit. Boas et al. (2017) showed a relation between water deficit (WD) and the decrease of enzymatic activity, which has the consequence of less loosening of texture when cooked in a CB way. The WD also has influenced on the cells size: fruits from WD treatment presented the same number of cells than control group, but larger when in the cell division phase (Ripoll, Urban et al. 2016). All of these factors will influence both the structure of the parenchyma, the morphology of the cells and the rigidity of the walls, but also on the chemical composition of the fruit and the resulting puree (Leverrier, Almeida et al. 2016).

Therefore, in order to better understand the variables that influence the texture on the tomato puree quality, we aimed to identify which are influenced by cultivars factors or WD treatment and the factors that influence the viscosity. For this study the cooking processes HB and CB were carried out from controlled conditions and a series of investigations on the pertinent variables were carried out to identify which parameters are modified in the pure ones (particle size, pulp content and serum viscosity) vary according to each factor in tomato purees.

Material and methods

Plant material and processing conditions

The raw materials used in this study come from two consecutive years of cultivation (2016 and 2017). Two industry type cultivars of tomato (*Solanum lycopersicum*), namely “H1311” and “Terradou” were selected for the contrast of quality of their fruit when processed as purees (Boas, Page et al. 2017), Terradou exhibited a high soluble solid content (SSC), and a low puree viscosity, while H1311 exhibited a lower SSC but producing more viscous purees. This last is also carrying the ‘high lycopene’ mutation, and therefor exhibit a high content of lycopene. Both genotypes were grown under two levels of irrigation, control and water deficit (WD) (described in Villas Boas et al, 2018) in an experimental field near Avignon, France, during 2016 and 2017 growing season. The fruits were harvested by hand in a total of 500kg for each modality analyzed (cultivars and WD) and immediately transferred to the pilot plant (CTCPA, Avignon, France), for being processed or stored at 4°C for a maximum of 48 hours. A representative sample of fresh fruits, i.e. a central slice of 10 fruits per samples, were immediately frozen in liquid nitrogen, and grinded into powder for enzymatic measurement.

Fresh fruit SSC and DMC

Soluble solids content (SSC) was measured using an ATAGO PR-1000 digital refractometer and results were expressed in °Brix, according to AOAC (2002). Dry matter content (DMC) was determined by weighting around 3g of grinded fruit before and after drying for 3 days at 70°C.

Fresh fruits cells number

The number of pericarp cells was measured after tissue dissociation using a method adapted from Bunger-Kibler and Bangerth (Bungerkibler and Bangerth 1983). The cells were

counted using a camera-equipped microscope (QImaging, Surrey, Canada) and QCapture Pro 6.0 software (QImaging, Surrey, Canada) (Bertin, Gautier et al., 2002).

Manufacture of purees

Batches of tomatoes were "hot-break" (HB) and "cold-break" (CB) processed in a pilot plant (CTCPA, Avignon, France). For HB, tomatoes were crushed in a hammer mill and immediately introduced into a preheated scraped surface heat exchanger for an immediate heating. Break temperature was fixed at 95°C/5min, and then stabilized for another 5 min at 95°C, refining was achieved through a 0.8 mm sieve, and product was packaged into 400mL bags. For CB, tomatoes were crushed into the same hammer mill as for HB, but then macerated for 10 min at 40°C in an intermediate tank, and stabilized for 5 min at 95°C. Then, the same processing as for HB was followed for refining. Purees from both processing were brought to 7°Brix packaged and sterilized according to industrial processes. Sterile packages were stored at 4°C before analyzes.

Puree/serum viscosity

Puree viscosities were deduced from a steady-state measurement carried out on an Anton Paar MCR 301 viscometer (Graz, Austria), using a double-ribbon wheel (with an internal radius of 11 mm, a 45 mm, a length of 45 mm, and an outer fixed cup with an outer radius of 14.46 mm). A flow curve was recorded between 1 and 120s⁻¹, 120 points and 1s⁻¹ per point and the result was obtained by the average of the last 60. Flow properties were described by the Herschel-Bulkley model (Espinosa, To et al. 2011). Serum viscosity was measured using a same rheometer as that used for puree, but with geometry with double air gap. This device doubles the friction surfaces and is therefore suitable for products that have a low viscosity. The flow curve is carried out between 10 and 1000 s⁻¹ (logarithmic progression in 8 min).

Enzymatic activity

Polygalacturonase (PG) and Pectin Metylesterase (PME) activities were determined by the method of Gross (Gross 1982) with some modifications by Ribas-Augusti et al (2017) (Ribas-Agusti, Gouble et al. 2017).

Repartition of the dry matter of purees into serum and different particle-size classes

The purees were separated into different component summarizes the samples prepared and the analysis made on each fractions (Figure 1). Six 50-ml falcon tubes filled with 50g of fresh purees were centrifuged 15 minutes at 13600g, the clear supernatant, i.e. the serum, were recovered, and the remaining pellet, i.e. the pulp, were transferred onto a vibrating sieve with 80 μ m - meshes and sieved by vibration and addition of one liter of distilled water. The weight of >80 μ m- particles was measured by difference with the weight of the empty sieve. The <80 μ m- particles which transferred through the sieve were recovered from the rinsing water by centrifugation for 30 minutes at 9.000RPM The pellets, i.e. the <80 μ m-particles were recovered and weighted. Each puree fraction was determined for their dry matter content by drying of an aliquot as for the raw puree. The proportions of each puree fraction were determined by calculating the proportion regarding their DMC compared to the DMC of raw purees.

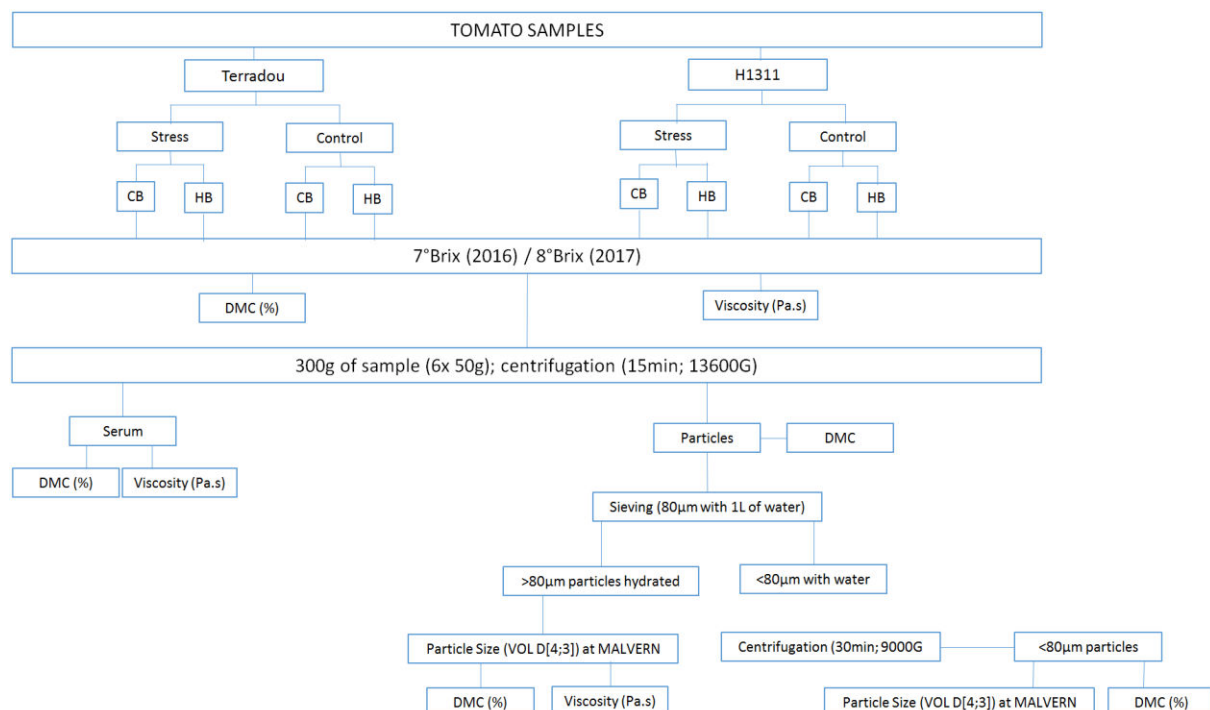


Figure 1. Description of the phases of separation of tomato purees in seroma, particles higher and lower than 80mm and analyzes performed during each part of the process.

Particles sizes measurement

The particle size distribution was carried out on both the <80- and >80 μ m-particles using a laser diffraction analyzer (Mastersizer 2000, Malvern Instruments). The samples were dispersed in distilled water (refractive index 1.33). The refractive index of plant cells is estimated at 1.52 and the absorption at 0.1 (Leverrier et al, 2016).

Data analyses

Data were analyzed using R statistical software (<http://www.Rproject.org>). Fresh fruit traits and puree viscosity were analyzed by analysis of variance (the agricolae R package and aov function; De Mendiburu, 2014). Heteroscedasticity and normality tests were performed before model evaluation. Multiple comparison of means was performed using the Least Significant Differences (LSD) test ($\alpha = 0.05$). When heteroscedasticity was detected, we used the Kruskal–Wallis non-parametric test followed by multiple comparisons of means through a t-student test on the ranks ($\alpha = 0.05$). The Factormine R package and the plot PCA function were used to perform PCA analysis. Datas were composed of 14 variables of fruit and puree quality and 8 observations per years (2 cultivars $\times$ 2 cookings $\times$ 2 irrigation levels). Data (means of 3 biological replicates) were centered and scaled by variables.

Results and Discussion

Fresh fruit characteristics are controlled by the water deficit implemented

Fresh fruits from two cultivars, two seasons and two WD treatments exhibited differences for their characteristics. As expected, Terradou generally exhibited a higher SSC than H1311 (figure 2A) while exhibiting a similar DMC (figure 2B). Terradou's SSC was up to 1.4°Brix higher than SSC from H1311 in all cases but for fruits exposed to WD in 2017. The WD had significant impacts in 2017 with values up to 1.7°Brix higher, while fruits were hardly different in 2016. WD Fruits also presented a higher DMC of their pericarp, with values up to 30% higher in 2017, while no differences significant were detected in 2016.

