



HAL
open science

Quels impacts des facteurs agronomiques et technologiques sur les déterminants biologiques de la texture des purées de tomates ? : Focus sur les variétés, la réduction des intrants au champ et l'itinéraire technologique à l'usine

Miarka Sinkora

► To cite this version:

Miarka Sinkora. Quels impacts des facteurs agronomiques et technologiques sur les déterminants biologiques de la texture des purées de tomates ? : Focus sur les variétés, la réduction des intrants au champ et l'itinéraire technologique à l'usine. Sciences agricoles. Université d'Avignon, 2022. Français. <NNT : 2022AVIG0608>. <tel-04097131>

HAL Id: tel-04097131

<https://theses.hal.science/tel-04097131v1>

Submitted on 15 May 2023

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.



HAL Authorization



THÈSE DE DOCTORAT D'AVIGNON UNIVERSITÉ

École Doctorale 536
Sciences et agrosociétés

Mention de doctorat :
Sciences agronomiques

Laboratoires :
INRAE Avignon, PSH et SQPOV

Présentée par
Miarka Sinkora

Quels impacts des facteurs agronomiques et technologiques sur les déterminants biologiques de la texture des purées de tomates ?

Focus sur les variétés, la réduction des intrants au
champ et l'itinéraire technologique à l'usine

Soutenue publiquement le 13/12/2022 devant le jury composé de :

Marc LAHAYE	Directeur de recherche, INRAE Nantes	Rapporteur
Mathieu LECHAUDEL	Chercheur, Cirad Guadeloupe	Rapporteur
Florence CHARLES	Enseignante chercheuse, Avignon Université	Examinatrice
Layal DAHDOUH	Chercheuse, Cirad La Réunion	Examinatrice
Cassandre LEVERRIER	Maître de conférence, AgroParisTech	Examinatrice
Nadia BERTIN	Directrice de recherches, INRAE Avignon	Directrice de thèse
David PAGE	Chargé de recherche, INRAE Avignon	Co-directeur de thèse
Anne-Laure FANCIULLINO	Chargée de recherche, INRAE Angers	Co-directrice de thèse



THÈSE DE DOCTORAT D'AVIGNON UNIVERSITÉ

École Doctorale 536
Sciences et agrosociétés

Mention de doctorat :
Sciences agronomiques

Laboratoires :
INRAE Avignon, PSH et SQPOV

Présentée par
Miarka Sinkora

Quels impacts des facteurs agronomiques et technologiques sur les déterminants biologiques de la texture des purées de tomates ?

Focus sur les variétés, la réduction des intrants au
champ et l'itinéraire technologique à l'usine

Soutenue publiquement le 13/12/2022 devant le jury composé de :

Marc LAHAYE	Directeur de recherche, INRAE Nantes	Rapporteur
Mathieu LECHAUDEL	Chercheur, Cirad Guadeloupe	Rapporteur
Florence CHARLES	Enseignante chercheuse, Avignon Université	Examinatrice
Loyal DAHDOUH	Chercheuse, Cirad La Réunion	Examinatrice
Cassandre LEVERRIER	Maître de conférence, AgroParisTech	Examinatrice
Nadia BERTIN	Directrice de recherches, INRAE Avignon	Directrice de thèse
David PAGE	Chargé de recherche, INRAE Avignon	Co-directeur de thèse
Anne-Laure FANCIULLINO	Chargée de recherche, INRAE Angers	Co-directrice de thèse

Remerciements

Je tiens à remercier mes encadrants, Nadia, David et Anne-Laure, pour m'avoir fait confiance en me proposant de travailler sur ce projet, pour leurs conseils et leur soutien tout au long de ces trois années, et pour m'avoir guidée pour donner du sens à ces travaux. Je remercie aussi les partenaires du projet Tom'Ability : Robert Giovinazzo et Lucas Lanoë pour leur collaboration et le travail de culture et récolte chaque été, François Zuber pour la gestion de la transformation des tomates. Merci aux membres du comité de pilotage, Emmanuel Geoffriau et Cassandre Leverrier pour les riches échanges et conseils au long de la thèse. Plus largement, je remercie les membres des unités SQPOV et PSH pour les trois années passées dans les laboratoires. Car ce projet est interdisciplinaire, depuis la culture du plant de tomate jusqu'à la qualité de la purée, il s'est construit grâce à l'ensemble d'entre vous, chacun apportant son expertise et son aide sur les différents volets du projet. Je tiens aussi à remercier les enseignants et chercheurs rencontrés lors de mes études, en particulier Daniel Tome, Fabrice Davrieux et Lidwine Grosmaire, qui m'ont donné l'envie de réaliser un doctorat, ainsi que ma famille pour son soutien. Enfin, je remercie les membres du jury pour le temps consacré à la lecture de ces travaux.

Sommaire

Sommaire	3
Résumé.....	7
Publications et communications scientifiques	9
Chapitre 1 Introduction et contexte général.....	10
I. La filière tomate d'industrie	10
II. Le changement climatique	12
III. Les ressources et leur utilisation par le secteur agricole	14
1. Les ressources en eau.....	14
2. Les ressources en engrais.....	16
3. Les besoins en eau de la tomate d'industrie.....	18
4. Les besoins en azote de la tomate d'industrie	18
IV. La purée de tomate	20
V. Les enjeux de la filière tomate d'industrie	22
VI. Le projet Tom'Ability	22
1. Présentation et objectifs	22
2. Cadre de la thèse et collaborations au sein du projet TomAbilityII	23
VII. Objectifs de la thèse	24
Chapitre 2 Etat de l'art	25
I. Le modèle d'étude : la tomate d'industrie.....	25
1. La plante	25
2. Le fruit de tomate.....	28
1. Structure.....	28
2. Composition	28
3. La paroi végétale	31
4. Le développement et le mûrissement du fruit.....	34
3. Le déficit hydrique.....	39
4. Le déficit en azote	42
II. La purée.....	43
1. Les procédés de transformation	43
2. Composition	43
3. Structure.....	43
4. Attributs sensoriels.....	46
5. Propriétés texturales	48

1.	Le consistomètre de Bostwick.....	48
2.	Le rhéomètre.....	48
3.	Propriétés rhéologiques des purées de tomate.....	48
III.	La qualité texturale des purées, un continuum du champ à la conserve.....	52
	Chapitre 3 Démarche et dispositif expérimental	53
	Chapitre 4 Tomato puree quality under fluctuating environment: from field to can.....	57
I.	Introduction.....	60
II.	Materials and methods	61
1.	Plant materials and crop management in the field.....	61
2.	Range of climatic conditions and water availability over the five-year trial.....	65
3.	Fruit harvest	65
4.	Processing of tomato fruits into purees.....	66
5.	Biochemical traits of fruits and purees	66
6.	Enzyme extraction and assays on fruits	66
7.	Viscosity of CB and HB purees.....	67
8.	Data analysis.....	67
III.	Results and discussion.....	67
1.	Effects of water and nitrogen supply reduction on WUE in 2019, 2020 and 2021.....	67
2.	Effects of interactions between water supply and cultivars on yield and water use efficiency over the five-year trial.....	69
3.	Variations in fruit and puree quality over the five-year trial	74
IV.	Conclusion	79
	Chapitre 5 The variety and the processing method modify the viscosity of tomato puree by acting on different structural and biochemical traits	81
I.	Introduction.....	84
II.	Material and methods.....	86
1.	Plant material and fruit harvest	86
2.	Fruit processing into puree	87
3.	Sensorial analysis (napping)	87
4.	Rheological measurements.....	87
5.	Pulp to serum repartition	88
6.	Particle-size repartition of insoluble fraction and microscopy	89
7.	Biochemical traits.....	89
III.	Results	91
1.	Rheological parameters of purees obtained from different cultivars /processes /nitrogen supplies.....	91
2.	Sensorial analysis.....	93

3. Links between variations in puree viscosity and variations in structural and biochemical parameters	93
4. Composition of alcohol insoluble solids and conformation of soluble pectins.....	94
5. Particles size distribution and microscope structure observation depending on cultivar and process	95
IV. Discussion and conclusion.....	98
Chapitre 6 Liens entre les structures et compositions du fruit et de la purée sous l'effet de la contrainte hydrique.....	103
I. Introduction.....	104
II. Material and method	104
1. Plant material	104
2. Glasshouse experiment	105
3. Physiological and phenological measurements	105
4. Mass, composition and cell structure of the pericarp during fruit development.....	107
5. Harvest of fruit at two ripening stages and processing into puree.....	108
6. Statistical analysis.....	108
III. Results and discussion.....	109
1. Effect of water deficit on the yield components.....	109
2. Impact of water deficit on fruit composition and structure during the developmental and maturation process	111
3. Puree quality traits as a function of cultivar, ripening stage, irrigation treatment and process	115
Chapitre 7 Discussion	119
Chapitre 8 Conclusion.....	126
References bibliographiques	128
Annexes du chapitre IV.....	I
Annexes du chapitre V.....	IX
Annexes du chapitre VI.....	XVI

Résumé

La tomate est un des fruits les plus consommés au monde, reconnu pour ses qualités nutritionnelles, et en particulier sa forte teneur en caroténoïdes. Le changement climatique et les sécheresses qu'il engendre amènent à repenser les méthodes de production, en diminuant les intrants. Dans le cas de la tomate d'industrie, destinée à la transformation, une approche intégrée depuis le champ jusqu'à la purée est nécessaire pour définir les effets des conduites à bas intrants sur les fruits et les purées de tomate, mais aussi leur interaction avec le procédé de transformation et la variété. Nous avons montré que la diminution de l'irrigation, et dans une moindre mesure de l'azote, modifient peu les caractéristiques biochimiques du fruit, augmentent la viscosité des purées et augmentent l'efficacité de l'eau des cultures. Ces données sont prometteuses pour diminuer la consommation d'eau mais soulignent aussi l'importance de maîtriser le déficit en particulier en cas de canicule. Un déficit modéré, jusqu'à 70% des besoins en eau semble possible. La viscosité des purées est avant tout modifiable par le choix variétal et par le procédé de transformation. Nous avons montré que la variété et le procédé modifient la viscosité par des mécanismes différents et que la quantité, la nature et la conformation des pectines jouent un rôle majeur dans la viscosité des purées. De plus nous avons mis en évidence des phénomènes d'agglomération de particules pouvant participer à la viscosité. Enfin, nos travaux ouvrent des perspectives sur le lien entre la structure du fruit et la structure et la viscosité des purées, et sur la manière dont le déficit hydrique peut modifier ce lien.

Publications et communications scientifiques

Article soumis

Sinkora M., Fanciullino A-L., Page D., Giovinazzo R., Lanoë L., Vilas Boas A., Bertin N. (2022). Tomato puree quality under fluctuating environment: from field to can. *Agronomy for sustainable development*.

Article en cours

Sinkora M., Fanciullino A-L., Bertin N., Giovinazzo R., Zuber F., Leca A., Rolland-Sabate A., Page D. (2022). The variety and the processing method modify the viscosity of tomato puree by acting on different structural and biochemical traits. *Journal visé: Food Chemistry*.

Posters

Sinkora M., Lanoë L., Giovinazzo R., Zuber F., Fanciullino A-L., Page D., Bertin N. (2022). Reducing water input on industrial tomatoes without affecting yield and fruit quality-A multi-annual study. 31st international horticultural congress, Angers (14-20 août 2022).

Sinkora M., Fanciullino A-L., Page D., Giovinazzo R., Lanoë L., Vilas Boas A., Bertin N. (2020). Impact of input reduction on yield and puree texture in tomato. Third symposium on Fruit and Vegetable Processing, Avignon (24-25 novembre 2020).

Communications orales

Page D., Sinkora M., Lanoë L., Giovinazzo R., Zuber F., Fanciullino A-L., Bertin N. (2022). Modifying the texture of tomato purees through variety selection or processing methods do not affect the same physical parameters and rheological mechanisms. 31st international horticultural congress, Angers (14-20 août 2022). "Young minds award" de la meilleure communication orale au symposium sur les approches intégratives pour la qualité des productions de fruits et légumes.

Sinkora M., Leca A., Fanciullino A-L., Bertin N., Page D. (2021). The measure of rheology highlights the role of agricultural practices on the control of textural quality on industrial tomato purees. Journées des jeunes rhéologues: « rheology and food structuring and destructuring », webinar (18 mars).

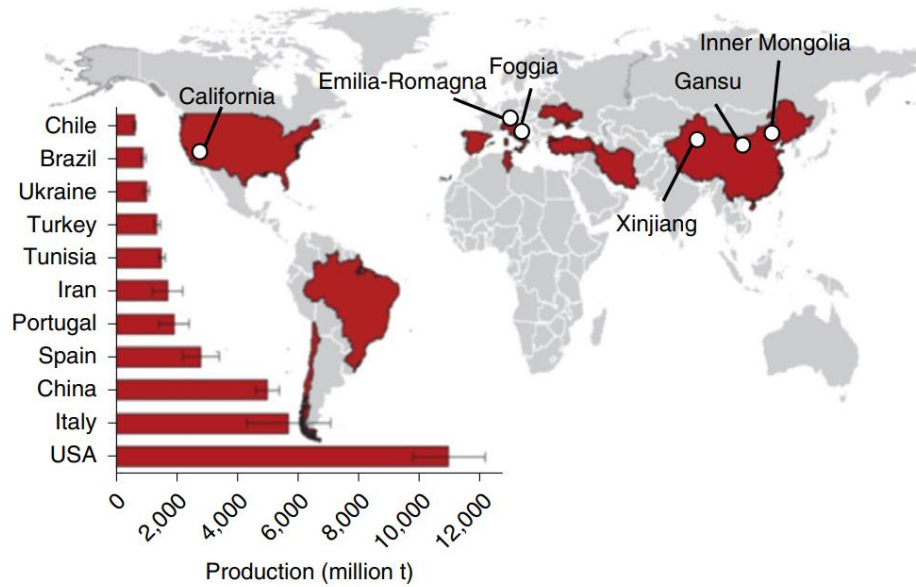
Chapitre 1 Introduction et contexte général

I. La filière tomate d'industrie

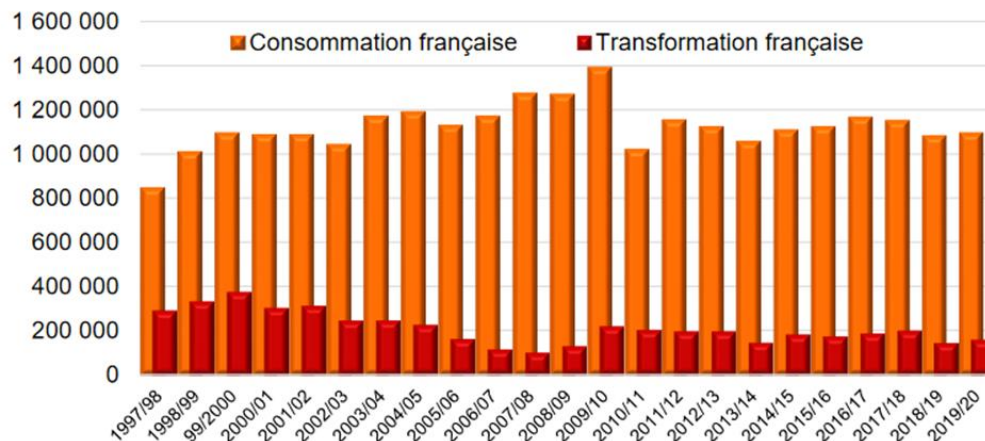
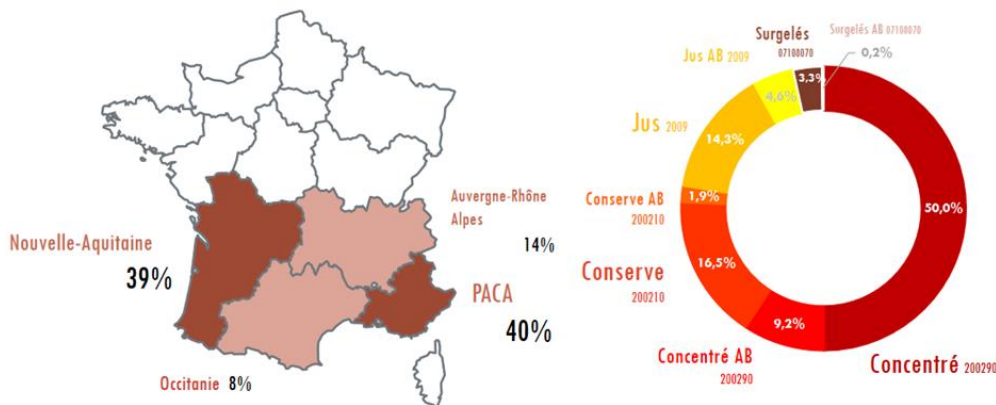
La tomate est un des fruits les plus consommés au monde. Environ un quart de la consommation se fait sous forme transformée. La transformation de tomate d'industrie est estimée à 40 millions de tonnes par an. Les principaux pays producteurs sont la Chine avec plus de 27 millions de tonnes de tomates transformées, les Etats-Unis avec plus de 10 millions de tonnes et l'Italie avec 5 millions de tonnes (Chapitre 1-Figure 1) (Tomato News, 2021a). La France est un moindre producteur, avec une prévision de 165 000 tonnes pour 2021, sur un total de 2220 ha (WPTC, 2021). Elle est cependant classée parmi les 20 plus gros importateurs mondiaux de purée de tomate, avec plus de 16000mT de purée importées par an, auxquelles s'ajoutent d'autres produits transformés tels que les tomates en boîte ou les sauces tomates. La France couvre actuellement en moyenne 13% de sa consommation et importe majoritairement des produits d'Italie et d'Espagne. Ce taux de couverture est en baisse puisqu'il était de 35% en 2000 (Chapitre 1-Figure 2).

La production française de tomate d'industrie est majoritairement localisée en région PACA et Nouvelle Aquitaine (Chapitre 1-Figure 2). La production est saisonnière, avec une culture au printemps et en été, pour une récolte et transformation en fin d'été ou début d'automne. Les fruits sont transformés dans les 24 à 48 heures suivant la récolte, à proximité du bassin de production et l'intégralité de la production est transformée en quelques semaines. Le produit majoritairement fabriqué est le concentré de tomate. En 2019 ce dernier représente plus de 80% de la transformation avec 127 360 tonnes selon l'interprofession de la tomate d'industrie (SONITO, 2019). Les rendements sont aux alentours de 75 tonnes ha⁻¹ en agriculture conventionnelle, et de 50 tonnes ha⁻¹ en agriculture biologique. Cette dernière représente 17% de la production en 2019-2020 et est en plein développement (+13% de la surface nationale en 5 ans).

La tomate a de nombreuses qualités nutritionnelles. Elle est la première source alimentaire de lycopène, est riche en vitamines A et C, ainsi qu'en potassium (Burton-Freeman and Reimers, 2011). La consommation de tomates ou de lycopène est corrélée à la diminution du risque de certains cancers (Giovannucci et al., 2002) et maladies cardiovasculaires (Cheng et al., 2019). La tomate présente aussi des propriétés anti-inflammatoires par la présence d'aglycone-polyphénols (Abbasi-Parizad et al., 2020). De plus, les produits transformés telles que les purées présentent une plus grande bioaccessibilité du lycopène (Page et al., 2012; Thakur et al., 2020).



Chapitre 1-Figure 1 : Principales zones de production de la tomate d’industrie et leur production annuelle (Cammarano et al., 2022).



Chapitre 1-Figure 2 : Répartition des surfaces de production de tomate d’industrie par région en France, répartition des types de transformation (pourcentage des tonnes produites) et évolution du marché français des dérivés de tomates (tonnes d’équivalent de matière première) de 1997 à 2020. (France AgriMer, 2020) d’après les données de la SONITO.

II. Le changement climatique

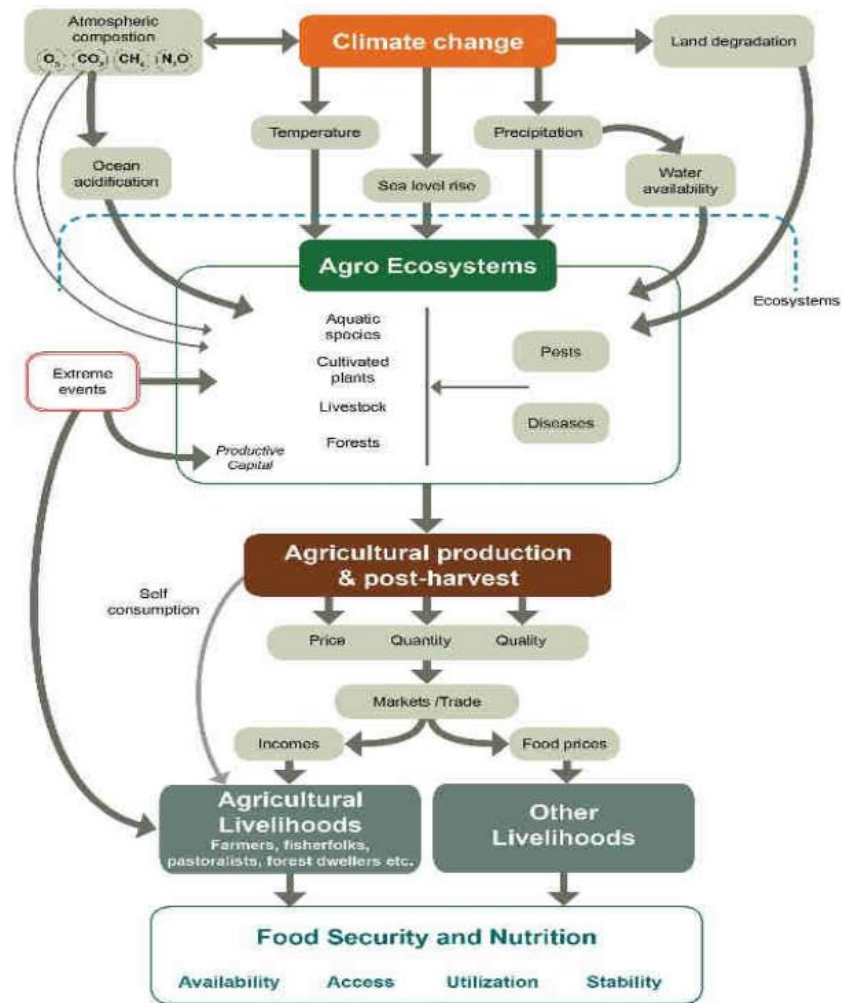
Un changement climatique se produit à l'échelle mondiale depuis plusieurs décennies, et les activités humaines en sont indéniablement la cause (Rockström et al., 2009). Le panel intergouvernemental sur le changement climatique prédit une augmentation globale des températures, de 1.5°C à l'échelle mondiale, avec des effets néfastes sur les rendements agricoles et la sécurité alimentaire (Mbow et al., 2019). Cette diminution de la production agricole menace la sécurité alimentaire, en empêchant l'autosuffisance alimentaire des producteurs d'une part, et en diminuant la disponibilité des denrées sur les marchés d'autre part. A plus large échelle, outre la disponibilité des produits, leur accessibilité, utilisation et stabilité sont aussi menacées (Chapitre 1-Figure 3).

Le rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution climatique publié en 2022 souligne une augmentation des effets du changement climatique sur les pénuries d'eau et les productions agricoles (IPCC et al., 2022). Ces effets sont très variables selon les zones géographiques, et la méditerranée est négativement impactée (Chapitre 1-Figure 4).

La Méditerranée est un des « hot spot » du changement climatique, avec de fortes modifications des précipitations (Cook et al., 2018; Giorgi, 2006). Le climat méditerranéen se caractérise par des précipitations en hiver et des sécheresses estivales. Le remplissage des nappes phréatiques durant l'hiver assure donc la ressource en eau de l'été suivant. Le changement climatique entraîne une augmentation des épisodes de sécheresse, dans une zone où la gestion des ressources en eau est déjà primordiale. Dix des hivers les plus secs entre 1902 et 2010 ont eu lieu après 1990 (Hoerling et al., 2011).

La sécheresse est une anomalie temporaire par rapport aux caractéristiques d'un climat donné sur le long terme (Mishra and Singh, 2010). Elle est classifiée selon quatre catégories :

- La sécheresse météorologique, liée à un déficit prolongé de précipitations par rapport au climat considéré. Cette sécheresse peut être évaluée à l'aide de l'index de précipitation standardisé ou encore la demande évaporatoire atmosphérique.
- La sécheresse hydrologique, liée à des ressources en eau de surface et souterraines temporairement insuffisantes pour un système donné de gestion de la ressource en eau. Elle est évaluée à partir de données de débit des cours d'eau.
- La sécheresse agricole, liée à une diminution temporaire de l'humidité du sol entraînant une diminution des récoltes.
- La sécheresse socio-économique, liée à un déficit en eau par rapport à la demande en eau d'un bien économique.



Chapitre 1-Figure 3 : Schéma des effets du changement climatique sur la production agricole et la sécurité alimentaire (FAO, 2015)

Impacts on water scarcity and food production

Human systems	Impacts on water scarcity and food production				Confidence in attribution to climate change
	Water scarcity	Agriculture/crop production	Animal and livestock health and productivity	Fisheries yields and aquaculture production	
Global	±	-	○	-	High or very high
Africa	-	-	-	-	Medium
Asia	±	±	-	-	Low
Australasia	±	-	±	-	Evidence limited, insufficient
Central and South America	±	-	±	-	na
Europe	±	±	-	±	
North America	±	±	-	±	
Small Islands	-	-	-	-	
Arctic	±	±	-	-	
Cities by the sea	○	○	○	-	
Mediterranean region	-	-	-	-	
Mountain regions	±	±	-	○	

Impacts to human systems in panel (b)

- Increasing adverse impacts
- ± Increasing adverse and positive impacts

Chapitre 1-Figure 4 : Effets du changement climatique sur la pénurie d'eau et la production alimentaire selon les zones géographiques. Adapté du rapport 2022 du GIEC (IPCC et al., 2022).

L'ensemble de ces catégories est impacté par le changement climatique en Méditerranée. De nombreux scénarios s'accordent sur une augmentation future des épisodes de sécheresse, avec de fortes disparités géographiques (Tramblay et al., 2020). Une étude prédit par exemple une réduction moyenne des précipitations de 12 %, avec des variations régionales de 1 à 38% d'ici à la fin du XXIème siècle (Polade et al., 2017). Les épisodes de sécheresse pourraient être 5 à 10 fois plus fréquents que lors des cinquante dernières années (Naumann et al., 2018), avec une augmentation des jours de sécheresse plutôt qu'une modification nette du volume des précipitations, et une augmentation de la superficie des zones de climat euro-méditerranéen et de climat aride.

Une modélisation des effets du changement climatique sur les températures en zone méditerranéenne conclut que durant le printemps et l'été, périodes de culture de la tomate, les températures augmenteraient respectivement de 0.37 à 1.20°C et de 1.50 à 1.80 °C en France (Chapitre 1-Figure 5), s'accompagnant d'une augmentation de l'évapotranspiration de référence, et d'une diminution des précipitations (Saadi et al., 2014).

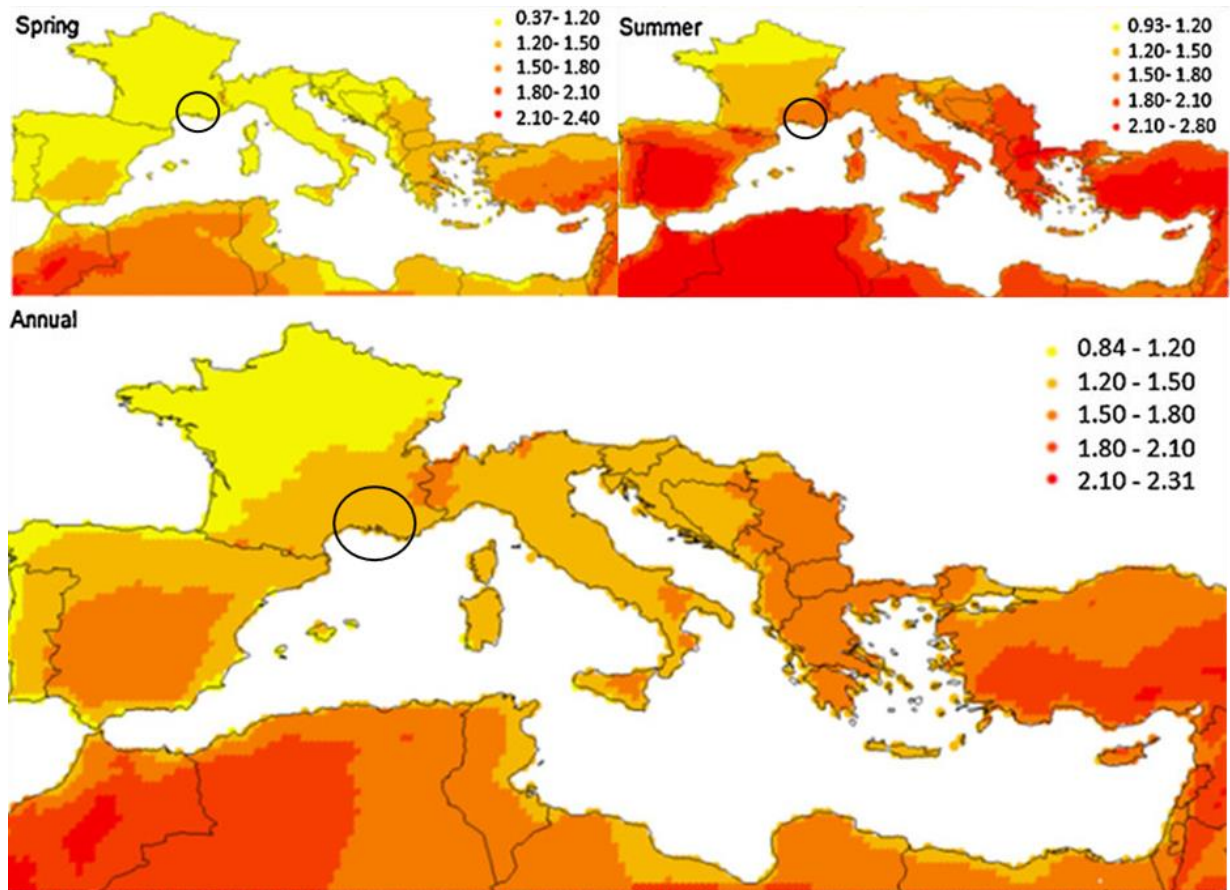
La température optimale de croissance de la tomate d'industrie se situe entre 22°C et 28°C au stade végétatif, et entre 26°C et 28°C lors de la fructification (Boote et al., 2012). L'augmentation des températures prédite pour 2050 engendrerait une diminution des rendements de 6% à l'échelle mondiale, et en particulier une diminution plus grande en Californie et en Méditerranée où les températures estivales avoisinent déjà la température limite de 28°C (Cammarano et al., 2022) . La hausse des températures pourrait réduire la durée de développement des plantes et avancer la date de récolte de 2 à 3 semaines en Californie, par rapport aux conditions actuelles (Pathak and Stoddard, 2018).

Le secteur agricole est victime du changement climatique, mais participe aussi à ce dernier. Il est consommateur de ressources en eau, producteur de gaz à effets de serre et à l'origine de pollutions par l'emploi d'engrais et pesticides. Depuis 1960, l'utilisation d'engrais azotés a été multipliée par 8 et l'utilisation des ressources en eau pour l'agriculture par 2. Les systèmes alimentaires sont responsables de 21% à 37% des émissions de gaz à effet de serre (Mbow et al., 2019).

III. Les ressources et leur utilisation par le secteur agricole

1. Les ressources en eau

Le volume d'eau douce approprié par l'homme pour sa consommation ou pollué par ses activités est nommé l'empreinte en eau (Hoekstra, 2011). Environ 70% à 90% des ressources mondiales d'eau douce est dédié à l'agriculture selon les sources et méthodes de calcul, et 40% dans les pays de l'OCDE (FAO, 2017; Hoekstra and Mekonnen, 2012; Organisation for Economic Co-operation and Development, 2010). Entre 1996 et 2005, l'empreinte en eau annuelle mondiale était de plus de 9000 Gm³ (Hoekstra and Mekonnen, 2012). Cette eau est divisée en eau verte (70 à 80%), bleue (10 à 15%) et grise (10 à 15%).



Chapitre 1-Figure 5 : Représentation des différences entre les températures (°C) prédites pour 2050 et celles observées en 2000, au printemps, en été et sur l'année. Le dégradé de couleurs traduit les gammes d'augmentation de la température par rapport à l'an 2000, en degré Celsius. Les cercles noirs représentent la zone de culture considérée dans le projet Tom'Ability. Adapté de (Saadi et al., 2014).

L'empreinte en eau varie fortement selon les régions du monde, et la France fait partie des pays à forte empreinte tout comme le reste de l'Europe, l'Asie et l'Amérique du Nord (Chapitre 1-Figure 6). L'empreinte en eau de la France est 30 % supérieure à la moyenne mondiale (Ercin et al., 2012) et la production agricole représente 82% de cette empreinte (Chapitre 1-Figure 7). Les fruits et noix en particulier, dont fait partie la tomate d'industrie, correspondent à 6%, une proportion faible mais beaucoup de ces fruits sont irrigués. La proportion de leur empreinte en eau bleu est donc importante. En France 5.8% de la surface agricole utile était irriguée en 2010, dont les cultures de tomate d'industrie (Loubier et al., 2013).

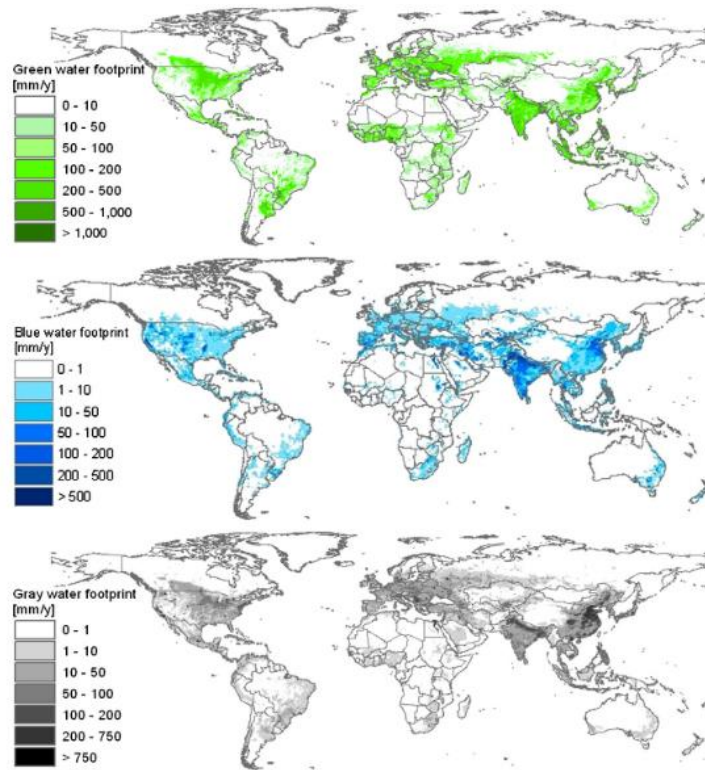
2. Les ressources en engrais

Les engrais ont pour fonction d'apporter à une culture donnée les nutriments nécessaires à sa croissance. Les principaux minéraux nécessaires à la croissance des plantes et qui sont puisés dans le sol sont l'azote, le phosphore et le potassium (FAO, 1984). Ils sont assimilés par les plantes sous forme d'ions H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} pour le phosphore, de cation K^+ pour le potassium et de NH_3 pour l'azote (plus rarement sous forme d'ammonium NH_4^+). Les engrais se divisent en deux principales catégories, organiques et inorganiques :

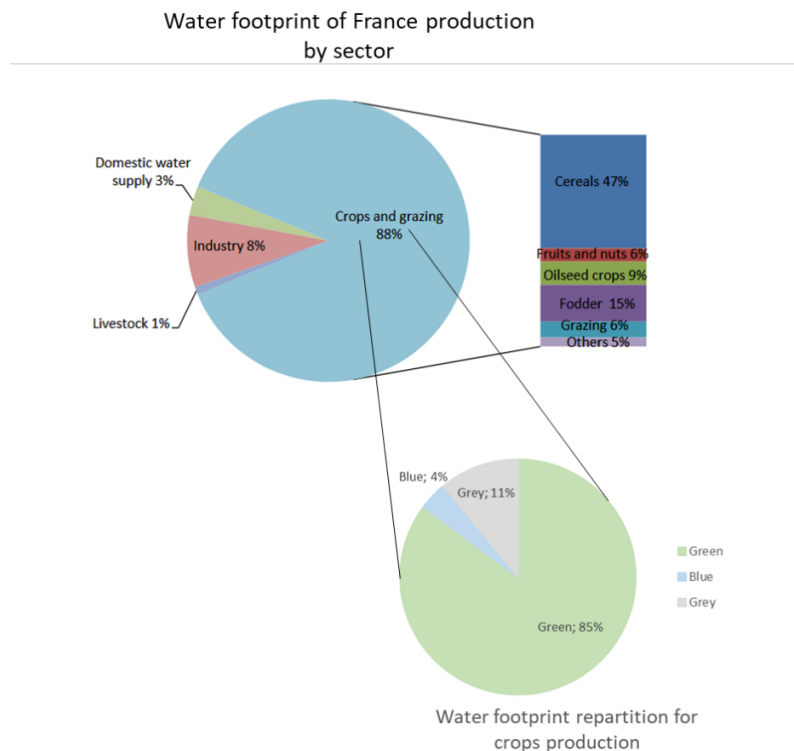
- Les engrais organiques sont composés de matière animale et ou végétale. Une étape de minéralisation est nécessaire pour l'assimilation des minéraux par les plantes. Leur composition est variable ainsi que leur capacité et vitesse à fournir des minéraux assimilables (Cassidy-Duffey et al., 2020).
- Les engrais inorganiques, sont directement assimilables par les plantes. Ils permettent une gestion précise des minéraux apportés aux cultures, et une augmentation des rendements.

L'utilisation d'engrais inorganique augmente à l'échelle mondiale. La quantité d'azote employé en agriculture a été multipliée par plus de 10 en 70 ans. En Europe, elle est stable depuis les années 2000, à plus de 10 millions de tonnes (FAO, 2021).Après une production intensive et une forte utilisation d'intrants de 1970 à 1990, la France est en transition vers des pratiques plus raisonnées, et une utilisation inférieure à 150kg Ha^{-1} depuis les années 2010. Cependant, cette valeur ne traduit pas les dynamiques régionales, et les pratiques agricoles variées. De plus, l'utilisation d'engrais doit être rapportée à la production agricole, pour évaluer son efficacité. L'efficacité de l'utilisation de l'azote a chuté de 60 à 46%, avec des disparités régionales (Houlton et al., 2019).

Bien que l'azote est majoritaire dans l'atmosphère, sa fixation par la plupart des organismes se fait sous la forme NH_3 . L'azote subit de nombreuses transformations lors de son cycle, qui dépendent de l'activité d'un ensemble de microorganismes. L'augmentation de la production d'engrais au cours du siècle dernier a altéré la quantité d'azote fixée par les écosystèmes : la quantité d'azote fixée par les activités humaines est en voie de dépasser celle fixée par les microorganismes. L'augmentation de l'azote disponible augmente la productivité primaire et la quantité d'azote fixé a doublé depuis les années 1940.



Chapitre 1-Figure 6 : Empreinte en eau verte, bleue et grise du globe entre 1996 et 2005. Les données sont exprimées en millimètres par an et sont le rapport de l’empreinte en eau (m^3 par an) par la surface d’une cellule de la grille ($10^3 m^3$). Source (Hoekstra and Mekonnen, 2012). L’eau verte représente l’eau de pluie qui est évapotranspirée par la culture considérée ou incorporée. L’eau bleue est l’eau de surface et l’eau souterraine, évapotranspirée et incorporée, mais aussi l’eau non utilisée qui se retrouve déplacée. L’eau grise est la quantité d’eau polluée associée à l’activité humaine considérée.



Chapitre 1-Figure 7 : Empreinte en eau de la production française par secteur, et focus sur la production agricole. Adapté de (Erchin et al., 2012)

Cela peut modifier le stockage du carbone et donc augmenter le réchauffement climatique (Bernhard, 2010). Les limites tolérables de modification du cycle de l'azote sont aujourd'hui considérées comme dépassées à l'échelle mondiale. Un seuil de rejet d'azote de 62 à 82 millions de tonnes par an a été fixé pour limiter l'eutrophisation des milieux aquatiques, soit environ 41 à 55 kg d'azote excédentaire par hectare et par an (Steffen et al., 2015). En 2015 les rejets étaient estimés à 150 millions de tonnes. En France, l'excédent d'azote est passé de 55kg par hectare de surface agricole utile et par an entre 1996 et 2005 à 45kg entre 2006 et 2015, suite aux programmes d'action gouvernementaux. La région PACA est une des régions de France les plus proches de l'équilibre, avec peu de rejet d'azote (Commissariat général au développement durable, 2019).