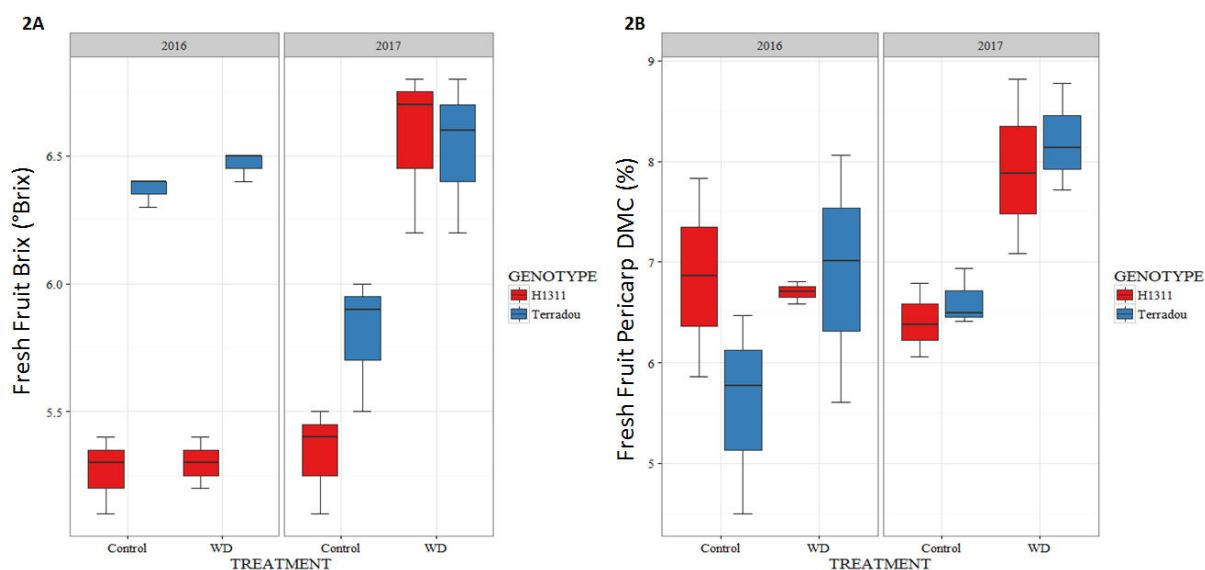


Figure 2. Impacts of years, cultivars and water deficit (WD) on fresh fruit SSC (2A) and fresh fruit pericarp DMC (2B)

This could be due to a more severe WD obtained in 2017 compared to 2016, the former corresponding to the replacing of 50% of the ETp of the plant, while it was 60% in 2016.

Soluble solids content (SSC) is a complex and multigene trait that is highly affected by the environment (Dorais, Ehret et al. 2008). Some cultivars have a genetic background adapted to potentially realize high SSC whatever the agronomic conditions. Fruit SSC is indeed influenced by solar radiation, temperature, day-length, water availability, soil mineral content, irrigation, fertilization regime and pruning techniques (Dorais, Ehret et al. 2008; Beckles 2012). Our results concerning WD are in agreement with many other authors, who also found that irrigation deficit positively influenced the soluble solids and dry matter content (DMC) of tomatoes (Zegbe-Dominguez, Behboudian et al. 2003; Hanson and May 2004; Hanson, Hutmacher et al. 2006; Favati, Lovelli et al. 2009). Obtaining a higher SSC is a positive achievement for the tomato industry, because it minor the quantity of energy necessary to evaporate water from the fruit juice to produce puree and (Favati, Lovelli et al. 2009).

In 2016, the number of cells contained within the fruit pericarp was evaluated (data not available in 2017). Despite its lower SSC and its similar DMC, H1311 had up to 37.7% +150% more cells in its pericarp than in Terradou. The WD had a similar impact on both genotypes, by lowering the number of cells, with -27% for H1311 and -18% for Terradou.

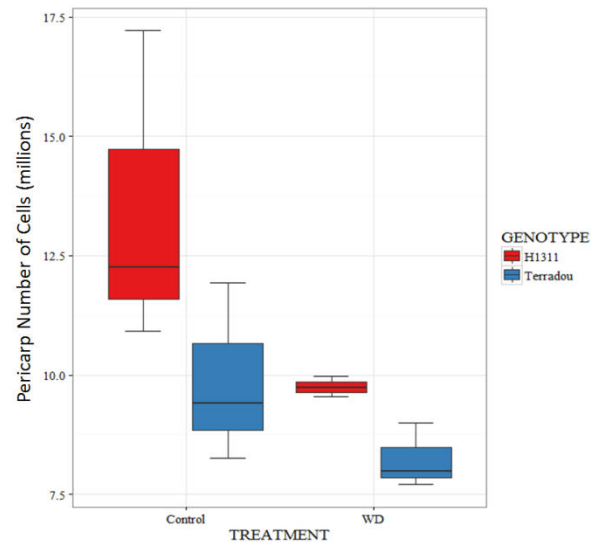


Figure 3. Impacts of cultivars and water deficit (WD) on pericarp number of cells in 2016.

Both division and expansion activity in pericarp tissue are determinant for fruit growth. Whereas epidermal cells still divide throughout fruit development, cell division in the pericarp is limited to a short period of fruit development and is located in the external tissue around the vascular bundles and in the hypodermis. (Bungerkibler and Bangerth 1983; Bertin 2005). Although several physiological and environmental factors interact in the control of fruit size, the cell number appeared to be to main one (Bertin, Borel et al. 2003). Bohner and Bangerth (1988) showed that defoliation caused a reduction in cell number, which is in agreement with our results as plant from the WD group produced less biomass (data not shown) as well as less cells in their fruits. One is tempted to associate a lower cell number (and thus their higher size as fruit had equivalent sizes in 2016), to higher particle sizes and then a higher viscosity for corresponding purees. Our results went partially in this way as WD purees from H1311 exhibited a higher viscosity, but the result was not obvious with Terradou. Unfortunately, we were not able to measure this trait in 2017. Such a hypothesis should be verified over more cultivars, samples and years to get a strong statistical relationship.

Genotype, water deficit and cooking controls the rheological properties

Cultivar, WD and processing had a significant impact on puree viscosity. However, interactions with the “year” effect was highly significant ($p\text{-value} = 0.001608$) (figure 4).

Purees from H1311 systematically exhibited viscosity higher than Terradou in all cases. The difference reached +220% in 2016 and +160% in 2017. As expected, CB purees exhibited viscosities as HB purees, for all the genotypes and the WD. The differences of

viscosity varied from 2,6 to 7,2 in 2016 in 2016, and in from 2.6 to 5,0 in 2017. As this difference of viscosity was mainly attributed to enzymatic reactivity (Sanchez, Valencia et al. 2002), those differences indicates that this last may have a genetic as well as an environmental control.

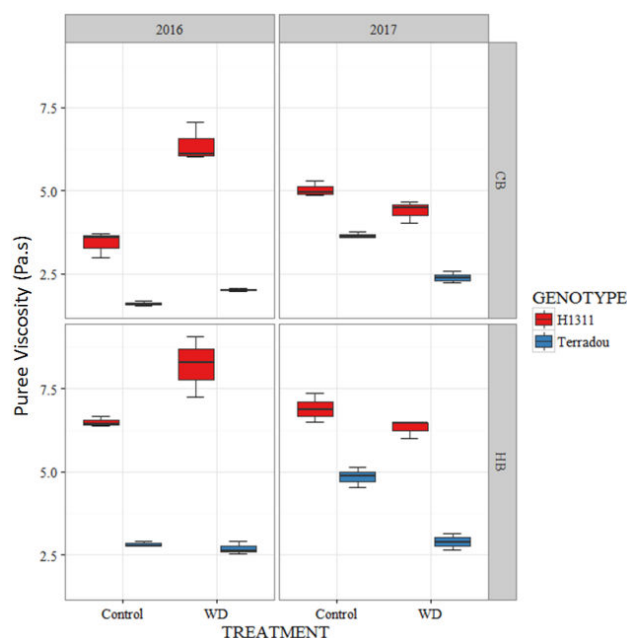


Figure 4. Impact of years, cultivars and water deficit on the rheology of CB and HB purees.

WD had a positive effect on viscosity in 2016, but went the other way around in 2017. We hypothesized that the decrease observed in 2017 with the WD purees may be due to the big difference of initial DMC and SSC observed on fresh fruit this year: the evaporation of water performed to reach the appropriate brix of the puree was more intense for the control tomatoes than for the WD tomatoes. These results cans also be explained by Favati et al (2009) where it was said that purees with the same SSC, but starting with fruit exhibiting different SSC, lead indeed to a different intensity of the concentration step. To fully address this hypothesis, we controlled the correlation between DMC of all our purees and their respective viscosities. This control was also motivated by the fact that, in 2016, the concentration step did not fully respect the fixed objectives as the SSC of purees varied from 6,8 to 8.9°Brix (it was not the case in 2017, were all SSC exhibited the around at 8°Brix), and as expected, from the initial fresh fruit SSC, the corresponding puree DMC varied from 7,19 to 9,56% (table 1).

Table 1: Means of SSC and DMC of the years 2016 and 2017 on the cultivars H1311 and Terradou submitted on two water regimes and HB and CB process.

Year	Cultivars	WD	Cooking	SSC	DMC
2016	H1311	Control	CB	7,3	8,07
2016	H1311	WD	CB	8,5	9,27
2016	H1311	Control	HB	7,9	8,45
2016	H1311	WD	HB	8,3	9,42
2016	Terradou	Control	CB	6,9	7,72
2016	Terradou	WD	CB	7,3	7,91
2016	Terradou	Control	HB	6,8	7,19
2016	Terradou	WD	HB	8,9	9,34
2017	H1311	Control	CB	8,1	8,95
2017	H1311	WD	CB	8,7	9,26
2017	H1311	Control	HB	8,1	8,95
2017	H1311	WD	HB	8,5	8,95
2017	Terradou	Control	CB	8,6	8,88
2017	Terradou	WD	CB	8,7	9,34
2017	Terradou	Control	HB	8,6	9,56
2017	Terradou	WD	HB	8,3	8,74

Considering the differences observed for DMC and SSC of the purees, we observed whether there was no strict correlation between purees and fresh fruits characteristic (figure 5). Despite a large range of variation, none of the correlation was obvious, neither with the variation of viscosity in CB purees, neither in HB purees. As previously discussed, the viscosity of tomato concentrates may be influenced by other physicochemical characteristic like the serum to pulp ratio, the distribution of particle sizes and shape and the viscosity of the serum (Sanchez, Valencia et al. 2002).

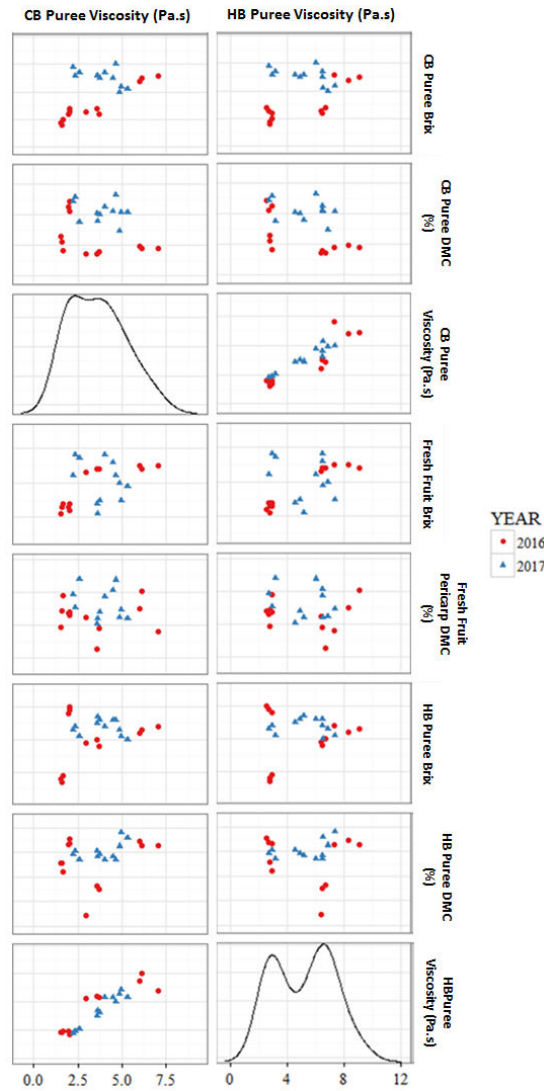


Figure 5. Correlation between Cold Break and Hot Break purees rheology and fresh fruits (SSC and Pericarp DMC) and purees (SSC and DMC).

As enzymatic reactivity of fruits, and especially their polygalacturonase (PG) and pectin methyl-esterase (PME) activities are involved in viscosity change during the process, we also measured these activities on fresh fruits, and look for their correlation with viscosities changes, observed over years, cultivars and WD treatment.

The PG activity was not much affected by the genotype and the WD effects in 2016. In 2017, the activity was lower, similar for H1311 and Terradou control, but inversely affected by the WD: PG activities increased for Terradou but dropped for H1311 (Figure 6A). No obvious relationships with purees viscosity were detected. On the other hand the PME activity had clear cultivar and WD impact. H1311 always showed PME activities superior to Terradou, with values, being on average 27% higher (Figure 6B). Fruits from the control

group also showed higher values when compared to the fruits submitted to a water deficit. The values were up to 51% and 29% in 2016 and 2017 respectively.

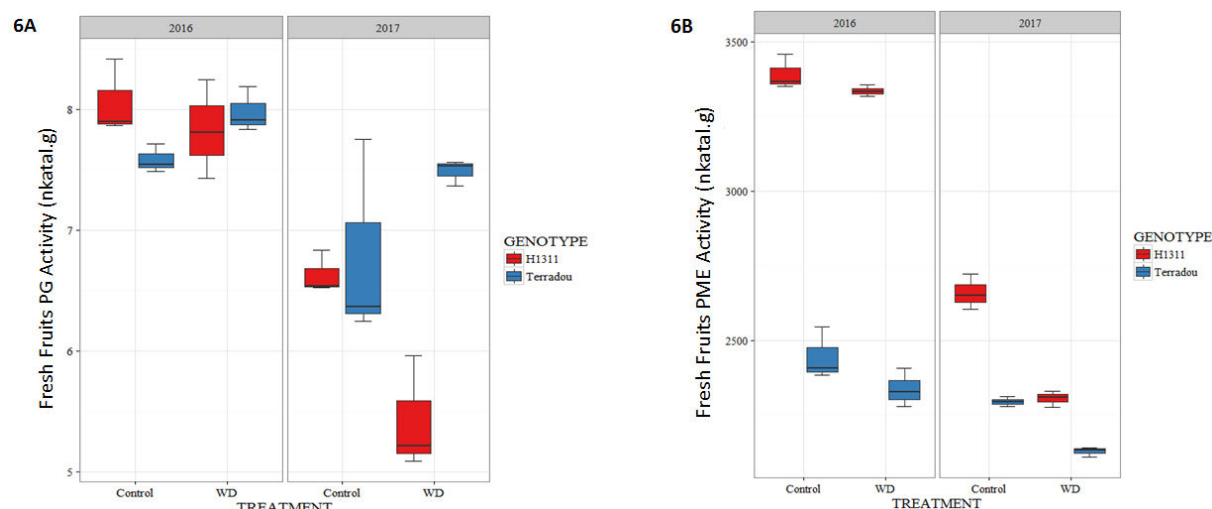


Figure 6. Impact of years, cultivars and water deficit (WD) on PG (6A) and PME (6B) fresh fruits activities.

Pectin is crucial in controlling the viscosity of tomato juice and there are a number of enzymes involved in pectin hydrolysis, the major ones being pectin methylesterase (PME) and polygalacturonase (PG) (Mirondo and Barringer 2015). Both enzymes do not have the same impact on pectin, but both are described as involved in loss of viscosity (Goodman, Fawcett et al. 2002; Anthon and Barrett 2008; Mirondo and Barringer 2015). In our case, the relation went the other way around for the PME, but not the PG. This result is consistent with studies on juice indicating that a high PME activity but low PG resulted in even more viscous structure (Errington, Tucker et al. 1998). As both enzymes reduce the viscosity during CB processing, we calculated the correlation between enzymes activities and the loss of viscosity (figure 7). As a result, even if the PME activity showed to be slightly more correlated than the PG activity, but none of them had any significance between these parameters was found

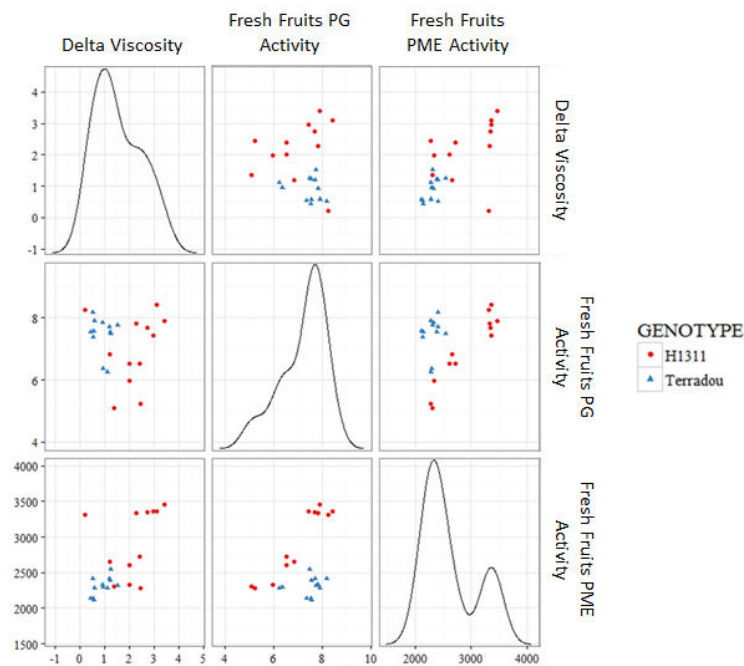


Figure 7. Correlations between delta viscosity and fresh fruits enzymatic activities.

It has already been showed that enzymatic activity may not be the only reason for pectin modification. For example, the speed of extraction also has a role on their conformation (Fishman, Chau et al. 1999). This could explain that enzymatic activities and viscosity are not fully linked

Based in these facts, were no correlations between the viscosity and the enzymatic activity, DMC and SSC, and also the fresh fruits characteristics, we propose that the differences of puree rheology were driven changes in particle size and shape. In order to identify which one occurred when changing cultivars, or cooking, we measured other variables, as serum viscosity, serum/pulp proportion, particles proportion and particles volume mean.

Sources of the differences on tomato puree rheology

It was investigated the structures of the purees in order to better understand what kind of physical process determine the sources of variation of this viscosity. Serum viscosity was performed, as well as the distribution and size of the particles that make up the pulps of the purees. These results are described separately below.

Serum viscosity: These results showed similar behaviors as those observed for the viscosities of the purees (figure 8). The H1311 serum exhibited higher values than those from Terradou, and this observation is clearer when one considers the purees obtained from the HB

treatments, with results varying from 1 to 4 (x1000 Pa.s). In general the H1311 purees were 65% higher than the Terradou purees.

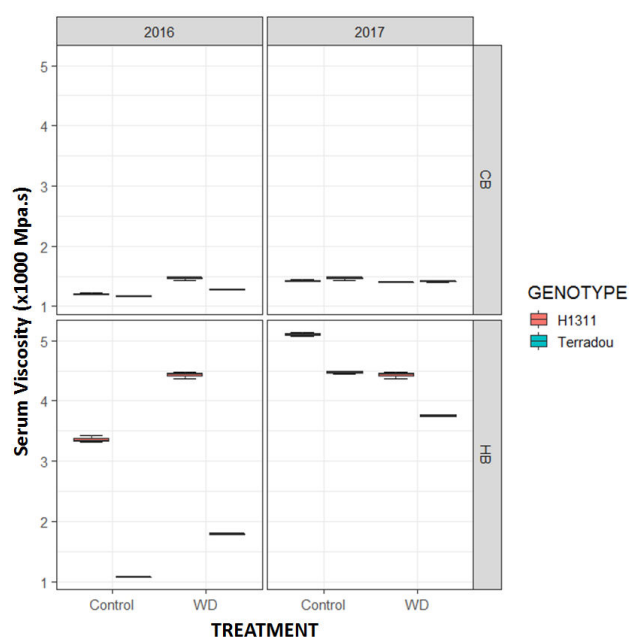


Figure 8. Impact of years, cultivars and water deficit on the serum viscosity (Mpa.s) on CB and HB purees.

The water restriction treatments presented an inverse behavior over the years. In 2016 the WD serum was more viscous, while in 2017, its viscosity decreased, following the same behavior of the purees. Regarding the type of process used, the differences are more marked in HB, whereas CB almost shows no differences in seroma viscosity in the two years and in the two irrigation regimes.

The serum is the colloidal phase in which particles above about 150 μ m are in suspension. In an apple, the viscosity is mainly driven by the concentration of particles in suspension, the rheological behaviors of the serum having a second role. Apple serum seems to be the best lubricating phase thanks to the pectin it contains. Ionic strength and density seem to have a negligible impact on flow properties of the suspensions in most cases (Leverrier, Almeida et al. 2017).

Effects of particle distribution: In order to evaluate the puree structure, we first separated the puree into serum and pulp and evaluated their respective proportion, (figure 9A). Then we separated the pulp into soluble, small and large particles (figure 9B).