3. Les besoins en eau de la tomate d'industrie

La tomate d'industrie est une culture irriguée, le goutte à goutte est une méthode de plus en plus courante. Son empreinte en eau bleue est importante, de l'ordre de 30% de l'empreinte en eau totale. A l'échelle mondiale, l'empreinte en eau bleue des tomates est estimée à 63m³ d'eau par tonne de fruit frais, à 211 m³ d'eau par tonne de purée, et à 316 m³ d'eau par tonne de concentré (Chapitre 1-Figure 8). Cette augmentation dans le cas des produits transformés est majoritairement liée à la concentration du produit : la tomate a une teneur en matière sèche de l'ordre de 7% et la purée jusqu'à 28%. La part de l'empreinte en eau grise des produits transformés n'est pas plus importante que celle des tomates fraîches. La transformation des fruits en jus ou purée n'est donc pas une source de pollution de l'eau, et l'optimisation de la ressource en eau est à améliorer au niveau de l'amont agricole principalement, en diminuant l'irrigation et donc l'empreinte en eau bleue. En France, la proportion de l'empreinte en eau bleue de la tomate (de bouche et d'industrie) est de 25% en 2012 (Ercin et al., 2012) ce qui correspond à 15 m³ d'eau par tonne de fruit frais. A titre de comparaison, la tomate a une empreinte plus faible par tonne de produit frais que la pomme ou encore l'abricot (Chapitre 1-Tableau 1).

Les sélections variétales ont permis une augmentation des rendements de l'ordre de 50% en Californie depuis les années 1970 (B. Hanson and May, 2006) et en Italie depuis les années 1930 (Ronga et al., 2019a). Les évolutions variétales, les changements de pratiques culturales et le changement climatique nécessitent aussi de réévaluer les besoins en eau de la culture (B. Hanson and May, 2006; B. R. Hanson and May, 2006a).

4. Les besoins en azote de la tomate d'industrie

L'azote est un élément majeur de par son importance pour la croissance de la plante, sa large utilisation et ses impacts environnementaux. Le déficit en azote est en effet un des principaux facteurs limitant la croissance de la plante mais aussi le rendement en fruits (Ronga et al., 2019b). L'utilisation d'engrais azoté permet l'augmentation des rendements de la tomate d'industrie et garantit une teneur en sucres solubles (degré Brix) du fruit, qui est le principal critère de qualité en entrée d'usine. Cependant, l'efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté est rarement prise en compte (Petropoulos et al., 2020; Ronga et al., 2019b).

FAOSTAT crop code	Product description	Global average water footprint (m ³ ton ⁻¹)			
		Green	Blue	Grey	Total
388	Tomatoes	108	63	43	214
	Tomato juice unfermented & not spirited	135	79	53	267
	Tomato juice, concentrated	539	316	213	1069
	Tomato paste	431	253	171	855
	Tomato ketchup	270	158	107	534
	Tomato puree	360	211	142	713
	Peeled tomatoes	135	79	53	267
	Tomato, dried	2157	1265	853	4276

Chapitre 1-Figure 8 : Empreinte en eau de la tomate et de ses dérivés à l'échelle mondiale. Extrait de (Mekonnen and Hoekstra, 2010)

Chapitre 1-Tableau 1 : Empreinte en eau de productions agricoles françaises en 2012. Les données d'empreinte en eau sont adaptées de (Ercin et al., 2012) et les données de production sur l'année 2012 (*) sont extraites de la base de données FAOSTAT.

Crop		Green WF	Blue WF	Grey WF	Total WF (Mm ³ /year)	Production (ton/year)*	WF (m ³ /ton)
Cereals and tubers	Wheat	21014	48	199	21261	37885742	561
	Maize	6510	1409	2391	10310	15393497	670
	Oats	442	31	0	473	400802	1180
Oleaginous	Potato	516	104	307	927	6376058	145
	Soybean	330	98	54	482	103935	4638
	Olives	87	5	9	102	29561	3456
	Sunflower seed	2097	19	889	3004	1572952	1910
sugar crop	Sugar beet	1329	39	213	1581	33077399	48
Vegetables	fresh nes	551	226	178	955	815658	1171
Fruits	Oranges	0,25	0,02	0,01	0,27	4213	64
	Apples	362	62	7	431	1306333	330
	Apricots	83	12	2	96	175228	551
	Peaches and nectarines	119	17	2	139	257038	539
	Tomatoes	24	9	6	40	588910	67

La fertilisation à travers le système d'irrigation augmente l'efficacité de l'azote, en limitant la lixiviation (Farneselli et al., 2018). Il reste complexe d'adapter les amendements aux besoins précis de la plante. Une analyse de cycle de vie de la tomate d'industrie en Californie entre 2005 et 2015 rapporte que la purée de tomate est responsable de 0.83 kg de CO₂ émis et de l'utilisation de 328 L d'eau et que la gestion de la fertilisation est un des moyens pour réduire l'impact environnemental de la production (Winans et al., 2020). Les besoins en azote de la tomate d'industrie irriguée au goutte à goutte varient de 160 kg Ha⁻¹ à plus de 400 kg Ha⁻¹ selon le sol, le climat et la densité des plantes (Bustamante and Hartz, 2015; Hartz and Bottoms, 2009; Vázquez et al., 2006; Warner et al., 2011). Une réduction modérée de l'azote apporté diminue la croissance végétative avec peu d'effet sur le rendement en fruits (Benard et al., 2009; Bustamante and Hartz, 2015). De plus, une diminution de l'apport en azote à irrigation constante, et une diminution de l'irrigation à fertilisation constante conduisent toutes deux à une augmentation de l'efficacité de l'eau (Badr et al., 2016).

IV. La purée de tomate

La purée de tomate est définie par le Codex Alimentarius comme le produit « *préparé par concentration du liquide, ou de la pulpe, extrait de tomates substantiellement saines, mûres et rouges (*Lycopersicon esculentum* P. Mill), filtrées ou préparées de toute autre façon, de manière que le produit fini soit débarrassé des peaux et pépins, ainsi que des autres parties dures ou gros morceaux; et conservé par des procédés physiques* » et dont la teneur en matière sèche doit être comprise entre 7% et 24% (FAO, 1981).

En France la vente de sauces chaudes à base de tomate a augmenté de 2.9% et celle des concentrés de tomate de 3.9% (en volume) en 2021. Les consommateurs s'orientent vers des produits « premium » dont la part des ventes est passée de 9.9% à 11.6% entre 2019 et 2021 (Tomato News, 2021b). Les principaux critères de qualité de la sauce tomate pour le consommateur sont la couleur, la consistance et la saveur (Hayes et al., 1998a). De plus, une analyse sensorielle a démontré que la connaissance de la couleur et de la marque de la sauce tomate modifie la perception sensorielle et le jugement hédonique des produits, et que ces critères étaient plus importants que le goût et l'odeur (Monaco et al., 2003). Les consommateurs français apprécient à la fois l'odeur et la saveur de tomate cuite et de purée de tomate dans les sauces (Chapitre 1-Figure 9). Le procédé de transformation modifie fortement la couleur ainsi que les notes de tomate cuite. Deux procédés, cold break (CB) et hot break (HB) diffèrent par le moment d'application et la force du traitement thermique appliqué. Les purées HB ont une couleur rouge plus profonde, des notes de tomate cuite plus prononcées et une viscosité plus forte que les purées CB qui présentent des notes de purée de tomate fraîche et une plus faible viscosité (Goodman et al., 2002). Les critères de qualité évalués par les industriels sont la couleur, la texture, l'odeur et la saveur (Chapitre 1-Figure 10). Une purée de qualité doit présenter une couleur rouge, une texture homogène avec un minimum de déphasage entre la pulpe et le liquide, une consistance importante (4 à 12 cm mesurés au consistomètre), un minimum d'éléments noirs ainsi qu'une odeur et saveur satisfaisantes.

Critères d'appréciation	Critères de dépréciation
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Odeur de tomate cuite ▪ Goût de tomate cuite ▪ Goût sucré ▪ Goût de purée de tomates ▪ Odeur de purée de tomates ▪ Goût d'oignon 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Odeur de poisson ▪ Odeur de poivre ▪ Odeur intense ▪ Odeur orientale ▪ Goût intense ▪ Odeur d'origan ▪ Goût d'olive ▪ Goût d'huile ▪ Goût salé ▪ Taille des bouchées ▪ Arrière-goût intense

Chapitre 1-Figure 9 : Principaux critères d'appréciation et de dépréciation de la sauce tomate en France (FiBL Suisse, 2011).

Factors:	U.S. Grade A	U.S. Grade B
Finish	Good <u>1/</u>	Good <u>1/</u>
Color	Good	Reasonably good
Score	21 - 25 points	17 - 20 points
Consistency	Good	Reasonably good
Centimeters (Bostwick)	4.0 - 12.0	3.0 to less than 4.0 or more than 12.0 but less than 15.0
Separation of free liquid	Equal to or less than 5 mm (3/16 in)	More than 5 mm but equal to or less than 10 mm (3/8 in)
Score	22 - 25 points	18 - 21 points
Defects <u>2/</u>	Practically free	Reasonably free
Pieces of peel <u>3/</u> exceeding 5 mm/100 g (3.5 oz) and Dark specks exceeding 1.0 mm (1/32 in)	Combined total of 15 pieces of peel and dark brown or black specks; no dark brown or black specks exceed 3.2 mm (1/8 in).	Combined total of 36 pieces of peel and dark brown or black specks; not more than 2 dark brown or black specks exceed 3.2 mm, no dark brown or black specks exceed 6.5 mm (1/4 in).
Whole seeds/2.835 kg (100 oz):	1	5
Overall appearance:	Not materially affected	Not seriously affected
Score	21 - 25 points	18 - 20 points
Flavor and odor	Good	Reasonably good
Score	21 - 25 points	17 - 20 points
Total minimum score	85 points	70 points <u>4/</u>

Chapitre 1-Figure 10 : Critères pour l'attribution des grades de qualité « A » et « B » pour des sauces tomate aux Etats-Unis (USDA, 1994).

V. Les enjeux de la filière tomate d'industrie

La France est un petit producteur face à ses voisins européens. La principale zone de production est située en climat méditerranéen, soumis à une augmentation des températures et des épisodes de sécheresse en période estivale. L'un des principaux enjeux de la filière française est de produire des dérivés de tomate se démarquant par leur qualité, et produits de manière durable, par une maîtrise depuis le champ jusqu'au produit fini. La filière doit également adapter cette production de qualité aux contraintes environnementales actuelles et futures.

La qualité correspond, en première partie de filière, à une production de fruits sans défauts (ravageurs, pourriture apicale), arrivés à maturité et à forte teneur en matière sèche. Le prix d'achat des fruits aux producteurs est indexé sur la teneur en sucres solubles (indice °Brix) mesurée, elle-même corrélée à la teneur en matière sèche (Hortimedia, 2021). Les fruits doivent aussi répondre aux attentes de couleur (stade de maturité et synthèse du lycopène), saveur (notamment la balance sucre/acides), et aptitude à produire des purées à la texture désirée. La qualité doit aussi aujourd'hui inclure des critères de durabilité. D'un point de vue économique, les rendements doivent être suffisants pour assurer des revenus équitables aux différents acteurs de la filière. D'un point de vue environnemental les rendements doivent être évalués au regard des intrants apportés à la culture (irrigation, fertilisation) et de leur impact sur qualité des sols, la pollution des milieux aquatiques et l'émission de gaz à effet de serre.

En seconde partie de filière, l'enjeu est de sélectionner les fruits en entrée d'usine selon leur potentiel variable à fournir la texture désirée. Or, la texture des purées n'est pas liée uniquement à la teneur en matière sèche, et des critères fiables et rapidement mesurables sur fruit frais sont à développer. Il s'agit aussi pour les industriels d'être en mesure d'adapter le procédé de transformation à une matière première vivante et donc variable pour assurer une texture constante du produit fini. Pour cela, une connaissance des effets des principaux procédés (CB et HB) sur cette matière première, ainsi que des interactions entre le procédé et la matière première variable (choix variétal, effet des conditions agro-environnementales) est nécessaire.

La communication et compréhension mutuelle entre l'amont agricole et l'aval industriel est donc indispensable pour faire face à ces enjeux. En particulier pour réévaluer certains critères au vu du changement climatique qui impacte la production de fruits et leur aptitude à la transformation.

VI. Le projet Tom'Ability

1. Présentation et objectifs

La thèse présentée s'inscrit dans le projet Tomability-II qui est piloté par le CTCPA. Il s'agit du second volet d'un projet portant sur l'amélioration de la qualité de la tomate d'industrie par une approche intégrée, depuis le champ jusqu'au produit fini.

Le premier volet, Tomability-I, de 2016 à 2018, a porté sur la détermination des principaux facteurs agronomiques et technologiques responsables de la variabilité des fruits et des purées de tomate, dans

les zones de production française (Sud-Est et Sud-Ouest). En particulier la variabilité due à la variété, à l'irrigation, au stade de récolte et au procédé de transformation a été étudiée. Ce projet a mis en évidence l'effet majoritaire de la variété sur la réponse au stress hydrique et une augmentation de la teneur en matière sèche de la tomate en cas de stress hydrique, qui compense partiellement la diminution de rendement frais.

De plus, ces travaux ont montré une corrélation positive entre la viscosité de la purée et la viscosité du sérum ainsi qu'une différence de taille de particules selon le procédé de cuisson, les purées cuites selon le procédé Hot Break présentant de plus petites particules que celles cuites selon le procédé Cold Break. De forts contrastes de viscosité entre certaines variétés de tomate ont aussi été mis en avant (Arbex de Castro Vilas Boas, 2018; Vilas Boas et al., 2018, 2017).

Le second volet du projet vise à poursuivre l'étude des facteurs agronomiques (climat, irrigation, fertilisation et choix variétal) et technologiques (procédés CB et HB) sur la qualité de la purée de tomate afin de réduire les intrants dans un contexte de changement climatique. Il s'agit aussi d'explorer plus en détail les paramètres physicochimiques des fruits et des purées en lien avec leur texture afin de proposer des leviers d'action pour la maîtrise de la qualité depuis le champ, en s'adaptant à la matière première.

2. Cadre de la thèse et collaborations au sein du projet TomAbilityII

Ce projet est financé par France AgriMer et fait intervenir plusieurs partenaires :

-La SONITO (SOciété Nationale Interprofessionnelle de la TOMate), pour l'expertise sur les essais expérimentaux au champ : mise en place de la culture, suivi de l'irrigation et de la fertilisation.

-Le CTCPA (Centre Technique de Conservation des Produits Agricoles) pour la transformation des tomates à échelle semi industrielle.

-INRAE, pour l'expertise scientifique, au sein des unités Plantes et Systèmes de culture Horticole pour l'approche agronomique et écophysio-logique et Sécurité et Qualité des produits d'origine végétale pour l'analyse des produits transformés.

Il s'agit donc d'une thèse interdisciplinaire combinant des approches écophysio-logiques et des approches technologiques permettant de créer un continuum de recherches entre les deux unités autour de la qualité de la tomate et des produits dérivés.

VII. Objectifs de la thèse

Les objectifs de la thèse se déclinent en trois points.

1. Evaluation des effets des interactions entre conditions agro-environnementales (en particulier eau, azote, variété) et procédés technologiques sur la qualité des purées de tomates.
2. Analyse des déterminants rhéologiques, structuraux, et biochimiques impliqués dans les variations de qualité des purées de tomates induites par les conditions agro-environnementales et les procédés.
3. Analyse des liens entre structure et composition du fruit frais et structure et propriétés rhéologiques des purées sous l'impact des conditions agro-environnementales.

Chapitre 2 Etat de l'art

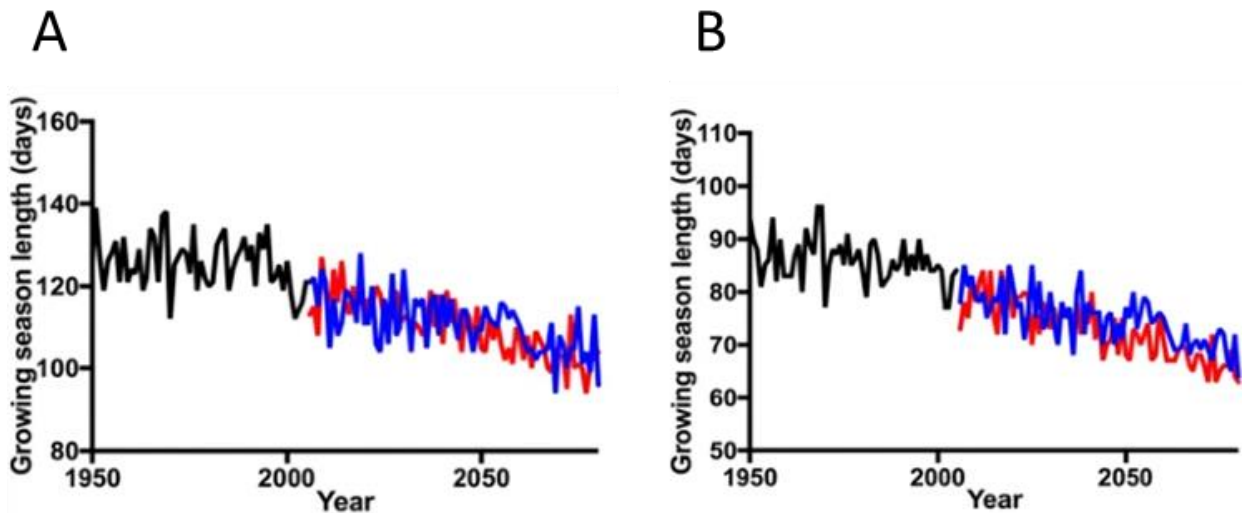
I. Le modèle d'étude : la tomate d'industrie

1. La plante

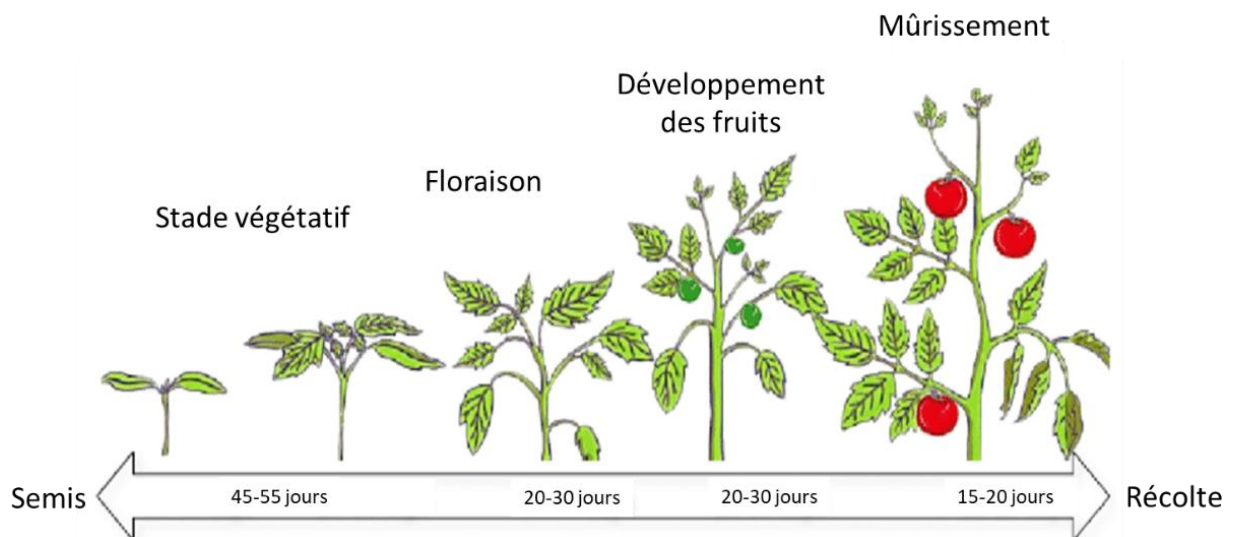
La tomate (*Solanum Lycopersicum*) appartient à la famille des solanacées dont le fruit charnu est consommé. Plusieurs milliers de variétés sont cultivées à travers le monde, et nous nous intéresserons à celles destinées à l'industrie qui sont cultivées en plein champ. Le cycle de culture dure en moyenne entre 100 et 200 jours pour une plantation précoce (mi-mars) et entre 70 et 100 jours pour une plantation plus tardive (mi-mai), avec des variations selon les variétés et le climat (Chapitre 2-Figure). Il se compose d'un stade végétatif avant la floraison, d'un stade de floraison (ou anthèse, d'un stade de formation des fruits et enfin d'un stade de mûrissement (Chapitre 2-Figure_ 2).

La croissance de la tomate d'industrie est sympodiale (dite déterminée) : sur la tige principale, les bourgeons axillaires donnent des ramifications. Les bourgeons terminaux forment des inflorescences. La croissance végétative des tiges s'arrête donc après un nombre fini de bouquets. Cette croissance déterminée entraîne une fructification groupée et permet une récolte unique et mécanique. A l'inverse, pour les variétés de tomate indéterminées telles les tomates de bouche, la tige principale se compose d'une alternance régulière de feuilles et d'inflorescence. La fructification est étalée dans le temps et plusieurs récoltes successives sont faites sur un même plant. Les feuilles sont alternées sur les tiges et sont composées de folioles principales et de folioles intercalaires (Chapitre 2-Figure_ 3). Les inflorescences forment des grappes de 3 à 8 fleurs, voire plus chez certains hybrides. Leur développement est décalé au cours du temps : des fruits de maturité différente sont présents sur un même bouquet, les fruits à l'extrémité étant plus jeunes. En plein champ, la plante présente un port buissonnant, d'une hauteur de 0,5 à 1m (Chapitre 2-Figure_ 4). En cas de culture en serre, la plante tuteurée peut atteindre deux mètres et a une croissance quasi indéterminée.

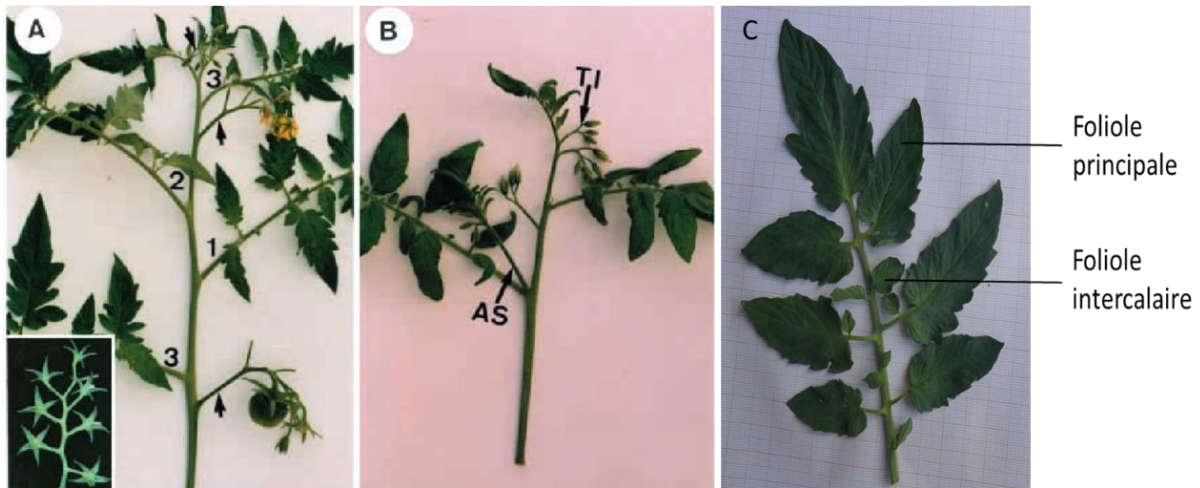
La sélection variétale des tomates d'industrie au cours du siècle dernier a conduit à l'augmentation des rendements en privilégiant un ensemble de traits adaptés à la culture intensive et mécanisée actuelle, et à la production de purées de qualité. Ainsi la sélection des variétés plus fermes et à la fructification groupée dans le temps ont été sélectionnées, mais aussi des résistances à des maladies (fusarium, verticillium), ou encore des traits de qualité du fruits tels qu'une pigmentation importante, une forte teneur en sucres solubles et en lycopène ou encore une capacité à produire des purées plus consistantes (Stevens and Rick, 1986). Les variétés actuelles ont un couvert végétal moindre, une floraison plus précoce, des fruits plus nombreux par bouquet mais plus petits et homogènes en taille, une forte capacité photosynthétique et absorption de l'azote. Les fruits ont un péricarpe plus épais et charnu, une couleur rouge plus vive et certaines variétés ont une teneur en lycopène plus élevée. Le développement racinaire est lui dépendant du système d'irrigation (Barrios-Masias and Jackson, 2014) et de la structure du sol.



Chapitre 2-Figure 1 : Evolution de la durée de culture de la tomate d'industrie en Californie (région de Merced) dans le cas d'une plantation précoce (A) ou tardive (B). Les courbes noires représentent les données historiques, en bleu et rouge les prédictions selon les scénarios de faible émission (RCP 4.5) et forte émission (RCP 8.5) du 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC. Adapté de (Pathak and Stoddard, 2018)



Chapitre 2-Figure 2: Stades de croissance de la tomate d'industrie lors d'une croissance en serre du semis à la récolte, et durée des différents stades. Adapté de (Shamshiri et al., 2018).



Chapitre 2-Figure 3 : Photos de la structure de plant de tomate indéterminé (A), déterminé (B) et de la structure d'une feuille de tomate d'industrie (variété H1311). Sur la photo A les feuilles de chaque unité sont numéroté de 1 à 3 et les inflorescences indiquées par des flèches se situent sous la troisième feuille de chaque unité. Sur la photo B un bourgeon axillaire se développe pour former un axe secondaire (AS) et une inflorescence terminale (TI) marque la fin de croissance de l'axe principal. Les images A et B sont adaptées de (Pnueli et al., 1998).



Chapitre 2-Figure 4 : Photo du port buissonnant d'un plant de tomate (à gauche) et d'une rangée de plants (à droite) de la variété H1311 cultivée en plein champ avec une irrigation par goutte à goutte (Piolenc, été 2020, source : Miarka Sinkora).

2. Le fruit de tomate

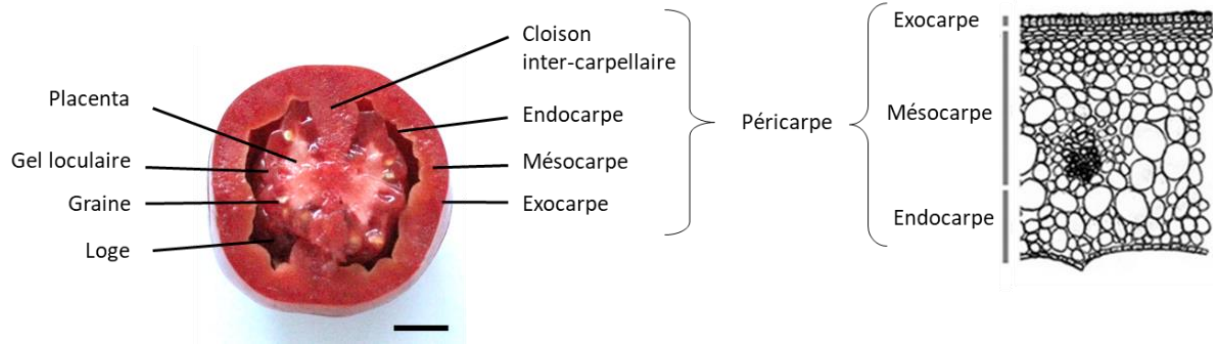
1. Structure

La tomate est composée d'un péricarpe charnu délimitant des septas, et d'un placenta. Ce dernier se différencie au cours de la croissance du fruit en un gel loculaire. La tomate d'industrie se distingue par un péricarpe épais et très ferme, permettant un transport et un stockage des fruits en conteneurs sans risque d'écrasement. Le péricarpe représente deux tiers de la masse du fruit (Ho and Hewitt, 1986) et est le composé majoritaire des jus et purées de tomate (Chapitre 2-Figure_ 5). Les cellules du péricarpe contiennent un grand nombre de chloroplastes qui sont au départ photosynthétiques et ensuite au cours du mûrissement se différencient en chromoplastes, structures spécialisées dans la biosynthèse et le stockage des pigments caroténoïdes. Les tomates d'industrie sont de forme variable, ronde ou allongée, et ont une masse variant en moyenne entre 50 et 100g selon les variétés (Chapitre 2-Figure_ 6).

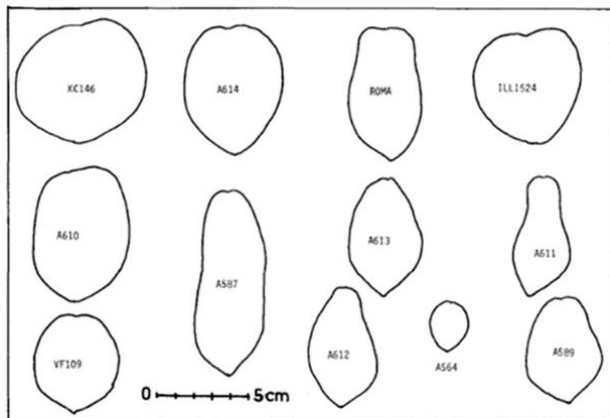
2. Composition

La tomate est réputée pour ses qualités nutritionnelles et ses bénéfices pour la santé. Elle est en particulier riche en lycopène (0.4% de la matière sèche (Davies and Hobson, 1981)), beta carotène et vitamine C, composés pouvant participer à la protection des cellules vasculaires face à l'oxydation (Willcox et al., 2003). La composition du fruit mûr est variable selon les variétés, mais peut être résumée par une teneur en matière sèche de 5 à 10%, dont la moitié sont des sucres solubles (fructose, glucose et saccharose). Les acides organiques majoritaires sont l'acide citrique et l'acide malique. La partie insoluble, majoritairement la paroi cellulaire, se compose de cellulose, hémicellulose et pectine dont nous discuterons l'importance dans la texture des purées (Chapitre 2-Figure_ 7).

Le lycopène est un tetraterpène de la famille des caroténoïdes qui donne sa couleur rouge à la tomate (Chapitre 2-Figure_ 8). Il représente 80 à 90% des caroténoïdes présents dans la tomate (Atkinson et al., 2011). Il est présent sous forme trans dans les fruits frais, et est partiellement dégradé lors de la transformation, par isomérisation ou oxydation (Shi and Le Maguer, 2000). Au sein de la cellule, le lycopène se situe dans les chromoplastes, structures subcellulaires dérivées des chloroplastes durant le mûrissement du fruit (Egea et al., 2011). En plus d'impacter la qualité sensorielle du fruit et de la purée (couleur), le lycopène est susceptible de jouer un rôle dans la texture des purées de tomate. La teneur en lycopène du fruit est très variable, et le principal facteur de variabilité est la variété (Helyes et al., 2003). Un second facteur est le stade de maturité physiologique au moment de la récolte des tomates. Les teneurs en lycopène se situent majoritairement entre 50 et 80 mg/kg dans le fruit mais peuvent varier d'un facteur 4. Les variétés hybrides riches en lycopène ont des teneurs allant jusqu'à 180mg/kg. Il se situe majoritairement dans le péricarpe, en particulier en concentration 5 fois plus importante dans la peau (Dumas et al., 2003).



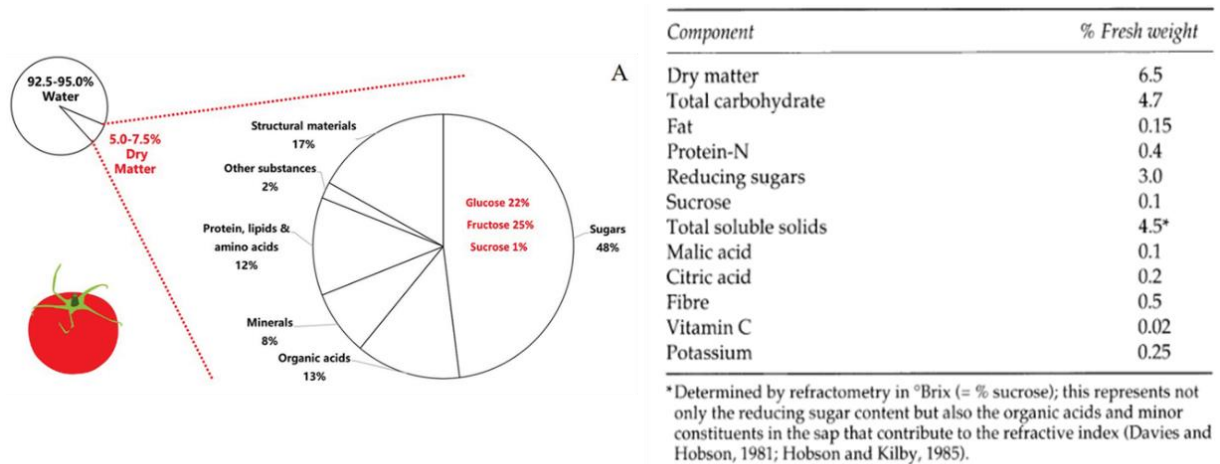
Chapitre 2-Figure 5 : A gauche, coupe transversale d'une tomate (variété H1311). La barre représente 1 centimètre. A droite, schéma général du péricarpe des fruits charnus de la famille des solanacées, adapté de (Pabón-Mora and Litt, 2011). Le péricarpe se divise en exocarpe, mésocarpe et endocarpe. L'exocarpe au sens strict est défini comme la première assise de cellules. Cependant certains auteurs considèrent plusieurs assises cellulaires. Il s'agit de cellules de faible volume, rectangulaires et allongées tangentiellement. L'endocarpe peut être défini comme la dernière assise de cellules du péricarpe, le séparant de la loge. Certains auteurs considèrent plusieurs assises et définissent la limite interne de l'endocarpe par la zone de faisceaux vasculaires. Le mésocarpe représente la majeure partie du péricarpe et se compose de cellules parenchymateuses de plus grande taille, jusqu'à 200µm, et dont l'organisation en assises est moins visible.



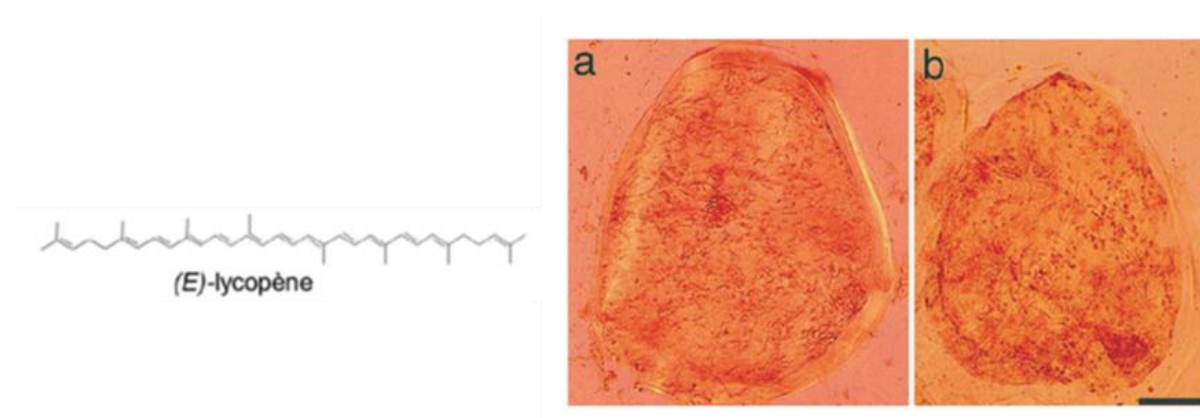
Variety	Maturity stage	Fruit weight (g)		Wall thickness (mm)	
		min – max	Average	min – max	Average
BOS 8066 (Orsetti)	R	65–115	92.8	5.3–7.8	6.9
	R + 2	43–114	70.0	5.0–7.1	6.0
	R + 3	50–104	76.1	4.8–6.2	5.5
Brigade (Asgrow)	R	60–86	73.2	6.2–8.6	7.3
	R + 2	63–87	75.7	5.1–8.4	7.4
	R + 3	66–80	73.5	5.9–7.5	6.8
FM 9208 (Ferry Morse)	R	64–93	80.8	5.9–9.4	7.7
	R + 2	57–82	72.7	6.9–9.6	8.2
	R + 3	54–104	78.7	5.9–8.6	7.2
H 3044 (Heinz)	R	45–82	62.1	4.4–8.2	6.1
	R + 2	44–84	67.5	4.9–7.5	6.2
	R + 3	49–81	65.5	3.5–6.5	5.5
H 8892 (Heinz)	R	62–89	74.7	5.7–8.8	7.0
	R + 2	63–78	70.3	5.2–6.8	6.0
	R + 3	58–105	81.3	5.7–8.8	7.2
H 9280 (Heinz)	R	50–106	72.8	5.2–9.3	7.0
	R + 2	57–93	72.0	5.8–8.1	6.9
	R + 3	49–138	74.2	5.1–7.9	6.9
LaRossa (Rogers)	R	71–105	83.0	6.5–9.4	7.6
	R + 2	53–91	70.0	6.2–7.9	7.2
	R + 3	50–112	76.1	5.9–8.4	7.0
Sun 6117 (Sun Seeds)	R	70–127	88.0	5.1–7.4	6.7
	R + 2	78–116	93.4	5.9–8.0	7.0
	R + 3	61–91	77.8	5.4–7.3	6.6
Halley 3155 (Orsetti)	R	85–130	100.9	6.2–9.1	8.1
	R + 2	61–96	83.4	5.8–8.1	7.3
	R	68–105	91.3	6.6–8.9	7.6
HyPeel 45 (Peto Seed)	R + 2	43–79	62.8	6.1–7.6	7.0

Note: All tomatoes were grown simultaneously and under the same agronomic conditions. R = red stage/USDA stage 6; R + 2 = 2 weeks after red stage; R + 3 = 3 weeks after red stage.

Chapitre 2-Figure 6 : A gauche, schéma des tailles et formes variées de douze variétés contrastées de tomate d'industrie (Janoria and Rhodes, 1974). A droite, variation de la masse des fruits et de l'épaisseur du péricarpe de dix variétés de tomate d'industrie (Barrett et al., 1998).



Chapitre 2-Figure 7: A gauche, schéma des proportions des différents composés de la tomate mûre, adapté de (Hou et al., 2019), et à droite composition de la tomate mûre exprimée en pourcentage de poids frais (Hobson and Grierson, 1993).



Chapitre 2-Figure 8 : A gauche, formule chimique du lycopène (Dufour et al., 2014). A droite, microscopie de cellule de péricarpe de tomate (variété Ailsa Craig) témoin (a) et mutée « high pigment-1 » (b). Les zones pigmentées de rouges sont les chromoplastes riches en lycopène, plus présentes dans la figure B. La barre représente 40µm. Adapté de (Cookson et al., 2003).

3. La paroi végétale

La paroi végétale entoure les cellules et les protège des contraintes mécaniques extérieures ainsi que de la pression de turgescence. Elle joue donc un rôle structural primordial. La paroi est une matrice extracellulaire complexe, constituée de polysaccharides et de protéines. La lamelle moyenne, fine couche composée de pectines, à l'extérieur de la paroi, garantit l'adhésion cellulaire. La paroi est composée de polymères (25%) et est riche en eau (75%). Ces polymères sont la cellulose (25 à 30%), qui s'organise en microfibrilles au sein d'un réseau contenant des hémicelluloses (30%), des pectines (30%) et des protéines (1 à 10%) (Albersheim, 2011) (Chapitre 2-Figure_ 9).

Les modèles prévalents sur la structure cellulaire tels que les travaux de Carpita et Gibeaut (1993) décrivent des interactions entre cellulose et hémicellulose qui structurent la paroi, tandis que les pectines interagissent surtout entre elles et forment un gel autour. De plus récents travaux ont aussi mis en évidence des interactions entre les chaînes latérales des pectines et les fibres de cellulose (Wang et al., 2012)(Chapitre 2-Figure_ 10).

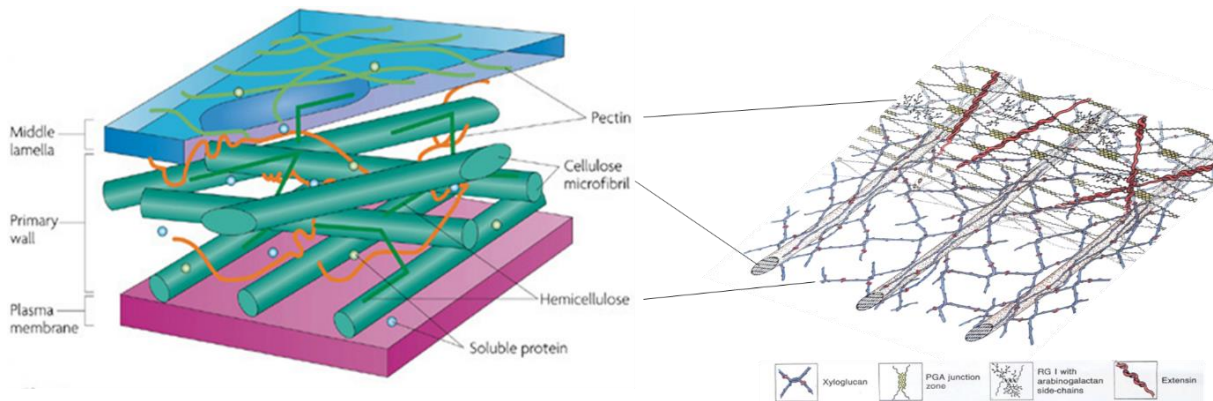
La cellulose est un homopolymère linéaire de glucopyranoses reliés par des liaisons β 1-4. Elle représente la majeure partie de la paroi (Chapitre 2-Figure_ 11).

Les hémicelluloses, en plus faible quantité, sont en interaction avec les microfibrilles de cellulose et assurent la cohésion de la structure. Il s'agit en majorité de xyloglucan (Wang et al., 2018). Elles sont aussi en interaction avec les pectines de la lamelle moyenne, assurant l'adhésion entre les cellules.

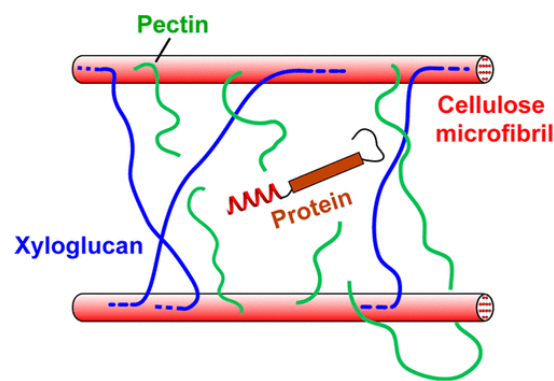
Les pectines sont des polysaccharides composés d'un squelette linéaire d'acide galacturonique, et éventuellement d'autres oses, et d'un nombre variable de ramifications (Chapitre 2-Figure_ 12). Ces ramifications sont initiées par une molécule de rhamnose et les chaînes latérales sont composés d'arabinose, de galactose ou d'un mélange de ces deux oses. Des groupements méthyls peuvent être présent sur le squelette d'acide galacturonique (BeMiller, 2019). Les pectines ont des propriétés gélifiantes variables selon leur degré de polymérisation, structure, organisation dans l'espace et degré de méthylation. Un fort degré de méthylation peut augmenter les propriétés gélifiantes (Melton and Smith, 2001). Les principales pectines sont :

- Les homogalacturonanes (HG), chaîne linéaire d'acide D-galacturonique reliés par des liaisons α 1-4.
- Les Rhamnogalacturonanes de type I, comprenant une alternance d'acide D-galacturonique et de rhamnose, ces derniers initiant des chaînes latérales composées de galactose et d'arabinose.
- Les rhamnogalacturonanes de type II, moins abondants, et dont les ramifications sont plus complexes.

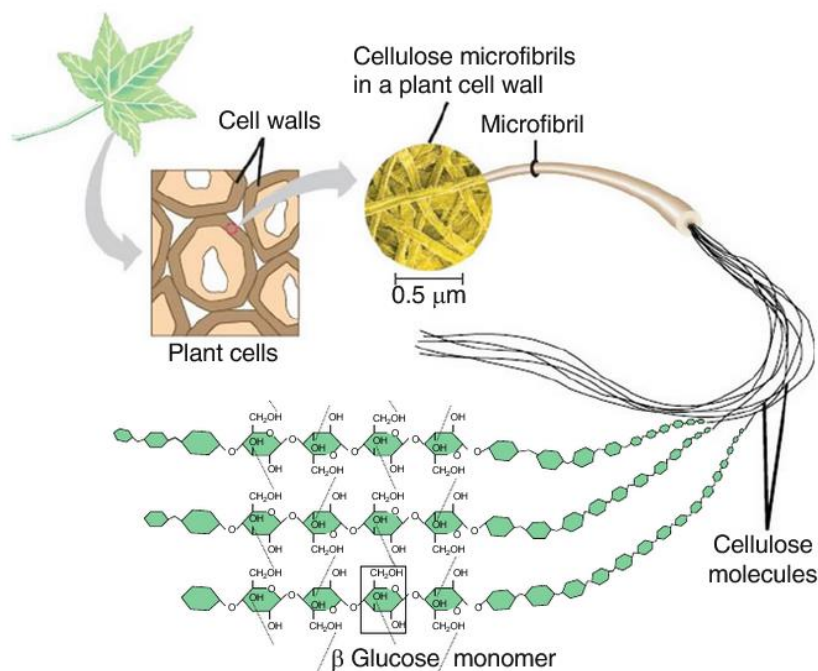
La conformation des pectines en solution peut être étudiée par chromatographie d'exclusion stérique : les molécules sont séparées selon volume hydrodynamique.



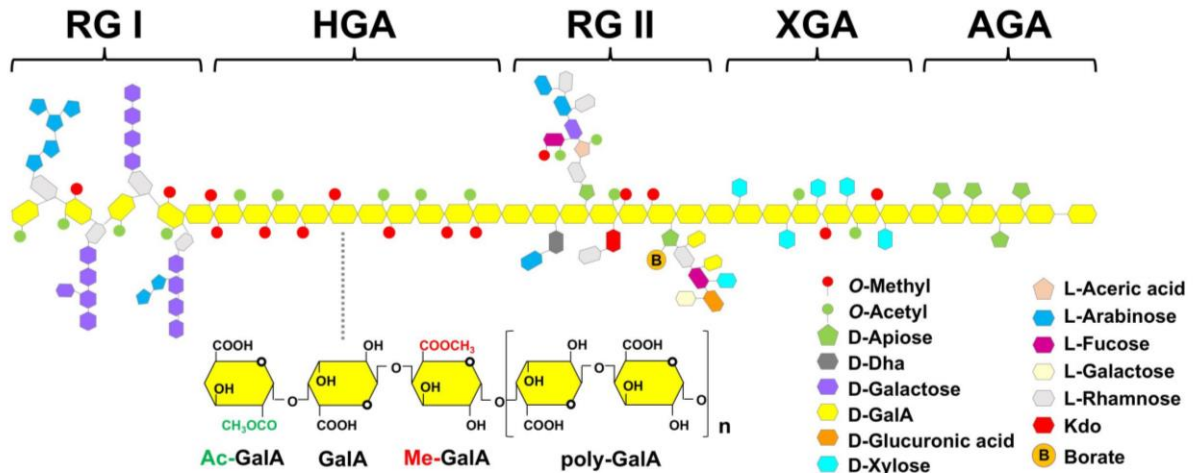
Chapitre 2-Figure 9 : Schéma de structure de la paroi primaire des végétaux, adapté de (Sticklen, 2008) et détail d'une strate de paroi primaire avec l'intrication des fibres de cellulose, hémicellulose et pectine, adapté de (Carpita and Gibeaut, 1993). Une succession de ces strates forme la paroi primaire.



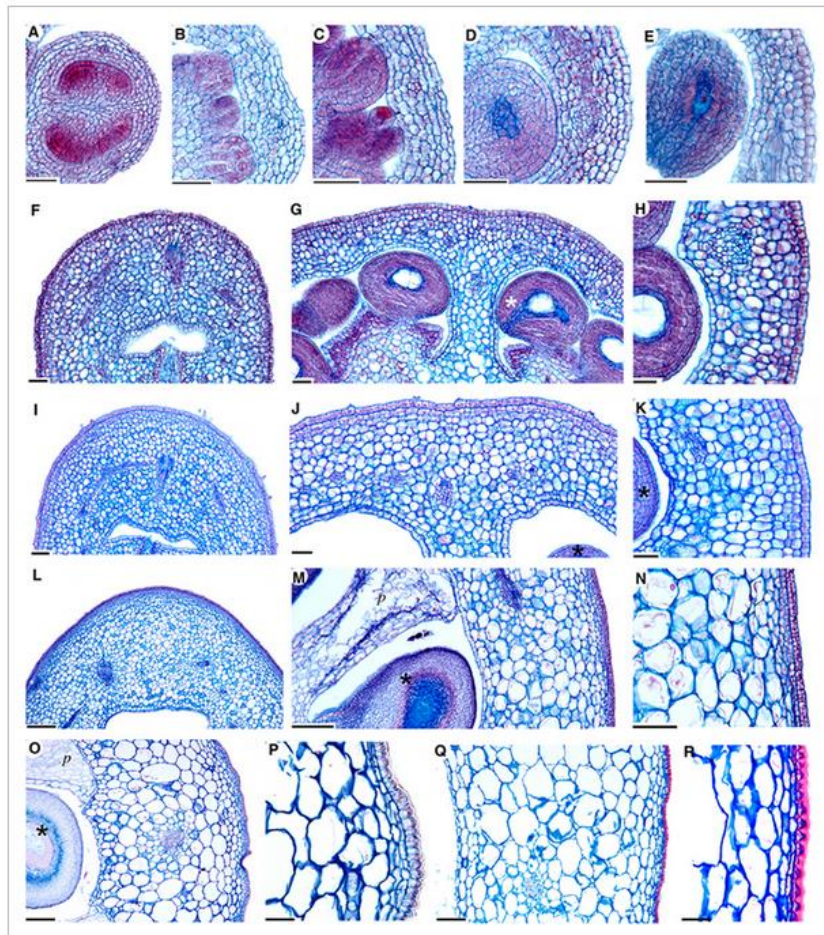
Chapitre 2-Figure 10 : Modèle d'architecture de la paroi primaire (Wang et al., 2012). Des segments des pectines sont à proximité des fibres de cellulose.



Chapitre 2-Figure 11 : Structure de la cellulose au sein des végétaux (Hassan and Ai-Jawhari, 2020). Les polymères de glucopyranoses, linéaires, s'organisent parallèlement, en microfibrilles.



Chapitre 2-Figure 12 : Schéma de structure des pectines adapté de (Wu et al., 2008). HGA signifie homogalacturonan (chaîne linéaire d'acide galacturonique plus ou moins méthylée), RG I et RG II signifient ramnogalacturonan de type I et II (pectines ramifiées), XGA signifie xylogalacturonan.



Chapitre 2-Figure 13 : Sections d'ovaires et de fruit de tomate (variété Micro-Tom) à différents stades de développement. Les images A à D représentent le stade pré-anthèse, l'image E le stade anthèse, les images F à R le péricarpe aux stades 2 jours après anthèse (F à H), 4 jours après anthèse (I à K), 8 jours après anthèse (L à N), 13 jours après anthèse (O à P) et 24 jours après anthèse (Q et R). Les barres représentent : 30 μm (E, J, K) ; 50 μm (C, D, F-I) ; 60 μm (A, B, P, R) ; 180 μm (O, Q) ; 200 μm (M, N) ; 240 μm (L). (Pabón-Mora and Litt, 2011)

4. Le développement et le mûrissement du fruit

Le développement et le mûrissement de la tomate ont été largement étudiés et plusieurs revues bibliographiques et études comparatives décrivent son développement et son métabolisme (Pabón-Mora and Litt, 2011; Quinet et al., 2019). Le développement du fruit se divise en 4 stades : le développement de l'ovaire jusqu'à la mise en place du fruit, la division cellulaire, l'expansion cellulaire et le mûrissement. D'importants changements métaboliques ont lieu durant ces phases ainsi que des modifications des propriétés mécaniques des parois.

Avant l'anthèse, le fruit est au stade d'ovaire, de forme globulaire (Chapitre 2-Figure_ 13, photos A à D). Durant cette phase, les ovules sont initiés, des divisions cellulaires, surtout anticlinales, ont lieu, augmentant le nombre d'assises cellulaires au niveau du péricarpe. Les cellules sont parenchymateuses et indifférenciées. Au moment de l'anthèse la fleur est pollinisée et les ovules fécondés. Les cellules de péricarpe sont encore indifférenciées (Chapitre 2-Figure_ 13, photo E).

La phase de division cellulaire du péricarpe débute environ deux jours après anthèse (Gillaspy et al., 1993) se déroule durant 7 à 20 jours après l'anthèse selon les variétés et conduit à une multiplication du nombre de cellules d'un facteur 1,5 à 3. Pour les fruits de plus gros calibre, la phase de division cellulaire peut durer jusqu'à 25 jours après anthèse (Bertin et al., 2009) La division cellulaire se déroule principalement au niveau de l'exocarpe et dans la partie externe du mésocarpe, de façon anticlinale (Cheniclet et al., 2005)(Chapitre 2-Figure_ 13, photos F à K).

La phase d'expansion cellulaire débute entre 2 et 8 jours après anthèse (Renaudin et al., 2017). Lors du début de la phase d'expansion, des divisions cellulaires ont encore lieu dans le fruit. Un flux entrant de ressources carbonées entraîne une entrée d'eau par osmose et donc une turgescence, et l'expansion des cellules (Chapitre 2-Figure_ 13, photos L à M).

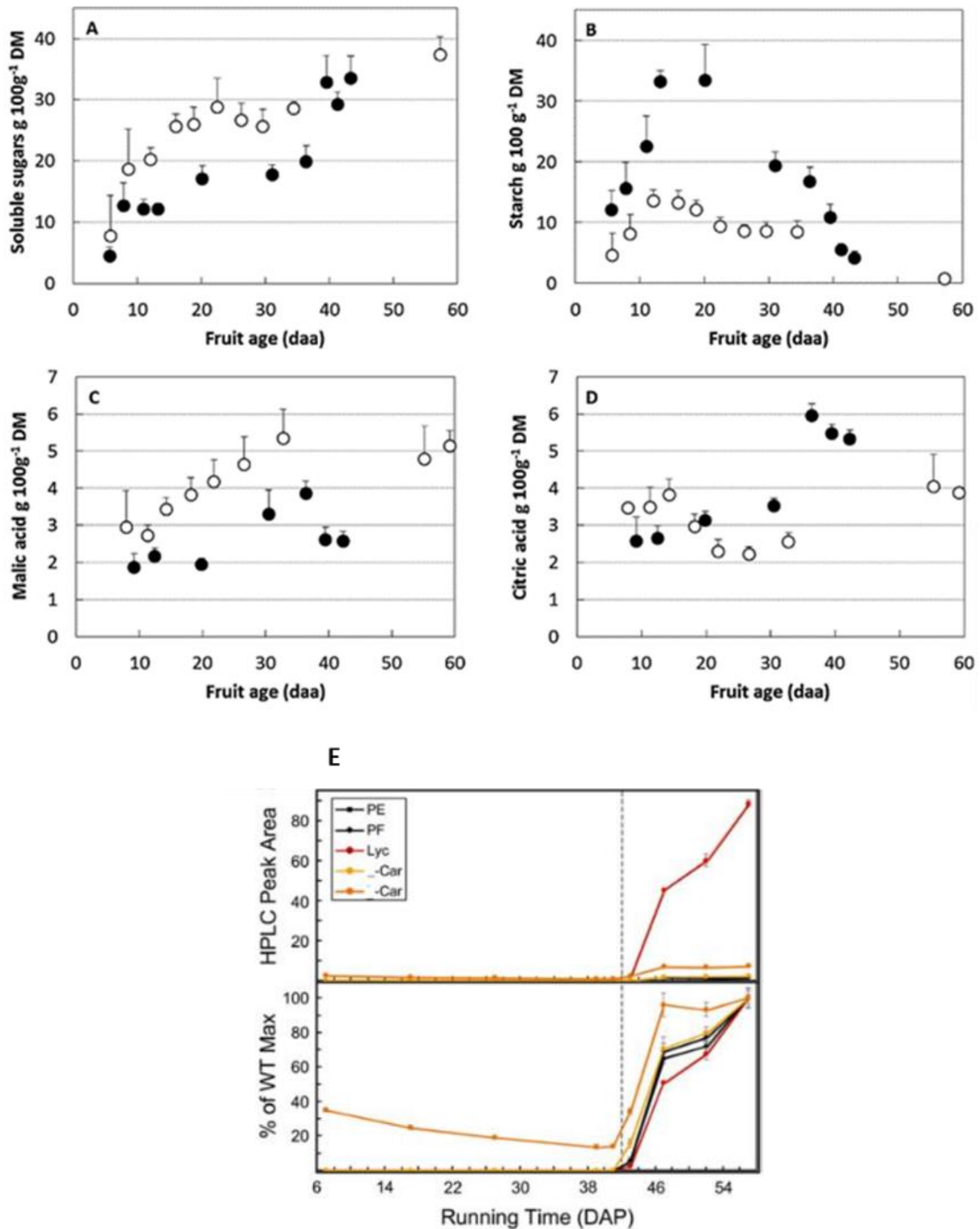
L'expansion a lieu au niveau du mésocarpe et de l'endocarpe. La taille des cellules est multipliée jusqu'à un facteur 20. De multiples endo réductions multiplient la quantité d'ADN jusqu'à 256 (8 cycles). Lors de ce phénomène, le cycle de division cellulaire est incomplet : l'ADN est dupliqué durant l'interphase mais la cellule n'est pas divisée. Cependant, l'endo réduction joue un faible rôle dans l'expansion cellulaire. Si la taille des cellules est corrélée à la ploïdie, il a aussi été démontré que la taille des cellules et du fruit peuvent être découplées de l'endo réduction (Chevalier et al., 2011). C'est aussi durant cette phase que les graines du fruit se développent. L'épaisseur du péricarpe est multipliée jusqu'à 50 fois entre l'anthèse et l'apparition de la coloration rouge (stade « Breaker ») avec de fortes disparités entre variétés, et le diamètre cellulaire atteint 200µm (Cheniclet et al., 2005). Le fruit atteint sa taille finale.

Le mûrissement se caractérise par le développement d'une couleur rouge, due à la transition de chloroplastes en chromoplastes et la synthèse de lycopène, la modification de la balance sucre/acide en faveur des sucres, la disparition des réserves d'amidon, la synthèse de composés volatils, la diminution de la pression de turgescence et de la fermeté du fruit (Gillaspy et al., 1993)(Chapitre 2-Figure_ 14).

Différents stades de mûrissement peuvent être définis visuellement et des guides existent selon les variétés pour les distinguer (Chapitre 2-Figure_ 15). La mise en place des structures décrites ci-dessus est régie par des boucles de régulations, impliquant de nombreux gènes et phytohormones (Chapitre 2-Figure_ 16). L'éthylène est primordial durant le mûrissement. Il favorise le mûrissement en activant indirectement la synthèse d'enzymes pectinolytiques. Ces enzymes dégradent les pectines des parois cellulaires et diminuent la fermeté du fruit. L'auxine a un effet antagoniste à l'éthylène durant le mûrissement et l'interaction de ces deux phytohormones est indispensable à l'obtention d'un fruit mûr (Quinet et al., 2019).

Le fruit passe d'un métabolisme en partie photosynthétique, à un métabolisme entièrement hétérotrophe, notamment par la transition des chloroplastes et chromoplastes. La transition a été mise en évidence par microscopie confocale et fluorescence (Egea et al., 2011). Au stade vert mature, les plastes sont encore des chloroplastes, puis une transition progressive s'effectue. La membrane interne est remodelée avec une lyse des thylakoïdes, et l'apparition de nouveaux complexes membranaires, lieux de la future synthèse des caroténoïdes. Le nombre de plastoglobulines augmente, notamment la fibrilline, participant à la séquestration des caroténoïdes (Chapitre 2-Figure_ 17).

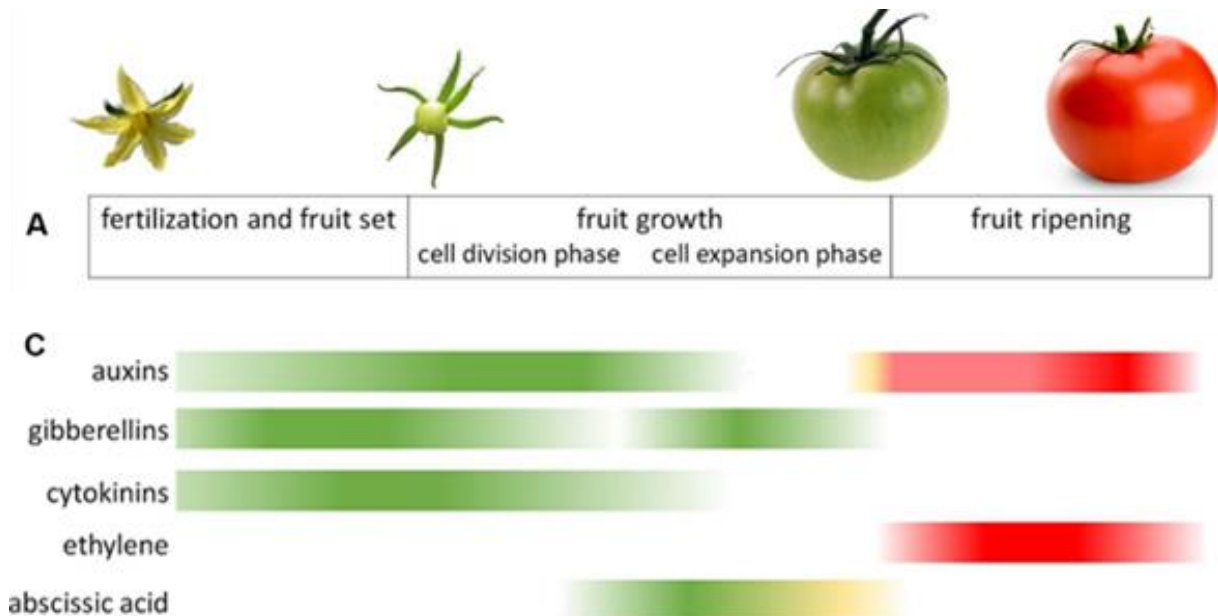
Les parois végétales, et en particulier les pectines impliquées dans l'adhésion cellulaire, sont fortement modifiées lors du mûrissement, ce qui conduit au désassemblage de la paroi et au ramollissement du fruit (Wang et al., 2018). L'action de plusieurs enzymes en est la cause (Chapitre 2-Figure_ 18). L'endo-polygalacturonase (PG) et la pectine méthylesterase (PME) sont les principales enzymes responsables du ramollissement du fruit durant le mûrissement de la tomate, et ont une action conjointe (Carrington et al., 1993; Tieman et al., 1992). La PME déméthoxye les homogalacturonanes. Son action seule peut favoriser les interactions entre les chaînes linéaires d'homogalacturonanes et donc une gélification, par interaction avec des ions divalents comme le calcium selon un modèle en « boîte d'œuf » (Ochoa-Villarreal et al., 2012). L'endo-polygalacturonase PG hydrolyse l'homogalacturonane déméthylé et conduit donc à sa dégradation en monomère ou oligomères d'acide galacturonique. L'action conjuguée de la PME et de la PG conduit donc à la déstructuration du réseau de pectines de la lamelle moyenne. La pectate lyase (PL) a une action similaire à la PG, et des plantes mutantes pour lesquelles la pectate lyase n'est pas fonctionnelle présentent plus de pectines dé-estérifiées au niveau de la lamelle moyenne et des jonctions tri-cellulaires, et donc une meilleure adhésion. Les chaînes latérales des rhamnogalacturonanes, en interaction avec les microfibrilles de cellulose dans la paroi, sont dégradées par la β -galactosidase et l' α -arabinofuranosidase. Ces réactions enzymatiques, lors du mûrissement, se produisent aussi lors de la transformation des fruits en purée et influencent la texture des purées.



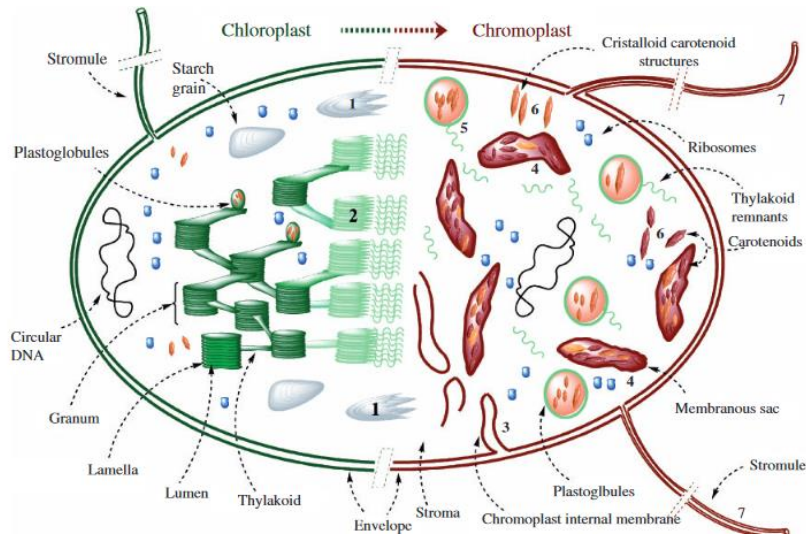
Chapitre 2-Figure 14 : Evolution de la composition en sucres solubles, amidon, acide malique et acide citrique de la matière sèche de tomates cerises (en noir) et de tomates plus larges (blanc) au cours du temps. L'âge des fruits est exprimé en jours après anthèse (A à D)(Bertin and Génard, 2018). Evolution de la quantité de caroténoïdes dans la tomate de bouche exprimée en air de pic lors d'un dosage par HPLC (variétés Ailsa Craig et Pearson) en fonction du temps. L'âge des fruits est exprimé en jours après pollinisation. PE est le phytoène, PF le phytofluène, Lyc le lycopène, car le carotène (Alba et al., 2005).



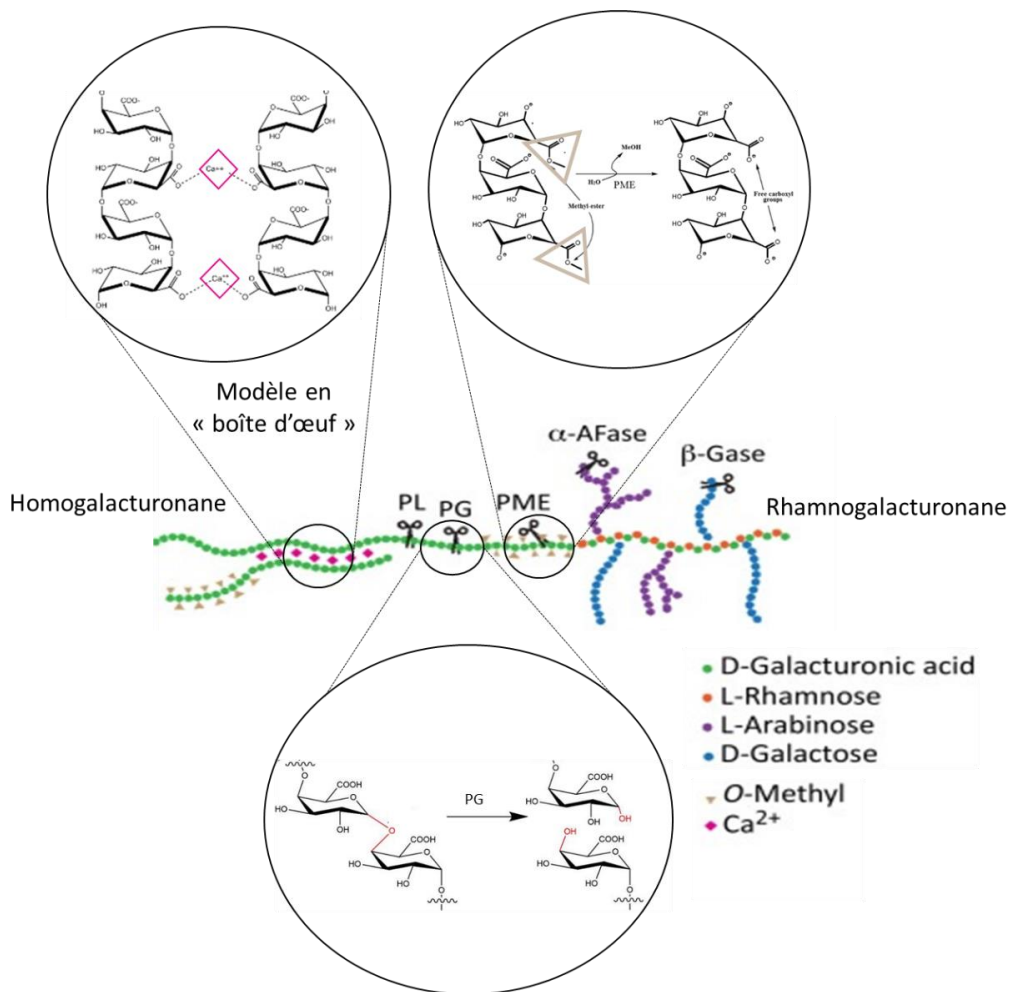
Chapitre 2-Figure 15 : Photos des différents stades de mûrissement d'une tomate d'industrie cultivée en plein champ (variété Calista F1), adapté de (Sikorska-Zimny et al., 2019) De gauche à droite un fruit vert mature, un « breaker », deux fruits tournants et un fruit rouge. Le fruit vert mature est entièrement vert. S'il est récolté, il mûrira par la suite, sans toutefois développer toutes les qualités d'un fruit récolté plus tardivement. Le stade « breaker » est lorsque la tomate verte commence à tourner au blanc ou jaune orangé selon les variétés. L'activité photosynthétique diminue, et les chloroplastes commencent leur transition en chromoplastes. Le stade tournant est lorsque 30 à 60% de la surface du fruit est orange ou rouge. Le fruit rouge est mûr et entièrement rouge et hétérotrophe. Il ne présente plus d'activité photosynthétique.



Chapitre 2-Figure 16 : Schéma des principales hormones régulant le développement de la tomate. Adapté de (Quinet et al., 2019). Lors de la pré-anthèse, la morphogenèse du fruit est majoritairement régulée dans l'espace et dans le temps par l'auxine. Puis la synthèse d'acide abscissique permet le maintien de l'ovaire à un stade dormant durant l'anthèse, jusqu'à la fécondation. Lors de la croissance du fruit, la synthèse de Gibbérelline augmente, stimule la synthèse d'auxine dans l'ovaire, qui stimule la reprise de la division cellulaire. Avant la phase de murissement, l'éthylène, produit à un niveau basal, a un rôle auto inhibiteur. Puis avant mûrissement, l'éthylène a un rôle autocatalytique, sa production est autoactivée ce qui engendre un pic d'éthylène au stade vert mature (multiplication par 100 à 300) et déclenche une cascade de réactions permettant le mûrissement. L'auxine et l'éthylène sont les deux hormones prédominantes pour le mûrissement du fruit.



Chapitre 2-Figure 17 : Schéma de la transition de chloroplaste à chromoplaste (Egea et al., 2010). A gauche un chloroplaste avec des thylakoïdes, ainsi que des plastoglobules et des grains d'amidon. A droite un chromoplaste avec des fragments de thylakoïdes, le développement de sacs membranaires séquestrant des caroténoïdes et des plastoglobules plus développés. L'amidon a été dégradé.



Chapitre 2-Figure 18 : Schéma de la structure des pectines et cibles des principales enzymes pectinolytiques. Adapté de (Ochoa-Villarreal et al., 2012; Salas-Tovar et al., 2017; Wang et al., 2018; Zhao et al., 2021). PL est la pectase lyase, PG est l'endo-polygalacturonase, PME est la pectine méthylestérase

3. Le déficit hydrique

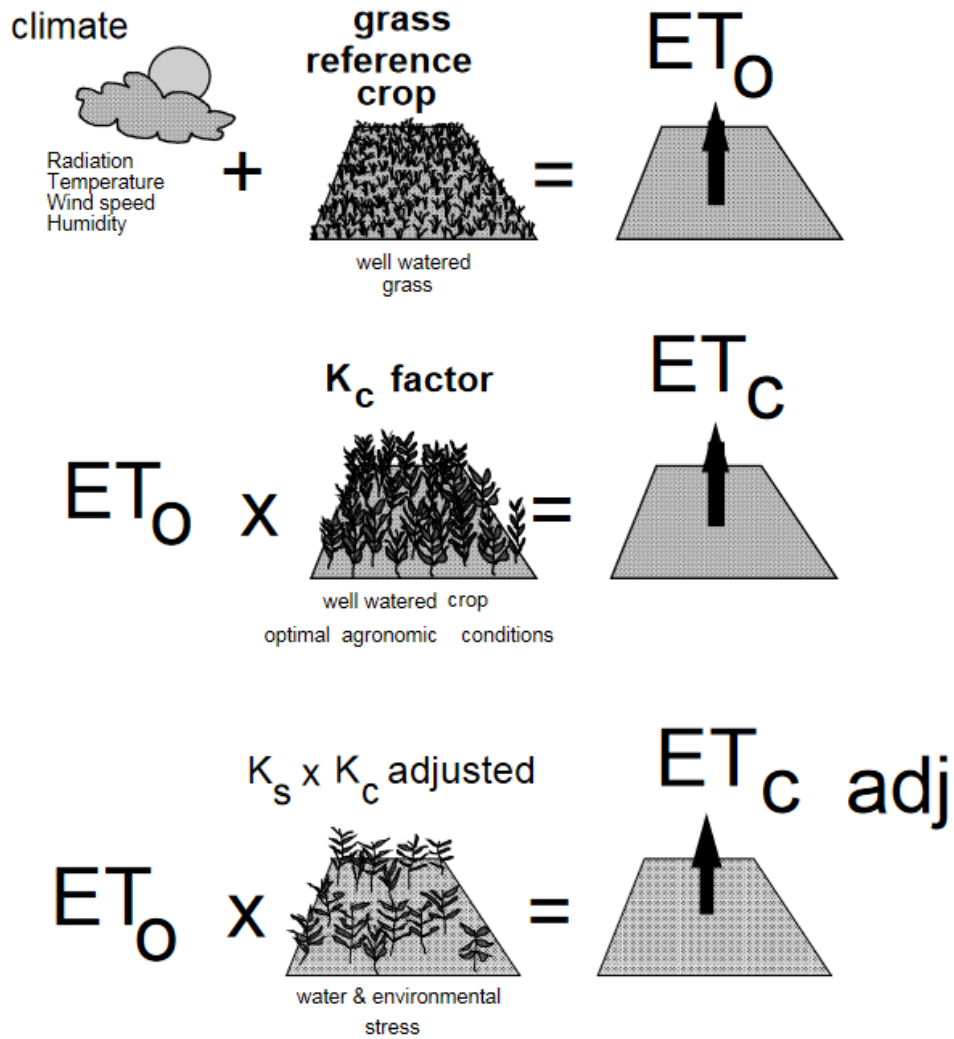
Le déficit hydrique se produit lorsque les apports en eau sont inférieurs au besoin de la plante. L'évapotranspiration de la culture est l'approche habituellement employée pour évaluer ce besoin. Il s'agit de l'évapotranspiration de référence (ET_0) multipliée par le coefficient cultural (Chapitre 2-Figure 19).

L'évapotranspiration de référence (ET_0) correspond à l'évapotranspiration théorique d'un couvert de gazon végétal, et dépend du climat de la zone de culture. Elle est généralement évaluée à partir de l'équation de Penman-Monteith (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998). Dans le cas du gazon la couverture végétale du sol est homogène et stable, tandis qu'elle évolue au cours de la croissance pour un plant de tomate, d'où la correction par un coefficient cultural. Le coefficient cultural est propre à la culture considérée et évolue au cours de son développement. Quatre stades sont habituellement considérés : initial, développement rapide, mi saison et fin de saison (Chapitre 2-Figure 20). Le plus critique est le stade à mi saison car la plante requiert des besoins en eau importants lors de l'étape critique de la nouaison et du développement des fruits. La valeur de référence mentionnée par la FAO pour la tomate est de 1.15 à mi saison (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998).

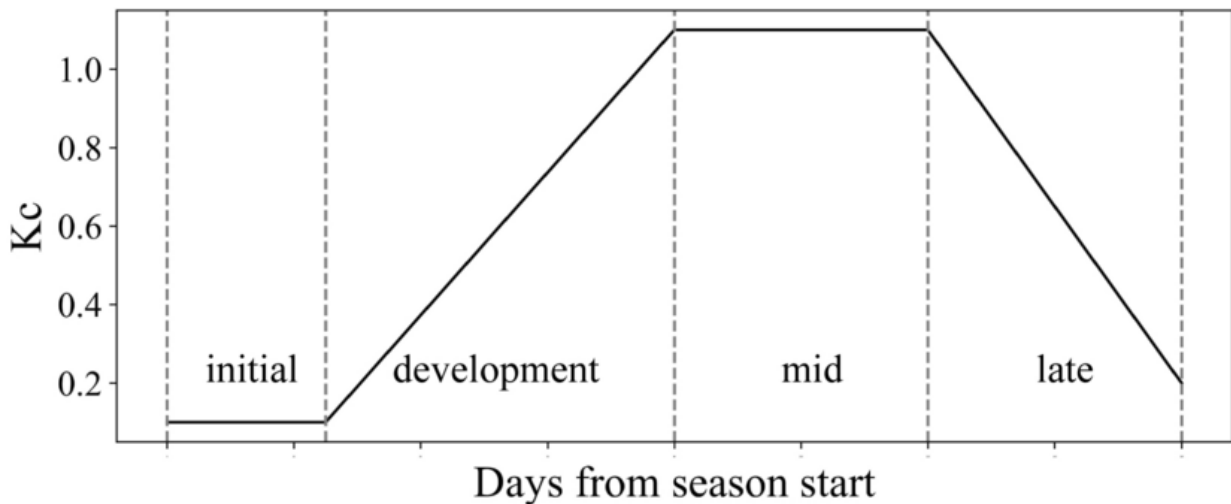
Plus récemment, le coefficient cultural à mi-saison de la tomate d'industrie a été référencé entre 1.05 et 1.25 (Francaviglia and Di Bene, 2019) et il est nécessaire de le réévaluer expérimentalement régulièrement à partir de la mesure de l'évapotranspiration de la culture (B. R. Hanson and May, 2006a). Un référencement des publications traitant de l'évapotranspiration de la culture de tomate d'industrie en milieu méditerranéen (Chapitre 2-Tableau_1) montre que les données de la FAO établies en 1998 restent majoritairement utilisées et que les besoins en eau sont aux alentours de 550 mm pour une densité d'environ 3 plantes par m^3 (374 à 742 mm selon la densité). Ceci correspond à environ 180 litres d'eau par plante et par cycle de production.

Les réponses de la plante au déficit hydrique sont dans un premier temps une diminution des échanges gazeux et de la photosynthèse, par fermeture des stomates et diminution des surfaces d'échange et une régulation osmotique pour conserver une turgescence des tissus. Puis des voies de synthèse spécifiques sont activées en réponse au déficit, et le réseau racinaire se développe davantage afin de puiser l'eau sur un plus grand volume de sol (Chapitre 2-Figure_21).

Les effets d'un déficit hydrique sont variables selon le stade de développement de la plante, l'intensité du déficit appliqué et sa durée. Différents déficits hydriques sont employés pour améliorer l'efficacité de l'irrigation (soit la biomasse de fruit produite par quantité d'eau apportée à la culture). Ainsi de nombreuses études ont été menées sur l'effet d'un déficit en eau (DI), d'un déficit en eau partiel (PDI) ou encore d'une sécheresse partielle appliquée au niveau racinaire (partial rootzone drying PRD).



Chapitre 2-Figure 19 : Formule d'estimation de l'évapotranspiration d'une culture. ET_c est l'évapotranspiration de la culture, ET_0 l'évapotranspiration de référence et K_c le coefficient cultural (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998).