The serum-to-pulp ratio was not impacted by the WD treatments and the years allowing us to pull the values over years. Puree from Terradou had a higher proportion of

serum than those from H1311, regardless of whether the transformation process used is HB or CB. In Terradou proportion were +23.75% higher for HB and +18.35% for CB. Regarding the process, CB trigger a 10% higher amount of serum than HB for both cultivars.

Concerning the splitting of the pulp into different particle-size classes, no differences over the years was also observed. In this case, Terradou showed the highest proportions of soluble material, and particles lower than 80µm, but presented the lowest proportions of particles higher than 80µm. The Terradou genotype presented +40.45% of particles lower than 80µm in the HB purees and + 42.85% in the CB purees. Within the proportion of soluble, Terradou presented values of +18.41 and + 10.45% for HB and CB, respectively. When analyzed the proportions of particles higher than 80µm, there is an inversion between the genotype, as previously mentioned and in this case H1311 obtained higher indices in + 40% when processed in HB and + 30% when processed in CB. There is no difference in the proportions of particles (>80µm or <80µm) and soluble according to the processing methods, demonstrating that the variation of viscosity may be more related to the cultivar.

The cultivar H1311, which has the highest viscosity compared to Terradou, also showed the largest amount of large particles (> 80µm), while the less viscous puree, exhibited larger amount of soluble and small particles (<80µm).

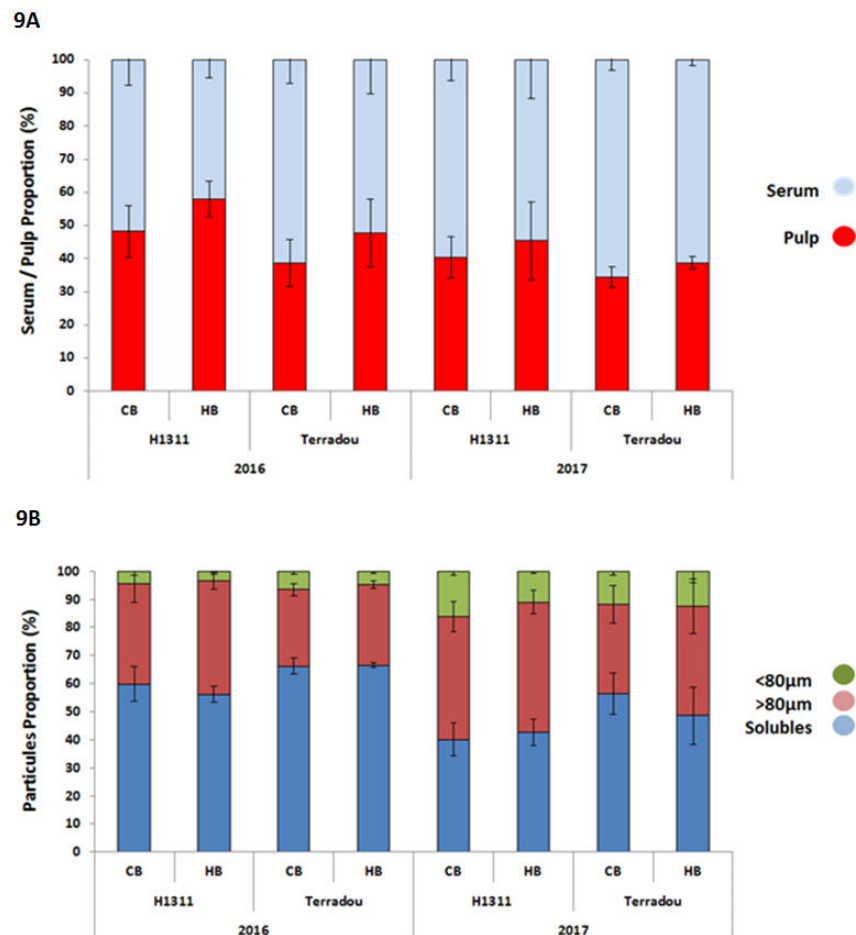
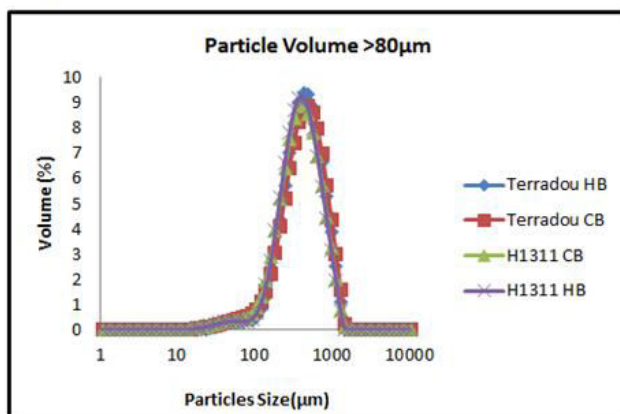


Figure 9. Impact of cultivars and cooking process on the proportion of pulp/serum (9A) and proportion of particles (9B) on tomato purees.

Effects of particle size: After looking for their difference in proportion by weight, an analysis to know if the particles had the same hydrodynamic volume was made measuring by laser granulometry. Profiles for particles were made and then separated in two profiles: larger than 80 µm and smaller than 80µm. Measurements showed a monomodal size distribution, for both separated fractions. These values should be treated with caution because particles in plant suspensions are not spherical (Leverrier, Almeida et al. 2016). When analyzing the volume of the particles larger than 80µm the result is counter intuitive because Terradou (less viscous) purees show significantly larger particle sizes (figure 10A). For small particles, the result is more contrasted. Overall, the small particles of Terradou appear smaller regardless of the cooking mode. But the volumes of particles smaller than 80µm showed a different behavior for the cooking and the genotypes studied (figure 10B). In this case, Terradou showed a higher volume than H1311.

10A



10B

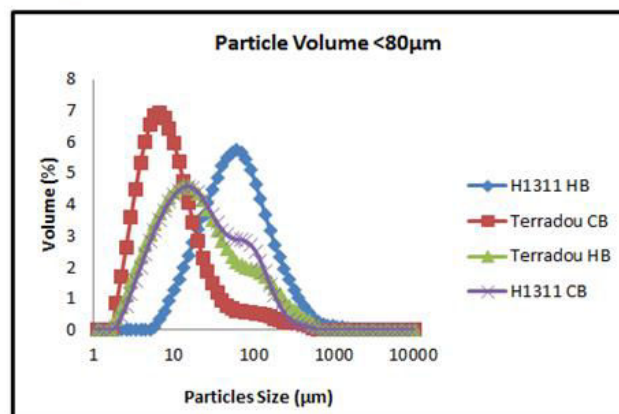


Figure 10. Impacts of cultivars and water deficit (WD) on particle volume mean and particles size analyzed when particles are bigger (10A) and less than 80µm (10B).

Regarding the data of proportions of each phase in the pulp of the purees and the particles sizes, it was verified that the Terradou and H1311 genotypes have inverse behaviors, independent of the type of transformation used. Large particles do not show many differences at first glance on the plots, but the average volumes are nevertheless different between genotypes. On the other hand, there are no differences between the HB and CB purees, despite a strong difference in viscosity (figure 11).

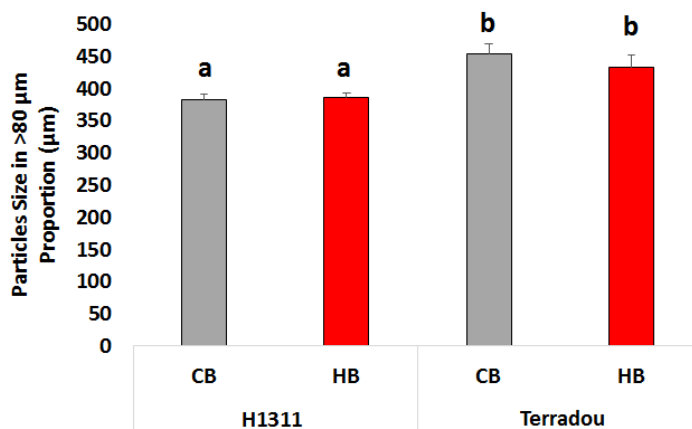


Figure 11. Impacts of cultivars and water deficit (WD) on particle volume mean and particles size analyzed when particles are bigger (9A) and less than 80µm (9B).

To identify which are the most influent variables that discriminated the samples for according to the genotypes, the process, years and WD it was performed a PLS-DA analysis (figure 12). No significant model was calculated for the year and WD impact, indicating that the measured variables were not adapted to discriminate these effects. To the contrary, as significant model was calculated for discriminating samples according to the genotype, with a

r^2 and Q^2 of 0.89 and 0.83 respectively. 100% of the samples were well discriminated. The processing model had a lower score: if 100% of HB samples were well ranked in their appropriate group, only 80% of CB samples were correctly classified.

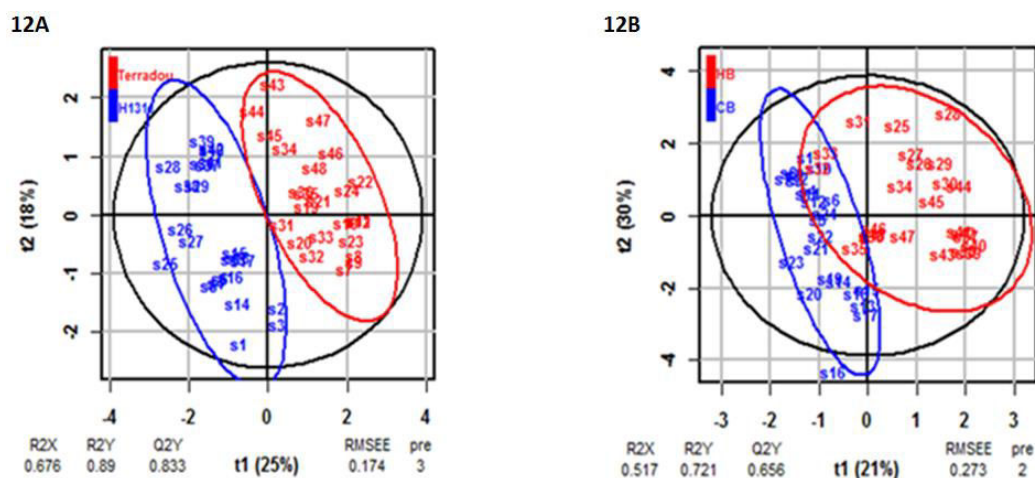


Figure 12. Projection according to PLS component 1 and 2 of the discriminating model for genotypes (12A) and the same but for the processing models (12B). VIP's corresponding to both models. R^2Y and Q^2Y are correlation coefficient and quality coefficient respectively.

The corresponding VIPs (variable important in projection) indicated that the most relevant variables for the discrimination were related to the size of the particles (Table 2). VIPs indicated that the most important variables were related to serum: i.e. serum viscosity and serum proportion.