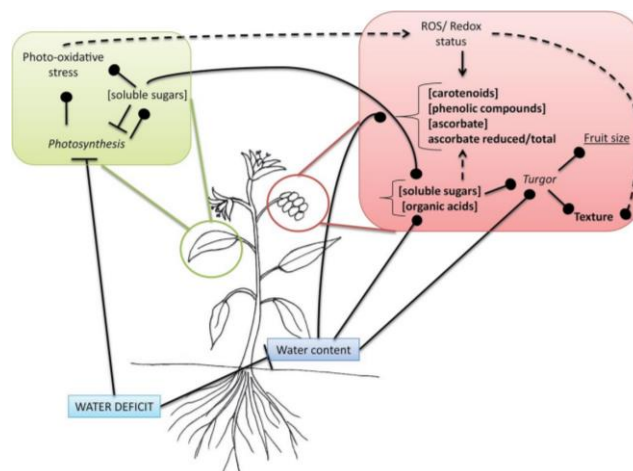


Chapitre 2-Figure 20 : Evolution schématique du coefficient cultural pour la tomate d'industrie (Pelta et al., 2022)

Chapitre 2-Tableau 1 : Tableau récapitulatif des essais menés au champ sur tomate d'industrie en milieu méditerranéen traitant de l'évapotranspiration de la culture. (Candido et al., 2015; Casa and Rouphael, 2014; Doorenbos, 1977; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998; Garofalo et al., 2011; Giuliani et al., 2016; B. Hanson and May, 2006; B. R. Hanson and May, 2006b; Lovelli et al., 2016; Patanè et al., 2011; Patanè and Cosentino, 2010; Tarantino, 1991; Vilas Boas et al., 2017)

Publication	Année de culture	Lieu de la culture	Variété	Irrigation	Evapotranspiration de reference ET0 (mm)	Evapotranspiration de la culture ETC (mm)	Coefficient cultural à mi saison	Densité de plantes au mètre carré
Hanson, 2006	2001	San Joaquin Valley, Californie	Heinz 9557, 9665, 9773	goutte à goutte	From California Irrigation Management Information System	572	0,99	non disp
	2002	San Joaquin Valley, Californie	Heinz 9773, Peto-Hypeel 303	aspersion	From California Irrigation Management Information System	742	1,08	non disp
	2003	San Joaquin Valley, Californie	non disp	aspersion	From California Irrigation Management Information System	622	1,05	non disp
	2003	San Joaquin Valley, Californie	Heinz 9557, Peto-Hypeel 303	goutte à goutte	From California Irrigation Management Information System	528	0,99	non disp
	2004	San Joaquin Valley, Californie	Heinz 9780	aspersion	From California Irrigation Management Information System	630	1,08	non disp
Rinaldi, 2015	2011	Foggia province, Italie	Defender F1	goutte à goutte	Évalué par Penman-Monteith equation	535	1,11 *	3
Giuliani, 2016	2009-2010	Foggia province, Italie	Genius F1	goutte à goutte	Évalué par Penman-Monteith equation	520-544	0,90**	2,7
Lovelli, 2016	2002-2003	Lavello, Italie	Pullrex	goutte à goutte		629-699 mesuré avec un atmomètre	0,90**	2,94
Candido, 2015	2008-2009	Metaponto, Italie	Faino F1	goutte à goutte	D'après Hargreaves and Samani 1995	426-370	0,90**	4,44
Casa, 2014	2006-2007	Viterbo province, Italie	Carioca, VF10	goutte à goutte	Évalué par Penman-Monteith equation	539-588 ****	FAO 56 valeur	3,33
Patane, 2011	2001-2002	Enna province, Italie	Brigade	goutte à goutte		378-381 with class A evaporimetric pan	1,1***	2,5
Patane, 2010	2002	Siracusa province, Italie	Brigade	goutte à goutte		374 with class A evaporimetric pan	1,1***	2,5
Vilas-Boas, 2017	2016	Avignon, France	H1315, H1311, Miceno, Terradou	goutte à goutte	Évalué par Penman-Monteith equation	non disp	1	3,3

*mesure par lysimètre issue d'une précédente étude (Garofalo, 2011)
 ** (Tarantino, 1991)
 *** (Doorenbos,1977)
 ****FAO 56



Chapitre 2-Figure 21: Illustration de la réponse de la plante au déficit hydrique(Ripoll et al., 2014).

L'effet du déficit hydrique sur les rendements dépend principalement du taux de diminution d'irrigation appliqué et du stade de développement de la plante. Un déficit hydrique appliqué tôt dans le cycle cultural peut conduire à une forte diminution des rendements, dû à l'avortement des fleurs. Dans le cas de la tomate d'industrie, un déficit hydrique appliqué à partir de l'anthèse réduit les rendements frais de la plante et peut augmenter la nécrose apicale (Zegbe et al., 2006). Cependant (Vilas Boas et al., 2018) ont observé une compensation de la diminution du rendement par une augmentation en matière sèche pour une diminution de l'irrigation 50% appliquée après anthèse. Ainsi le rendement en matière sèche, primordial pour la transformation du fruit en purée, est peu modifié.

Le déficit hydrique entraîne une concentration des composés accumulés dans le fruit (sucres acides, lycopène), une augmentation de sa fermeté ainsi qu'une augmentation du pH (Míngo et al., 2004; Patané and Cosentino, 2010). La qualité du fruit est généralement considérée comme améliorée (Ripoll et al., 2014; Veit-Köhler et al., 1999). De plus, selon le stade auquel il est appliqué, le déficit hydrique impacte la division cellulaire (plus de petites cellules au sein du péricarpe) et la vitesse de maturité (Ripoll et al., 2016b). Les effets du stress hydrique sur la teneur en lycopène sont controversés. Le lycopène est un antioxydant, protégeant des radicaux oxygénés produits en cas de stress (Klunklin and Savage, 2017). Une augmentation de la teneur en lycopène en cas de stress hydrique semblerait cohérente. Cependant l'antagonisme des voies de régulation de l'éthylène et de l'acide abscissique peuvent expliquer les effets contrastés du stress hydrique sur la teneur en lycopène. En effet, l'augmentation de l'éthylène au cours du mûrissement est corrélée positivement avec l'accumulation du lycopène tandis que l'acide abscissique produit lors d'un stress hydrique inhibe la production d'éthylène (Atkinson et al., 2011).

Un déficit hydrique peut entraîner une diminution de l'expansion et de la division cellulaire et donc une diminution de la biomasse produite, impactant les rendements. En effet, le potentiel hydrique et de turgescence est nécessaire à l'expansion des cellules. Un manque d'eau dans la plante peut générer une baisse de la turgescence. Le déficit hydrique induit aussi une augmentation de la teneur en matière sèche du fruit, par concentration (moins d'eau dans le fruit) et aussi par augmentation de la quantité de solutés organiques tels que les sucres et les acides.

4. Le déficit en azote

Selon (Benard et al., 2009), une diminution de l'apport en azote de 12 à 6 ou 4 mM entraîne une faible diminution du rendement en fruit (7%) , une diminution des acides de 10 à 16 % et une augmentation des sucres solubles de 5 à 17%. Peu d'études semblent porter sur l'effet de l'apport en azote sur la teneur en lycopène, et les résultats sont contrastés. Dans certaines études une diminution de l'azote augmente la teneur en lycopène (Montagu and Goh, 1990) tandis qu'une augmentation d'azote induit une augmentation des caroténoïdes dans de nombreuses plantes (Mozafar, 1993).

II. La purée

1. Les procédés de transformation

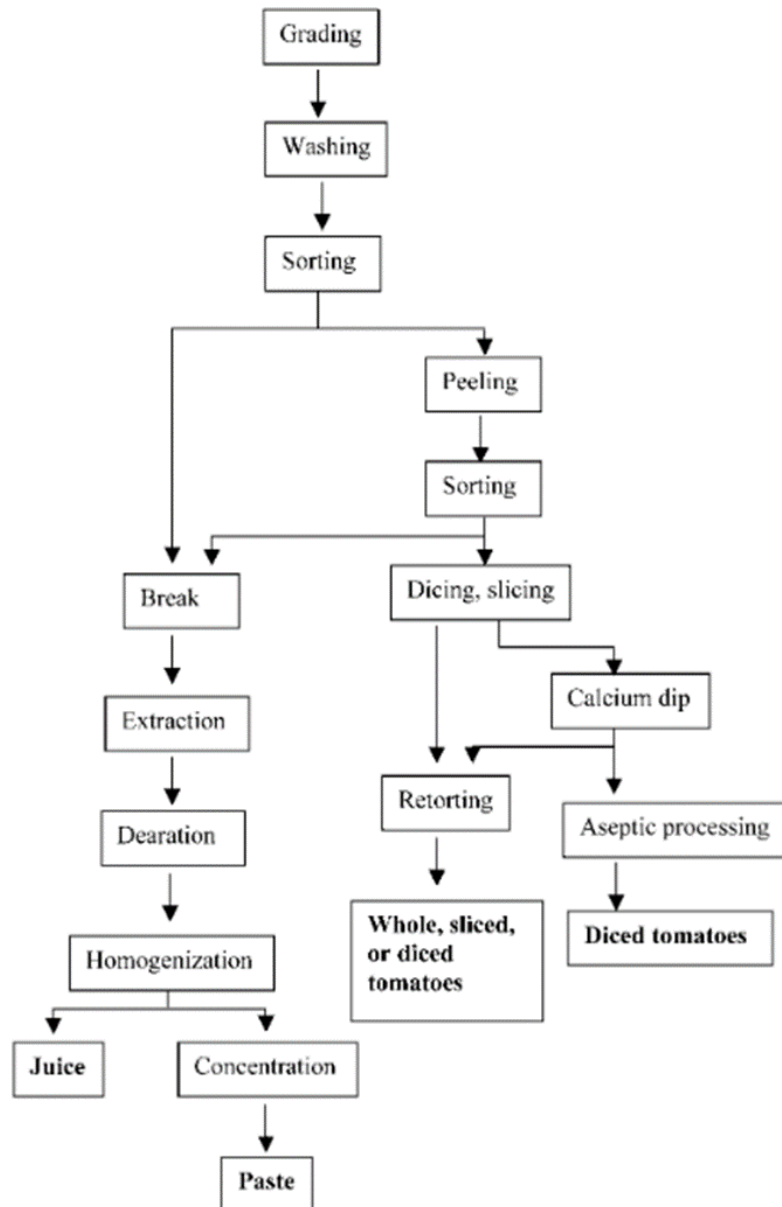
Lors de la transformation des tomates en purées les fruits subissent d'abord un nettoyage par trempage et un rinçage par jet pour retirer les résidus, qui représentent un risque sanitaire, affectent la qualité sensorielle et endommagent les équipements de transformation. Puis les fruits sont triés (souvent par trieur optique) pour retirer ceux présentant des défauts, et orienter les fruits pour la transformation en tomates entières pelées (gros calibre, sans défauts) ou bien en pulpes et concentrés (SONITO, 2011). Pour réaliser des purées, l'étape de « break » correspond au broyage et à la cuisson, qui peuvent se faire selon deux procédés. Le procédé Cold Break, par un broyage et un chambrage entre 60 et 66°C permet l'action des enzymes PME et PG. Le procédé Hot Break désactive thermiquement ces enzymes par un broyage à chaud, entre 93 et 99°C (Barringer, 2004). Le raffinage permet d'ôter la peau et les pépins. Selon le diamètre des trous, la taille des particules de pulpe est variable et conduit à des purées plus ou moins lisses. Le produit est ensuite conditionné et pasteurisé (Chapitre 2-Figure_ 22). Une partie des purées est conditionnée en petit volume, et est destinée à l'usage des particuliers. Une autre partie est conservée dans des tanks de grands volumes, pour une utilisation différée. Les purées peuvent aussi subir une concentration supplémentaire, pour réduire leur masse et leur coût de transport. Les concentrés sont ensuite redilués et utilisés comme ingrédients dans l'industrie agroalimentaire, par exemple dans les plats cuisinés.

2. Composition

La composition nutritionnelle des purées de tomate est très proche de celle du fruit frais (Chapitre 2-Tableau 2). Les principales différences sont dues à la phase de raffinage du produit, qui retire la peau, les pépins et une partie des fibres ; à la phase de concentration du produit, qui en retirant une partie de l'eau concentre les autres composés ; et au traitement thermique qui dégrade certains composés comme le lycopène (Koh et al., 2012; Manzo et al., 2019). Le lycopène est présent sous forme cristalline dans la tomate fraîche (Jeffery et al., 2012), et le traitement thermique modifie sa diffusibilité et la composition des glycolipides entourant le lycopène dans la purée (Page et al., 2019).

3. Structure

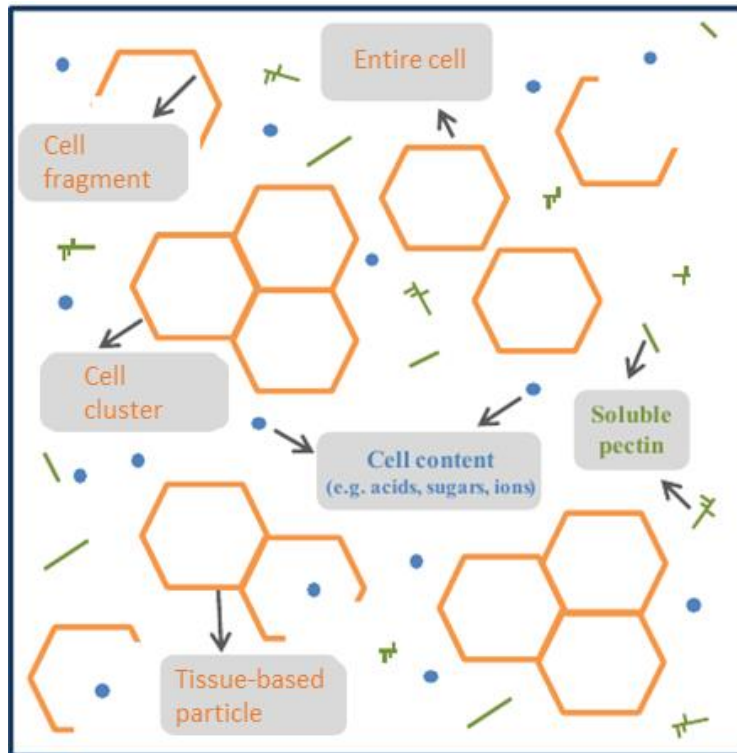
D'un point de vue structurel, la purée de fruit est une suspension de particules (amas de cellules, cellules ou débris de cellules) nommées pulpe, dans un milieu continu nommé sérum et constitué de sucres et pectines solubles (Espinosa, 2012; Leverrier, 2016)(Chapitre 2-Figure_ 23). Les particules en suspension dans la purée de tomate sont des fragments de cellules ou des cellules seules, tandis que des clusters de cellules sont observables dans les purées de carotte ou brocolis (Chapitre 2-Figure_ 24). La taille de ces particules est modifiée par le procédé de transformation, les particules étant plus petites en Hot Break (Lopez-Sanchez et al., 2011). Cependant, la purée est un milieu concentré, et une dilution est nécessaire à l'observation. Les particules, déformables, peuvent présenter des volumes différents de ceux au sein de la purée.



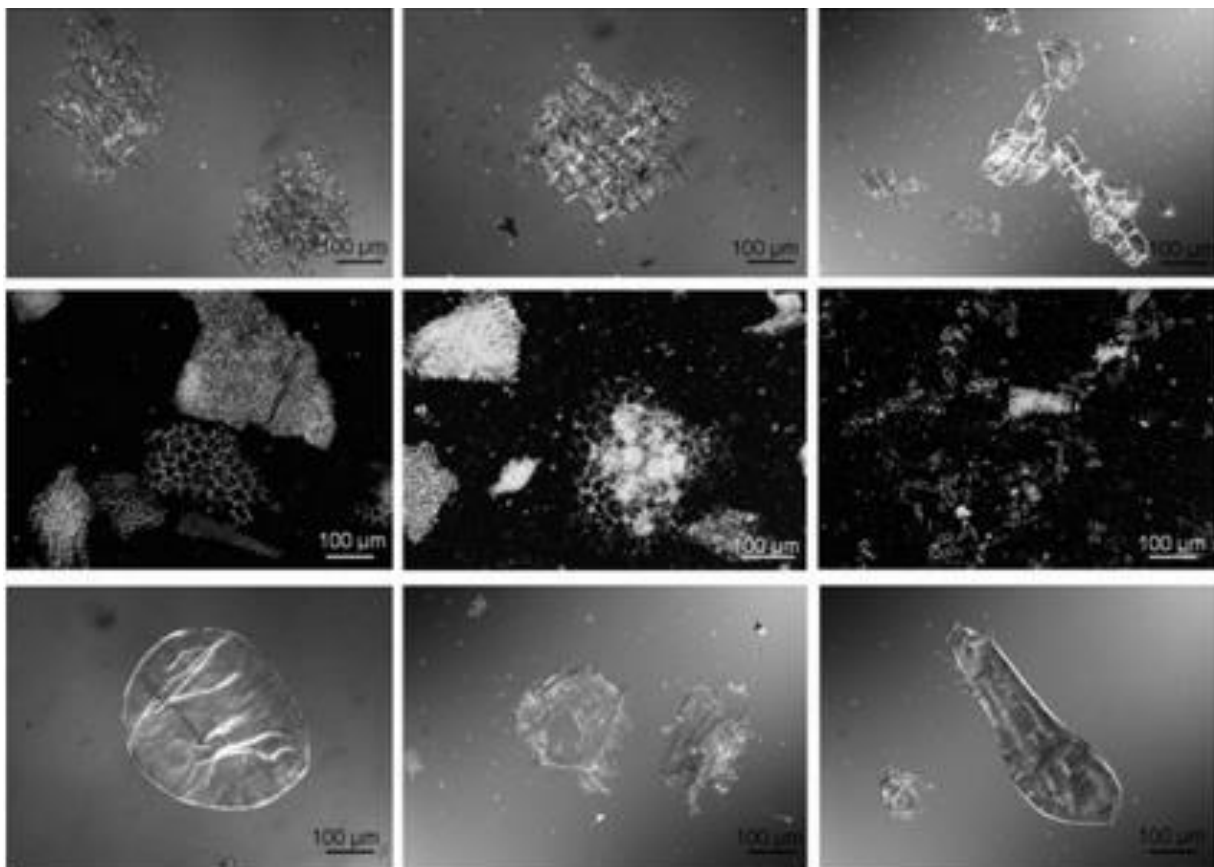
Chapitre 2-Figure 22 : Diagramme de transformation des tomates d'industrie(Barringer, 2004). A gauche la transformation en jus et purées, par procédé « hot break » ou « cold break » et à droite la transformation en tomates pelées, entières ou en dés.

Chapitre 2-Tableau 2 : Composition des principaux dérivés de la tomate (ANSES, 2022)

Composition (g/100g)	Tomate pelée appertisée égouttée	Pulpe de tomate appertisée	jus de tomate, pur jus	Purée de tomate appertisée	Coulis de tomate appertisé (purée mi-réduite à 11%)	Double concentré de tomate appertisé
Eau	94,4	93	94,1	85,6	88,2	74,13
Protéines	1,07	1,2	0,88	1,4	2,05	3,73
Glucides	1,89	3,63	3,72	7,54	8,53	17
Lipides	0,28	<0,5	0,14	0,4	0,2	0,29
Sucres	1,88	3,2	3,72	3,64	5,5	16,5
Fibres alimentaires	1,27	1,8	0,4	2,38	2,6	3,62
Acides organiques	0,46	0,45	0,4	1	traces	traces



Chapitre 2-Figure 23 : Schéma de la structure d'une suspension de particules végétales. Adapté de (Moelants et al., 2014b)



Chapitre 2-Figure 24 : Images de purées obtenues en microscopie. De haut en bas : carotte, brocolis, tomate. De gauche à droite : produit cru, CB et HB (Lopez-Sanchez et al., 2011).

4. Attributs sensoriels

Les aliments lorsqu'ils sont analysés par des consommateurs naïfs, sont décrits avant tout par leur goût et arôme, cependant la texture intervient de façon inconsciente dans l'évaluation et est un critère important de dépréciation du produit : le goût et l'arôme du produit ne sont évalués que si la texture est acceptée (Scott and Downey, 2007). Si la texture et la saveur des sauces tomate est évaluée par les industriels depuis de nombreuses années (Chapitre 1-Figure 10, page 21), les attributs concernant la saveur restaient peu définis et sans référence d'intensité et les attributs concernant la texture bien que plus objectifs étaient mesurés à l'aide d'appareils plus que par analyse sensorielle.

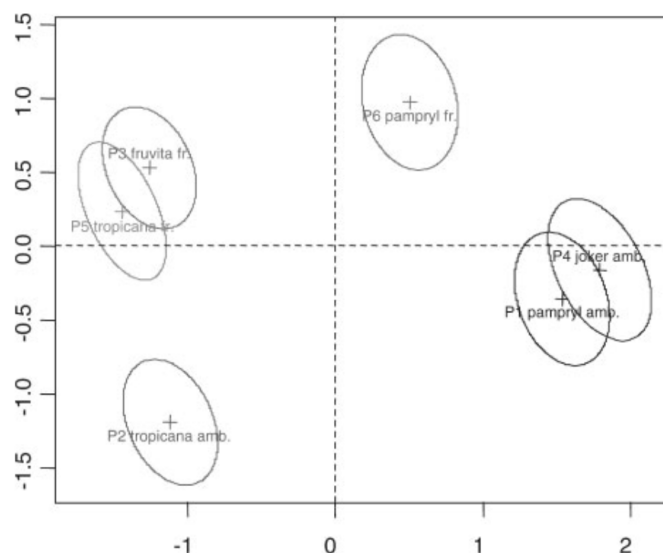
La texture d'un aliment est un critère multifactoriel, complexe, qui fait intervenir des composantes motrices et sensorielles du système nerveux du consommateur. La texture peut être définie comme « la propriété d'une substance résultant d'une combinaison de propriétés physiques et perçues par les sens que sont le toucher, la vue et l'ouïe. Les propriétés physiques peuvent inclure la taille, la forme, le nombre, la nature et la conformation des éléments structuraux qui le constituent » (traduit de Jowitt, 1974). Ces propriétés physiques du produit influent aussi sur son comportement lors de déformations, et Bourne (1982) ajoute à cette définition la notion de déformation, désintégration et d'écoulement du produit sous l'action d'une force. Hongsoongnern and Chambers Iv (2008) constatent que peu d'études portent sur les attributs sensoriels des tomates transformées et en proposent un lexique (Chapitre 2-Tableau 3). La texture des purées y est principalement décrite par son épaisseur, sa viscosité, la quantité de pulpe et la sensation farineuse, et ces attributs permettent une discrimination des produits par des dégustateurs, avec une forte corrélation entre la viscosité et la taille de la pulpe (Hongsoongnern and Chambers Iv, 2008).

Le napping est une méthode holistique d'analyse sensorielle qui consiste à proposer à un jury de positionner des échantillons sur la surface d'une nappe, selon leurs ressemblances et dissemblances (rapprocher des échantillons ressemblants et éloigner des échantillons dissemblants)(Lê et al., 2015; Pages, 2003). Les critères de choix sont propres à chaque juge. L'analyse est ainsi basée sur la distance des produits entre eux, par une analyse factorielle multiple (AFM) (Pagès, 2004; Pagès and Husson, 2005). Cette méthode peut être réalisée avec un petit nombre de juges (10 à 15) non entraînés et permet d'évaluer si les produits sont clairement distingués les uns des autres par les juges, sans toutefois associer de critères de distinction. La génération de panels virtuels par la méthode de « bootstrap » permet d'illustrer par des ellipses de confiance l'incertitude de position des différents échantillons sur la nappe moyenne des individus et de conclure sur la distinction ou non des produits (Chapitre 2-Figure_ 26). Cette méthode a pour avantage d'être rapide à mettre en œuvre (pas de jury entraîné, ni de séance de définition de descripteurs) et de nécessiter peu de juges par rapport par exemple à un test triangulaire.

Si la texture du produit peut être évaluée en analyse sensorielle, elle est aussi appréhendée de manière plus objective par des outils tels que le rhéomètre à travers la mesure de la viscosité et de la consistance.

Chapitre 2-Tableau 3 : Attributs sensoriels de dérivés de tomate(Hongsoongnern and Chambers Iv, 2008)

Attribute	Definition	Reference* and intensity†
Aroma		
Tomato ID	The aromatics commonly associated with tomato, which may be described as sweet, fruity, earthy, viney, ripe and sour (citric).	Campbell's Tomato Juice = 8.0
Browned	Dark impression often associated with toasted and caramelized.	Great Lakes Sun Dried Tomato = 10.5 Contadina Tomato Paste = 7.5
Texture		
Mealiness	A geometric attribute within the product. The perception of fine, soft, somewhat round and smooth particles evenly distributed within the product.	Fresh Pear, peeled, 1/2 in. cubed = 8.0
Pulp amount	A measure of the amount of perceivable pulp in the liquid portion of and the pureed products, evaluated by manipulating the product to the roof of the mouth with the tongue.	Hunt's Tomato Sauce = 8.0 Contadina Tomato Paste = 14.0
Thickness	A measure of resistance of the pureed product when stirred with a spoon.	Campbell's Tomato Juice = 4.0 Hunt's Tomato Sauce = 7.0 Musselman's Applesauce = 13.0
Viscosity	Degree of resistance to flow. Evaluated by the rate of flow of liquid when sample is poured from a spoon, using 1 tsp sample.	Campbell's Tomato Juice = 4.0 Hunt's Tomato Sauce = 7.5 Musselman's Applesauce = 13.0
Flavor		
Tomato ID	The aromatics commonly associated with tomato, which may be described as sweet, fruity, earthy, viney, ripe and sour (citric acid).	Campbell's Tomato Juice = 10.0
Browned	Dark impression often associated with toasted and caramelized.	Hunt's Tomato Sauce = 8.0 Contadina Tomato Paste = 10.0
Ripeness	A sweet full flavor of mature fruit. (Unripe → overripe)	Campbell's Tomato Juice = 10.0
Cooked	The brown (not caramelized), woody aromatics associated with cooked and/or processed tomatoes. (Uncooked → cooked)	Campbell's Tomato Juice = 9.5



Chapitre 2-Figure 25 : Exemple de représentation de jus d'oranges analysés par méthode de napping, selon les deux principaux axes de l'AFM ($F_1=61.24\%$ et $F_2=16.29\%$). Les points sont les coordonnées moyennes de chaque produit sur la nappe moyenne, et les ellipses de confiance (95%) représentent l'incertitude de la position, à partir de panels virtuels générés par méthode de bootstrap (Pagés and Husson, 2005). Les jus « tropicana fr » et « fruvita fr » sont confondus entre eux, mais distingués du jus « pampryl fr ».

5. Propriétés texturales

La purée de tomate est un aliment semi-solide, qui ne nécessite pas de mastication. Durant la consommation, la purée subit des contraintes mécaniques (cisaillement, compression) en bouche, par action de la langue sur le reste de la cavité buccale. Le comportement du produit lors de ces déformations modifie la perception en bouche et la déglutition (Stokes, 2012). La rhéologie est la science de la déformation et de l'écoulement (Mezger, 2014), et peut mimer les contraintes appliquées à la purée lors des processus oraux, afin de définir ses propriétés d'écoulement et de les relier à la perception de la texture en bouche. La viscosité d'un produit est « la friction interne d'un fluide ou sa tendance à résister à l'écoulement » (traduit de Bourne, 1982). La texture et la viscosité sont donc deux paramètres différents, même si ils sont parfois confondus et employés de manière similaire pour définir des produits semi-solides (Barrett et al., 1998). Différents appareils peuvent être employés, pour appréhender la texture des purées.

1. Le consistomètre de Bostwick

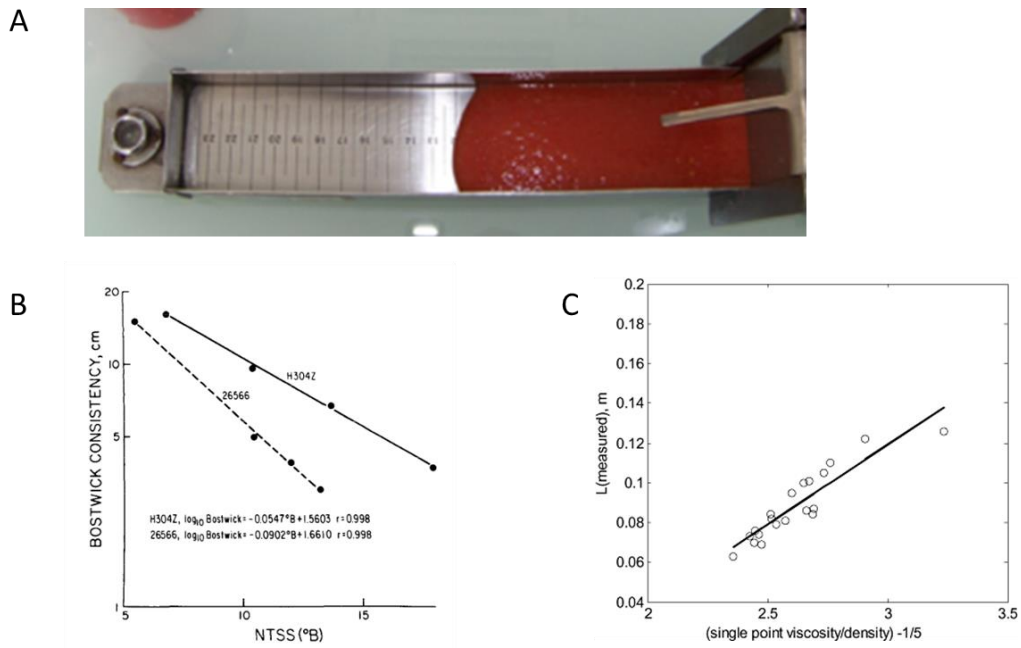
Dans l'industrie, la consistance des purées est mesurée à l'aide d'un consistomètre (Bostwick) (Mccarthy et al., 2008), outil simple et peu coûteux qui permet une évaluation rapide. Le produit est déposé sur une rampe inclinée et la consistance est la distance parcourue par le produit qui s'écoule par gravité durant un temps donné. Cette mesure est corrélée à la teneur en sucres solubles de la purée ainsi qu'à la viscosité (Chapitre 2-Figure_ 27). Cependant la mesure est subjective, et varie avec l'opérateur ou encore l'humidité du consistomètre au moment de la mesure (Cullen et al., 2001) et donne peu d'informations sur les propriétés rhéologiques du produit.

2. Le rhéomètre

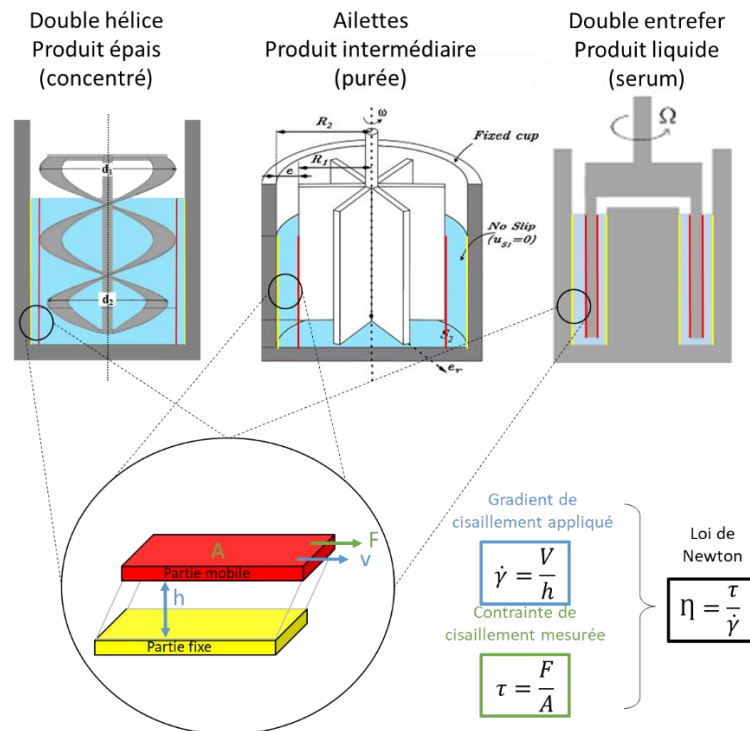
Le rhéomètre permet l'étude des propriétés d'écoulement et de déformation d'un produit en reliant la déformation appliquée au produit à la contrainte qui en résulte. Pour définir la viscosité du produit, un gradient de cisaillement, qui correspond à une vitesse d'écoulement, est appliqué au produit et la contrainte qu'exerce le produit est mesurée. La loi de Newton définit la viscosité comme le rapport de la contrainte de cisaillement par le gradient de cisaillement (Chapitre 2-Figure_ 28).

3. Propriétés rhéologiques des purées de tomate

Les fluides sont classés en différentes catégories selon leurs propriétés d'écoulement. Les particules de purée sont concentrées et donc en interaction les unes avec les autres. Les particules colloïdales telles que les pectines sont en interaction entre elles par des forces de Van der Waals (attraction entre deux particules proches) ou par des forces électrostatiques si elles sont chargées. Les particules de la pulpe telles que les fragments cellulaires peuvent entrer en contact direct ou bien en contact lubrifié si une couche de sérum les sépare (Leverrier, 2016). Ainsi la purée de tomate est un gel faible rhéofluidifiant à seuil d'écoulement. Pour de faibles cisaillements ce réseau garde sa structure, puis il se rompt lorsque le cisaillement seuil est atteint, occasionnant l'écoulement du produit. Ceci est dû au réagencement des particules en suspension, qui s'alignent. Leur comportement peut être modélisé par les modèles d'Herschel-Bulkley ou Oswald de Waele au-delà du seuil d'écoulement (Chapitre 2-Figure_ 29).



Chapitre 2-Figure 26 : Photo de la mesure de consistance d'une purée de tomate à l'aide d'un consistomètre Bostwick. Crédit photo : Alexandre Arbex de Castro Vilas Boas (A). Relation entre la consistance et la teneur en sucres solubles de deux variétés de tomate d'industrie (Marsh et al., 1980) (B) et entre la consistance et la viscosité de ketchup (Mccarthy et al., 2008) (C).

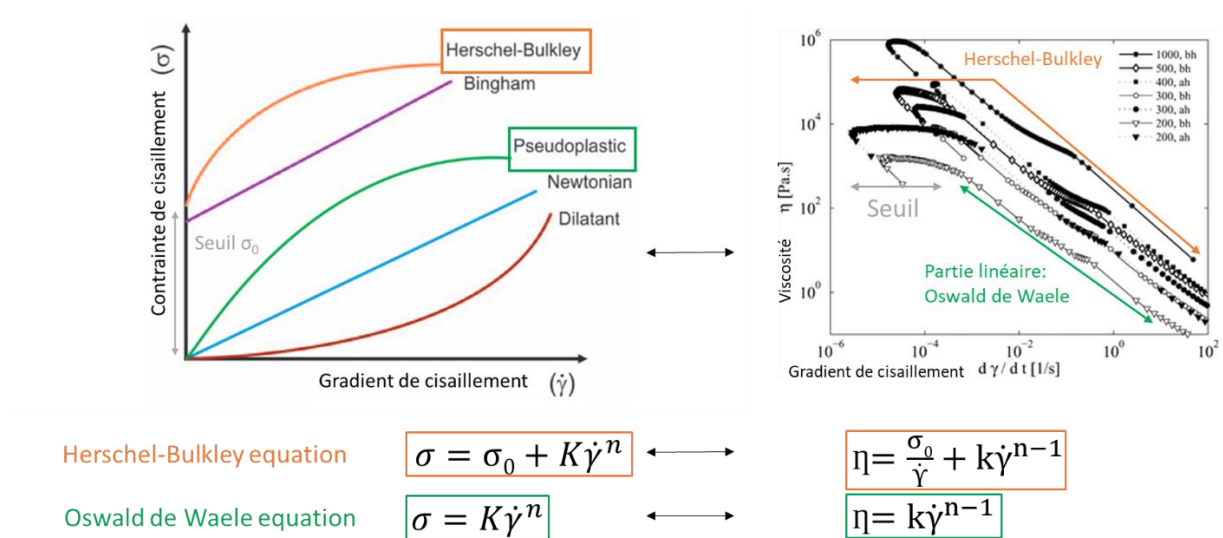


Chapitre 2-Figure 27 : Schéma de mobiles employés en rhéologie pour la mesure de la viscosité d'un produit, et définition de la viscosité. La double hélice le phénomène de glissement le long de la paroi fixe, qui empêcherait l'application d'un gradient de cisaillement. Il est adapté pour des mesures de purées épaisses ou dans le cas d'un ensemble d'échantillons dont les épaisseurs sont contrastées. Les ailettes sont utilisables sur des purées, si l'espace entre le mobile et la paroi fixe est dimensionné par rapport à la taille des particules pour éviter les turbulences et favoriser un écoulement laminaire. Le double entrefer est adapté à des produits liquides, de faible viscosité tel que le sérum, car la surface d'échange entre le mobile et la paroi fixe est doublée.

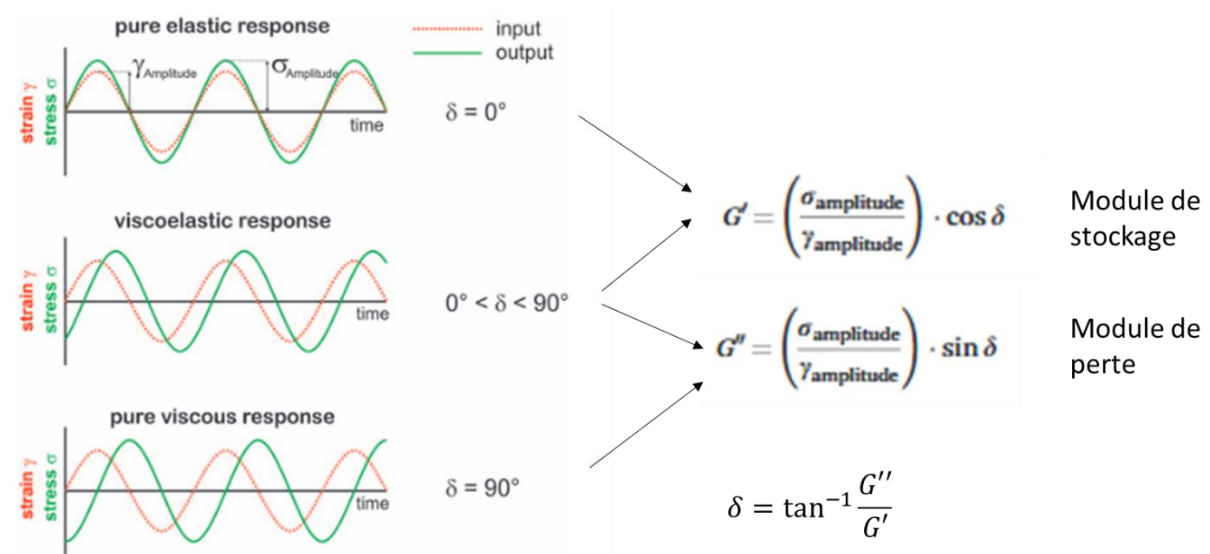
Les purées présentent aussi des propriétés viscoélastiques, avec un comportement intermédiaire entre les fluides Newtoniens visqueux, et les solides élastiques. Ces propriétés sont notamment importantes pour la stabilité des produits lors de la conservation (limiter les déphasages) et le comportement lors de la transformation. Ces propriétés sont étudiées par des tests oscillatoires, d'amplitude ou de fréquence variable. Le gradient de cisaillement est appliqué de façon sinusoïdale, et le déphasage (δ) entre ce gradient et la contrainte mesurée définit la viscoélasticité. Les modules de stockage (G') et de perte (G'') définissent respectivement les propriétés élastiques et visqueuses (Chapitre 2-Figure_ 30). Au repos et pour de faibles cisaillements, G' est supérieur à G'' dans les purées de tomates, traduisant une structure de gel faible. Pour de plus forts cisaillements, lorsque le produit d'écoule, G'' est plus élevé.

Les valeurs de l'ensemble de ces paramètres rhéologiques sont modifiées par le procédé de transformation.

- La quantité de pulpe, qui peut être modifiée par ajout de pulpe dans la purée, ou par concentration (évaporation de l'eau) est fortement corrélée à la viscosité de la purée.
- La viscosité du sérum, qui est plus importante lors du procédé HB, et qui est modifiée par l'étape de concentration : A fraction de pulpe égale, la viscosité de la purée augmente avec la viscosité du sérum.
- La distribution de taille et la forme des particules- modifiables par le choix du break et du raffinage, ainsi que par homogénéisation des purées à haute pression-ont des effets variables sur la viscosité des purées.



Chapitre 2-Figure 28 : Classification des fluides selon leur réponse au gradient de cisaillement, adapté de (Kubo et al., 2019) et exemple d'application des modèles d'Herschel-Bulkley et Oswald de Waele sur la viscosité de purées de tomates, adapté de (Bayod et al., 2007). Le modèle d'Herschel Bulkley est le plus employé dans l'étude des jus et purées de fruits. Au-delà du seuil d'écoulement, le modèle en loi de puissance d'Oswald de Waele est applicable.



Chapitre 2-Figure 29 : Schématisation des tests oscillatoires dans le cas de purées élastique, viscoélastique et visqueuse, d'après (Kubo et al., 2019). La purée de tomate a des propriétés viscoélastiques. Définition des modules de stockage, de perte, et du déphasage.

III. La qualité texturale des purées, un continuum du champ à la conserve

Si les effets des pratiques culturales sur la qualité et la structure du fruit ont été largement étudiées, de même que les effets des procédés de transformation sur la texture des purées, peu de travaux mettent en lien l'amont agricole et l'aval industriel, pour proposer un continuum dans la gestion des multiples composantes de la qualité du produit fini. Il a été montré lors du premier volet du projet tomability que la distribution des tailles de particules de purée semble modifiée par le déficit hydrique. Le volume moyen occupé par les particules de diamètre supérieur à 80 μ m diminue. Ceci pourrait s'expliquer par un lien entre taille des cellules de péricarpe et taille des particules dans la purée (Arbex de Castro Vilas Boas, 2018). Cependant, cette diminution de la taille des grosses particules sur les purées de l'année 2017 n'a pas été confirmé depuis.

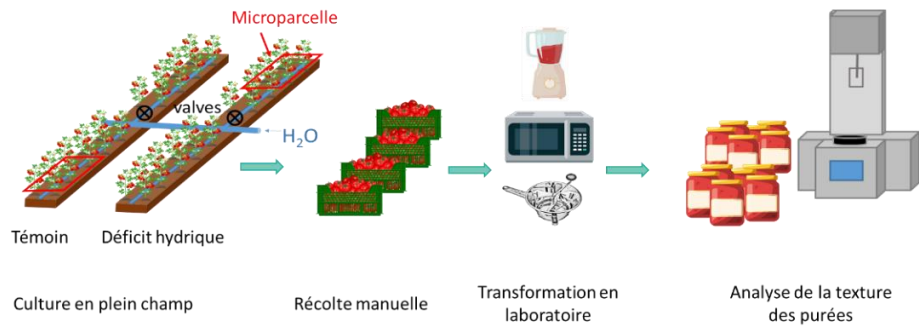
Chapitre 3 Démarche et dispositif expérimental

Afin d'étudier les effets des déficits hydrique et azoté sur le rendement, la qualité des fruits frais et des purées de tomate, des essais incluant plusieurs variétés ont été mis en place par la SONITO sur un champ expérimental d'un hectare, chez un agriculteur, à Piolenc, en 2019, 2020 et 2021 selon des conditions contrôlées d'irrigation et de fertilisation. Une récolte manuelle sur des microparcelles au sein de la culture, suivie d'une transformation en purée en laboratoire (INRAE SQPOV) mimant les procédés CB et HB ont été réalisées afin d'étudier les rendements, la qualité des fruits et les propriétés texturales sur toutes les modalités présentées (variété x irrigation x fertilisation x procédé)(Chapitre 3-Figure 1).

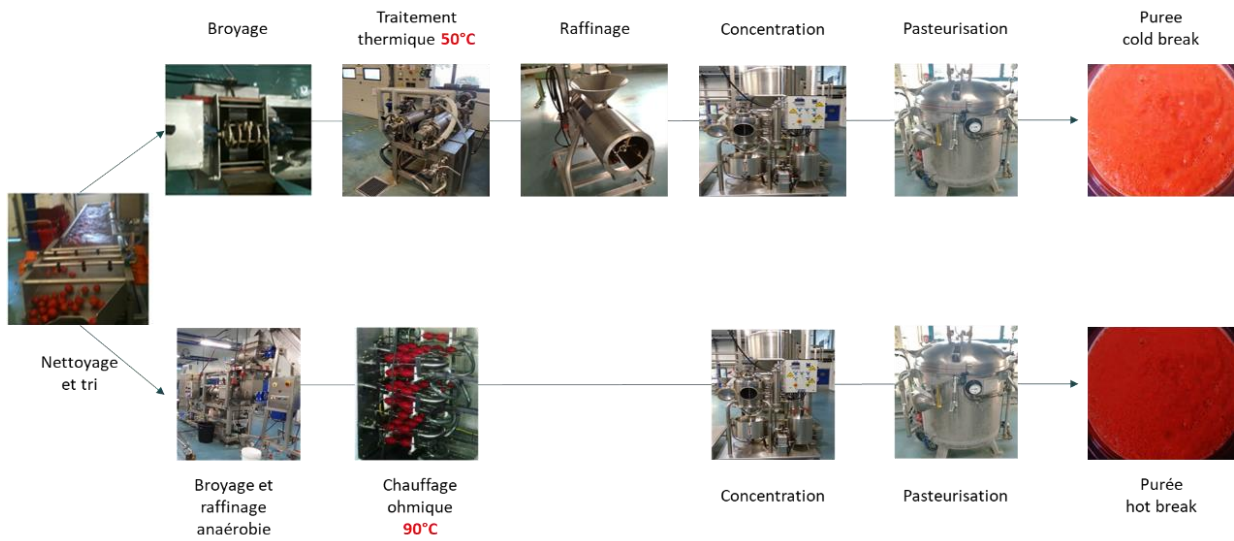
Afin de définir les paramètres à l'origine des différences de texture selon les variétés et les procédés de transformation, une seconde récolte plus importante en volume a été réalisée en même temps sur les mêmes essais au champ. Les fruits de quelques modalités sélectionnées ont été transformés en halle pilote par le CTCPA (Chapitre 3-Figure_2), afin d'obtenir de plus grands volumes de produit stabilisé et d'étudier en détail les propriétés rhéologiques et structurales des purées (Chapitre 3-Figure 3).

Afin d'étudier les liens entre la structure des fruits et la viscosité et structure des purées dans des conditions de déficit hydrique mieux contrôlées, une expérimentation a été menée en serre (INRAE PSH), suivie d'une récolte et transformation en purée en laboratoire.

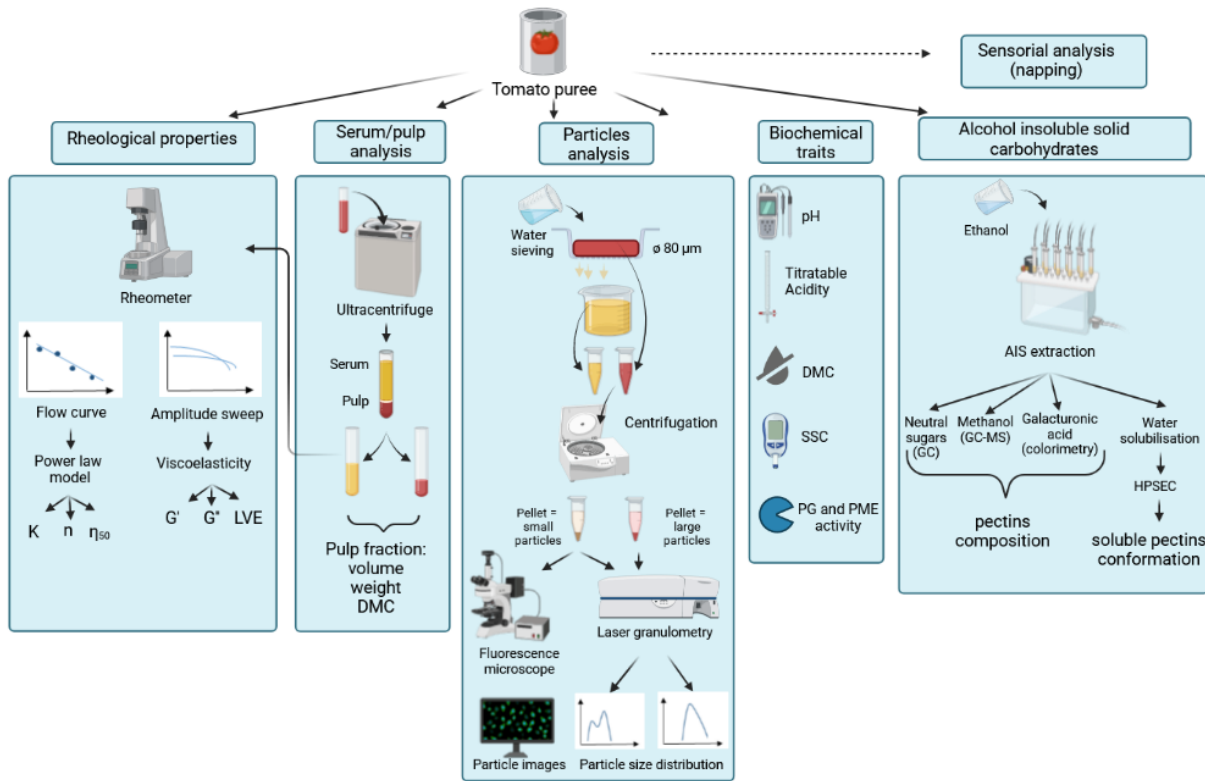
L'ensemble des dispositifs mis en place pour répondre aux objectifs du projet est schématisé (Chapitre 3-Figure 4).



Chapitre 3-Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental mis en place pour étudier les effets des paramètres agro-environnementaux sur la qualité des récoltes et la texture des purées et répondre à l'objectif 1.

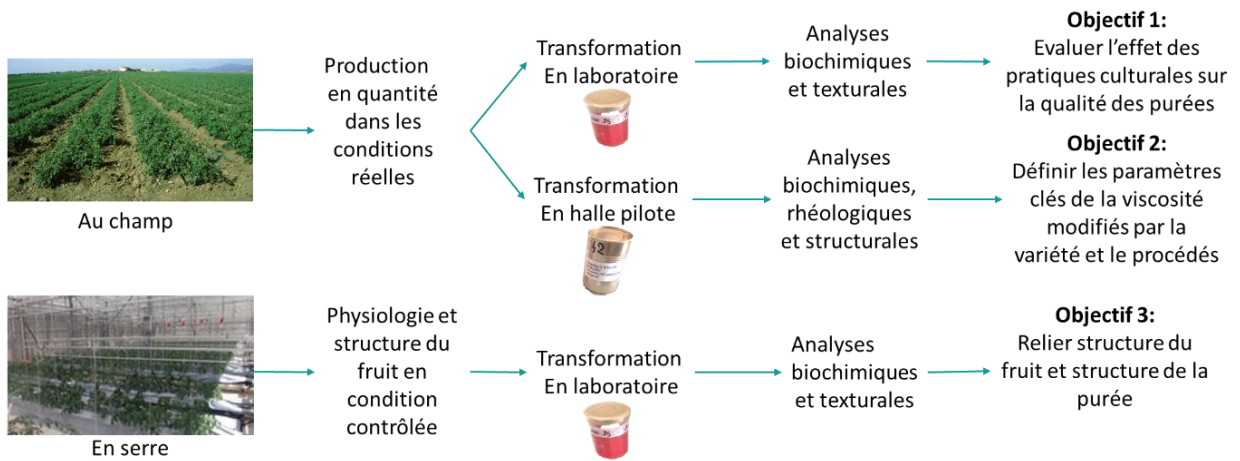


Chapitre 3-Figure 2 : Diagramme des procédés de transformation CB et HB effectués en halle pilote pour répondre à l'objectif 2. Photos : François Zuber (CTCPA)



Created in BioRender.com

Chapitre 3-Figure 3 : Diagramme des expérimentations menées sur les purées de tomate pour répondre à l'objectif 2



Chapitre 3-Figure 4 : Schéma récapitulatif des essais mis en place pour répondre aux objectifs de recherche.

Chapitre 4 Tomato puree quality under fluctuating environment: from field to can

Le changement climatique et l'impact environnemental des activités humaines amènent le secteur agricole à repenser le pilotage des intrants au champ. Les périodes de sécheresse plus fréquentes créent en particulier une pression sur la ressource en eau. Or de précédents travaux ont montré les bénéfices d'un déficit hydrique maîtrisé sur la qualité des fruits. La fertilisation doit aussi être ajustée en fonction des apports en eau.

Ce travail met en avant l'importance d'une approche intégrée pour l'évaluation des effets agro-environnementaux dans le cas des fruits destinés à la transformation. La prise en compte de l'aval industriel dans l'évaluation des effets du pilotage au champ des intrants permet de définir les paramètres du produit fini qui peuvent être modifiés par les pratiques agricoles.

Ce chapitre est présenté sous la forme d'un article soumis au journal *Agronomy for sustainable development*.

Tomato puree quality under fluctuating environment: from field to can

Miarka Sinkora¹, Anne-Laure Fanciullino^{2,3}, David Page¹, Robert Giovinazzo⁴, Lucas Lanoë⁴, Alexandre Vilas Boas², Nadia Bertin²

¹ INRAE, Avignon Université, UMR SQPOV, F-84000, Avignon, France

² INRAE, PSH, F-84000 Avignon, France

³ Univ Angers, Institut Agro, INRAE, IRHS, SFR QUASAV, F-49000 Angers, France

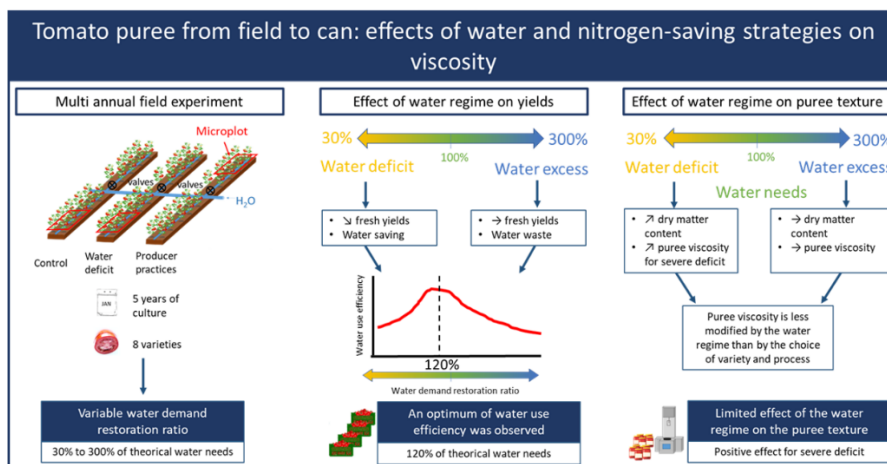
⁴Société Nationale Interprofessionnelle de la Tomate, F-84000 Avignon, France

Abstract

Processing tomato is a main source of phytomicronutrients in the human diet due to both its micronutrient content, including lycopene, and the diversity of derived products consumed worldwide. A large proportion of processing tomatoes are grown under a Mediterranean climate where increasing water scarcity and heat are expected to reduce yields and to have major negative impacts on fruit quality. Despite this, the effects of changes in fresh fruit quality on processing and end-product quality have been under-investigated. It would therefore seem imperative to work along the length of the food chain to improve food sustainability while maintaining quality and access to important phytonutrients. The present study adopts a holistic approach from field to processing plant, assessing the effects of reduced water and nitrogen supplies on yields, fresh fruit quality and suitability for processing, and puree quality. The 5-year trial included eight varieties, two levels of water and nitrogen supply, and two processes. It was found that water deficit induced a decrease in fresh commercial yield, partially compensated by an increase in dry matter content. The yield loss was the result of a lower number of fruits per plant, while the average fruit weight and biochemical composition showed little change. Water use efficiency decreased above 120% of water demand restoration and improved under low nitrogen supply. Puree viscosity and dry matter content increased with water deficit with beneficial effects for the industry, while the reduction of nitrogen supply did not affect puree quality. This work highlighted the possibility of monitoring quality traits in tomato puree, such as texture, directly from field. Nevertheless, the trade-offs between WUE, quality and yield need to be optimized. Selection of varieties rich in lycopene could be a promising avenue as they appear more tolerant to water deficit. This work also stressed the need to reassess the crop coefficient for new varieties, to improve evaluation of water needs.

Key-words: Water deficit, processing tomato, Nitrogen fertilization, fruit quality, puree viscosity, inter-year variability

Graphical abstract



I. Introduction

Industrial tomato is the top vegetable used in food processing, with around 40 million tons of fruit processed each year, and it ranks third among horticultural products in terms of production volume (WPTC, 2021). Most of the production takes place in areas with a Mediterranean climate, a regime currently considered to be one of the hotspots of climate change, where agriculture is facing desertification, drought and flood episodes (Tramblay et al., 2020). In this context, the global production of processing tomato is expected to decrease and the quality of fruits will be affected (Beillouin et al., 2020; Cammarano et al., 2022; Litskas et al., 2019; Rosenzweig et al., 2014). Viewed more globally, seventy percent of the world's freshwater is used for agriculture (FAO, 2017), a percentage that tends to increase with climate change and greater food demand (Ragab, 2015). The average Blue Water Footprint (BWF, related to surface and groundwater) for tomatoes is estimated at 63 m³ water ton⁻¹ fresh fruit (Mekonnen and Hoekstra, 2011), rising to 316 m³ water ton⁻¹ for tomato concentrate due to repeated evaporation and dilution during processing. Besides water scarcity, nitrogen release poses a further major environmental problem through nitrous oxide atmospheric emissions, water pollution and the development of toxic alga (Compton et al., 2011). Over the last century, nitrogen fertilizer applications in agriculture increased 100-fold while nitrogen use efficiency declined globally by 60 to 46%, with high regional variability (Houlton et al., 2019). Nitrogen requirements for processing tomatoes under drip irrigation vary from 160 kg Ha⁻¹ to more than 400 kg Ha⁻¹ depending on soil, climate and plant density (Bustamante and Hartz, 2015; Hartz and Bottoms, 2009; Vázquez et al., 2006; Warner et al., 2011).

Thus, in the current context, it will be essential to adjust water and nitrogen supplies to the needs of the crop if we are to develop sustainable practices and optimize both yield and quality, including field and processing criteria for the latter. In terms of tomato yield, low nitrogen fertilization has little effect although it reduces vegetative growth (Benard et al., 2009; Bustamante and Hartz, 2015). By contrast, WD effects are variable depending on the intensity of the water deficit (WD), the period of development to which it is applied, soil characteristics and tomato varieties (Lovelli et al., 2016; Lu et al., 2021; Ripoll et al., 2014). WD during flowering reduces the number of reproductive organs and hence the number of trusses and fruits (Pulupol et al., 1996). This can lead to an increase in individual fruit size and quality, as more assimilates are made available for the remaining fruits (Ripoll et al., 2014; Zegbe et al., 2006). Only rare studies have investigated the combined effects of nitrogen and water supply, but interestingly, both an increase in nitrogen supply at a fixed irrigation rate and a decrease in water supply at a fixed nitrogen level induce increased water use efficiency (WUE) in tomato (Badr et al., 2016). In terms of fruit composition, low nitrogen fertilization increases the sugar content (Benard et al., 2009; Bustamante and Hartz, 2015). Similarly, WD during fruit ripening is more effective than during the earlier stages of development in increasing soluble solid contents (SSC) (Lovelli et al., 2016), and producers already reduce irrigation about 10 days before harvesting to increase the fruit Brix Index. Patanè and Cosentino (2010) and Patanè and Saita (2015) reported that decreasing irrigation to 50% of

water needs throughout the season has no significant effect on tomato yield, while it saves 43% to 45% of water and increases SSC by between 5% and 11%. The increase in soluble solids may result from concentration (less water) and/or from an active accumulation of metabolites (Bertin and Génard, 2018). The accumulation of other compounds involved in responses to WD-induced oxidative stress, such as carotenoids, may be affected, with a range of variation from 10 to 30 % depending on the nature of the WD and varieties (Fanciullino et al., 2014; Ripoll et al., 2014).

Although the effects of water and nitrogen deficit on tomato yield and fruit quality traits have been widely described, the impacts on puree quality are still being debated, as are the links between fruit traits and puree quality. The major puree quality traits are its red colour, a homogeneous texture and consistency (measured in the industry with a Cenco-Bostwick Consistometer), and product flavour (Hayes et al., 1998b). Consumer demand for high quality products with fresh flavours, few added ingredients, environmental friendliness and minimal processing is increasing (Jürkenbeck et al., 2019; Porretta, 2019; Zhu et al., 2018). The main two tomato products are Cold Break (CB) and Hot Break (HB) puree. CB process allows enzyme activity after fruit crushing while HB thermally inactivates them. Enzymatic reactions modify fruit pectin, as reviewed by (Sila et al., 2009). During the fruit crushing step, pectinmethylesterases (PME) catalyse the demethoxylation of homogalacturonan (HG), leading to methanol production, the hydrolysis of depolymerized HG by polygalacturonase (PG) and a decrease in viscosity. HB products are, then, more viscous than CB products. Tomato puree viscosity is also affected by fruit firmness and ripening stage, as well as by WD during plant development (Abson et al., 2012).

To integrate production practices from field to end product, we must understand how the entire process of managing fruit quality in the field and the quality of the manufactured paste can be optimized in the context of climate change. The present study contributes to this wider project, its main objective being to analyse the impacts during plant production of two environmental factors, water availability and, to a lesser extent, nitrogen supply, on the quality of the fresh fruits, focusing on the viscosity of the tomato purees obtained from CB and HB processes. The range of environmental conditions it has been possible to observe thanks to an experimental trial conducted over 5 years in the south of France has provided useful insights into the production of tomato puree quality from field to can.

II. Materials and methods

1. Plant materials and crop management in the field

Eight varieties of industrial tomatoes (Table 1) were cultivated in 2016, 2017, 2019, 2020 and 2021 in open field conditions in Uchaux, France (44°11'22.4"N 4°48'11.7"E). 100 m rows of individual varieties at a density of 6 plants per m² were randomly distributed in the field. A drip irrigation system was equipped with water meters to create an independent water supply for each row. Alongside the experimental plots, a control group of the same varieties was grown at the same time and density, following the irrigation and fertilization practices of one reference producer. The five-year trial is detailed in Table 1 and Figure 1.

Table 1: Agricultural practices applied in field experiments conducted on processing tomato in 2016, 2017, 2019, 2020 and 2021. ETM is the maximal evapotranspiration per plant. Water input is the total amount of water (irrigation + rainfall) from anthesis to harvest. Water restoration is the percentage of ETM compensated by water input from anthesis to harvest. N is nitrogen, K is potassium, P is phosphorus. Growing degree days are calculated from transplanting to harvest.

		2016	2017	2019	2020	2021
Varieties	Terradou	x	x	x	x	x
	H1311	x	x	x	x	x
	H1015	x	x			
	Miceno	x	x			
	Lycobol			x	x	
	Sailor			x	x	x
	Lykomech			x		
	Viscomech			x		
ETM *(L/plant)		59	86	47	45	57
Water input * (L/plant)	Control	90	192	26	54	59
	WD	62	115	15	28	34
	Producer	-	-	86	77	188
Water demand restoration ratio* (%)	Control	152	225	55	120	103
	WD	106	135	31	61	60
	Producer	-	-	183	171	329
Preplant fertilizer N-P-K (kg/Ha)		-	-	6-21-0	9-31-0	9-31-0
Additional fertilizer N-P-K (kg/Ha)	HN	-	-	67-35-69	91-17-200	85-17-163
	LN	-	-	15-17-69	16-17-200	38-17-164
	Producer	-	-	17-38-127	90-40-80	34-46-117
Growing Degree Days		1237	1377	1509	1448	1484

*calculated from anthesis to harvest

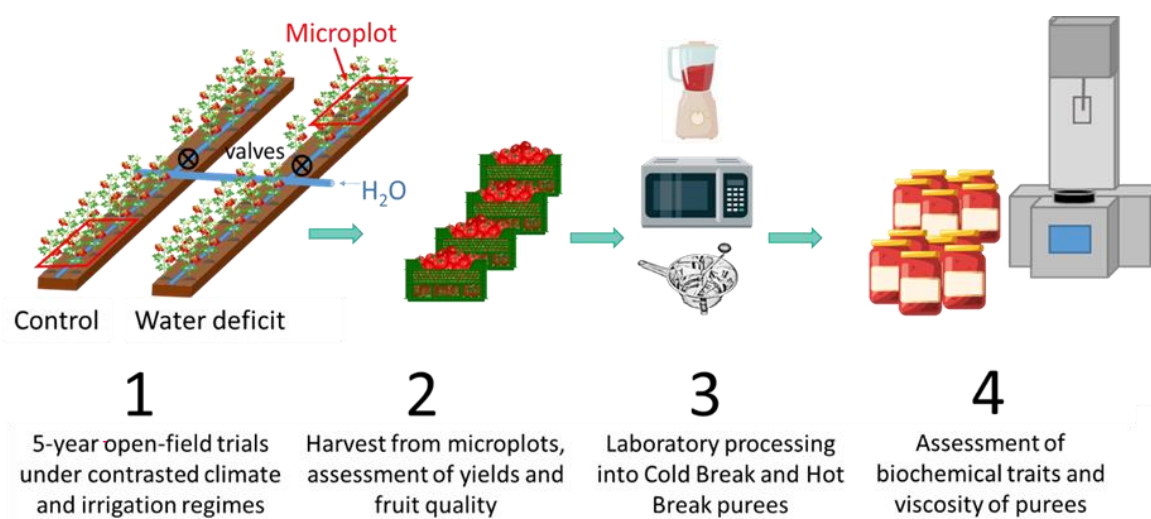


Figure 1: The four steps involved in an integrated approach to the assessment of the effects of water deficit on tomato yields and on fruits and puree quality.

The soil was composed of 29% clay (<2µm), 35% fine silt (<20µm), 17% coarse silt (<50µm), 15% fine sand (<2000µm) and 0.5% coarse sand (>2000µm). For the experimental plots, two water inputs were selected: well-watered plants (Control) and plants grown under Water Deficit (WD). Under well-watered conditions, irrigation was controlled in such a way as to compensate for maximum evapotranspiration (ETM), calculated on the basis of (Doorenbos and Pruitt, 1977):

$$ETM(mm) = ET_0(mm) \times Kc \quad \text{Eq.1}$$

where ET_0 is the reference evapotranspiration in mm (amount of water evapotranspired by a reference crop under optimal irrigation) and Kc is the crop coefficient for industrial tomato.

The predicted reference evapotranspiration (ET_0) was calculated according to the Penman Monteith equation based on average weather data from the last 20 years, and the water supply was then corrected weekly in line with the actual ETM, calculated from real weather data obtained from a local weather station. The crop coefficient, Kc , varied in the course of plant development (supplementary material figure S1) increasing from 0.4 to 1.1 from the vegetative stage to the reproductive stage, then decreasing to 0.4 during ripening, as described in the SONITO cultivation guide. Under the WD regime, irrigation was progressively reduced following the first anthesis. Irrigation was then halted for all combinations (variety x water input) around ten days before harvest (Figure 2).

To compare the different years, the water demand restoration ratio (WDRr) was calculated as the ratio between the cumulative real water inputs (irrigation + rain) from anthesis to harvest and the theoretical needs of the culture for the same period:

$$WDRr (\%) = \frac{\text{real water input}}{\text{Theoretical needs}} \times 100 \quad \text{Eq.2}$$

where real water input is the total amount of water received by the plant from anthesis to harvest ($L \text{ plant}^{-1}$) and theoretical needs as defined in equation 1 are converted in $L \text{ plant}^{-1}$.

In the experimental plots, the WDRr varied from 31% to 135 % under the WD treatment and from 55% to 225% under the control treatment. In the producer plot, the WDRr varied from 170 % to 329 %. The high values are likely to have resulted from an underestimation of theoretical needs due to minor differences between predicted and actual ETM, while the water supplied through irrigation are likely to have been overestimated, given that run-off, evaporation and infiltration were not considered. As a whole, plants were considered to be under water deficit (WD) when the WDRr dropped below 100%. From 2019, two nitrogen levels were applied: a high level of between 73 and 100 kg per hectare, and a low level of between 21 and 47 kg of nitrogen per hectare. Fertilizer was applied at two periods. A preplant fertilizer of 6 to 9 kg of nitrogen per hectare was applied along the rows, then the fertilizer treatments were applied once a week (for 2 hours) through the drip irrigation system, using the same irrigation volume for all plants (Table 1).

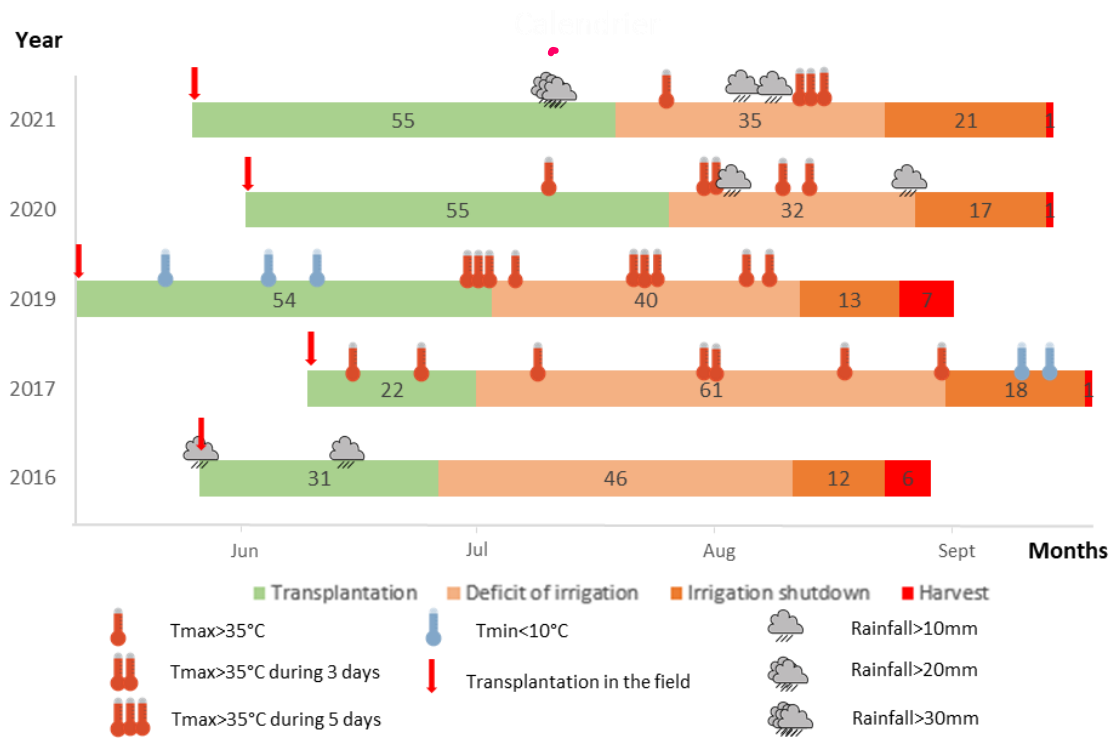


Figure 2: Calendar of field experiments with main climatic events (rainfall and low and high T°C peaks) in 2016, 2017, 2019, 2020 and 2021, indicating the number of days for each period. In the water deficit plots, WD was introduced gradually from the first anthesis. Ten days before harvest, irrigation was halted for all combinations (variety x water input).

Harvest dates were decided according to fruit maturity stage (visual assessment) and confirmed by the cumulative Growing Degree Days calculated from Equation 3 and reported in Table 1:

$$\text{Cumulative degree day } (^{\circ}\text{C}) = \sum_{\text{Transplant}}^{\text{Harvest}} \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} - T_{\text{base}} \quad \text{Eq.3}$$

where T_{max} is the maximum daily temperature ($^{\circ}\text{C}$), T_{min} the minimum daily temperature ($^{\circ}\text{C}$) and T_{base} the basal temperature for tomato (10°C) (Andrea et al., 2009).

2. Range of climatic conditions and water availability over the five-year trial

Climate variables recorded by the weather station are reported in the supplementary data (Supplementary material Figure S 2 to Supplementary material Figure S 5). Average temperatures were similar in 2016, 2017, 2020 and 2021 at around 25°C , while in 2019 higher temperatures were reached at the end of June (with a mean daily temperature above 30°C and a maximum temperature above 40°C). Solar radiation was similar for all years, averaging around $24 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (the maximum was around $30 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$). Precipitation did not hinder the establishment of the water deficit, with most rainfall occurring before the initiation of the water deficit treatment, except in 2021, where one rainfall event in July increased water input and reduced WD intensity. Air relative humidity reached similar levels in 2016 and 2017, at around 60 %, and was lower in 2019, 2020 and 2021, at around 50%. 2019 and 2020 differed from other campaigns in their higher temperatures and lower humidity. The theoretical water needs from transplanting to harvest for these two years were 122 L plant^{-1} and 131 L plant^{-1} in 2019 and 2020, as compared to 95 L plant^{-1} , 97 L plant^{-1} and 107 L plant^{-1} in 2016, 2017 and 2021, respectively. There was thus a particularly high level of, a water deficit coupled with thermic stress in June 2019 especially. It is possible that an early slight water deficit might have been induced before anthesis in 2017 and 2019, while sufficient irrigation was supplied before anthesis in other years. The water supply in the producer plot considerably exceeded the theoretical needs evaluated by ETM.

3. Fruit harvest

For each combination (variety \times water input \times nitrogen input) and year, three microplots of 4 to 6 plants, representative of the culture, were marked out. At least four plants per microplot were collected to determine yield, WUE and fruit and puree quality traits. Fruits were visually sorted into green, orange and ripe categories, and then weighed to deduce the total and fresh commercial yields (orange and red fruits, as accepted by industrial processors). Yields in tons per hectare were calculated for the commercial yields measured on the microplots. Fresh and dry mass-based water use efficiency (WUE, g fruit L^{-1}) was calculated as the ratio of, respectively, the total fresh mass or total dry mass of commercial fruit (g plant^{-1}) to litres of water supplied (irrigation + rain) to an individual plant from transplanting to harvest.

4. Processing of tomato fruits into purees

A proportion of the harvested tomatoes were transformed by either cold break (CB) or hot break (HB) treatment following the laboratory scaled method described by (Page et al., 2012). For each microplot, around 1 kg of tomatoes were cut in large pieces. Aliquots of fresh cut fruits were stored respectively at -80°C and -20°C for further biochemical analysis (see below). Two purees were prepared from the remaining fresh fruits:

- Hot break puree (HB): 400 g of fresh cut fruit were placed in a round cooking container suitable for microwave heating, with the steam vent opened on the lid to avoid excess pressure. The container was heated for 90s in a microwave at 1500 W (0.23 s g⁻¹ of tomato). The tomato was then ground for 30 s at ambient temperature in a blender (Waring, USA).
- Cold break puree (CB): 450 g of fresh fruit were ground in a blender for 30 s at ambient temperature, an aliquot of 50g was used for pH and brix analysis. The remaining fruit was heated in a microwave using the same program as for HB.

The purees were packed in 250 mL glass jars and pasteurized for 20 minutes at 100°C in an autoclave. Jars were then stored at 4°C a few weeks before analysis. A total of 662 jars were processed and analysed over the 5-year trial.

5. Biochemical traits of fruits and purees

Analysis was carried out on fresh tomatoes just after crushing and on purees processed in the laboratory, in 3 replicates of around 50g corresponding to the 3 microplots in the field. The dry matter content was determined by weighing 3 g of a fresh sample before and after 3 days of drying in a ventilated oven at 70°C. pH was measured with a pH meter (FE20/EL20, Mettler Toledo, Switzerland) and soluble solid content using a digital refractometer (PR-32 α , ATAGO, Japan) with automatic compensation at 25°C. Results were expressed in degrees Brix. Titratable acidity was measured with an automatic titrator (888 Titrand, Metrohm, Switzerland), and results were expressed in mEq/100g using Tiamo 2.4 software. The colour of the tomato purees was determined with a colorimeter (CR. 400, Konica Minolta, Japan). Lycopene content was measured by HPLC-DAD on fresh fruits and purees during the 2016 and 2020 campaign in accordance with (Page et al., 2012). Results were expressed in mg g⁻¹ of fresh fruit and mg g⁻¹ of dry fruit.

6. Enzyme extraction and assays on fruits

Each year, 4 selected combinations (treatment x cultivar) were analysed, in 3 replicates corresponding to the 3 microplots in the field. Frozen samples of the fruits were finely ground in liquid nitrogen and extracted. PG activities were determined by the Gross method, adapted as described by (Ribas-Agustí et al., 2017). PME activity was determined by an adaptation of the Houben method described by (Ribas-Agustí et al., 2017). The aliquot of PME enzyme extract measured 50 μ L instead of 250 μ L due to the high enzymatic activity in tomato fruit. Results were expressed in nkatal per g of fresh fruit.

7. Viscosity of CB and HB purees

Apparent viscosity was measured for all purees in 2016, 2019, 2020 and 2021 on a stress-controlled rheometer (Physica MCR 301, Anton Paar, Austria) equipped with a Peltier cell (CPTD-200, Anton Paar). Samples were thermostated at 22.5°C. In 2016, testing was performed with a double helicoidal ribbon spindle (ST24/2HR-37/120, Anton Paar) combined with an outer cylinder cup (CC27/S, Anton Paar) for a shear rate of 3 s⁻¹. For the second campaign, in 2019, 2020 and 2021, two shear rates were applied: 5 s⁻¹ and 50 s⁻¹. A 50 s⁻¹ shear rate mimics the oral shearing applied during puree consumption (Ong et al., 2018). A minimum of 24 points were measured for each sample, and the average viscosity was calculated from at least 15 points after stabilization. Viscosity was expressed for a 50 s⁻¹ shear rate for all years, extrapolating the value of the 2016 samples from the viscosity at 3 s⁻¹ using the Ostwald de Waele equation (Eq.4), which is suitable for tomato puree (Kubo et al., 2019). The yield stress of tomato juice being around 1 s⁻¹ (Augusto et al., 2012), the relation between viscosity and shear rate is considered to be linear between the 3 s⁻¹ and 50 s⁻¹ shear rates. Viscosity data from the 2019 samples were used to determine the values of the parameters K and n in accordance with the Linear Ostwald de Waele equation:

$$\ln(\eta) = K + (n - 1)\ln(\dot{\gamma}) \quad \text{Eq.4}$$

where η is the apparent viscosity in Pa s, K is the consistency coefficient in Pa sⁿ, $\dot{\gamma}$ is the shear rate in s⁻¹ and n the flow behaviour index (dimensionless).

8. Data analysis

Data analysis was conducted with R software (R Core Team, 2022). Analysis of variance and Tuckey post hoc tests were performed using the R stats package. Graphics were created using the Ggplot2 and Agricolae packages (De Mendiburu and Yaseen, 2020; Hadley Wickham, 2016) and PCA was carried out using the FactoShiny package (Vaissie et al., 2021). When the sampling design allowed, ANOVA with Tukey post-hoc pairwise tests were performed to compare the means. Otherwise, non-parametric Kruskal-Wallis tests were performed with the Fisher LSD post-hoc test and Bonferroni adjustment.

III. Results and discussion

1. Effects of water and nitrogen supply reduction on WUE in 2019, 2020 and 2021

In a first step, the combined effects of water supply and nitrogen supply on the different cultivars were analyzed over three years. In 2019, contrasted levels of nitrogen supply were applied to 6 cultivars, in 2020 to 4 cultivars and in 2021 to 3 cultivars (Supplementary Table S1). The effect of the low nitrogen treatment (LN) on WUE (g fruit dry mass L⁻¹) depended on the variety, water supply and season (Figure 3). In 2019, the LN treatment, whether alone or combined with WD, did not modify WUE significantly except in the case of ‘Lycobol’, which was sensitive to LN when combined with WD displaying a 49% decrease in WUE compared to HN combined with control irrigation (Figure 3A). In 2020, the treatment combining LN and WD had a significant positive effect on WUE for ‘Lycobol’, ‘Sailor’ and ‘Terradou’ compared to LN under control irrigation, highlighting the interactions between irrigation and fertilizer application (Figure 3B).