Table 2. VIPs most relevant variables the treatments and processing models.

Variables	VIP's	
	Genotype	Processing
Puree Dry matter Content	0.60	0.38
SSC (°Brix)	0.43	0.55
Serum / Pulp proportion	1.35	1.23
Pulp composition		
<80µm particles proportion	0.48	0.77
>80µm particles proportion	0.34	0.64
Proportion of soluble elements	0.22	0.46
Serum viscosity	0.78	2.14
Volume of >80µm particles	2.17	0.34
Volume of <80µm particles	0.93	1.03

Based on these results, it was showed that the viscosity changes and the serum seems to be a primary function controlling the viscosity of the puree, unlike what was obtained for apple purees (Leverrier, Almeida et al. 2016), where quantity of insoluble and size and shape of particles tend to have the greatest influence on this characteristic. Serum is the continuous liquid phase that consists of water and soluble materials (mainly pectic polymers, and sugars) that give it its viscosity. The pectin present in the serum is used as indicators of changes in the cell wall, because during heat treatment the pectin is solubilized from the pulp to the serum (Diaz et al., 2009). HB serums, which are supposed to carry more intact pectin (not affected by pectinolytic enzymes), were more viscous, as are HB purees. This results is consistent with result obtained when high pressure (HP) homogenization is applied on purees with low consistency, and which trigger an increase of viscosity. The HP homogenization allows for an increase in pectin molecular weights, by triggering interaction between dissolved pectin. The interactions between pectin are therefore one of the bases of the texture modifications of tomato purees (Santiago et al., 2017).

Conclusions

The objectives of the work were reached, that were to know what were the properties affected by changes in pre- and post-harvest treatment. This study shows that the viscosity changes are difficult to explain by variations in the structure and composition of fresh fruit tissues, because no relationship between cell size / DMC / Brix enzymatic activity vs viscosity was identified. The variations in viscosity are not related to the differences in the water content in the mash, neither induced by the process nor by the pre-harvest treatments. It is clearly that not the same characteristics are affected when the variation of viscosity comes from the genotype or the process. And we also showed that tomato purees have a behavior different from that of an apple puree with a significant role of the part serum. We propose that the effect of puree rheology was driven by changes in the variables linked to the serum. The difference in rheology after HB and CB treatments is attributed to temperature effects on endogenous pectinolytic enzymes, namely has important role in the final viscosity of the products, which has been shown that higher activity of PME of the cultivar, a higher viscosity is found in the final product. Thus, the activity of pectin-degrading enzymes in response to WD should be analyzed in further details.

Acknowledgements

AA a été soutenu par une subvention du CAPES et du ministère brésilien de l'éducation. Ce travail a également été soutenu par la Société Nationale Interprofessionnelle de la Tomate (SONITO) et la Structure Fédérative de Recherche Tersys.

REFERENCES

- Anthon, G. E. and D. M. Barrett (2008). "Combined enzymatic and colorimetric method for determining the uronic acid and methylester content of pectin: Application to tomato products." Food Chemistry **110**(1): 239-247.
- Barnes, H. A. (2000). A handbook of elementary rheology (2000).
- Barrett, D. M., E. Garcia, et al. (1998). "Textural modification of processing tomatoes." Critical Reviews in Food Science and Nutrition **38**(3): 173-258.
- Beckles, D. M. (2012). "Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit." Postharvest Biology and Technology **63**(1): 129-140.
- Bertin, N. (2005). "Analysis of the tomato fruit growth response to temperature and plant fruit load in relation to cell division, cell expansion and DNA endoreduplication." Annals of Botany **95**(3): 439-447.
- Bertin, N., C. Borel, et al. (2003). "Do genetic make-up and growth manipulation affect tomato fruit size by cell number, or cell size and DNA endoreduplication?" Annals of Botany **92**(3): 415-424.

- Boas, A., D. Page, et al. (2017). "Combined Effects of Irrigation Regime, Genotype, and Harvest Stage Determine Tomato Fruit Quality and Aptitude for Processing into Puree." Frontiers in Plant Science **8**.
- Bohner, J. and F. Bangerth (1988). "EFFECTS OF FRUIT-SET SEQUENCE AND DEFOLIATION ON CELL NUMBER, CELL-SIZE AND HORMONE LEVELS OF TOMATO FRUITS (LYCOPERSICON-ESCULENTUM MILL) WITHIN A TRUSS." Plant Growth Regulation **7**(3): 141-155.
- Bungerkibler, S. and F. Bangerth (1983). "RELATIONSHIP BETWEEN CELL NUMBER, CELL-SIZE AND FRUIT SIZE OF SEEDED FRUITS OF TOMATO (LYCOPERSICON-ESCULENTUM MILL), AND THOSE INDUCED PARTHENOCARPALLY BY THE APPLICATION OF PLANT-GROWTH REGULATORS." Plant Growth Regulation **1**(3): 143-154.
- Diaz, J. V., G. E. Anthon, et al. (2009). "Conformational Changes in Serum Pectins during Industrial Tomato Paste Production." Journal of Agricultural and Food Chemistry **57**(18): 8453-8458.
- Dorais, M., D. L. Ehret, et al. (2008). "Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: from the seed to the consumer." Phytochem. Rev. **7**: 231-250.
- Errington, N., G. A. Tucker, et al. (1998). "Effect of genetic down-regulation of polygalacturonase and pectin esterase activity on rheology and composition of tomato juice." Journal of the Science of Food and Agriculture **76**(4): 515-519.
- Espinosa-Munoz, L., R. Symoneaux, et al. (2012). "The significance of structural properties for the development of innovative apple puree textures." Lwt-Food Science and Technology **49**(2): 221-228.
- Espinosa, L., N. To, et al. (2011). Effect of processing on rheological, structural and sensory properties of apple puree. 11th International Congress on Engineering and Food. G. Saravacos, P. Taoukis, M. Krokida et al. Amsterdam, Elsevier Science Bv. **1**: 513-520.
- Favati, F., S. Lovelli, et al. (2009). "Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling." Scientia Horticulturae **122**(4): 562-571.
- Fishman, M. L., H. K. Chau, et al. (1999). "Characterization of pectin, flash-extracted from orange albedo by microwave heating, under pressure." Carbohydrate Research **323**(1-4): 126-138.
- Goodman, C. L., S. Fawcett, et al. (2002). "Flavor, viscosity, and color analyses of hot and cold break tomato juices." Journal of Food Science **67**(1): 404-408.
- Gross, K. C. (1982). "A RAPID AND SENSITIVE SPECTROPHOTOMETRIC METHOD FOR ASSAYING POLYGALACTURONASE USING 2-CYANOACETAMIDE." Hortscience **17**(6): 933-934.
- Hanson, B. and D. May (2004). "Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability." Agricultural Water Management **68**(1): 1-17.
- Hanson, B. R., R. B. Hutmacher, et al. (2006). "Drip irrigation of tomato and cotton under shallow saline ground water conditions." Irrig. Drain. Sys. **20**: 155-175.
- Leverrier, C., G. Almeida, et al. (2016). "Influence of Particle Size and Concentration on Rheological Behaviour of Reconstituted Apple Purees." Food Biophysics **11**(3): 235-247.
- Leverrier, C., G. Almeida, et al. (2017). "Design of Model Apple Cells Suspensions: Rheological Properties and Impact of the Continuous Phase." Food Biophysics **12**(3): 383-396.
- Mirondo, R. and S. Barringer (2015). "Improvement of Flavor and Viscosity in Hot and Cold Break Tomato Juice and Sauce by Peel Removal." Journal of Food Science **80**(1): S171-S179.

- Moelants, K. R. N., R. Cardinaels, et al. (2014). "Rheology of Concentrated Tomato-Derived Suspensions: Effects of Particle Characteristics." Food and Bioprocess Technology **7**(1): 248-264.
- Moelants, K. R. N., R. Cardinaels, et al. (2014). "A Review on the Relationships between Processing, Food Structure, and Rheological Properties of Plant-Tissue-Based Food Suspensions." Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety **13**(3): 241-260.
- Ribas-Agusti, A., B. Gouble, et al. (2017). "Towards the Use of Biochemical Indicators in the Raw Fruit for Improved Texture of Pasteurized Apricots." Food and Bioprocess Technology **10**(4): 662-673.
- Ripoll, J., L. Urban, et al. (2016). "Water deficit effects on tomato quality depend on fruit developmental stage and genotype." Journal of Plant Physiology **190**: 26-35.
- Sanchez, M. C., C. Valencia, et al. (2002). "Influence of processing on the rheological properties of tomato paste." Journal of the Science of Food and Agriculture **82**(9): 990-997.
- Santiago, J. S. J., Z. J. Kermani, et al. (2017). "The effect of high pressure homogenization and endogenous pectin-related enzymes on tomato puree consistency and serum pectin structure." Innovative Food Science & Emerging Technologies **43**: 35-44.
- Servais, C., R. Jones, et al. (2002). "The influence of particle size distribution on the processing of food." Journal of Food Engineering **51**(3): 201-208.
- Zegbe-Dominguez, J. A., M. H. Behboudian, et al. (2003). "Deficit irrigation and partial rootzone drying maintain fruit dry mass and enhance fruit quality in 'Petopride' processing tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill.)." Scientia Horticulturae **98**(4): 505-510.

5. Conclusion et perspectives

Cette étude s'inscrit dans une perspective de meilleure valorisation de la filière française de tomate d'industrie. Nous avons principalement étudié l'impact du déficit d'irrigation et du génotype sur la qualité du fruit frais et sur celle des purées après transformation. Une question centrale a été de comprendre l'influence de certains paramètres structuraux des tissus du fruit sur les propriétés rhéologiques des purées de tomate afin d'établir des relations et d'identifier des leviers d'action potentiels à l'échelle de la production des fruits et de leur transformation qui permettent de piloter et maîtriser la structure et la texture des purées.