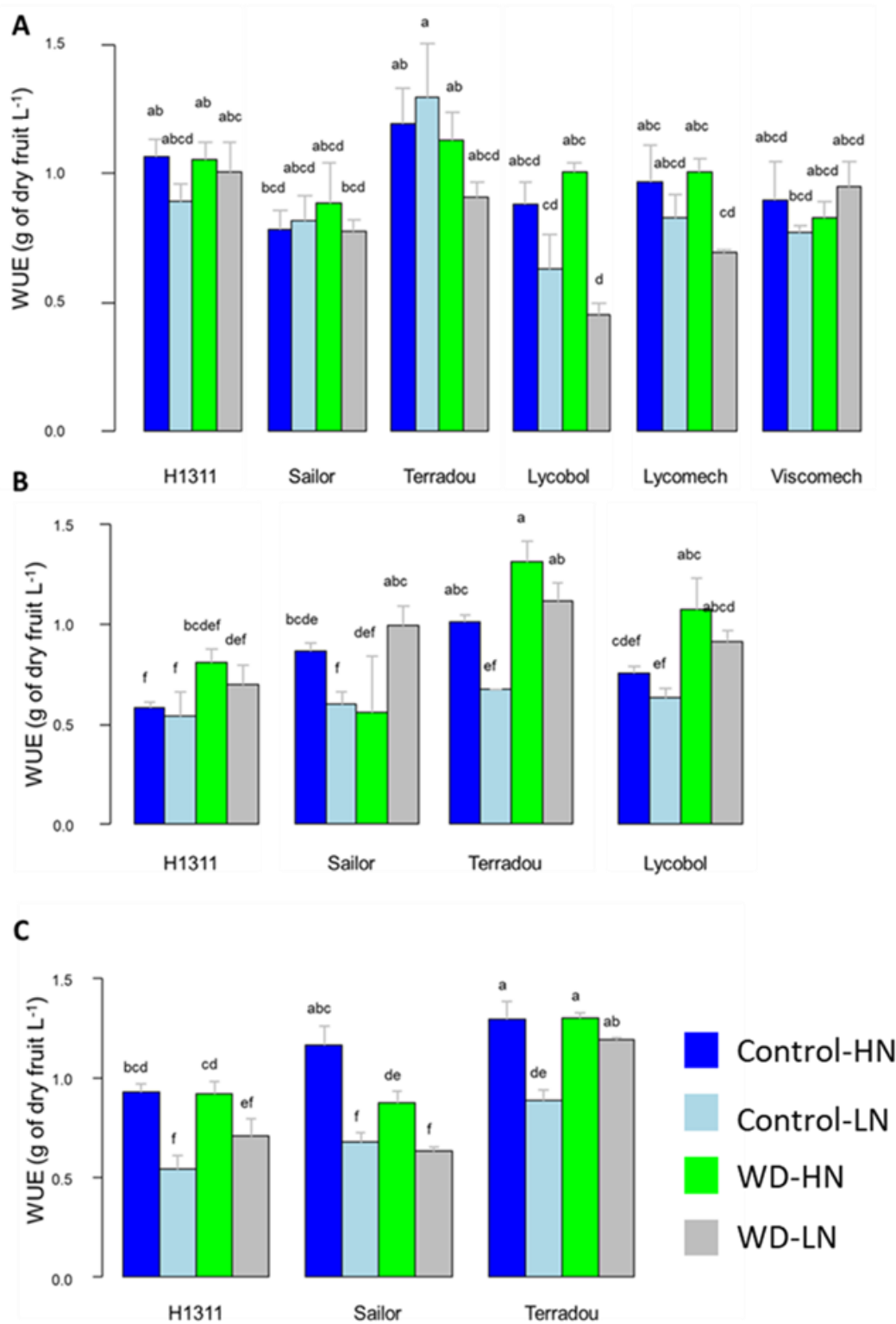


Figure 3: Effects of water and nitrogen supply on WUE expressed on a dry matter content basis in 2019 (A), 2020 (B) and 2021 (C). Bars show standard deviations and letters indicate pairwise comparison groups (Fisher LSD with Bonferroni adjustment) after the Kruskal-Wallis test (significant differences correspond to $P < 0.05$).

In 2021, WUE for all varieties decreased (up to 42%) when combined with low nitrogen supply, as can be seen by comparing control-LN with control-HN (Figure 3C). As in 2020, under LN treatment, the water deficit applied in 2021 increased the WUE of ‘Terradou’ (Figure 3C). Given that plants were cultivated for several years on the same field, soil analysis would be required to assess whether nitrogen impoverishment occurred, causing the effect observed in 2021. In addition, ‘Sailor’ and ‘Terradou’ appeared more sensitive to LN treatment under control irrigation than the other cultivars, with reductions in WUE in both 2020 and 2021.

In line with this, previous studies on the impact of nitrogen supply on tomato yield and WUE have shown that impact depended on the components included in the design of the experiment, especially average annual temperature, soil type, water supply, and variety (Badr et al., 2016; Cheng et al., 2021; Zotarelli et al., 2009). Regarding interactions between nitrogen and water supply, Badr et al. (2016) noted that WUE increased significantly with increasing nitrogen levels and that, at the same nitrogen level, the highest WUE was recorded under the lowest water supply regime. With regard to the physiological mechanisms that underlie plant WUE, Wang et al. (2019) found that tomato WUE was determined by a decrease in stomatal conductance in response to WD rather than by increased photosynthesis determined by the nitrogen supply. Stomatal conductance and photosynthesis have not been monitored in our trial, but it is likely that the increased WUE recorded in 2020 and 2021 under WD-LN treatment was due to a reduction in plant transpiration resulting from lower plant biomass (data not shown) and reduced stomatal conductance.

2. Effects of interactions between water supply and cultivars on yield and water use efficiency over the five-year trial

In a second step, the effects of interactions between water supply and cultivars were analyzed for HN treatments only and including the producer field. Fresh yields ranged from 570 to 2930 g per plant over the five years and across treatments (Supplementary Table S1); it decreased almost linearly when the WDRr dropped below 100% and remained unchanged when the water supply exceeded 150% of demand (Figure A). Differences were observed between varieties. Whatever the WDRr, ‘Terradou’ gave the highest yields. Conversely, ‘H1311’ gave the lowest yields when the WDRr was above 100%, with yield values that were always below the average of all genotypes, but it was the variety that was least sensitive to water deficit. The percentage of green and rotten fruits was stable over the years (7.5% on average for all cultivars and years) and did not depend on the WDRr. The Terradou variety produced more rotten fruits (11%) than other varieties. A review of the effects of deficit drip irrigation on industrial tomato in Italy (Francaviglia and Di Bene, 2019) including 54 field experiments, reported high variability in marketable fruit yield, from 51 to 114.2 ton.ha⁻¹. A slight reduction in yield was observed when irrigation covered at least 40% of water needs, with variations depending on location and soil type, while below 40% of WDRr, yields decreased significantly by around 70%.

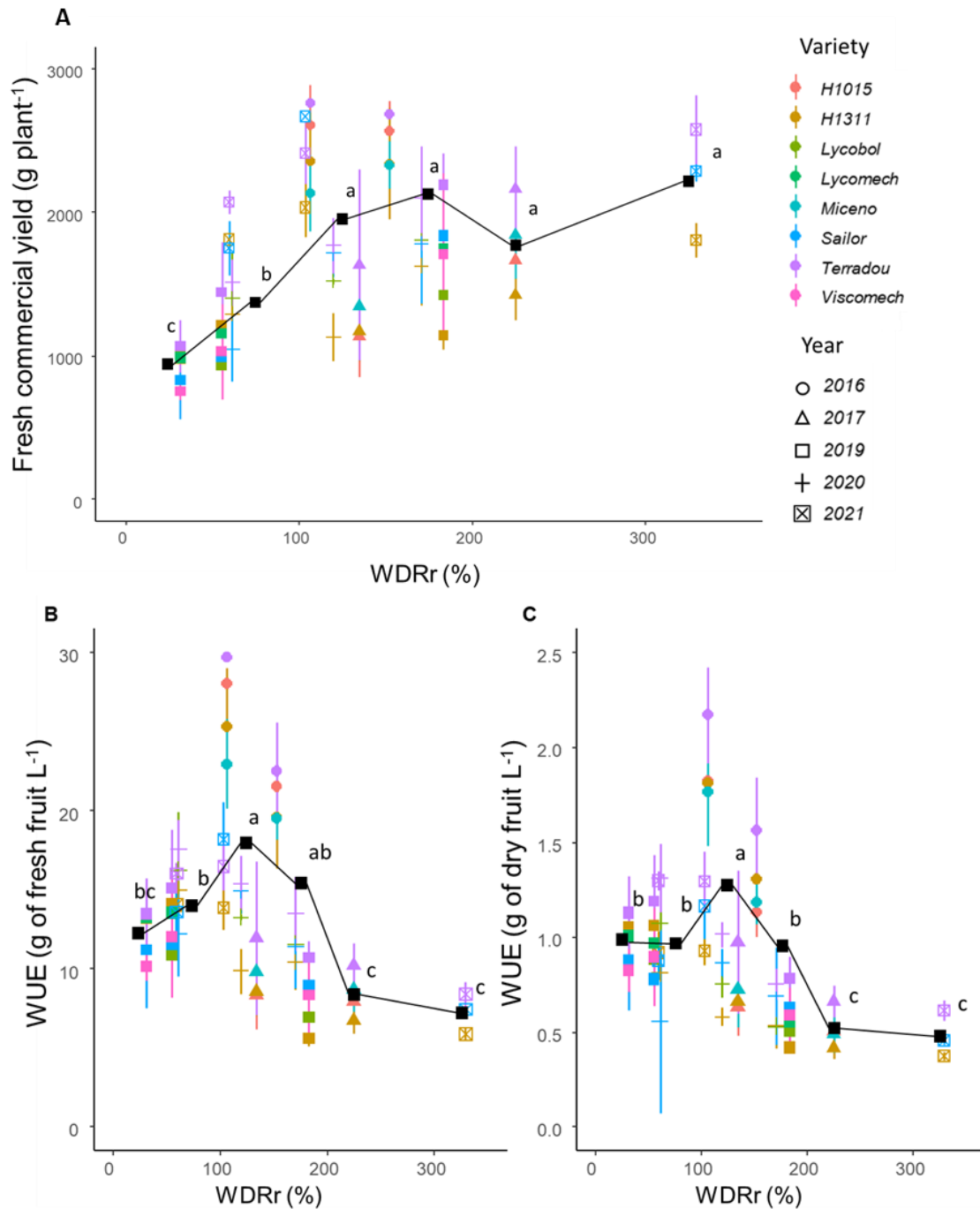


Figure 4: Fresh commercial yields (A) and Water Use Efficiency (B, C) of processing tomatoes in relation to the water demand restoration ratio (WDRr) expressed as the ratio between water supply and theoretical water needs from anthesis to harvest. Commercial yields were measured using 4 plants harvested from 3 microplots randomly selected from across the field for each condition (year x cultivar x irrigation x nitrogen). Different years and cultivars are shown as follows: colors are used to represent the 8 different varieties (red is “H1015”, brown “H1311”, light green “Lycobol”, dark green “Lycomech”, light blue “Miceno”, dark blue “Sailor”, purple “Terradou” and pink “Viscomech”). The different symbols represent the different years of cultivation: circle (●) for 2016, triangle (▲) for 2017, square (■) for 2019, plus sign (+) for 2020 and crossed square (⊠) for 2021. Each point represents the mean calculated from the 3 microplots (12 plants for each combination), and bars indicate standard deviations. Black squares correspond to the mean calculated for each class of water restoration (0-50%, 50-100%, 100-150%, 150-200%, 200-250%, 250-300%, 300-350%) and letters indicate pairwise comparison groups (Tukey post-hoc test; significant differences correspond to $P < 0.001$).

These results are consistent with our observations of yields ranging from 41.5 to 82.3 ton ha⁻¹ depending on variety and water supply, with a 62% yield diminution at a WDRr of 31%. Dry commercial yields followed the same trend: they increased from 75 g to 140 g per plant when the WDRr increased from 31% to 121%. At higher WDRr levels, dry yields were highly variable between 70g and 200g per plant, depending on cultivars and years. Terradou, with high fresh yields and high fruit dry matter content, gave the highest dry yields, while H1311 and Sailor gave the lowest.

The yield loss observed when water demand was not met by the water supply should be considered in relation to the amount of water saved. WUE was at its highest when the WDRr varied between 100% and 121% with 1.14 g of dry fruit L⁻¹ (16 g fresh fruit L⁻¹) (Figures 4B and 4C; Supplementary Table S1). WUE decreased for a WDRr of below 100% due to yield losses, and for a WDRr of above 150% due to water wastage. Our data do not follow the same trends as those already described in the literature, since WUE is usually described as increasing with deficit irrigation (Giuliani et al., 2017; Lovelli et al., 2016). Giuliani et al. (2017) reported an increase in WUE (kg fresh yield m⁻³) as water inputs decreased, with the greatest increase (+60% WUE) for 22% water restoration. Similarly, Lovelli et al. (2016) observed the greatest WUE to occur at the lowest irrigation rate (11% water restoration) applied over the whole crop cycle. This difference suggests that the plant adapts better when WD occurs at the beginning of crop growth and not only during the reproductive phase as was the case in our study. Thus, early WD could promote plant adaptation to dry climate conditions at the end of the cycle. Moreover, differences in sensitivity were observed between cultivars. ‘Terradou’ showed the greatest WUE (Figures 4B and 4C), regardless of WDRr, while WUE in ‘H1311’ varied according to the WDRr.

Where the WDRr exceeded 100%, ‘H1311’ had the lowest WUE, but it scored highly for WUE under water deficit by maintaining consistent fresh yield rates and increasing its DMC. Thus, the performance of H1311 proved to be better under WD. In addition, variations in yield and WUE were visible from year to year. In 2016, WUE values were very high (up to 50% higher when compared to the other years) due to higher yields. This could be related to the milder weather in that year, with fewer heat waves than in other years (Figure 2).

It has been reported that heat stress, with temperatures above 32°C during the day and 20°C during the night, impairs tomato pollen and anther development and decreases pollen viability (Alsamir et al., 2021); this may explain the decreased yields and WUE in our trial during warmer seasons, as in 2019. Heat stress, by inducing stomata closure or even leaf abscission reduces the assimilation of carbohydrates through photosynthesis and, hence, fruit growth (Hoshikawa et al., 2021). A previous study (Lovelli et al., 2016) also reported seasonal variations in yields and WUE depending on weather conditions: a 50% water reduction in ETM after anthesis increased fresh WUE by 15% (up to 20.57g fresh fruit. L⁻¹) during a mild and rainy season, while it decreased by 6% during a hot and dry season.

In our study, most of the contexts in which the WDRr was higher than 150% involved the crops grown by the reference producer, showing that there is an opportunity for the profession to reduce its water consumption and improve WUE.

Interestingly, the decrease of fresh commercial yields under WD was due to a decrease in the number of fruits per plant and not a strong decrease in individual fruit fresh mass. The individual fruit fresh mass varied between 34 and 81g depending on the year and variety, with an average mass of 60 g (Figure 5A). The number of fruits reached 40 fruits per plant at a WDRr of 170% and above. Below that figure, the fruit number decreased linearly to fewer than 20 fruits at a WDRr of 31% (Figure 5B). A similar inflexion at around 170% of WDRr was observed for fruit DMC, which was stable around 6 gDM 100g⁻¹ FM when WDRr was higher than 170%, and increased to 8g DM 100g⁻¹ FM at lower WDRrs. In line with this result, a study including 29 varieties of processing tomatoes has elsewhere concluded that a 65% water reduction from the reproductive stage onwards decreased yields by 29% due to a 26% decrease in fruit number, while individual fruit mass remained unchanged (Fullana-Pericàs et al., 2019). By contrast, when water deficit is applied from the beginning of cultivation, this can induce a decrease in fruit size (Patanè et al., 2011). The increase in DMC may be explained by a decrease in the net water influx to the fruit and/or by an increase in phloem sap concentration (Ho et al., 1987). In our study, the decrease in fruit DMC when the WDRr decreased from 100 to 170% may also suggest an overestimation of this ratio, which could result from both an overestimation of the water supply actually available to the plants and an underestimation of the plants' theoretical needs (Eq.1). The crop coefficients used for the vegetative stage of the culture are in accordance with those found in the literature for processing tomatoes (Cerekovic et al., 2010; B. Hanson and May, 2006; Patanè and Cosentino, 2010), with an increase of up to 1.1, while the decrease in Kc values applied during fruit set was greater than that already described: 0.4 after 75 to 90 days in our crops as compared to 0.6 after 90 days (Cerekovic et al., 2010). Accordingly, our study highlights the need to reassess the kc values in light of climate change and to adapt kc to specific varieties to better fit the plants' water needs. Moreover, the decrease in WUE during the hottest seasons may be explained by the difficulty in assessing plant evapotranspiration and needs during periods of extreme heat. More generally, in the field, the plants are in rows, the soil is not fully covered by the crop, and water evaporation is probably underestimated. Additionally, soil's water retention capacity was probably altered after severe droughts, affecting rates of water infiltration and run-off from rainfall.

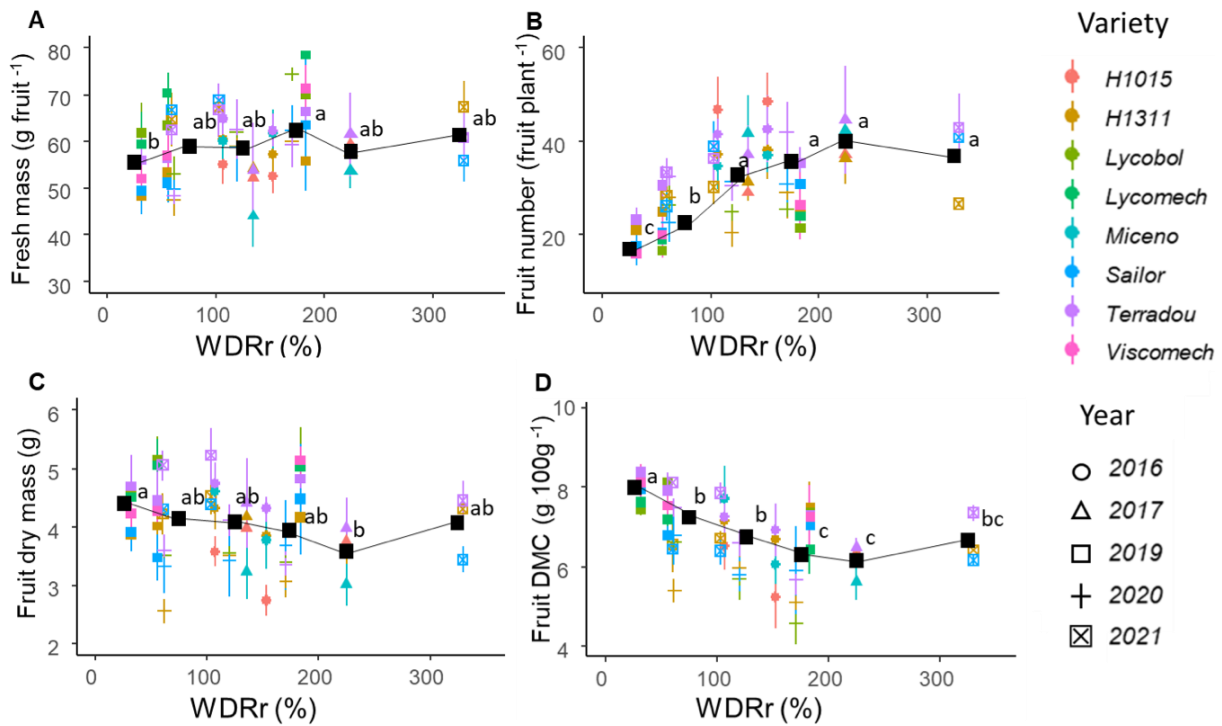


Figure 5: Fruit fresh weight (A), Number of fruits per plant (B), Individual Fruit dry weight (C) and fruit DMC (D) for processing tomatoes in relation to the water demand restoration ratio (WDRr) expressed as the ratio between water supply and theoretical water needs from anthesis to harvest. Different years and varieties are shown as follows: colors are used to represent the 8 different varieties (red is “H1315”, brown “H1311”, light green “Lycobol”, dark green “Lycomech”, light blue “Miceno”, dark blue “Sailor”, Purple Terradou” and pink “Viscomech”). Each point represents the average for the 3 microplots, and bars indicate standard deviations. The different symbols represent the different years of cultivation: circle (•) for 2016, triangle (▲) for 2017, square (■) for 2019, plus (+) for 2020 and crossed square (⊠) in 2021. Black squares show the average value per category of water restoration ratio (0-50%, 50-100%, 100-150%, 150-200%, 200-250%, 250-300%,300-350%) and letters indicate pairwise comparison groups (Tukey post hoc test; significant differences correspond to $P < 0.05$).

3. Variations in fruit and puree quality over the five-year trial

The 5-year trial yielded contrasting harvests in terms of fruit mass and dry matter content, and these were further analyzed and processed into purees except in 2017. Interestingly, nitrogen reduction had little effect on puree viscosity. In 2019 and 2020 puree viscosity was not modified except in the case of ‘Lycobol’, which responded in contrasting ways depending on the year: LN treatment decreased puree viscosity in 2019 by 28 % and increased it in 2020 by 100% (not shown). No significant effects of nitrogen fertilizers on puree viscosity were observed in 2021. Thus, in the remainder of the present paper, only the effects of water deficit are presented and discussed, and only HN treatments are considered.

The viscosity levels of all purees processed in 2016, 2019, 2020 and 2021 extended across a large range, from 78 to 762 mPa s for HB purees (

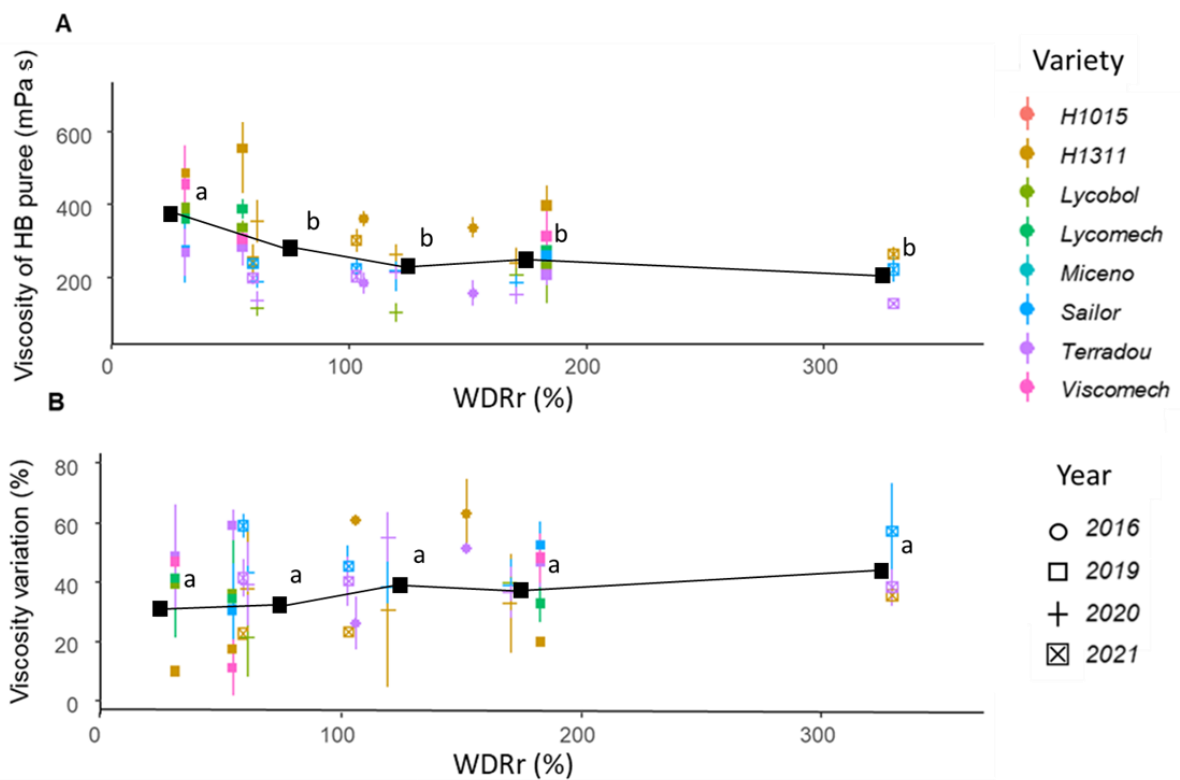


Figure 6A) and 76 to 498 mPa s for CB purees. This variability was due to the growing conditions (inter-year treatment variability) and to differences in the capacity of the selected cultivars to produce viscous purees (intra-year treatment variability). Variety ‘H1311’ was twice as viscous as ‘Terradou’ despite a higher DMC in ‘Terradou’ fruits. Interestingly, excessive irrigation tended to reduce both HB puree viscosity and variation between varieties (Figure 6A). Where the producer used excessive irrigation, this had deleterious effects, decreasing puree viscosity. On average, HB puree viscosity was stable at around 200 mPa s where the WDRr was higher than 120% and increased with deficit irrigation up to 380 mPa s where the WDRr was 31 % (Figure 6A). The viscosity variation between HB and CB purees was barely

modified by the WDR, and CB purees were about 30% less viscous than HB purees on average (Figure 6B). CB puree also had a higher titratable acidity ($5.85 \text{ meq } 100\text{g}^{-1}$) than HB puree ($5.67 \text{ meq } 100\text{g}^{-1}$). The main difference between CB and HB purees lies in the activity of the pectinolytic enzymes (Sila et al., 2009). During the CB process, PME activity releases methanol, leading to the increase in titratable activity (Anthon and Barrett, 2012). Additionally, the results suggest that the enzyme activity in fresh fruit was barely affected by WD and depended on the cultivar. Previous work has reported a decrease of PME activity under WD for 7 cherry tomato cultivars (Barbagallo et al., 2008) and one processing tomato cultivar (Barbagallo et al., 2014). In the present study, the fruit enzyme activity measured in 2017 (not shown) was barely affected by WD (PME activity decreased by 8 to 13% under WD and PG activity was not affected).

However, further analysis is required to reach any conclusion, since enzymatic activity was not measured under WD conditions in 2019 and 2020. PME activity was over $2000 \text{ nKatal g}^{-1}$ for all conditions, and PG activity varied from 5 to 10 nKatal g^{-1} .

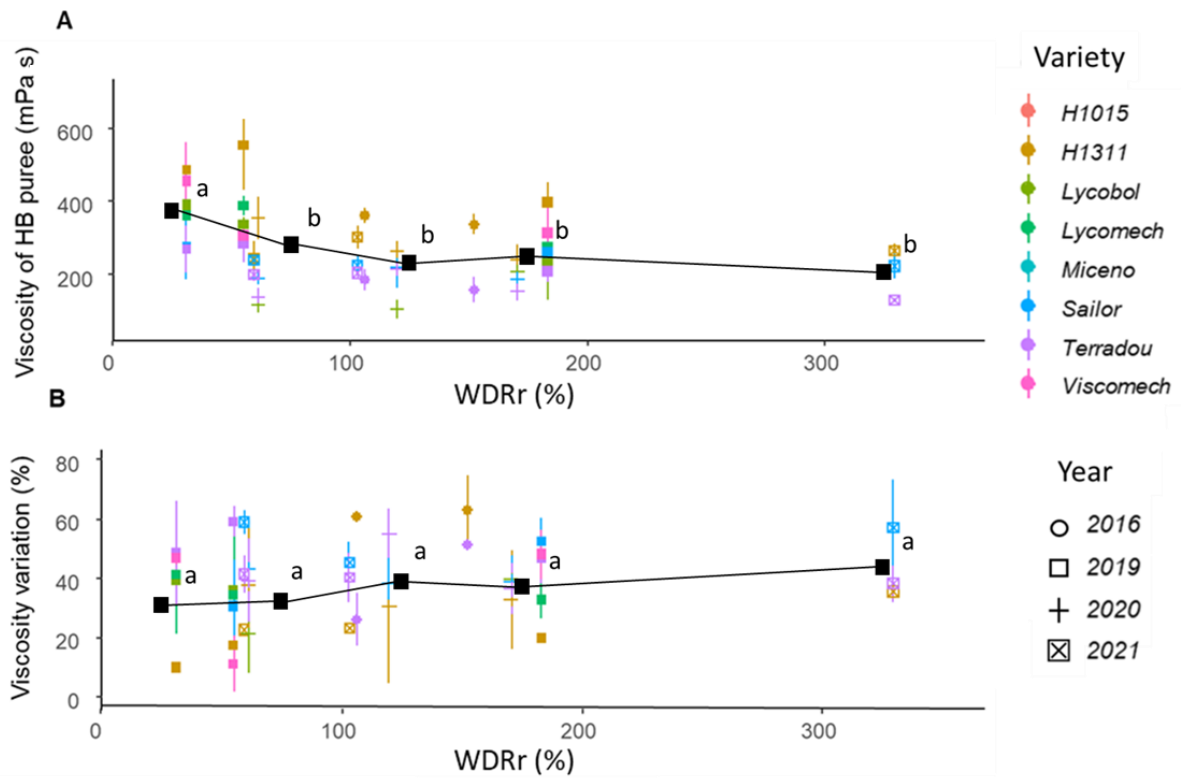


Figure 6: Viscosity of Hot Break purees (A) and variation of viscosity between Cold Break and Hot Break process (B) for processing tomatoes in relation to the water demand restoration ratio (WDRr) expressed as the ratio between water supply and theoretical water needs from anthesis to harvest. The different years and cultivars are shown as follows: colors represent the 8 different varieties (red is “H1315”, brown “H1311”, light green “Lycobol”, dark green “Lycomech”, light blue “Miceno”, dark blue “Sailor”, Purple Terradou” and pink “Viscomech”). Symbols represent the different years of cultivation: circle (•) for 2016, triangle (▲) for 2017, square (■) for 2019, plus sign (+) for 2020 and crossed square in 2021. Each point represents the average of 3 purees from the 3 microplots, and bars indicate standard deviations. Black squares represent the average values per category of water restoration (0-50%, 50-100%, 100-150%, 150-200%, 200-250%, 250-300%, 300-350%) and letters indicate pairwise comparison groups (Tukey post hoc test, significant differences correspond to $P < 0.05$).

To explore the links between fresh fruit quality and puree quality, the most complete dataset was selected, i.e. four cultivars (Terradou, H1311, Sailor and Lycobol) grown in 2019, 2020 and 2021 (Supplementary Table S2) The increase in viscosity observed where the WDRr was below 120% could be related to the increase in the fruit's DMC. For the four varieties, the apparent viscosity was significantly higher in 2019. The pH, soluble solid content and titratable acidity of both CB and HB purees were not modified by WDRr. Similar observations were made concerning the fresh fruits. Fruit pH was stable (at around 4.39 ± 0.12 on average) between varieties, treatments and years. This average pH of 4.4 corresponds to the maximum value permissible for food safety and to guarantee good flavor in the end product, and also indicates that the fruits have reached full ripeness (Anthon et al., 2011). Regardless of the year, WD did not modify fruit titratable acidity, which is related to total acid concentration. However, for all varieties, titratable acidity was significantly higher in 2021 compared to other years (Table S3). In 2019, 2020 and 2021, the 'Sailor' variety had lower fruit titratable acidity (6.03 ± 0.56 mEq 100g^{-1}) than H1311 (6.98 ± 0.47) and 'Terradou' (7.05 ± 0.74). The fruit refractive index was not modified by WD and it was higher for 'Terradou' (6.55 ± 0.53 °Brix) than for other varieties (at around 5.5 °Brix on average). The 'Terradou' variety is in fact known for its high soluble sugar content (Damidaux et al., 2015a). A year-on-year difference was observed, with higher RI in 2019 compared to 2020 and 2021.

The lycopene content of the purees was lower than that of the fresh fruits, due to the degradation caused by thermic treatment, especially for HB purees. The lycopene content of fresh fruits measured in 2020 depended on the variety but not on water input, and ranged from 41 to 305 mg kg^{-1} of fresh fruit. As was to be expected, the Lycopene content was twice as high in "high lycopene" varieties 'H1311' (198 ± 79 mg kg^{-1}) and 'Lycobol' (238 ± 42 mg kg^{-1}). The same trend was observed on a dry matter basis. The impact of WD on tomato fruit quality is still a matter of debate and contrasted results are reported in the literature. For example, WD was found to enhance carotenoid content as well as to reduce it (Lu et al., 2021; Ripoll et al., 2016b). The wide range of effects can be associated with the different scenarios for the application of water deficit in terms of intensity, duration, and period of application during the plant cycle, which affect different processes (Fanciullino et al., 2014; Liu et al., 2015; Ripoll et al., 2014). However, an increase in soluble metabolites as a consequence of concentration has been repeatedly observed (Lu et al., 2021; Ripoll et al., 2016b). It would appear reasonable to deduce that the practice of halting irrigation ten days before harvest for both control and WD treatments was sufficient to eliminate differences in metabolite concentrations. This effect was not shown by our refractive index comparison of fruit grown under WD and control conditions (Table S3), while fruit DMC increased with water deficit (Figure 5D). The correlation between DMC and RI varies by cultivar (r^2 from 0.32 for Sailor to 0.72 for Lycobol). The refractive index, used by the industry as a tool to assess the dry matter content of fruits and their suitability for the production of high viscosity purees would thus seem not entirely appropriate in this respect.

The difference in results could be explained by an increase in insoluble dry matter content (cell wall material) as a consequence of WD, while the soluble solids that are measured by the RI undergo less modification.

A principal component analysis was performed on the 19 variables measured in the fresh fruit, the CB and HB purees, and 165 individual specimens from 4 varieties in 2019, 2020 and 2021 (Figure 7). The first two dimensions accounted for more than 50% of total variation. PCA made it possible to distinguish individual samples through reference to the WDRr gradient, the cultivar and the year (Figures 7B, 7C, 7D). For the first component, individual plants were distinguished by fruit and puree DMC, RI and viscosity. In Figures B and D, high puree viscosities were associated with a low WDRr and the 2019 trial, which had indeed been an exceptional year in terms of climatic conditions, with extreme temperatures and heat stress occurring during the vegetative stage ($T_{\max} > 40^{\circ}\text{C}$). Interestingly, puree viscosity and commercial yield were in opposition for this first component. For the second component, individual plants were distinguished by both puree and fruit traits (TA, pH) as well as by yield components (NF, FCY). Terradou and the 2021 trial were associated with high yields and titratable acidity in both fruit and puree, while Lycobol and the 2019 trial were associated with high pH in fruit and puree. PG and PME activities, along with lycopene content, were measured in 2020 alone and have been presented as supplementary variables, but they were not well represented in the first and second components. Viscosity delta, representing the viscosity difference between HB and CB purees, also showed little progression along the first axis, confirming that enzymatic activity was barely modified by either the process or the water supply. Thus, it appears that WD mainly determines yield and puree viscosity and DMC, having negative effects on yield but positive ones on viscosity and DMC. If DMC is involved in puree viscosity, this parameter alone may not explain the differences between varieties. ‘Terradou’ had higher DMC but lower puree viscosity compared to H1311. Other properties, such as the serum to pulp ratio, serum viscosity and particles size and shape, can influence puree viscosity and may explain the differences observed between varieties (Moelants et al., 2014a; Porretta, 2019; Tanglertpaibul and Rao, 1987). Increased fruit DMC would be beneficial for the industry, since less water would need to evaporate from the tomato juice to obtain the desired puree in terms of viscosity and DMC, and there would be few changes to the biochemical composition of the puree.

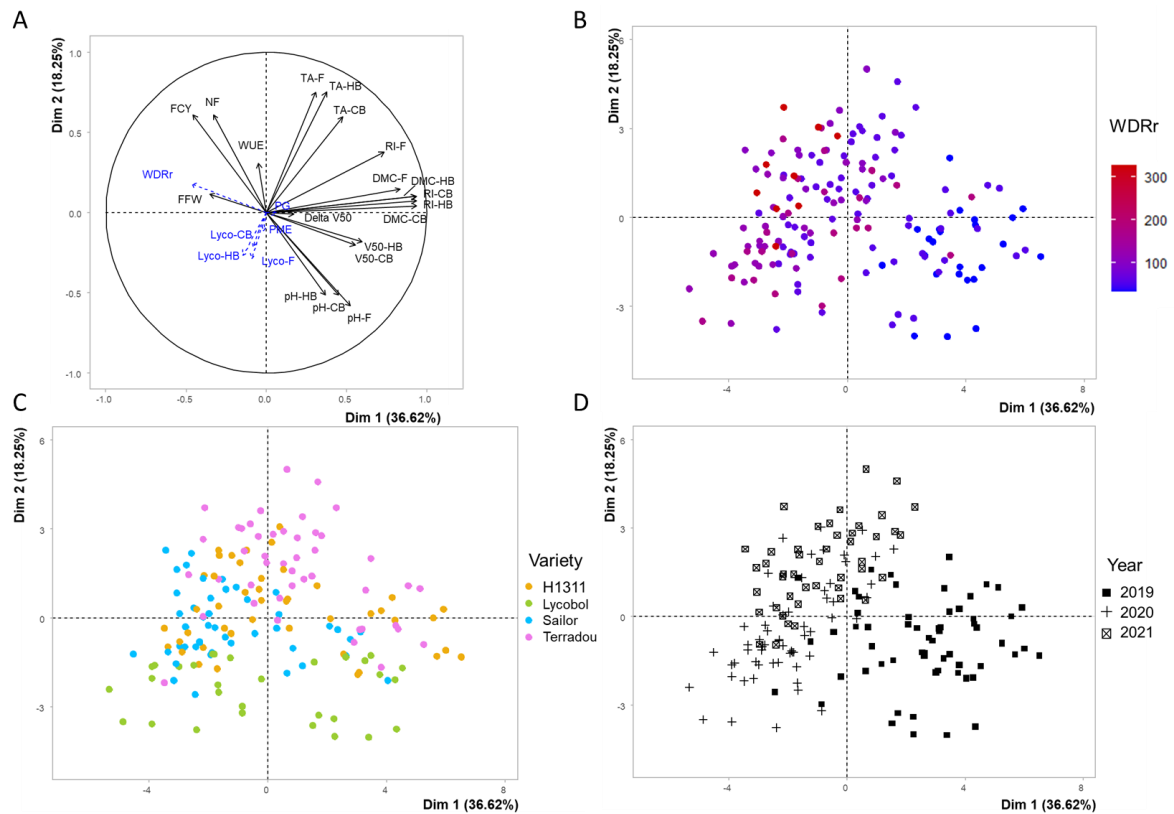


Figure 7: Principal component analysis of traits measured in fresh fruits and on purees. 19 quality parameters are included in the analysis for four varieties, three years and a range of water demand restoration ratios (from 31% to 300%). RI is refractive index ($^{\circ}$ Brix), TA is titratable acidity ($\text{meq } 100\text{g}^{-1}$), DMC is dry matter content ($\text{g } 100\text{g}^{-1}$ fresh fruit), V50 50 is apparent viscosity at 50 s^{-1} (mPa s), Delta V50 is the viscosity variation between Hot Break and Cold Break puree, PG is polygalacturonase activity (nKatal g^{-1}), PME is pectinmethyl esterase activity (nKatal g^{-1}), lyco is lycopene content (mg g^{-1} fresh fruit), FCY is fresh commercial yield (g plant^{-1}), NF is number of fruit per plant, WUE is water use efficiency ($\text{g of fresh fruit L}^{-1}$). F refers to fresh fruit, CB refers to cold break puree and HB refers to hot break puree.

IV. Conclusion

An integrated approach conducted in-field on 8 industry-type tomatoes across 5 growing seasons made it possible to quantify the impacts of low water and nitrogen supplies along the food chain. As expected, low water and nitrogen supplies reduced fresh commercial yields. However, where the water demand recovery ratio exceeded 120%, we found that both commercial fresh yield and WUE remained stagnant while puree viscosity decreased. We additionally found that application of an irrigation deficit can improve WUE under a low nitrogen supply and that this effect is genotype-dependant. Consequently, deficit irrigation both made water savings possible at field scale and provided an increase in fruit and puree DMC and in puree viscosity without modifying reactivity. This should benefit the tomato industry by serving as a concentration step in the process to obtain concentrates. Further analysis of PME and PG activities would be required to confirm matrix reactivity. We also found the biochemical composition of fruit and purees to be strongly correlated and barely affected by WD. Care should be taken to choose varieties that are tolerant of WD and to adapt the crop coefficient to these varieties, especially during heat waves. Our data highlights that the more productive varieties tested were less able to adopt water saving strategies, whereas varieties with lower productivity and higher puree viscosity displayed barely any negative effects from WD. Last, we have stressed that variations in fruit processing characteristics derive partly from changes in the fruit's DMC, which alone couldn't explain the genotype-dependant increase in viscosity observed under WD. Other components such as fruit histology are likely involved and deserve to be studied in more detail.

Chapitre 5 The variety and the processing method modify the viscosity of tomato puree by acting on different structural and biochemical traits

Nous avons mis en avant dans le chapitre précédent qu'un déficit hydrique piloté au champ peut conduire à l'augmentation de la viscosité des purées de tomate, mais aussi que certaines variétés sont plus tolérantes au déficit hydrique. Des effets bénéfiques pour le secteur industriel seraient donc possibles.