Durant toute notre étude, qui a successivement considéré 1) l'étude de la diversité des productions françaises, 2) divers dispositifs en conditions contrôlées ou semi contrôlées au champ et en serre et 3) des analyses physicochimiques de laboratoire, nous avons identifié des leviers forts de progrès liés à la gestion de l'eau en lien avec la qualité des produits industriels. Les principaux résultats que nous avons obtenus sont :

- Le comportement des variétés est variable entre les deux grandes régions de productions, sans qu'il y ait de limitation hydrique dans les conduites traditionnelles dans le SE et dans le SO. Dans ces conditions, les fruits présentent des différences, principalement sur les teneurs en sucres et acides. D'après les données analysées, la qualité des purées était influencée par le choix variétal, la durée du cycle et le contexte pédoclimatique. En se basant dans ces informations, nous nous sommes placés en conditions de déficit hydrique, nous avons choisi des cultivars contrastés, et nous avons surveillé les stades de maturation puisque la qualité, et en particulier la texture, est très dépendante de la date de récolte.
- Diminuer l'irrigation jusqu'à ne remplacer que 50 % de l'ETP des plantes affecte pas ou très peu le rendement, et en tout cas, ne réduit pas, voire améliore le rendement en matière sèche, ce qui est positif pour l'usine. Nos résultats ont déjà incité certains professionnels à adapter leur conduite de culture, d'autant que les pratiques courantes dans la filière se situent entre 120 et 180% de remplacement de l'ETP, ce qui provoque une sur-irrigation de la culture, entraînant des pertes économiques importantes. Cela nous indique qu'un meilleur suivi de l'ETP au cours du cycle peut

permettre de réduire considérablement les apports d'eau et générer plus de profit pour le producteur. Dans le contexte du changement climatique, de la raréfaction des ressources naturelles (en particulier l'eau) et de la nouvelle législation visant à réduire les effets néfastes de l'activité humaine sur l'environnement, les systèmes de production doivent évoluer vers des systèmes moins intensifs et plus durables. L'eau est le principal facteur limitant pour la production agricole et les pressions exercées sur l'utilisation de cette ressource naturelle vont s'accroître au cours des prochaines décennies.

- La simple conduite de culture sous déficit d'irrigation a fait passer l'efficacité de l'eau (quantité de matière fraîche produite pour 1 m³ d'eau d'irrigation apporté) de 27 à 37 kg.m⁻³. Sur la base de ces résultats, nous pouvons dire qu'une nouvelle évaluation des cultivars est possible, et ouvre des perspectives d'adaptation des cultivars à une utilisation réduite de l'eau dans ce contexte industriel particulier. L'augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau par les plantes cultivées est aujourd'hui nécessaire pour anticiper l'évolution du contexte de production. L'une des principales difficultés réside dans l'élaboration de stratégies efficaces pour définir des idéotypes culturels, en raison notamment de la complexité des mécanismes impliqués dans la réponse des plantes. Nos résultats suggèrent que même dans un contexte contraignant, les systèmes de production ont des marges de manœuvres pour évoluer vers des systèmes moins intensifs et plus durables tout en préservant leur qualité.
- Les fruits conduits sous déficit hydrique ont sensiblement les mêmes compositions que les autres, ne présentant pas de désordre métabolique. En revanche, ils n'ont pas toujours la même réactivité vis-à-vis du procédé. En effet quand ils sont soumis aux mêmes barèmes de cuisson, ils ont tendance à perdre moins de viscosité lorsqu'ils sont transformés en purées sous certaines conditions, ce qui témoigne de la baisse de leur teneur en enzymes pectinolytiques, responsables des modifications de texture des purées, ce que nous oblige à mieux connaître les matières premières pour adapter les procédés. Cela nous amène à conclure qu'il est possible de réaliser des économies d'eau à la fois dans la production de fruits et dans la fabrication de produits transformés, ainsi que dans les exigences de qualité de la matière première qui arrive à l'usine. Par exemple, il a été démontré une valeur plus élevée de matière sèche pour les cultivars Miceno et H1015 lorsque les fruits sont soumis à un traitement en WD, ce

qui est un avantage pour l'industrie. Notre étude a démontré que la réduction des prélèvements d'eau pourrait être facilitée par une meilleure intégration des exigences de fabrication.

- Les résultats montrent également que dans les mêmes gammes de concentration des purées, il y a des valeurs différentes de matière sèche, de solides solubles et de viscosité, ce qui représente une déconnection entre ces trois variables. Dans notre essai, nous avons montré que lorsque ces différences sont induites par le mode de cuisson, c'est principalement la viscosité du sérum (partie liquide de la purée) qui est en jeu. Lorsqu'elles sont induites par l'utilisation d'une variété avec un fort potentiel de viscosité (tomate à Ketchup), ce sont les tailles et formes des particules et leur potentiel d'agrégation qui sont impliqués. Un déficit hydrique améliore le rendement en matière sèche dans le fruit, ce qui est positif pour l'usine. Pour cela, un outil permettant d'anticiper l'importance des variations de texture dans différentes conditions industrielles est important. Cet outil pourrait être un modèle mathématique qui intègre toutes les différentes variables mesurées et leur mode de variation vis-à-vis de la texture. Ce modèle permettrait de prédire le comportement de chaque cultivar qui arrive à l'usine ainsi que les caractéristiques finales du produit généré. Ainsi, cela permettrait de jouer sur plusieurs leviers pour contrôler de façon plus pragmatique les consistances des purées. Aujourd'hui, ce contrôle dans les usines reste très empirique. Cette dimension est importante dans un contexte où l'industrie de la tomate, en Europe tend vers un paiement à la qualité. Actuellement, les outils d'aides à la décision sont principalement orientés vers la qualité du fruit à la récolte et les rendements, mais, à notre connaissance, aucune étude n'intègre la dimension « procédés » et permet de tenir compte de la réactivité de la matrice. L'outil pourrait également, dans une certaine mesure intégrer la valeur nutritionnelle, ou la qualité organoleptique si tant est que des progrès dans le déterminisme de ces valeurs soient faits.

Sur la base des conclusions tirées de cette étude, certaines perspectives peuvent être mises en avant:

- Connaître la maturation optimale d'une variété pour sa transformation, et surtout pouvoir la prédire à l'aide de données climatiques relevées sur la parcelle reste un challenge pour l'agronomie. L'utilisation de capteurs photo multi spectraux

(embarqués sur drones ou statiques) a montré un potentiel fort pour suivre et enregistrer la maturation des fruits.

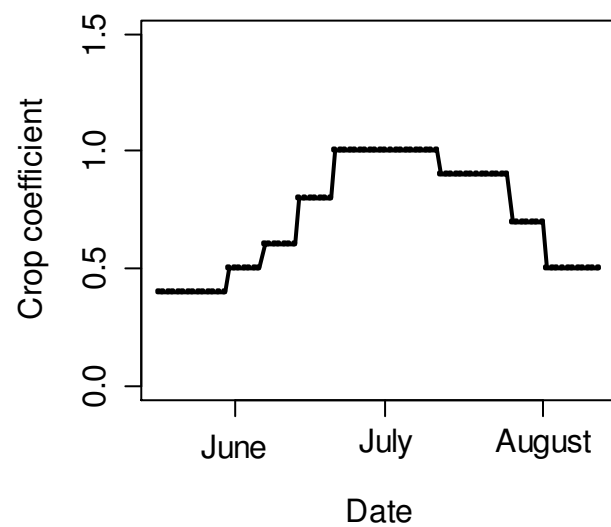
- Une meilleure connaissance de l'ETP et des coefficients culturels ainsi que l'installation de stations météorologiques dans les champs de production fourniront un énorme apport de données et d'informations au producteur en ce qui concerne l'utilisation efficace de l'eau pendant le cycle de la culture. Sur la base de ces informations, le producteur sera en mesure de mieux contrôler les coûts d'utilisation et contrôler davantage la qualité de la matière première qui sera livrée à l'usine.
- Un diagnostic de la réactivité du fruit serait essentiel, ce que nous oblige à mettre au point des tests simples de perte de texture lorsqu'on cuit en condition cold break. La méthode de laboratoire que nous avons utilisée (micro-onde et blender de laboratoire), est une première approche. L'analyse des changements dans les compositions de pectine doivent être poursuivis et connus pour être mieux maîtrisés au cours du processus de traitement industriel pour déboucher sur un modèle global permettant de prédire les caractéristiques qui seront trouvés dans les produits finaux.
- D'autres méthodes d'analyse doivent être prises en compte lors de l'analyse des fruits frais au moment où ils arrivent à l'usine, car l'analyse de Brix effectuée actuellement n'est pas un facteur prépondérant pour savoir réellement quels types de caractéristiques ces fruits peuvent représenter dans l'environnement. le produit final. De nouveaux tests impliquant d'autres paramètres de qualité, tels qu'un dispositif infrarouge permettant de lire rapidement une matière première, peuvent aider considérablement le processus décisionnel de l'industrie.
- La spectroscopie infrarouge, couplée à un modèle pluriannuel est capable, en une seule mesure, de prédire la composition précise des fruits (non seulement le Brix, mais également la teneur en matière sèche et l'acidité titrable). Cette technique a également montré son potentiel pour discriminer des produits suivant leur mode de cuisson et leur origine (variété et lieu de production). Le transfert de cet outil à l'industrie est un enjeu de progrès pour l'agrégation des fruits en entrée usine et le suivi de la qualité des produits manufacturés au cours des procédés. Cet outil permettra d'avoir une meilleure mesure de différents paramètres au fur et à mesure de l'entrée des fruits à

l'usine, ce qui devrait permettre, à terme d'alimenter le modèle et donc d'affiner la connaissance de la matrice tomate pour sa réactivité vis-à-vis du procédé.

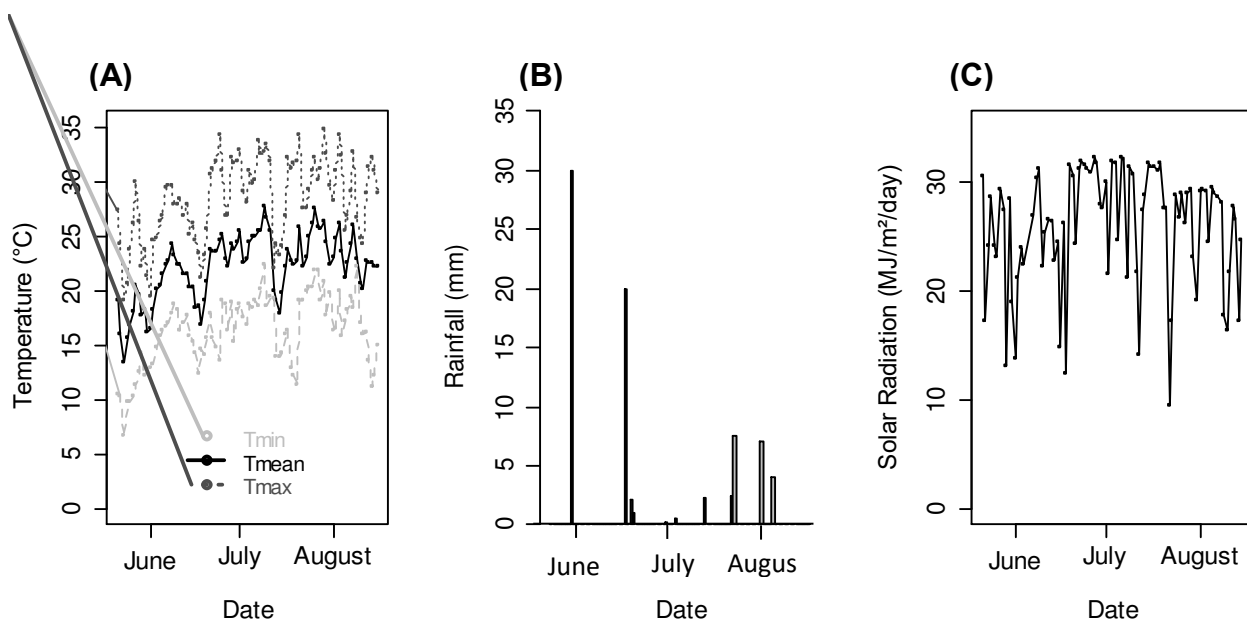
ANNEXES

ANNEXE 1

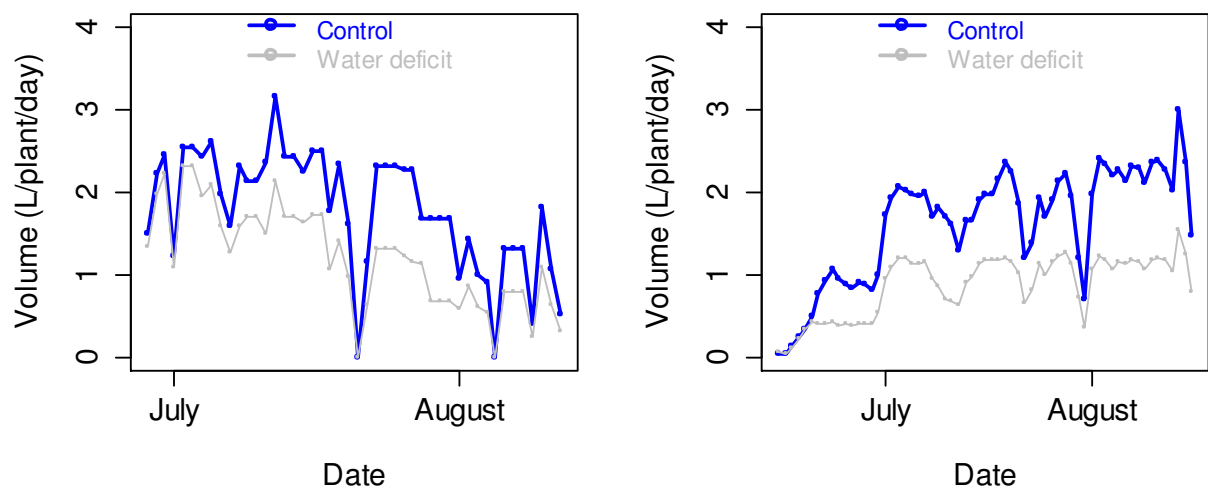
Chapitre 3



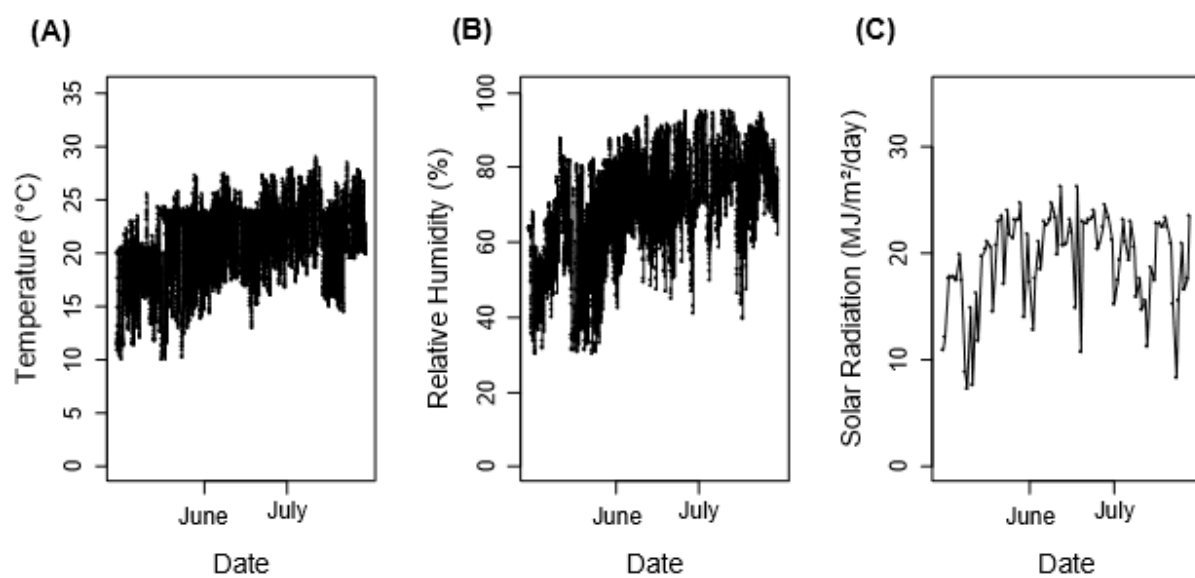
Supplementary Figure 1. Variations of tomato crop coefficient (Kc) during the 2016 season, from June to August.



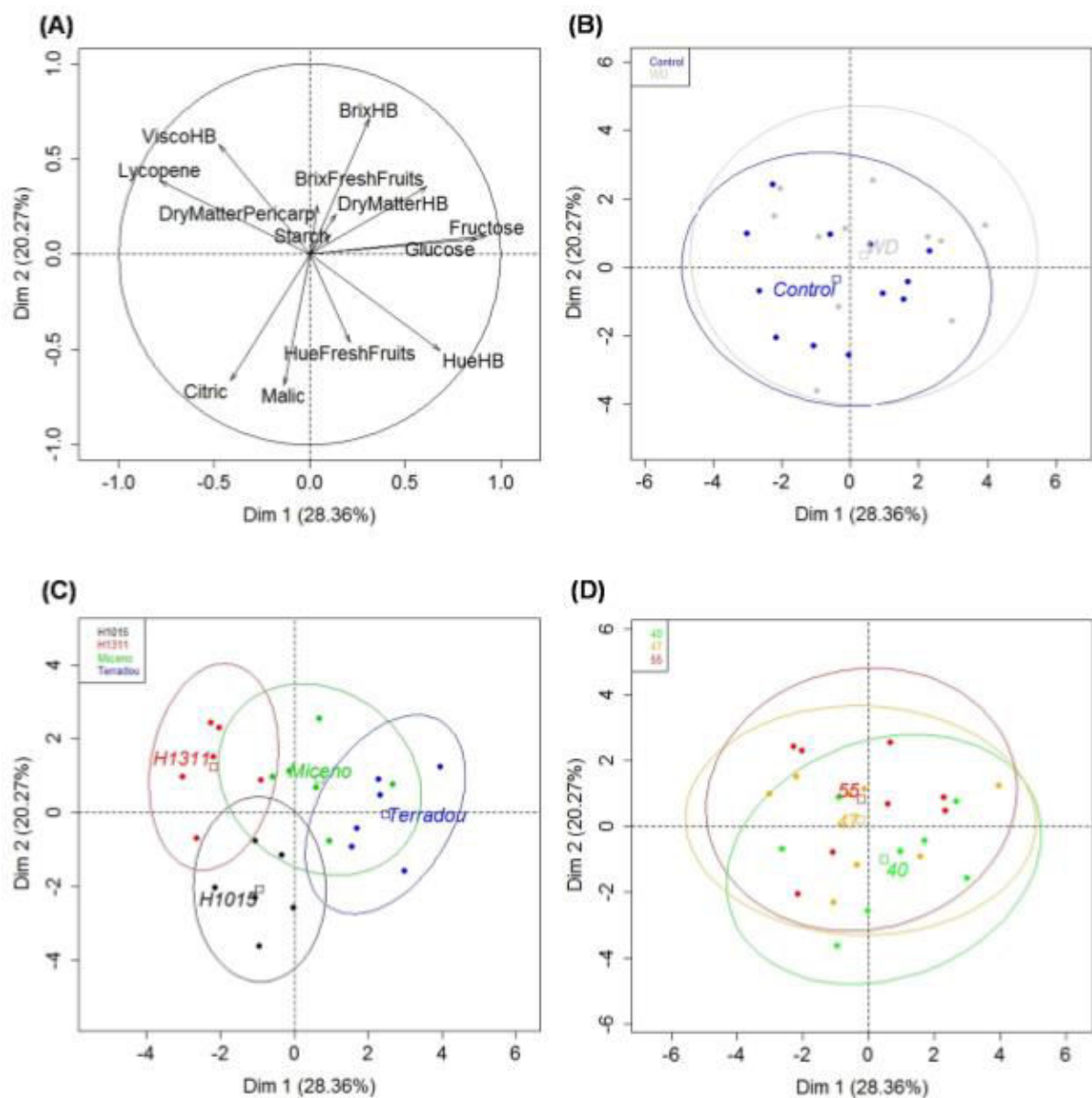
Supplementary Figure 2. A, Daily minimum (Tmin), mean (Tmean), and maximum (Tmax) air temperatures monitored in the open-field. B, Rainfall recorded daily during the time-course of the open-field experiment. C, Daily solar radiation recorded throughout the experiment.



Supplementary Figure 3. Representation of the two irrigation regimes from June to August 2016 in A, the open-field and B, in the glasshouse. The control plants were irrigated in order to meet the evapotranspiration demand (ETP), which corresponded to a volume ranged from 0 to 3 L per plant and per day, throughout the experiments (blue lines). The irrigation was reduced to 60% (field) and 50% (glasshouse) of the ETP for the plants under water deficit (grey line).



Supplementary Figure 4. Variations in temperature (A), and relative humidity (B) monitored every 30 minutes, and solar radiation (C) inside the glasshouse throughout the experiment.



Supplementary Figure 5. PCA results of fruit quality traits (determined on dry weight basis) and puree quality traits in glasshouse according to dimension 1 and 2 (48.63% of the total variance). The proportions of explained variability are indicated for each axis; A: projection of the variables taken into account; B, C, and D : projection of individuals. Each point corresponds to the mean of four replicates. B, Centres of gravity for water treatments, C, Centres of gravity for genotypes and D, Centres of gravity for maturity stages.