Cependant, de nombreux paramètres entrent en compte dans la viscosité finale du produit. La variété de tomate transformée et le procédé de transformation sont aujourd'hui les principaux leviers d'action des industriels pour la maîtrise de la viscosité. Si les effets des procédés cold break et hot break ainsi que de la concentration sur la viscosité des purées sont décrits dans la littérature, l'effet du choix variétal l'est moins. Au cours du siècle dernier, les sélections variétales ont conduit à l'obtention de certaines variétés produisant des purées à forte viscosité. Une meilleure compréhension des paramètres conférant à ces variétés une forte viscosité est nécessaire afin de sélectionner à l'avenir des variétés présentant ces paramètres ainsi qu'une tolérance au déficit hydrique, mais aussi d'adapter le procédé de transformation.

Dans ce chapitre nous avons étudié un ensemble de paramètres biochimiques et structuraux impliqués dans la viscosité du produit sur des purées issues de variétés contrastées, transformées selon les procédés cold break et hot break. Puis une analyse discriminante a permis d'identifier les paramètres modifiés par le choix variétal et par le procédé.

Ce chapitre est sous la forme d'un article en cours de préparation et sera soumis au journal Food Chemistry.

The variety and the processing method modify the viscosity of tomato puree by acting on different structural and biochemical traits

Miarka Sinkora¹, Anne-Laure Fanciullino^{1,3}, Nadia Bertin⁴, Robert Giovinazzo², François Zuber, Alexandre Leca¹, Agnès Rolland-Sabate¹, David Page¹

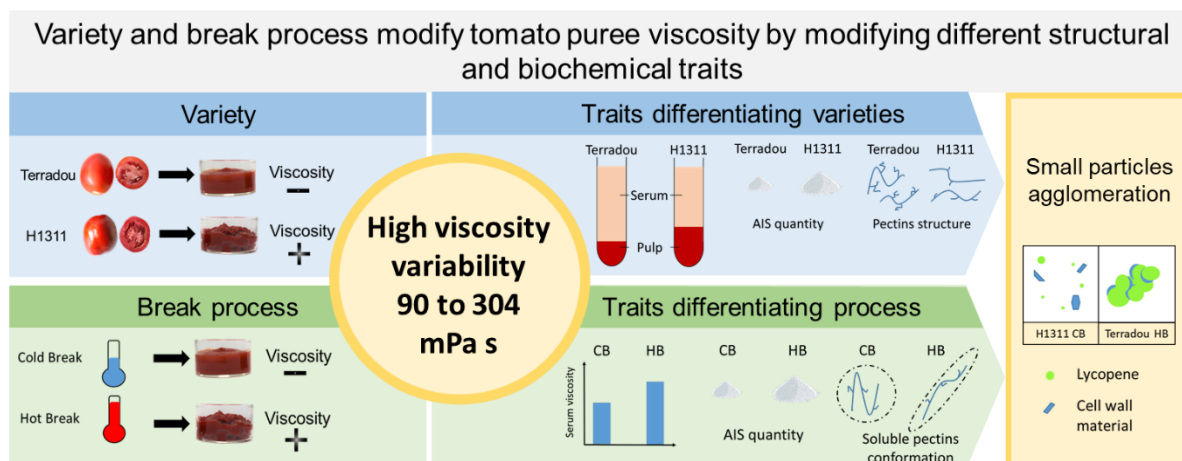
¹ INRAE, Avignon Université, UMR SQPOV, F-84000, Avignon, France

²Société Nationale Interprofessionnelle de la Tomate, Avignon, France

³UMR 1345 Institut de Recherche en Horticulture et Semences, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Centre Pays de la Loire, Angers, France

⁴UR 1115 Plantes et Systèmes de cultures Horticoles, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Centre PACA, Avignon, France

⁵CTCPA Ctr Tech Conservat Prod Agr, F-84911 Avignon 9, France



Highlights

- Variety and process modify puree viscosity through different parameters
- CB and HB purees differed by AIS, serum viscosity and large particles proportion
- H1311 and Terradou varieties differed by pulp volume, pulp DMC and serum DMC
- Soluble pectins conformation differed between CB and HB process
- HB process modified small particles (<math><80\mu\text{m}</math>) capacity of agglomeration

Abstract

This study investigated structural and physico-chemical parameters involved in the variability of puree texture induced in the field through agronomic factors and in the plant through process. Four cultivars were grown over two years under different nitrogen fertilization and fruits were processed through cold (CB) or hot break (HB) method. Purees apparent viscosity varied from 90.6 to 303.9 mPa.s and resumed most of the rheological variability. It was higher for H1311 variety than for Terradou and for HB than for CB process. Structural and biochemical traits were studied on the purees and their relative importance to the puree viscosity varied according to varieties and processes. CB and HB purees differed for their alcohol insoluble solids quantity, serum viscosity and proportion of large particles, with lower values in CB process, while varieties differed for their pulp volume and pulp DMC. Especially in HB purees, small particles (<math><80\mu\text{m}</math>) agglomerated into bigger elements, made of an imbrication of lycopene and cell wall material. This study revealed that variety and process modify puree viscosity through specific parameters and provide important information to the industry for monitoring puree quality from the field.

Key-words: Tomato puree, agricultural practices, break process, rheology, structure

I. Introduction

Processed tomatoes are food base products even out of the production area and tomato paste is the first product processed. It is a main source of phytomicronutrients for human food. In 2021, 38.7 million metric tonnes of processing tomato were produced worldwide, mainly in California (10.7 million metric tonnes expected), Italy (6.05 million metric tonnes) and China (4.8 million metric tonnes). France produced 0.42% of the world production with 164 000 tonnes on 2559 hectares (WPTC, 2021) and covered only 10,5% of its national consumption. More than 120 000mT of tomato pastes were imported in 2020 (Tomato News, 2020). The raising awareness on climate change and anthropogenic pollution prompts the growers to more sustainable practices, which in turn impact the quality of harvested fruits (Vilas Boas et al., 2017). As a result, tomato processors must adapt their practices to maintain the quality of the finished product. This involves adapting processes and using a wider range of varieties. Up to now, quality is usually assessed through soluble solid content, however the refractive index is a poor predictor of product quality (Mohr, 1987, Villas boas 2017). In this context, the tomato industry is looking for new quality markers, better able to predict the quality of the finished product from the characteristics of fresh fruits. Texture, colour and flavour are the quality attributes of puree in order of importance for the consumer (Hayes et al., 1998c). Texture is indeed a key characteristic, and even concerns industrials as it is used to define appropriate engineering parameters and design machinery like pumps (Rao, 2014). Most of the time, no texture agents are added in the tomato puree. Therefore, the targeted texture has to be obtained by appropriate processing parameters adapted to the fluctuating quality of fresh material.

Purees are suspensions of insoluble particles, the pulp, in a continuous phase, the serum. Their respective proportions, compositions and interactions impact the rheological properties. Particles are mainly individual cells and cell fragments (Lopez-Sanchez et al., 2011), but may also result from the aggregation of smaller elements (Bayod et al., 2007). Their distribution is bimodal with a class of particles bigger than 100 μm and another one with particles about 1 μm in size (Bayod and Tornberg, 2011). Tomato products behave like weak gels, with dominant elastic properties, and storage modulus (G') is systematically higher than loss modulus (G'') in the linear viscoelastic domain and exhibit viscoelastic properties. From a physical point of view, tomato-based products are pseudoplastic fluids with a yield stress, and their flow behaviour fits well with a power law equation beyond the yield stress (Diantom et al., 2017; Koocheki et al., 2009; Lee et al., 2002).

Texture can be modified either through the process or the choice of appropriate varieties. Concerning processes, they can be either cold break (CB) or hot break (HB). CB consists in chopping tomatoes and maintaining them for a short period at 60 to 66°C to allow for the reactions of pectinolytic enzymes, before stabilizing the product at around 95°C, whereas HB chopping is achieved at 93 to 99°C to immediately inactivate enzymes (Barringer, 2004).

Consequently, HB products are more viscous and darker, while CB products are more liquid, red and with flavours closer to the fresh fruit (Goodman et al., 2002). From the genetic point of view, the complexity of the mechanisms underlying texture modification of puree has been partially documented (Sánchez et al., 2002), but knowledge is still required to define breeding traits more precisely. Specific varieties of processing tomatoes have been selected by breeders for traits related to the quality of processed product. However, while yields, disease resistance, earliness and maturity performance have been largely improved by breeding since the 1930s, improvements in texture, and especially viscosity, have yet to be unravelled beyond the simple soluble solid content criteria (Ronga et al., 2019a). Indeed, puree viscosity has been mainly addressed indirectly through fruit dry matter content or soluble solid content, and the last has been documented as disconnected from puree texture variation (Vilas Boas et al., 2017). More knowledge is available about the impact of process. HB process and longer concentration step (i.e. higher soluble solid content) both increase rheological parameters linked to texture, like the apparent viscosity, the yield stress, and storage and loss moduli (Porretta, 2019). HB/CB impact cell wall which is composed of cellulose, hemicellulose and pectins. These last are polysaccharides, made of galacturonic acid backbone with some rhamnose units connecting side chains of arabinan, galactan or arabinogalactan. Pectins accumulate in the middle lamella and act as linker between cells, and are therefore key components of fruit texture. Pectins impact serum viscosity, as their properties varies according to their constitutive monosaccharides, their degree of polymerisation, their linear or branched structure, and the degree of methylation of their galacturonic acid units (BeMiller, 2018). The degree of methylation may have contradictory effects as it can either increase the gelling properties (in a context of high sucrose content and high pH where it depends on hydrophilic bounds), or decrease them (in a context of low sugar and high calcium content by favouring the ionic bounds). This makes it difficult to predict their impact on texture (Gawkowska et al., 2018). During CB process, pectinolytic enzymes catalyze their degradation. Pectinmethylesterase (PME) catalyses the demethoxylation of the homogalacturonan, allowing their hydrolysis by the polygalacturonase (PG), leading to a decrease of viscosity (Sánchez et al., 2002). High break temperature, like in the HB process, inactivates enzymes early during the process and thus increase the water insoluble solid content, leading to higher viscosity, yield stress and viscoelastic moduli (Valencia et al., 2004). High performance size-exclusion chromatography with multi-angle-laser-light scattering (HPSEC-MALLS) on tomato serum highlighted that pectins root-mean-square (rms) radius decreased during puree concentration while molecular weight remained constant, leading to a loss of viscous properties (Diaz et al., 2009). Process may also impact particles size distribution. However discrepancies appear regarding the effect of particle size, shape, concentration and deformability on the rheological behaviour (Porretta, 2019). On one hand, viscosity increases when the proportion of small particles is increased either after reassembling of purees after wet sieving (Yoo and Rao, 1994) or by adding homogenisation operations (Bayod et al., 2007). On the other hand other studies reported an optimum of viscosity for particles between 90 and 180 μm and then a decrease for bigger particles (Ouden and Vliet, 2006), and no modification of the storage modulus

after particle size was decrease by homogenisation (Moelants et al., 2014a). Beside the particle size, their shape modifies rheological properties. Irregular particle surfaces increase the yield stress (Leverrier et al., 2017; Moelants et al., 2014a). In the industry, particle size may be modified by the finisher screen size or by high pressure homogenisation of puree. The finisher screen size may have contradictory effects, decreasing the pulp fraction and the particle size at the same time (Sánchez et al., 2002).

Texture attributes may be assessed visually, like the visible mealiness, with spoon tests by stirring or pouring to assess thickness and viscosity, and in mouth by chewing the product (Hongsoongnern and Chambers Iv, 2008). However, as sensory texture is a set of attributes highly connected, instrumental analysis struggles to evaluate the overall sensory texture. Conversely, any instrumental measurement of texture should be corroborated at least by a hedonic test to verify that differences measured are really perceived by the consumer. The napping methods is a non-directed method designed to distinguish wines following multiple attributes (Pages, 2003), and may be adapted to assess rheological measurements on tomatoes.

In this context, this study aimed to i) analyse the variations in rheological properties of tomato puree induced by interactions between process, cultivar and nitrogen supply ii) assess if measured differences could be perceived by consumers and iii) relate viscosity changes to structural and biochemical characteristics and identify those that explain process and variety effects. We made the hypothesis that textural changes induced through contrasted processing methods or cultivars stem from different rheological parameters and that a detailed analysis of these parameters will help improve quality of end products by adapting the process to the raw material and breed new varieties to the present and future context of production.

II. Material and methods

1. Plant material and fruit harvest

Four varieties of processing tomatoes (H1311, Terradou, Lykopol and Sailor) were cultivated in 2019 and 2020 in an open field near Avignon, France (44°11'22.4"N 4°48'11.7"E). Varieties were repeated randomly in the field in order to obtain 50 to 100m-length double-rows at a linear density of 3.3 plants m⁻¹. Plants were drip irrigated and irrigation was adjusted weekly based on climate data from a local weather station to replace 100% of the plant evapotranspiration, as described in (Vilas Boas et al., 2017). In 2019, the experimental design consisted in two varieties (Terradou and H1311) cultivated under two contrasting levels of nitrogen supply: (high i.e. 73 kg/ha and low i.e. 21 kg/ha). In 2020, four varieties (H1311, Terradou, Lykopol and Sailor) were cultivated on a very close field, under high nitrogen supply (100kg/Ha). So a total of 8 different lots of 200kg raw fruits corresponding to the 8 combinations (2 varieties and 2 N levels in 2019 and 4 varieties in 2020) were harvested for processing. Red fruits were selected (representing 71 and 90 % of the total fruit mass per plant, in 2019 and 2020 respectively).

For analysis of the raw material corresponding to each condition, 3 batches of 2 kg of fruits were manually harvested on 3 locations spread within the entire rows in the field. For each batch, a central slice of each tomato (around 1cm of thickness) was cut, quickly frozen and stored at -80°C before biochemical characterisation.

2. Fruit processing into puree

Fruit of each of the 8 conditions (200 kg) were either "hot-break" (HB) or "cold-break" (CB) processed in a pilot plant (CTCPA, Avignon, France) giving a total of 16 purees. For CB juices, tomatoes were cleaned, chopped in a hammer mill (Electra F6N, Electra, France), heated for 2 minutes and 45 seconds at 50°C in a scraped-surface heat exchanger (Thermorotor, Duprat, France) and directly refined. For HB, juices were extracted and refined at ambient temperature in a turbo extractor equipped with 8/10 sieve (Giubillo short 55KW, CFT, Italy), vacuum deaerated and immediately heated for 2 minutes at 95°C under ohmic heating (Ohmico impianto pilota, CFT, Italy), then chambered for 5 additional minutes at 95°C in a vapor exchanger, then homogenized and cooled down to 40°C in a tank. Both juices were then concentrated to approximately 15°Brix in vacuum evapo-concentrator at 55°C (Auriol, France). Concentrates were canned, sterilized 25 minutes at 93.3 °C ($z=8.89^{\circ}\text{C}$) in a vertical static autoclave (AUTR03, Auriol, France) and cans were stored at 4°C until analysis.

3. Sensorial analysis (napping)

Purees processed in the pilot plant in 2019 and 2020 were tasted by 14 non-trained juries using the Napping method (Pagès, 2005). Therefore, purees were transferred into 50ml cups before degustation, and their order of presentation was randomized for each member. Napping consists in disposing the degustation cups directly on a rectangular paper tablecloth (60x40), according to their similitudes or differences. Sample positions were characterized by coordinates on the tablecloth and coordinates were analyzed with multiple factor analysis to produce an average map of individuals with the average position of samples and their confidence ellipses (Pagès and Husson, 2005). Data analysis was conducted with FactoMineR R package.

4. Rheological measurements

Rotational and oscillatory tests were conducted on each puree to measure their flow behaviour and viscoelastic properties as described in (Buergy et al., 2020) with few adaptation to tomato purees conditions. All tests were performed on a stress-controlled rheometer (Physica MCR301, Anton Paar, Austria) equipped with a Peltier cell (CPTD -200, Anton Paar). Samples were thermostated at 22.5°C and changed for each test. Tests were performed with a six-bladed vane tool (FL 100/6W/Q1, Anton Paar) combined with an outer cylinder cup (CC27/S, Anton Paar). Indeed as samples contain particles higher than 100µm but lower than 1mm due to refining process, the measuring cell gap of around 3 mm was assumed to be adapted according to (Tornberg, 2017). Each test was preceded by a pre-shearing 20s^{-1} during 60 s, and a 300 s rest with the mobile plunged in the product, to remove air inclusions,

to ensure the dispersion of the product and retrieve a rheological equilibrium. Three tests were performed for each puree:

1-A flow curve consisting of measuring apparent viscosity over a range of shear rates from 1 to 150s⁻¹ (31 points automatically scaled over a logarithmic ramp) after 15 s of stabilization for each point. The flow curves were then modelled using the Ostwald de Waele equation suitable for non-Newtonian fluids (Kubo et al., 2019):

$$\eta = K \times \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad \text{Eq.1}$$

where η is the apparent viscosity in Pa.s, K is the consistency coefficient in Pa.sⁿ, $\dot{\gamma}$ is the shear rate in s⁻¹ and n the flow behaviour index (dimensionless).

2- Oscillatory strain sweep was performed to define the linear viscoelastic domain and estimate the flow stress FS. Strain was applied from 0.01 to 150% (logarithmic ramp) at a frequency of 1Hz and 20 points were registered for both loss modulus (G'') and storage modulus (G'). The linear viscoelastic domain is the strain domain for which G' and G'' are constant. The flow stress (FS) was then measured, and correspond to the point where G' and G'' equalized as both quit the linear domain (Buegy et al., 2020). FS corresponds to the shear stress necessary for the product to start flowing. Frequency sweep was then performed within the linear viscoelastic domain previously established. Oscillatory shear was here applied under constant strain of 1%, but with frequencies varying from 0.01 to 100 Hz, giving access to a more accurate measurement of G' and G'' . Loss factor $\tan(\delta)$ was then calculated as the ratio of the storage modulus G' by the loss modulus G'' . The phase shift δ was calculated as the arctangent of the loss factor.

3-The apparent viscosity η_{50} was measured with a double helicoidal ribbon mobile (ST24-2HR-37/120, Anton Paar) at a shear rate of 50s⁻¹ to mimic the shearing applied by in-mouth puree consumption (Stokes, 2012) and to verify if shear rate is not influenced by the wall slip phenomenon as may occur with tomato product (Moelants et al., 2013).

Finally, after centrifugation (described later), the specific viscosity of serum was measured with a double gap geometry: outer cylinder (DG27, Anton Paar) with a mobile (DG27/T200/SS). After a 60 s rest, a flow curve from 10 to 1000s⁻¹ was realised (logarithmic ramp), from which the apparent viscosity value at 100s⁻¹ was selected as representing the shear rate applied during serum in-mouth consumption (Buegy et al., 2020).

5. Pulp to serum repartition

Three replicates of 12g of each puree were centrifuged into 12-ml tubes on a Beckman ultracentrifuge (L8-70 M, Beckman, USA) equipped with a swing rotor (SW41T, average diameter 61,2mm) at 100000 g, at 4°C, during 28minutes (including 4 minutes of acceleration). The pulp volume fraction was calculated as the ratio between the pellet volume and the total volume in the tube (supernatant + pellet).

Then, the serum was removed for further rheological analysis, and the pulp was weighted and analysed for dry matter content (DMC). The pulp DMC fraction was calculated as its proportion into the total puree on a dry-weight basis.

6. Particle-size repartition of insoluble fraction and microscopy

Wet sieving of 80g of puree was achieved on a vibratory sieve shaker (Retsch AS200 Basic, Retsch, Germany) with an 80 μ m-mesh sieve. Samples were washed with 1L to 1.5 L of distilled water until the washing water became transparent. Particles retained on the sieve, here after called “larges particles” (LP) were centrifuged (9000g 10min), as well as those contained into the rinsing water (9000g 20min) here after called, “small particles” (SP). The pellets of both sieving fractions were weighted and analysed for their dry matter content and the size distribution of their particles using a laser diffraction analyser (Mastersizer 2000, Malvern Instruments Ltd, UK). Samples were dispersed in distilled water (refractive index 1.33). Refractive index of the particles was set at 1.52 and absorption at 0.1, adapted for vegetal material, according to (Leverrier et al., 2016). Each sample was analysed in triplicate and for each analysis, the average particle size distribution of three measurements was considered.

For Terradou and H1311 purees, the pellets from the rinsing water were also diluted in 2 mL of distilled water with 0.01% of calcofluor and observed on a microscope (Olympus BX61, Olympus, Japan) with 20 magnificence. One drop of diluted pellet was placed on a 1 mm precleaned micro slice (Leica biosystems, Germany) surmounted by 0.16-0.19 mm thinness cover glass. Three slides for each sample were observed and 10 images were recorded per slide. A total of 103 images were analysed. For each, particles longer than 20 μ m were counted and measured under FITC (lycopene autofluorescence) and DAPI (cell wall material coloured with calcofluor). A merge of DAPI and FITC images was used to verify colocation of particles of lycopene and cell wall material.

7. Biochemical traits

Biochemical analysis were conducted in three replicates on fresh tomato grinded under liquid nitrogen using an IKA A11 basic analytical mill (IKA Works, USA) and on purees. The dry matter content (DMC) was determined by weighting 3 g of fresh sample before and after 3 days drying at 70 °C. Total Soluble solid content (TSS) was measured with an ATAGO PR-32 α digital refractometer (ATAGO, Japan) with automatic compensation at 25 °C and results were expressed in degree Brix. pH was measured with a Mettler Toledo FE20/EL20 pH meter (Mettler Toledo, Switzerland). Titratable acidity (TA) was measured with an automatic 888 Titrando titrator (Metrohm, Switzerland), and results expressed in mEq 100 g⁻¹ fresh weight with the Tiamo 2.4 software.

Enzymatic activities were measured on fresh fruit freeze-grinded powder. PG activity was determined by the method of Gross adapted by (Ribas-Agustí et al., 2017). PME activity was determined by an adaptation of the HOUBEN method described by (Ribas-Agustí et al., 2017)The aliquot of PME enzyme extract was 50 μ L instead of 250 μ L due to the high enzyme activity in tomato fruit.

Alcohol insoluble solids (AIS) were extracted from 2 g of cold powder (-80 °C) of fresh fruits or from 2 g of freeze-dried purees. Samples were stirred one night at 4 °C in pure acetone and then filtered on 75 mL Sep-pak column (Interchim, France) with 20 µm porosity sinter as described in (Le Bourvellec et al., 2011). The residue was dried 48 h at 38 °C and weighted. AIS were expressed as percentage of the initial dry weight.

Neutral sugars, galacturonic acid (GalA) and methanol were measured on AIS to characterise pectins. After the acid hydrolysis of AIS (Saeman et al., 1954), the free neutral sugars were derivatized to alditol acetates (Englyst et al., 1982) and analysed by gas chromatography. GalA was measured spectrophotometrically using the *m*-hydroxydiphenyl assay (Blumenkrantz and Asboe-Hansen, 1973) and methanol was quantified by stable isotope dilution assay after saponification and analysed by gas chromatography as described by (Buergy et al., 2020). The degree of methylation (DM) was evaluated as the molar ratio between methanol and GalA. Pectin composition was assessed through ratios of neutral sugars quantity expressed in mg/g: GalA divided by the sum of rhamnose, arabinose and galactose to assess the level of branching (R1), sum of arabinose and galactose divided by rhamnose to assess the length of branching chains (R2), GalA divided by rhamnose to assess pectin linearity (R3), Arabinose divided by Galactose to assess the type of branching (R4).

The molar mass and size distributions of soluble pectins were evaluated on a high-performance size-exclusion chromatography (HPSEC) system coupled to a multi-angle laser light scattering detector (MALLS) and an online viscometer from Wyatt Technology (Santa Barbara, CA), a differential refractive index detector (DRI) and a diode array detector (DAD) from Shimadzu (Tokyo, Japan), as described by (Buergy et al., 2020). 10 g/L of AIS were solubilized in the eluent (NaNO₃ 0.1M with sodium azide 0.02%) by stirring 48 h at 4 °C. The suspension was centrifuged to extract soluble pectins (10 minutes, 9000 g) and the supernatant filtrated on a 0.45µm PTFE syringe filter (Macherey-Nagel, Düren, Germany) before injection (150µL). Samples were eluted at a flow rate of 0.5 mL/min at 30 °C and separated by three PolySep-GFC columns (P3000, P5000 and P6000, 300 × 7.8 mm) and a guard column (Phenomenex, Le Pecq, France). The ASTRA® software (Wyatt Technology, version 7.3.2.21 for PC) was used to obtain molar mass and sizes (viscometric hydrodynamic radius $\bar{R}_h(v)$) from the data as described by Buergy et al., (2020). The weight-average molar mass \bar{M}_w and intrinsic viscosity $[\eta]_w$ were obtained by integrating the whole peaks. Each sample was injected twice.

III. Results

1. Rheological parameters of purees obtained from different cultivars /processes /nitrogen supplies

Shear and oscillatory tests revealed that all samples were shear thinning non-Newtonian fluids and had a weak gel behaviour as usually observed on tomato products. Viscosities decreased with increasing shear rate and the curve fitted with the Oswald de Waele model, giving access to flow behaviour indexes (n) and consistency indexes (K). n varied from 0.170 to 0.277, and (K) from 12.5 to 85.8 Pa sⁿ (table S1). Oscillatory strain sweep confirmed that the storage moduli G' was always higher than the loss moduli G'' under the linear viscoelastic domain as expected from weak gels. Flow stresses (FS), calculated as the point where both moduli equalised, ranged from 13 to 100 Pa, corresponding to various consistencies among samples. Concerning the elasticity, the phase shift (δ) ranged from 14.87 to 17.46 degrees, but it was poorly correlated to the flow stress FS ($r^2=0.41$) or G'/G'' ($r^2=0.42$), revealing that distinct physical phenomena may occur. The apparent viscosity (η_{50}) varied from 90.6 to 303.9 mPa.s (table S1). All the factors included in our experimental design impacted on the rheological behaviour of purees. The low nitrogen supply in 2019 triggered a 9.3 % increase of the η_{50} and a 9% decrease of FS, while the year of production had a 40% impact on the mean η_{50} of H1311 and Terradou purees grown under non-limiting nitrogen supply. In 2020 purees had higher η_{50} , but also higher δ than in 2019. Overall, the cultivar was the most impacting factor. Sailor and H1311 consistently gave purees with higher apparent viscosity than Terradou and Lycobol. Between Sailor and Lycobol, the apparent viscosity varied by 57%. Sailor had the highest η_{50} and G' even compared to H1311, but H1311 exhibited higher δ . Finally, the process was the second most impacting factor: all HB purees exhibited higher η_{50} , FS, G'/G'' and δ than CB purees whatever the cultivar and the year. The differences varied between varieties, but on average, HB purees exhibited a 40% higher η_{50} than CB purees.

A PCA of all the rheological parameters (Supplementary table s 1) measured on the different samples showed that most of the rheological parameters were highly correlated, along the first axis which explained 76% of the variability. Purees were mainly discriminated according to FS, G' , G'' , K and η_{50} . The second axis, explaining 15% of the variability, depended mainly upon variations of n and δ (Figure A). Samples were discriminated on this plane according to varieties and process. Concerning varieties, Terradou and Lycobol were imbricated in a position corresponding to low value of most parameters (negative side of the first axis), while H1311 and Sailor were situated on the positive part of this axis. For any of the four varieties, position corresponding to CB purees also exhibited lower coordinate on the first axis compared to HB purees, as illustrated by the position of the barycentre on each HB/CB group (Figure B). However, the variation according to the process varied along the second axis in different ways depending on the varieties. The variation of Terradou, Sailor and Lycobol purees was a rightward and upward shift according to their processing, while H1311 purees exhibited a downward shift when processed HB was compared to CB.

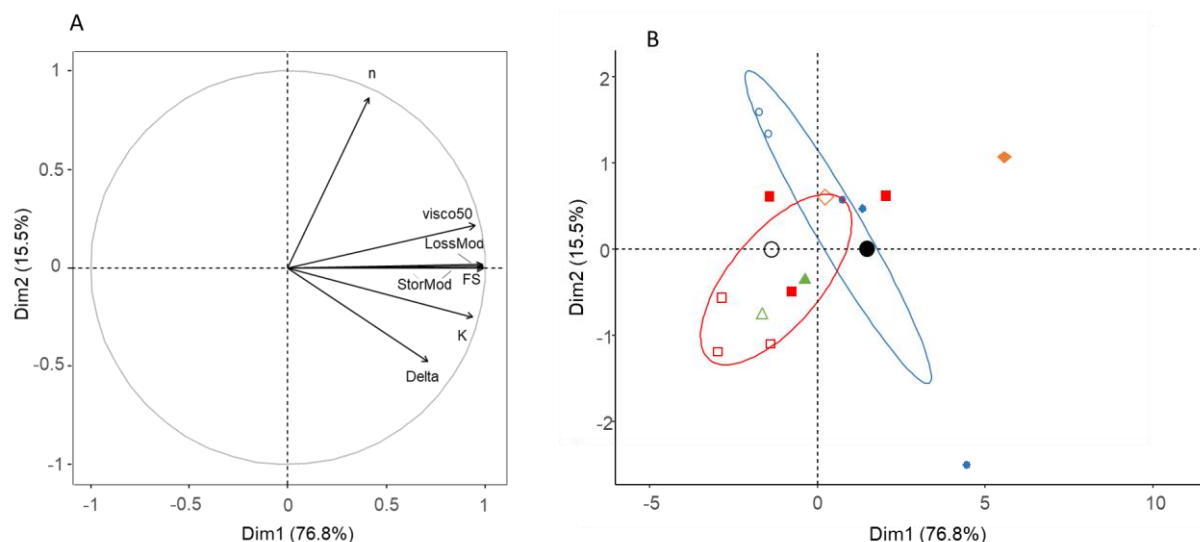


Figure 1: Principal Component Analysis on rheology parameters of tomato purees obtained from different cultivars, nitrogen fertilization and processes. Circle of correlations (A) and individuals graph (B). Each point represents one puree (16 in total). Shapes and colors are cultivars: blue circles are H1311, red squares are Terradou, green triangles are Lykobil and orange diamonds are Sailor. Empty symbols represent CB and filled symbols are HB process. Black filled and empty circles are barycenters of CB and HB purees. Confidence ellipses at 95% are represented for H1311 (blue) and Terradou (red) samples obtained over two years.

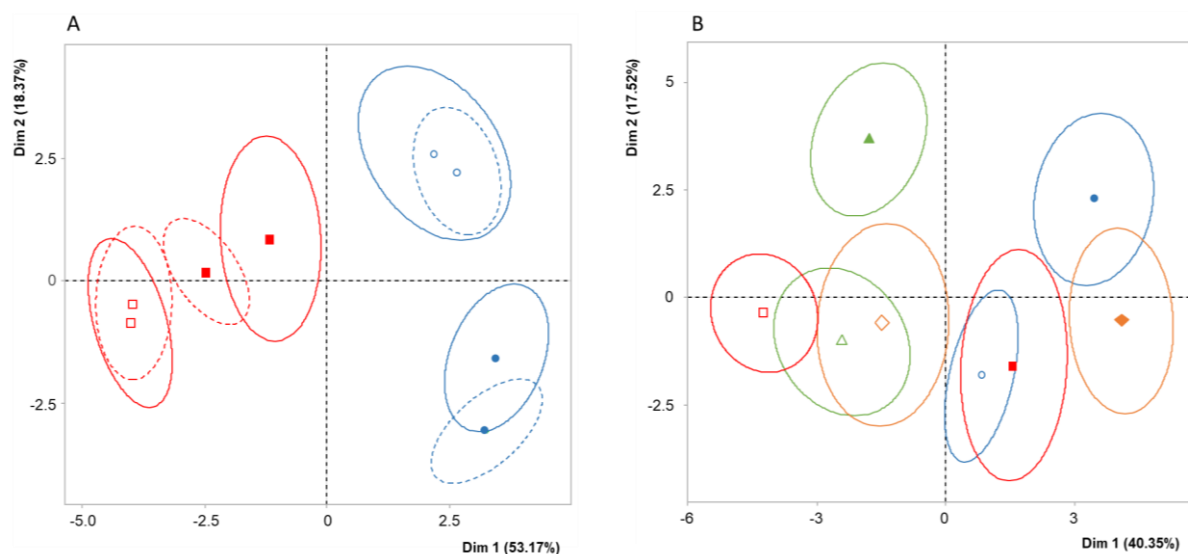


Figure 2: Average napping configuration for purees tasted in 2019 (A) and in 2020 (B). Shapes and colors represent cultivars: blue circles are H1311, red squares are Terradou, green triangles are Lykobil and orange diamonds are Sailor. Empty symbols are CB and filled symbols are HB. Ellipses represent the sample position for 100 virtual panels generated by bootstrap method, with 95% confidence. Lines are for HN samples and dotted lines for LN.

The PCA confirmed that cultivar and processing impacts on texture cannot be distinguished by only one specific rheological behaviour, as both impacted the same parameters.

2. Sensorial analysis

The samples presenting differences in terms of rheology were discriminated by the sensorial analysis (Figure 2). In 2019, the juries distinguished the H1311 purees from the Terradou purees following the first axis of the average tablecloth and the HB/CB purees following the second axis. The process impact was more intensively perceived for H1311 than for Terradou as indicated by the higher Euclidian distances between average points on the map. Purees issued from tomatoes cultivated under LN and HN were not distinguished (Figure 2A), In 2020, CB and HB process were distinguished for every of the four varieties tested. Varieties were more difficult to distinguish as indicated by the overlapping ellipses.

However, Terradou and H1311 purees were still separated (Figure 2B). The most contrasted varieties according to the rheology of their purees and their distinction by sensorial analysis were H1311 and Terradou.

3. Links between variations in puree viscosity and variations in structural and biochemical parameters

Eleven biochemical and structural variables potentially related to the texture of purees were measured on our samples: puree DMC, SSC, AIS, pH, titratable acidity, proportions of large and small particles, pulp DMC and volume, serum DMC and viscosity (Supplementary table s 2). Most of them exhibited variations according to the cultivar, the process and the year but were less influenced by the nitrogen supply in 2019. Each variable was tested first for its correlation to fresh fruit TSS and DMC (Supplementary table s 3) and then for its correlation to the variations of η_{50} in purees (Supplementary table s 2). The variables related to the pulp fraction (AIS, proportion of large particles, pulp DMC and pulp volume fraction) had coefficients of correlation higher than 0.5, but none of their individual variation fully explained the variations of viscosity. The coefficients of correlation varied between <0.001 and 0.84, and we verified that low coefficient of correlation may not be explained by non-linear regression between variables (data not shown) None of the puree variables was correlated to fresh fruit variation of DMC or Brix. All fresh fruits were situated in a narrow range of TSS or DMC, and the lack of correlation confirmed that differences observed in purees cannot be explained by any dilution effects that may occur during the process (especially during the concentration steps). The coefficient of correlation between η_{50} and puree DMC (0.45), indicating that the DMC was not an indicator of puree viscosity in our trial. Another outstanding feature was on serum composition: H1311 and Terradou exhibited similar serum DMC, but contrasted serum viscosity (η_{100}), indicating that conformation of its constitutive molecules may be the driving force of its differences of viscosity. Interestingly, serum η_{100} were poorly correlated to puree η_{50} . Altogether, those results indicated that associations of parameters were involved in viscosity control.

In a first step, a partial least square (PLS) model was calculated with the same variables to check if viscosity may be linked to a combination of them. PLS exhibited a significant model ($R^2=0,86$). Seven out of the 11 variables exhibited importance in projection (VIP) higher than 0.8. This result validated most of our markers as having a partial impact on variations of viscosity, and suggested that they must indeed be considered in combination to explain viscosity changes induced by cultivars and process (Supplementary table s 4).

In a second step, we performed two discriminant PLS (PLS-DA) on the 12 purees from H1311 and Terradou varieties which were present in 2019 and 2020. No significant models were found for discriminating the years or the nitrogen supply. However, one significant model can be calculated for discriminating purees either according the process or the varieties (Supplementary table s 4). The discriminant analysis on the process highlighted that CB purees differed from HB purees mainly for their AIS quantity, serum viscosity and proportion of large particles. The order of importance of the variable for discrimination (VIP) changed from one model to the other. CB purees was mainly differing from HB purees by a lower quantity of AIS, a lower serum viscosity and a higher proportion of large particles, and Terradou purees were mainly characterised by a lower pulp volume, a lower DMC and a higher serum DMC compared to H1311 purees.

4. Composition of alcohol insoluble solids and conformation of soluble pectins

As AIS quantity and serum viscosity appeared as important variables to discriminate Terradou from H1311 purees and CB from HB process, AIS composition and soluble pectins conformation were studied in further detail. The major components of the AIS were GalA and glucose confirming that they were mainly composed of pectin and cellulose. Xylose also confirmed the presence of hemicellulose. Concerning the impact of varieties, H1311 fresh fruits exhibited 29,8% more AIS in its DMC than Terradou fruits on average. AIS of H1311 exhibited higher R1, R2 and R3 ratio than AIS of Terradou, corresponding to pectins more linear, less branched and with smaller branching chain. H1311's pectin were also less methylated than Terradou's pectin, which is coherent with a higher PME activity registered in H1311 compared to Terradou. The mean PG activity was also higher in H1311, although the difference was affected by the harvesting year (Supplementary table s 5).

The HB and CB process decreased AIS yields by respectively 25% and 42% as expected from the CB treatment which promote the intrinsic enzymatic action. In the same way, the DM of CB puree decrease by 90% compared to fresh fruit, while only by 43% for HB on average. Pectins of CB were less linear (smaller R3) and appear as more branched (smaller R1) compare to HB, which is also consistent with a more intense PG activity in CB. Considering the contrast between varieties, AIS yield followed the differences observed on fresh fruit, with a higher yield for H1311 purees. However, the impact of process was not strictly the same depending on varieties: while R1 and R3 decreased between fresh to process samples of H1311, they raised for Terradou HB samples and decreased only slightly for CB sample (Supplementary table s 6).

Soluble pectin from AIS of H1311 and Terradou purees of 2020 were studied for their \bar{M}_w and size distribution. They differ between varieties and processes. Soluble pectins may be divided into five main size class (chain concentration peaks on figure 3 A, B). Peaks 1, 2 and 3 were higher for H1311 pectins than for Terradou, traducing a higher proportion of pectin with high molar mass. For both varieties, larger pectin in terms of hydrodynamic radius ($R_h > 37.5$ nm) were less represented under CB process (Peak 1 with lower chain concentration, Fig. 3 A, B). The weight-average molar mass \bar{M}_w were thus higher for HB process (1.26×10^5 g/mol) than for CB (1.01×10^5 g/mol), especially for H311 (Figure 3 D). Information on pectin conformations in solution were obtained by plotting the molar mass versus the intrinsic viscosity. The Mark-Houwink-Sakurada conformation exponent α is ~ 0.55 for CB pectin, a value corresponding to a random coil conformation in a θ solvent, and ~ 0.95 for HB (Fig. 3 C), indicating a semi-flexible organization in a good solvent (Flory, 1953), in agreement with literature data (Fishman et al., 2001). Moreover, for similar molar mass, the intrinsic viscosity of soluble pectin was higher after HB process (Fig. 3 C). Soluble pectin from HB exhibit then a more elongated structure in solution and \bar{M}_w that participates to the increase of serum viscosity (Figure 3 D). The structure of HB pectin may favor interactions with the pulp fraction.

5. Particles size distribution and microscope structure observation depending on cultivar and process

Considering the results of PLS-DA about the influence of proportion of large particles, or pulp volume fraction, a detailed investigation on particle sizes and repartition was conducted also for Terradou/H1311 and for HB/CB contrasts. Insoluble content of purees, were previously separated into large (LP) and small particle (SP) as already described (Page et al., 2019). Each fraction was first characterised for the particle size distribution. The most contrasted fraction among our samples was the SP (figure 4A and B). All profiles, irrespectively of the variety and process, presented a bimodal profile, mainly composed of one peak between 70 and 91 μm (corresponding to the mesh of the sieve), and a second one between 5 and 20 μm , which mean size varied according to process or varieties. In CB situation, the second peak was centered on 8 to 10 μm for both varieties, and only the respective proportion of both peaks differed between varieties. In HB situation, the second peak differed between varieties. It was centered on 6 μm for H1311, and was the main peak. For Terradou, the second peak corresponded to larger particle sizes, centered on 15 μm , and is almost confused with the first peak. Puree LP had a monomodal distribution with a shoulder around 50 μm . Particles were larger for Terradou (417 μm) than for H1311 (316 μm).