1.2 Supplementary Tables

Supplementary Table 1. Outputs of PCA on fruit and puree quality traits in field

Eigenvalues	Dim .1	Dim .2	Dim .3	Dim .4	Dim .5	Dim .6	Dim .7	Dim .8	Dim .9	Dim. 10	Dim. 11	Dim. 12	Dim. 13	Dim. 14	Dim. 15
	4.52	3.55	2.29	1.28	1.01	0.77	0.52	0.35	0.18	0.14	0.11	0.08	0.07	0.05	
Variance	3	9	8	5	7	9	6	2	9	2	4	5	1	3	0.007
% of var	30.1	23.7	15.3	8.56	6.78	5.19	3.50	2.34	1.25	0.94	0.76	0.56	0.47	0.35	
	54	29	21	5	0	3	3	9	7	4	0	6	6	5	0.048
Cumulative	30.1	53.8	69.2	77.7	84.5	89.7	93.2	95.5	96.8	97.7	98.5	99.1	99.5	99.9	100.0
% of Var	54	83	03	68	48	41	45	94	51	96	55	21	97	52	00

Traits (the 10 First)									
	Dim.1	ctr	cos2	Dim.2	ctr	cos2	Dim.3	ctr	cos2
HueFreshFruits	0.626	8.655	0.391	-0.384	4.139	0.147	-0.123	0.655	0.015
DryMatterPericarp	0.035	0.028	0.001	0.163	0.747	0.027	-0.317	4.386	0.101
BrixFreshFruits	0.178	0.704	0.032	0.914	23.479	0.836	0.089	0.346	0.008
Citric	0.196	0.853	0.039	-0.489	6.721	0.239	0.785	26.844	0.617
Malic	-0.241	1.284	0.058	-0.505	7.161	0.255	0.583	14.789	0.340
Glucose	0.528	6.167	0.279	0.265	1.977	0.070	0.728	23.077	0.530
Fructose	0.652	9.399	0.425	0.232	1.515	0.054	0.681	20.164	0.463
Starch	0.600	7.971	0.361	0.122	0.419	0.015	-0.176	1.341	0.031
Lycopene	-0.806	14.347	0.649	0.058	0.094	0.003	0.146	0.932	0.021
HueHB	0.848	15.895	0.719	-0.194	1.053	0.037	-0.320	4.455	0.102

Supplementary Table 2. Outputs of PCA on fruit and puree quality traits in glasshouse

Eigenvalues													
	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6	Dim.7	Dim.8	Dim.9	Dim.10	Dim.11	Dim.12	Dim.13
Variance	3.687	2.635	2.162	1.095	0.837	0.642	0.551	0.480	0.401	0.285	0.129	0.086	0.011
% of var.	28.363	20.271	16.628	8.421	6.435	4.940	4.237	3.692	3.081	2.193	0.989	0.663	0.088
Cumulative	28.363	48.634	65.261	73.682	80.117	85.057	89.294	92.987	96.068	98.261	99.249	99.912	100.000

Traits	(the	10	first)						
	Dim.1	ctr	cos2	Dim.2	ctr	cos2	Dim.3	ctr	cos2
BrixFreshFruits	0.615	10.254	0.378	0.354	4.757	0.125	-	0.169	1.325
BrixHB	0.313	2.657	0.098	0.712	19.245	0.507	-	0.114	0.598
Citric	-	0.413	4.623	0.170	-	0.664	-	0.108	0.537
DryMatterHB	0.136	0.504	0.019	0.212	1.702	0.045	-	0.770	27.445
DryMatterPericarp	0.042	0.049	0.002	0.259	2.544	0.067	-	0.555	14.247
Fructose	-	0.927	23.306	0.859	0.096	0.349	-	0.062	0.175
Glucose	-	0.880	21.005	0.775	0.083	0.259	-	0.118	0.640
HueFreshFruits	-	0.210	1.195	0.044	-	0.463	-	0.695	22.341
HueHB	-	0.684	12.688	0.468	-	0.505	-	0.208	2.009
Lycopene	-	0.787	16.783	0.619	-	0.384	-	0.263	3.198

RESUME

La tomate est le deuxième légume le plus consommé dans le monde et la plus grande partie est consommée sous forme transformée. La tomate d'industrie est typiquement une culture exigeante en eau. La production se situe majoritairement en zone méditerranéenne, confrontée à des périodes de sécheresse de plus en plus fréquentes, et contrainte, dans le contexte de changement climatique, à réduire le prélèvement des ressources en eau pour son agriculture. L'eau est un facteur majeur qui impacte le rendement et la qualité des tomates et il y a donc un lien direct entre l'amont agricole (production), et l'aval industriel (transformation). Bien que des travaux visant à mieux comprendre les liens pré-post-récolte existent, mieux adapter la production face aux contraintes climatiques en évolution reste un challenge pour la filière, et c'est dans ce cadre que se situe ce travail de thèse. Dans ce contexte, l'objectif de la thèse était d'analyser au cours de la chaîne de production et de transformation, l'impact de facteurs agronomiques et technologiques sur la qualité des purées de tomate, et d'identifier au cours de cette chaîne des leviers pour améliorer la qualité gustative, nutritionnelle et environnementale du produit fini. Etant donné cet objectif, ce travail a été construit pour analyser 1) quels sont les principaux facteurs agronomiques et technologiques responsables de la variabilité de la qualité des fruits frais et transformés au sein des zones de production françaises de tomates d'industrie ; 2) quels sont les effets de la variété, des apports en eau, du stade de développement, et du procédé sur la qualité des fruits frais et leur aptitude à la transformation ; 3) Quels sont les processus responsables des modifications des propriétés rhéologiques des purées. Nos résultats ont montré des différences de qualité des fruits et des produits finis entre les deux grandes régions de production françaises de tomates d'industrie en 2015. Le choix du cultivar et des pratiques, comme la densité de plantation ou la durée du cycle de production, étaient responsables de ces différences. En l'absence de déficit hydrique, les différences climatiques (amplitudes thermiques et cumul de précipitations) n'ont pas semblé être un facteur majeur de variation. L'exploration des liens pré-post-récoltes a ensuite confirmé que les critères à la récolte couramment utilisés (rendement et °Brix) renseignaient peu sur l'aptitude à la transformation des tomates. De plus, nous avons montré que diminuer l'irrigation jusqu'à ne remplacer que 60 % de l'évapotranspiration des plantes n'a que très peu affecté le rendement en fruit frais, et a augmenté le rendement en matière sèche jusqu'à +27%, ce qui est positif pour l'usine. L'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation a ainsi été augmentée d'en moyenne 20% sur tout le cycle. La composition de la matière sèche des fruits à la récolte n'a pas été significativement affectée par le déficit hydrique en 2016. En revanche, lorsque ces mêmes fruits ont été transformés selon des procédés industriels, le déficit hydrique a amélioré la viscosité de la purée sans affecter sa couleur. Il a également limité la perte de viscosité obtenue lorsque le procédé possède une phase de macération à basse température (Cold Break (CB)). Ce résultat a suggéré que la réactivité enzymatique des tissus a été réduite. En revanche, un stress hydrique plus drastique en 2017 a induit des fortes différences de teneur en matière sèche. Comme les purées sont concentrées à la même teneur en SSC, alors les purées WD, où moins d'eau a été éliminée, montre une viscosité plus faible. La maîtrise de la matière sèche n'est pas le seul facteur affectant la rhéologie des purées. C'est un phénomène complexe dépendant de plusieurs facteurs. En effet, lorsque les différences de viscosité sont induites par le mode de cuisson, c'est principalement la viscosité du sérum (partie liquide de la purée) qui est en jeu. Lorsque les variations de viscosité sont induites par l'utilisation d'une variété avec un fort potentiel de viscosité (tomate à Ketchup), ce sont les tailles et formes des particules et leur potentiel d'agrégation qui sont impliqués. L'élaboration de ce schéma global de la viscosité et la réalisation d'essais à différentes échelles (laboratoire, usine) permettront d'adapter les procédés en fonction de la qualité des fruits entrant à l'usine, pour un pilotage de la qualité du champ à l'assiette.

ABSTRACT

Tomato is the second most consumed vegetable in the world and most of it is consumed in processed form. The industry tomato is typically a demanding crop in water. Production is mainly in the Mediterranean zone, facing increasingly frequent periods of drought, and constrained, in the context of climate change, to reduce the withdrawal of water resources for its agriculture. Water is a major factor affecting the yield and quality of tomatoes, so there is a direct link between upstream agriculture (production) and industrial downstream (processing). Although works to better understand pre-post-harvest links exists, better adapting production to changing climatic constraints remains a challenge for the industry, and it is in this context that this thesis work is located. In this context, the objective of the thesis was to analyze during the chain of production and processing, the impact of agronomic and technological factors on the quality of tomato purées, and to identify during this chain levers to improve the taste, nutritional and environmental of the finished product. Given this objective, this work was constructed to analyze 1) what are the main agronomic and technological factors responsible for the variability of the quality of fresh and processed fruit within the French production areas of industrial tomatoes; 2) what are the effects of variety, water supply, stage of development and process on the quality of fresh fruits and their suitability for processing; 3) what are the processes responsible for the changes in the rheological properties of the purees. Our results showed differences in the quality of fruit and processed products between the two major French industrial tomato production regions in 2015. The choice of cultivar and practices, such as planting density or production cycle time, were responsible for these differences. In the absence of a water deficit, climatic differences (thermal amplitudes and cumulative precipitation) did not seem to be a major factor of variation. Exploration of pre-post-harvest links then confirmed that the commonly used harvest criteria (yield and °Brix) provided little information on the processing ability of tomatoes. In addition, we have shown that decreasing irrigation to replace only 60% of plant evapotranspiration has had little effect on the yield of fresh fruit, and has increased dry matter yield to + 27%, which is positive for the plant. The efficiency of the use of irrigation water has thus been increased by an average of 20% over the entire cycle. The composition of the dry matter of the fruits at harvest was not significantly affected by the water deficit in 2016. On the other hand, when these same fruits were transformed according to industrial processes, the water deficit improved the viscosity of the purees without affecting its color. It also limited the loss of viscosity obtained when the process has a low temperature maceration phase (Cold Break (CB)). This result suggested that the enzymatic reactivity of the tissues was reduced. On the other hand, more drastic water stress in 2017 led to significant differences in dry matter content. As the purees are concentrated to the same SSC content, then the WD purees, which less water has been removed, shows a lower viscosity. The mastery of the dry matter is not the only factor affecting the rheology of purees. It is a complex phenomenon depending on several factors. Indeed, when the differences in viscosity are induced by the cooking method, it is mainly the viscosity of the serum (liquid part of the mash) that is involved. When the viscosity variations are induced by the use of Variety with a high potential for viscosity (Ketchup tomato), it is the size and shape of the particles and their aggregation potential that are involved. The development of this overall viscosity scheme and the realization of tests at different scales (laboratory, plant) will allow the adaptation of the processes according to the quality of the fruits coming to the factory, for a control of the quality of the field to the plate.