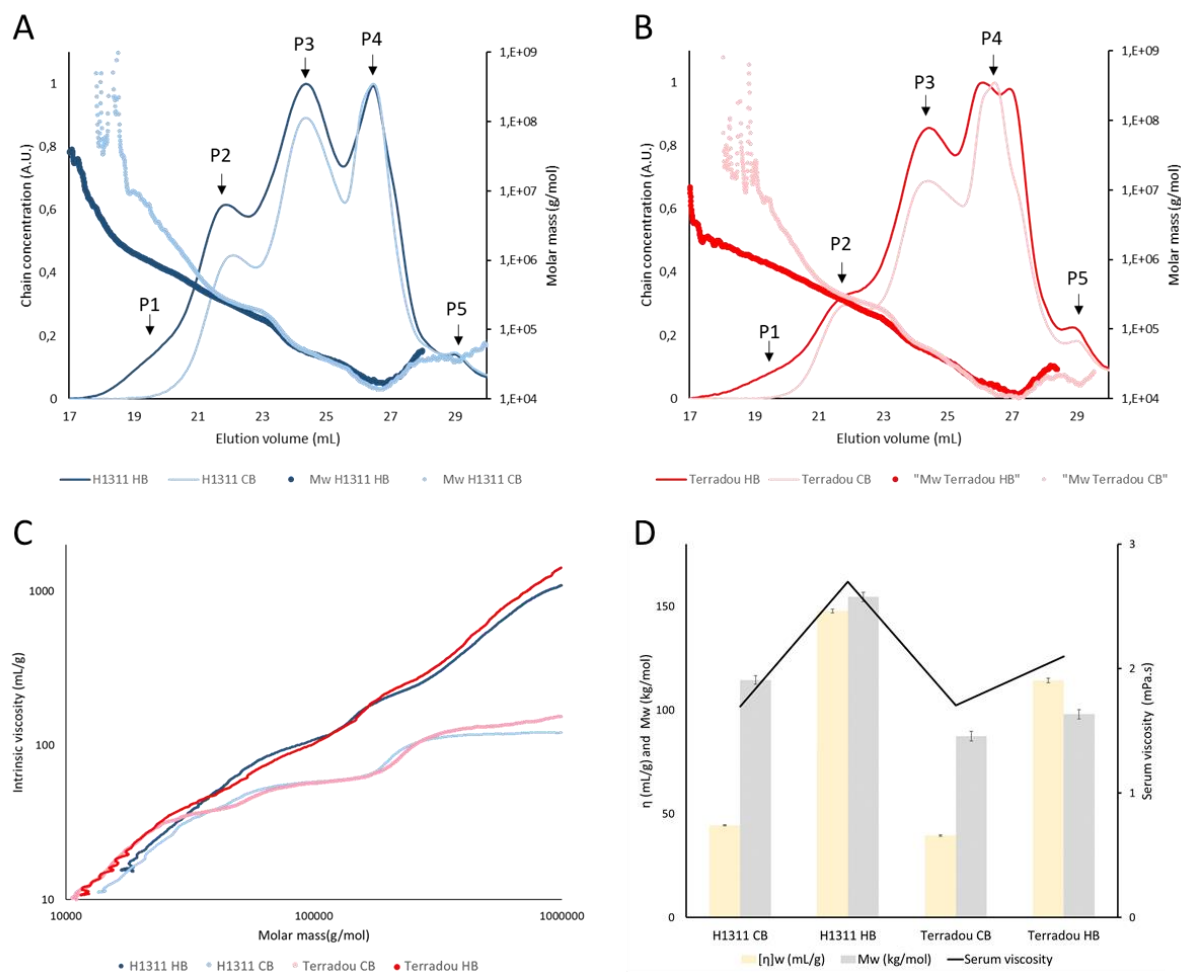


Figure 3: Soluble pectin characteristics evaluated by HPSEC-MALLS. Normalized chain concentration (thin lines) and molar mass (thick lines) versus elution volume of soluble pectin for H1311 (A) and Terradou (B), purees, Intrinsic viscosity plot versus molar mass (C) and evolution of weight-average molar mass \bar{M}_w and intrinsic viscosity $[\eta]_w$ of soluble pectins and serum viscosity of H1311 and Terradou purees (D). α : hydrodynamic coefficient for a given polymer calculated from the Mark-Houwink -Sakurada equation ($[\eta]_i = K_a M_i^\alpha$) for pectin samples in citrate/phosphate buffer at pH 3.8, 0.1 M ionic strength. $\alpha = 0$: Spheres, 0.5-0.8: Random coils, 1.0: Stiff coils, 2.0: Rods. $\alpha=0.913$ for H1311 HB, $\alpha=0.551$ for H1311 CB, $\alpha=0.974$ for Terradou HB, $\alpha=0.567$ for Terradou CB. Arrows highlight the peaks in chain concentration. P1 : 15.1-20.3 mL : $R_h > 37.5$ nm, P2 : 20.3-22.8 mL : 37.5 nm $> R_h > 13$ nm, P3 : 22.8-25.4 mL : 13 nm $> R_h > 5$ nm, P4 : 25.4-27.5 mL : 5 nm $> R_h > 2.5$ nm, P5 : 27.5 mL-30 mL : $R_h < 2.5$ nm.

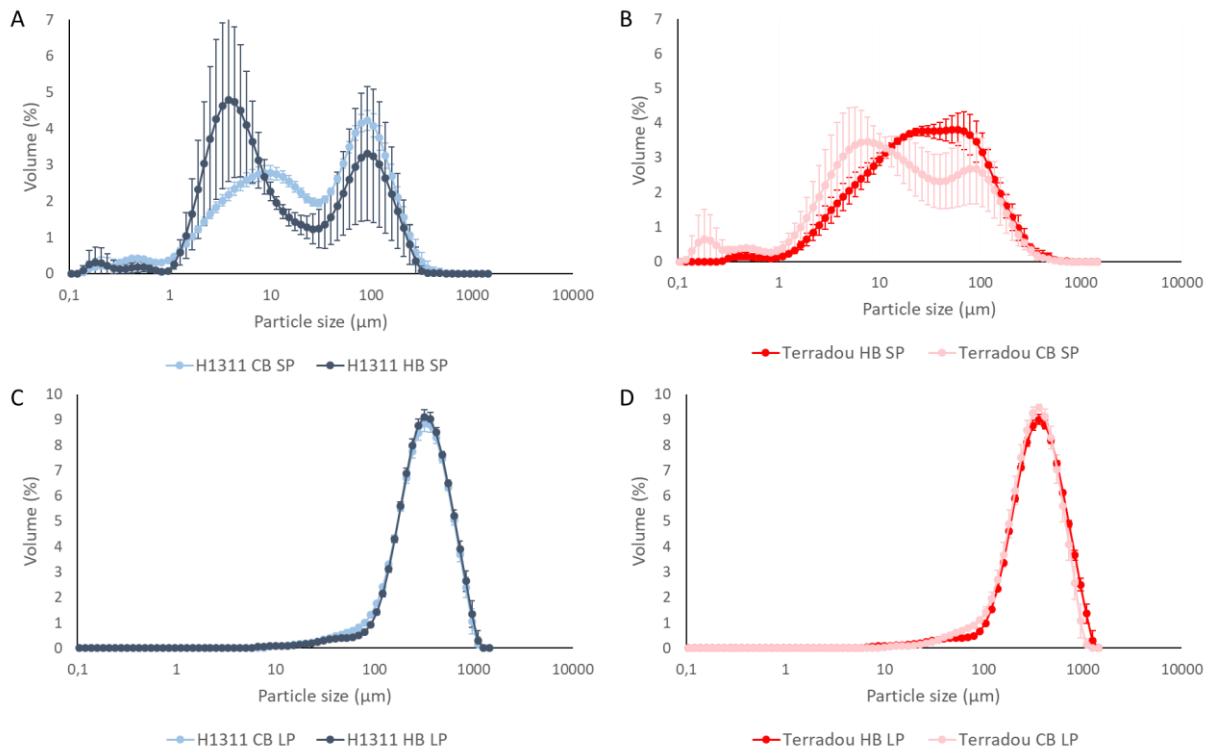


Figure 4: Particle size distribution of Small Particles SP (A, B) and Large Particles LP (C, D) of H1311 and Terradou purees after water sieving in 2020. Distributions are the average distribution of 3 purees, each analysed twice in the granulometer, and bars are the standard error of mean.

Considering the changing size distribution of the small particles, a total of 103 microscopy images with double coloration targeted on cell wall and lycopene were analyzed for particle of this size class prepared from CB and HB purees of both H1311 and Terradou. A total of 614 particles were counted (328 particles of lycopene on FITC and 286 particles of cell wall material on DAPI). Particle size varied from 20 μm to 726 μm , and revealed various types of structures (figure 5). Merging FITC and DAPI images revealed colocation of lycopene and cell wall fragments. Lycopene appeared either as independent structures or as being a component of an intricate structure of small fragment of cell wall with diffuse particles of lycopene. We sorted the 286 particles of cell walls into 4 categories and counted their respective frequencies (figure 5B). A larger proportion of cell wall clusters was observed in Terradou compared to H1311. And especially for clusters involving colocation with lycopene. CB treatment drastically reduce the occurrence of cell wall clusters compared to other types of particles, and especially the numbers of clusters exhibiting colocation with lycopene. Altogether, the microscopy images revealed that small particles may aggregate to form complex structures larger than the sieve (80 μm), and this aggregation properties seemed affected by the process and the varieties.

IV. Discussion and conclusion

In the context of climate change and increasing demand for more sustainable production systems and high-quality food, understanding the effects of interactions between agronomic and processing factors on end-product quality is a major issue. Texture is a main factor of quality for tomato products. This study provided a deep insight into textural variations related to cultivars, nitrogen supply and process and revealed important information to manage puree quality from the field.

Large range of puree viscosity results from interactions between agronomic and processing factors

The rheological behaviour of the samples was typical of tomato purees. A flow behaviour index lower than 1 is typical of non-Newtonian pseudo plastic behaviour (Steffe, 1996). Values of the consistency coefficient and flow behaviour index were in the range of previous studies, (Diantom et al., 2017) reported a consistency coefficient of 9.01 Pa.sⁿ and a flow behaviour index of 0.274 for 9% DMC sauce. The higher value of G' compared to G'' under the viscoelastic linear domain confirmed the weak gel structure, as well as values of the phase shift, lower than 45°. The increase of viscosity with the HB process is coherent with previous works (Gao et al., 2021; Sánchez et al., 2002; Valencia et al., 2004). Further analysis, on many years, would be necessary to conclude on a significant difference between H1311 and Terradou varieties. Previous experiment on the same field (Arbex de Castro Vilas Boas, 2018) concluded on a significantly higher viscosity for H1311 purees.

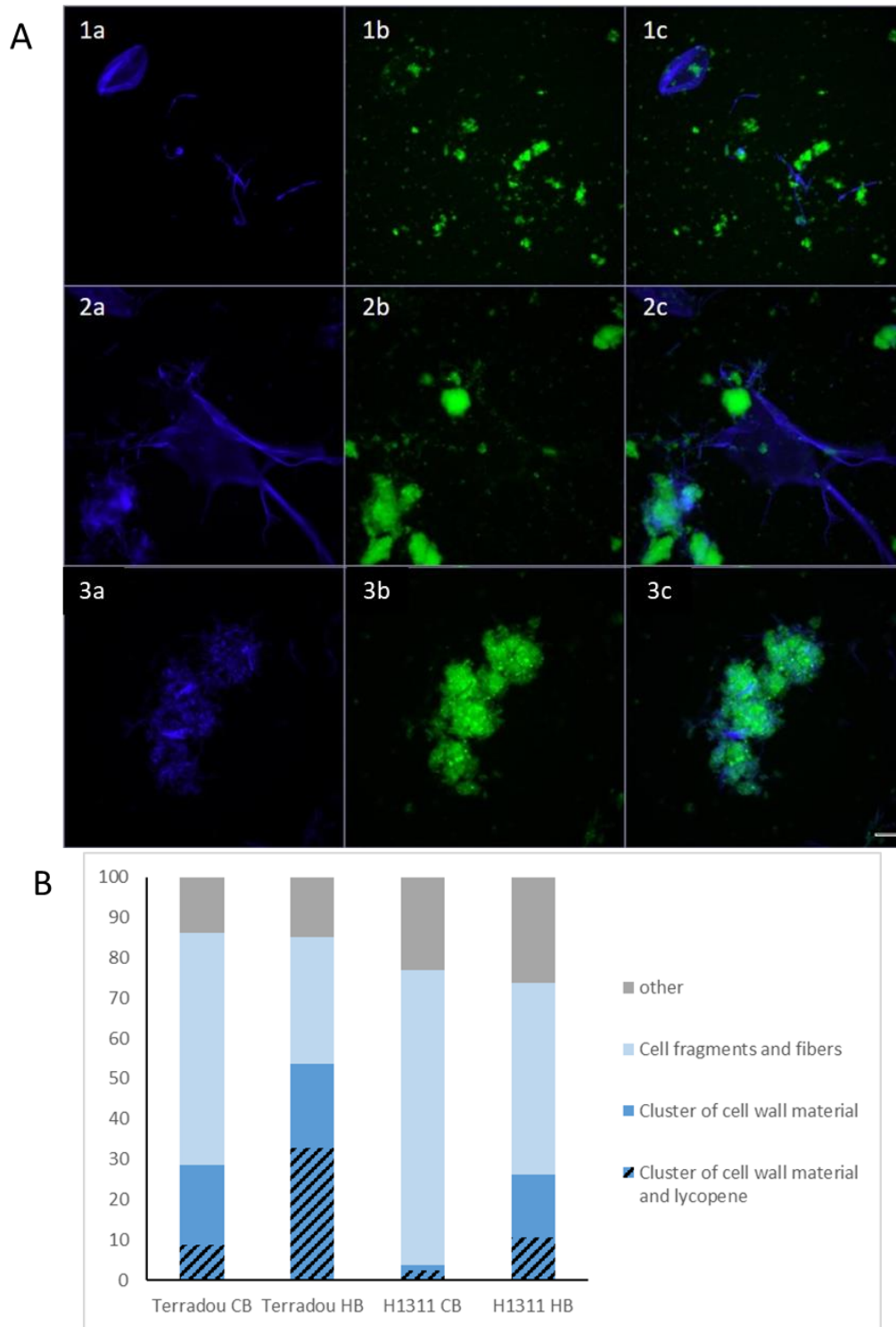


Figure 5: (A) Typology of particles observed in CB and HB purees after sieving and proportions of the different types of cell wall particles depending on variety and process (B). Fluorescence microscope images. First column is DAPI image with cell wall material in blue, marked with calcofluor, second column is FITC image, with autofluorescent lycopene in green, third column is merged image of DAPI and FITC, highlighting the collocation of cell wall material and lycopene. The three lines are three different images representatives of the range of particles observed in purees. Cluster of cell wall material and lycopene is visible on image 3c, cluster of cell wall material is visible on image 3a, cell fragments on image 2a and cell fibers on image 1a. Bar represent 50 μ m. On the diagram, the portion of cluster of cell wall material presenting a collocation with lycopene is represented by black lines.

Combinations rather than individual rheological parameters allow to discriminate agronomic and processing impact on puree viscosity

The PCA on rheological parameters highlighted that if both variety and process modified puree rheology, none of the parameters was specific to modification induced by variety or process. Similarly, in sensorial analysis, CB purees were differentiated from HB purees for each variety, but no clear axis on the average napping configuration separated process or varieties. As the process and some varieties were separated on the PCA (Figure 1) and were also separated on the average tablecloth (Figure 2), we can suggest that texture was one of the criteria perceived and evaluated by jury members to discriminate the purees.

Among the biochemical parameters studied, none of them individually explained the viscosity variation between samples. However, the discriminant analysis highlighted that a different combination of these parameters discriminated purees for their variety and for their process. Different underlying physical phenomena occur when changing the process or the variety. The major influence of AIS and large particle and pulp proportions on viscosity variations is coherent with the literature: AIS indeed represent cell wall material and are composed of cellulose, hemicellulose and pectins. Except for soluble pectins, the major part of AIS belongs to pulp fraction, correlated with puree viscosity. Puree viscosity increases with both the pulp fraction and the serum dry matter content, with a predominance for the pulp (Moelants et al., 2013). In CB purees, enzyme activity depolymerized pectin and released monosaccharides and small pectin fragments, decreasing the AIS content. The proportion of large particles, expressed as % of the DMC had the second highest score in the PLS, and the pulp fraction DMC had the third highest VIP score (1.328). Large particles are the major part of the pulp fraction in terms of DMC, and thus pulp fraction and puree viscosity increase when large particles fraction increases. The low VIP score of the serum viscosity and the SSC is coherent with the predominant importance of pulp fraction, previously highlighted replacing serum by water in purees with minor effect on puree viscosity (Moelants et al., 2014a).

Pectin content and conformation may explain the correction between pulp AIS and puree viscosity

The break process decreased AIS yields by decreasing pectin content, especially in CB with pectinolytic enzymes activity. This is confirmed by GalA diminution. The PME activity of fresh fruits was higher than 2000 nkatal/g for both H1311 and Terradou varieties, and the PG activity higher than 5 nkatal/g (data not shown). Regarding the high enzymatic activity compared to fruits like apple, we consider that during the CB process, the substrate (e.g. pectin) was limiting for the catalysis, and that all the pectin susceptible to enzymatic depolymerisation and demethylation were modified. These enzymes were thus responsible of the methanol and DM decrease during CB process. HB process, as well as CB process, induced similar changes of cell wall composition for both varieties. So the difference of texture between Terradou and H1311 purees was not due to cell wall composition. The lower DM of CB pectin compared to HB confirmed the PME activity and may favour PG activity and subsequent pectin depolymerisation,

decreasing their susceptibility to form gels and the puree viscosity. Large particles decrease may be explained by pectin degradation too, as pectin participated in the cohesion of cell walls, by bonds with divalent ions.

The nature of pectins differed according to the variety, and the process modified both the size, composition and conformation of soluble pectins. Soluble pectins from HB had a higher molar mass and intrinsic viscosity than CB ones, they were less degraded and they had a more elongated shape, and a semi-flexible structure in agreement with their higher DM. This gave them a higher capacity to interact and increase serum viscosity compared to CB pectins which were not methylated and exhibited a more dense and globular shape. Lin et al. (2005) reported similar results, with pectins from hot break puree serum having rod-like shapes (α from 0.69 to 1.46) and cold break pectins having spheric shapes ($\alpha=0.34$). We can suggest that the HB pectins, apart from interacting together increasing serum viscosity, also interacted with the pulp fraction and participated to the agglomeration of small particles observed by granulometry and microscopy. The size of some SP was higher than the sieve pores (80 μm). This was due to the softness of some cell wall fragments able to go through the pores, and mainly to the agglomeration of small cell wall material and lycopene, as observed on microscopy images (Figure 5). Microscope observations of small particles confirmed the presence of particles bigger than the sieve diameter of 80 μm . These particles are made of lycopene, cell wall material, or an imbrication of both in the case of HB purees, suggesting a higher stability of the overall element.

To conclude both the process and the variety modified puree rheology, and especially the apparent viscosity, with higher effect of the process. CB process induced lower AIS quantity, serum viscosity and large particle proportion, mainly due to enzymatic activity. Serum viscosity was modified by different pectin conformation more than pectin molecular weight. Under HB process, small particles composed of cell wall material and lycopene tend to agglomerate. Viscosity differences between the two contrasted varieties H1311 and Terradou were related to pulp volume, pulp DMC and serum DMC.

Chapitre 6 Liens entre les structures et compositions du fruit et de la purée sous l'effet de la contrainte hydrique

Nous avons dans de premiers travaux quantifié les effets de la réduction d'irrigation et d'azote sur la production et sur la qualité des purées de 8 variétés de tomate d'industrie, sur 5 années de culture. Nous avons montré qu'une large gamme de texture peut être obtenue, selon la variété et le procédé, mais aussi selon l'irrigation. Le déficit hydrique peut modifier la teneur en matière sèche des fruits et la viscosité des purées.

Ensuite, afin de déterminer les mécanismes contrôlant la variation de viscosité des purées, le comportement rhéologique des purées a été analysé plus en détail. Cette seconde partie a souligné qu'en plus de la teneur en matière sèche de la pulpe ou de la quantité de matière insoluble dans l'alcool, la taille des particules (pulpe) et ses propriétés influencent la viscosité des purées. En particulier, nous avons observé des interactions entre les petites particules de matériel pariétal et le lycopène, formant de plus larges éléments qui influencent probablement le comportement rhéologique des purées. Ainsi la sélection de variétés riches en caroténoïdes semble être une piste prometteuse pour améliorer à la fois la qualité nutritionnelle et la viscosité des purées.

Le dernier volet du projet vise à étudier le continuum fruit-purée et en particulier comment le déficit hydrique au cours de la période reproductive modifie la structure et la qualité du fruit et in fine la structure et la qualité des purées. Pour cela, une étude en serre a été menée, pour observer l'effet du déficit hydrique sur la structure du péricarpe des tomates au cours du développement. En fin de culture, les rendements en fruit ont été mesurés et les fruits ont été transformés en purée afin de relier la texture et la composition des purées à celles du péricarpe des fruits.

Ce chapitre est présenté sous la forme de résultats préliminaires.

I. Introduction

While million people lack access to food rich in nutrients, the horticultural crops such as tomato face numerous challenges in the context of climate changes. To improve crop sustainability and to meet the increasing demand for food rich in phytomicronutrients such as carotenoids we need to develop low-inputs cropping system allowing trade-offs between yield and quality. The development of such systems requires better knowledge on factors impacting quality along the food chain. In this context, industry-type tomato is an important crop to work on because it is one of the most important crops in the world and a major source of phytomicronutrients. In addition, industry-type tomatoes are grown under a large range of climatic conditions and practices that affect their ability to be processed, and the final quality of products (Vilas Boas et al., 2017).

To inform breeding programs or to develop new tools to manage quality in fields or during processing, we need to evaluate in further details which fruit traits can influence particle size and properties and how they would be affected by environmental factors. If the structure and the composition of tomato puree have been well documented (Moelants et al., 2014b; Porretta, 2019), few studies on processing tomatoes have analyzed relationships between fruit structure and composition and puree texture. A first work in 2017, has suggested that the size of pericarp cells and the carotenoid contents could be involved (Vilas Boas et al., 2017). As these fruit traits are influenced by environmental constraints such as water deficit (Ripoll et al., 2014), they could be involved in the variations of puree texture due to fluctuations in growing conditions. Thus, the objective of this chapter was to analyze in further details these relationships combining histology, metabolite and rheology analyses. In addition, because tomato structure and composition undergo great changes during the developmental and maturation process with specific response to environmental factors, fruits were analyzed at six developmental stages whereas purees were obtained from fruits collected at two different maturity stages.

II. Material and method

1. Plant material

Four varieties of processing tomatoes (H1311, Terradou, Lykobil, Sailor) were selected for their diversity. H1311 and Terradou have been previously studied (Chapters 4 and 5) and are contrasted in terms of puree viscosity and lycopene content (Arbex de Castro Vilas Boas, 2018). H1311 (H.J. Heinz Company, USA) and Lykobil (Unigen Seeds, Italy) are F1 high-lycopene varieties with lycopene contents 60% to 80% higher than in other cultivars. Terradou (Inrae, France) is a F1 cultivar with high soluble solids content (Damidaux et al., 2015b). Sailor is a high yielding F1 hybrid, with high fruit firmness (ISI Sementi, Italy).

2. Glasshouse experiment

Thirty-six 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°54'N 4°52'E), France. The experiment took place from May to September 2017. Two similar compartments of 72 plants were set. Day-night temperature controls were set at 25–15°C and the air humidity ranged between 19 and 95%. Solar radiation inside the glasshouse varied from 2.6 to 13.8 MJ m⁻² day⁻¹ (Supplementary material figure s 1). Flowers were pollinated by bumblebees (*bombus terrestris*). One hive (Natupol, Koppert France, Cavaillon, France) per compartment was installed at the beginning of anthesis. Plants were supplied daily with a nutrient solution (Liquoplant Rose, Plantin, Courthézon, France). This solution was diluted between 0.4‰ and 0.8‰ according to the plant developmental stage, which corresponded to an average electro-conductivity of 1.8 mS dS cm⁻¹. First, all plants were irrigated in order to match 100% replacement of evapotranspiration (well-watered plants, WW). At the beginning of the reproductive period (anthesis of the first flowers or trusses), half of the plants (18 plants per variety, water deficit plants, WD) were subjected to soil water deficit (soil water content (SWC) of 1.5 g of water g⁻¹ dry soil which corresponded to a soil water potential of - 0.4 MPa) whereas all the other pots were kept under controlled conditions (more than 2.5 g of water g⁻¹ dry soil or a soil water potential of -0.05 MPa). (Supplementary material figure s 2). The experiment was set on the 27th of May, the water deficit was set on the 30th of June and lasted 95 days. The calendar of experiments is presented in Figure 1.

3. Physiological and phenological measurements

During plant growth, the establishment of the water deficit was followed by the determination of soil water content and gas exchange on WW and WD plants. Leaf gas exchange was measured between 9 and 13 a.m. with a portable photosynthesis system (LI-6400, LI-COR, USA). The parameters were set as follows: air temperature at 25°C, CO₂ concentration at 400 ppm, and light intensity at 1500 μmol m⁻² s⁻¹. For all measurements, at least four plants per conditions and 4 leaves were used. The selected leaves were fully developed, oriented to the east and well exposed to the sun light. At the end of the culture, net photosynthesis rate (Pn) decreased by 13 % to 48 % depending on the variety and stomatal conductance (gs) by 52 % to 84 % for WD plants compared to the plants under control irrigation. An effective WD was thus applied to the plants, and it was also confirmed by the soil water content. The soil water content was higher under WW condition up to the beginning of July, with around 4 g of water g⁻¹ of soil while it dropped under 2 g of water g⁻¹ of soil under WD. For Lycobol variety, the intensity of WD was lower, and may be explained by a delayed development of the plant and a smaller canopy, leading to less water demand. As all varieties were irrigated similarly up to July, Lycobol has been subjected to a lower WD (Supplementary material figure S 3).

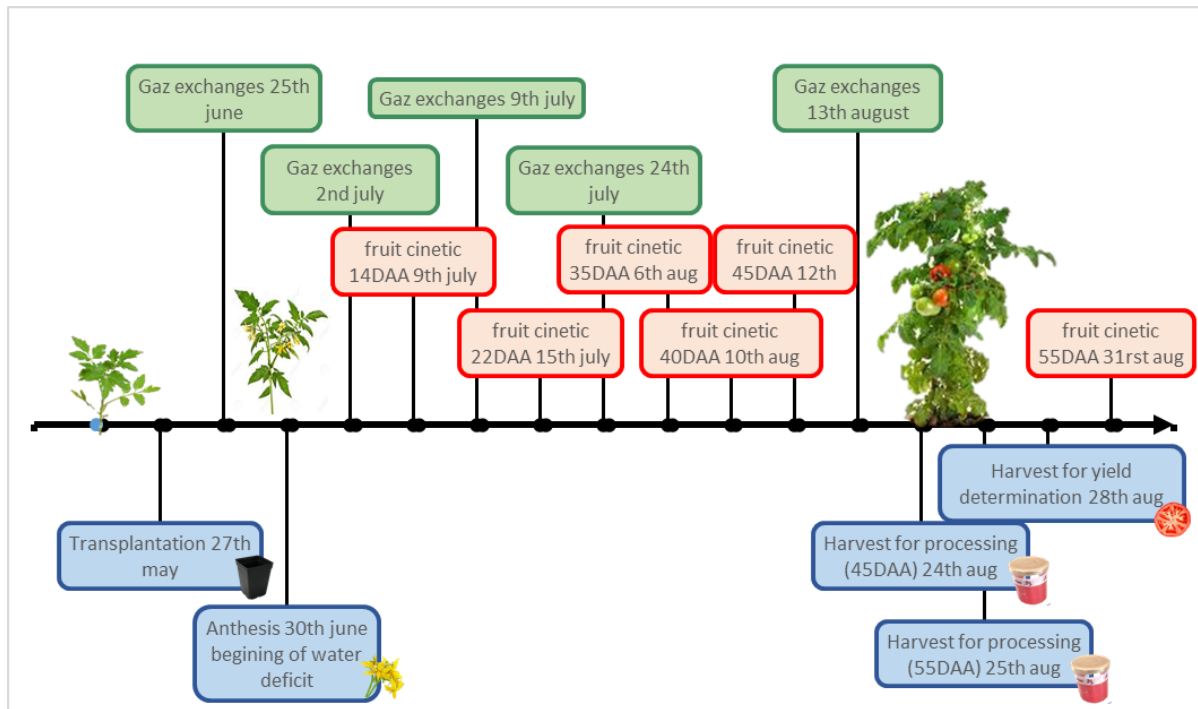


Figure1: The experimental design in the greenhouse. Elements in blue are relative to crop management, elements in red are related to the kinetic of fruit development (fruits analyzed at 14, 22, 35, 40 45 and 55 days after anthesis), elements in green are related to the following of gas exchanges. D is the age of the fruits, in days after the anthesis.

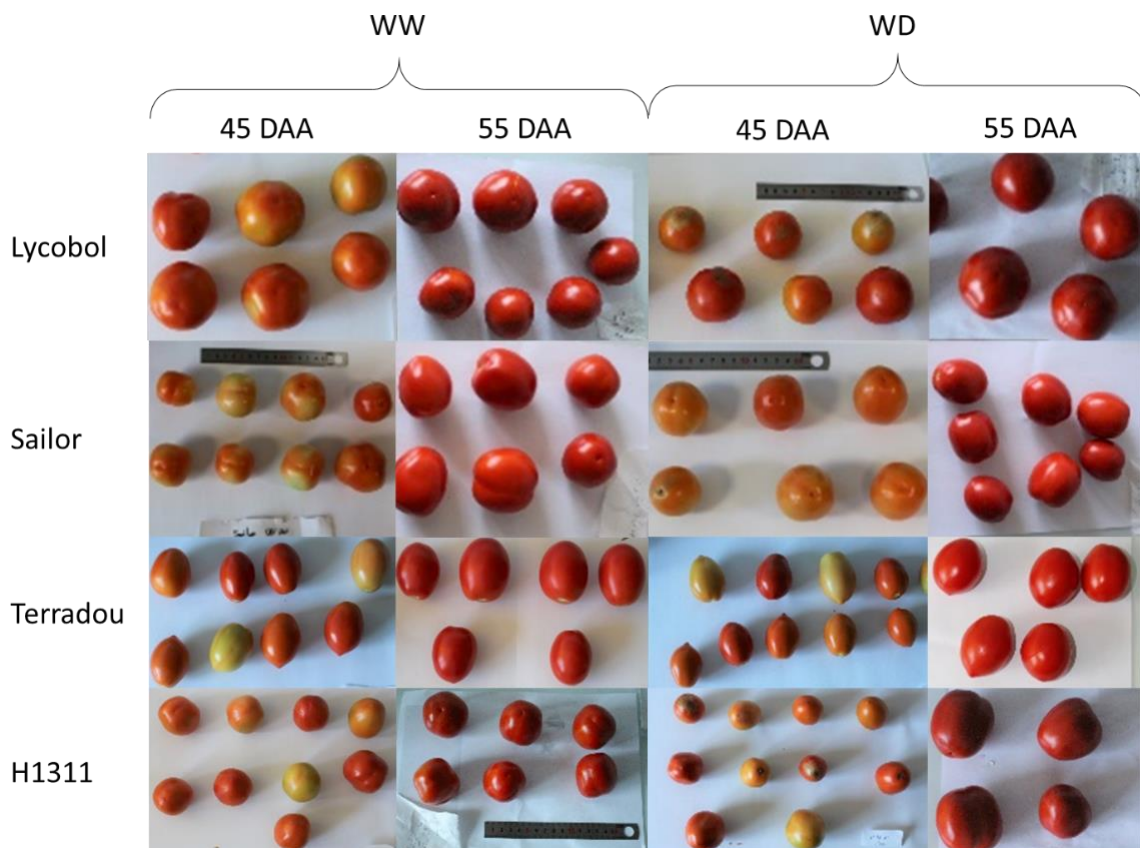


Figure2 : Photos of fruits harvested at 45 and 55 DAA from the 4 tomato varieties grown under two water regimes, well-watered (WW) and water deficit (WD). Credit : Miarka Sinkora

4. Mass, composition and cell structure of the pericarp during fruit development

Trusses were labelled at full bloom. Then, fruits were collected at 6 developmental stages: 14, 22, 35, 40, 45 and 55 days after anthesis (DAA). Three fruits per developmental stage, variety and water regime were harvested (fruits at position 2 or 3 within a truss) and weighed. Fruits from the first truss were not collected. Equatorial sections of fresh tomato pericarp were used for the determination of cell number after tissue dissociation according to the method described by (Bertin et al., 2002). For fruits at stages 45 and 55 DAA, around 1g of pericarp was deeped into 6 mL of pectinase solution (35g/L of pectin + 72.9g/ L of mannitol in EDTA solution) to destructure cell walls. Cell density was calculated counting cell numbers in a Fuchs-Rosenthal counting chamber with double ruling, 0.2mm depth and 3.2 μ L volume. The pectinase solution with cells was diluted twice with a 58% glycerin solution before counting, to obtain an appropriate concentration for counting. Six countings per sample were done and the number of pericarp cells was evaluated for each fruit. The whole fruit cell number was extrapolated from the pericarp cell density multiplied by fruit pericarp weight

The remaining fresh pericarp was used for confocal microscopy analysis. A section of 1cm width was plunged into an agar solution at 55°C (agar concentration varied from 5% for green fruit to 3% for red fruit) before cutting with a vibratome (Leica VT 1000S, Leica Biosystems, Germany) to obtain slices of 150 to 300 μ m of thickness, depending on fruit maturity. Slices were placed in PBS solution at 0.01 M at pH 7.4 until observation. Before microscope observation, slices were stained with fluorescent brightener (0.01%) (Sigma), and then rinsed in PBS. Pericarp slices were imaged by a confocal laser scanning microscope (CLSM Leica SP8, Leica, Germany) with an inverted microscope (DMI8, Leica, Germany). To observe cell wall material, the sample was excited with a 405nm laser (3 to 6%) and signal was collected by a PMT2 receptor between 436 and 485 nm. Then to record pigments (chlorophylls or carotenoids) autofluorescence, the sample was excited by a 488 nm laser (3 to 6%) and signal was collected by a PTM4 receptor between 654 and 710 nm or by a hybrid receptor between 498 and 579 nm for chlorophylls and carotenoids respectively. A reconstituted image of pericarp from outer to inner epidermis was obtained, on 100 to 200 nm thickness. Images were processed by Image J software.

Biochemical analyses were realized on the fruit pericarp at the 6 developmental stages, frozen into liquid nitrogen according to the method of (Gomez et al., 2002) for sugar and acid analyses or (Sérino et al., 2009) for carotenoid analysis. The pericarp structural dry mass, corresponding to cell wall material, was evaluated as the difference between the pericarp dry weight and the sugars and acids dry weight (Chapitre 6 Equation 1).

Chapitre 6 Equation 1 : Evaluation of the pericarp structural dry mass. Sugars and acids were expressed in g.

$$\begin{aligned} \text{Pericarp structural dry mass (g)} \\ = \text{Pericarp dry mass} - (\text{saccharose} + \text{glucose} + \text{fructose} + \text{starch} + \text{malic acid} \\ + \text{citric acid}) \end{aligned}$$

5. Harvest of fruit at two ripening stages and processing into puree

Three samples of 1.5 kg of fruits per modality were harvested at two stages: 45 and 55 DAA. Fruits at 45 DAA were visually orange, not fully ripe, while fruits at 55 DAA were red ripe (Figure 2). To evaluate the maturity of the fruits according to the color, 10 to 18 fruits per variety with a range of color from mature green to red ripe were harvested to measure the ethylene release and skin color. Each fruit was individually confined in a 270 mL hermetic jar equipped with a septum during 1 hour. A volume of 500 μ L of air was collected through the septum and injected in a GC-FID (7820A, Agilent technologies) equipped with Porapak Q column (length 2.74m OD 1/8 ID 2 mm) (Génard and Gouble, 2005). The carrier gas was N₂. Fruit skin color was assessed with a colorimeter (CR. 400, Konica Minolta, Japan) on 3 points at the bottom of the fruit. At the end of the experiment, to assess yields, the fresh and dry weight of commercial fruits (orange and red) and the fresh and dry weight of vegetative part of the plant were measured on 8 plants per variety. Fruits were processed into Cold Break (CB) and Hot Break (HB) puree following a laboratory scale protocol, as described by (Vilas Boas et al., 2017) and filled in 250 mL jars then pasteurized 20 minutes at 100°C in an autoclave. A sample of fresh fruit was frozen for further biochemical analysis.

Biochemical analyses were conducted on fresh tomato after grinding and on purees. The dry matter content was determined by weighting 3 g of fresh sample before and after 3 days drying at 70 °C. Then soluble solid content was measured with an ATAGO PR-32 α digital refractometer (ATAGO, Japan) with automatic compensation at 25 °C and results were expressed in degree Brix. pH was measured with a Mettler Toledo FE20/EL20 pH meter (Mettler Toledo, Switzerland). Titratable acidity was measured with an automatic 888 Titrand titrator (Metrohm, Switzerland), and results expressed in mEq/100 g with the Tiamo 2.4 software. The colour of tomato purees was determined with a colorimeter (CR. 400, Konica Minolta, Japan). Puree viscosity was assessed on a stress-controlled rheometer (Physica MCR301, Anton Paar, Austria) equipped with a Peltier cell (CPTD -200, Anton Paar). Samples were thermostated at 22.5°C. The apparent viscosity η_{50} was measured with a double helicoidal ribbon mobile (ST24-2HR-37/120, Anton Paar) combined with an outer cylinder (CC27/S, Anton Paar) at a shear rate of 50s⁻¹, to mimic the shearing applied by in-mouth puree consumption (Stokes, 2012). Before the measurement, a pre-shearing of the sample (20s⁻¹ during 60 s) followed by a 300 s rest was applied to ensure the dispersion of the product and the retrieve of rheological equilibrium.

6. Statistical analysis

Data analysis was conducted with Excel Stat or R software (R Core Team, 2022). Analysis of variance and Tuckey or Dunett post hoc tests were performed using the R stats package. Graphics were created using the Ggplot2 and Agricolae packages (De Mendiburu and Yaseen, 2020; Hadley Wickham, 2016) and PCA was carried out using the FactoShiny package (Vaissie et al., 2021). When the sampling design allowed, ANOVA were performed to compare the means. Otherwise, non-parametric Kruskal-Wallis tests were performed with the Fisher LSD post-hoc test and Bonferroni adjustment.

III. Results and discussion

1. Effect of water deficit on the yield components

The water deficit negatively impacted shoot production and especially fruit yields (Figure 3). Terradou cultivar exhibited the highest fresh commercial yield under WW condition with more than 4092 g plant⁻¹ and H1311 the lowest (2043 g plant⁻¹). These marketable yields dropped from 70 % to 86 % under water deficit. Blossom-end-root (BER) affected yields of WD plants, as visible on Figure 3, especially for Terradou variety. Fruits with BER were removed from the survey. Consequently, under WD, all varieties presented fresh commercial yields below 1000 g plant⁻¹. When expressed on a dry weight basis, yields decreased from 65 % to 82 % in WD treatment compared to the control. The fresh yield losses were poorly compensated by a concomitant dry matter content increase when compared to what happened in a previous work on Terradou and H1311 varieties grown in a similar glasshouse (Vilas Boas et al., 2017). These authors reported that the fresh yield decreased by only 34 to 44% under WD compared to WW condition, and fruit biomass under WD was around 2000 g plant⁻¹. The fruit dry biomass under WW condition was similar in Vilas Boas et al. (2017) and in our experiment in 2020. On the contrary under WD the dry biomass was around 150g plant⁻¹ in Vilas Boas et al. (2017) but lower than 100g⁻¹ in our experiment. Fruit dry matter content increase was higher and fruits were less susceptible to blossom-end rot (fruit physiological disorder linked to local Ca²⁺ deficiency) in Vilas Boas et al. (2017). These discrepancies might be explained by two elements: 1) a more intense water deficit in 2020 than in Vilas Boas et al. (2017), or 2) higher mean temperatures in 2020 than in 2017. These two factors, water stress impacting Ca nutrition and high temperature promoting the rate of fruit growth have been shown to increase the incidence of blossom-end rot (Ho and White, 2005; Saure, 2001). Indeed, in 2020 a heat stress occurred at the end of July, with temperatures higher than 30°C during a few days. However, that event alone may not explain the high rate of BER, which had been observed since the beginning of fruit set (early developmental stages are very susceptible to BER) was earlier in July. The irrigation applied in 2020 was similar as the one reported in 2017, with a reduction close to 50% compared to WW condition. But the plant response appeared different, with a stomatal conductance decrease by 52% to 84% (only 50% in 2017).

The percentage of plant dry biomass allocated to the fruits decreased significantly under WD for all cultivars excepted for Lycobol for which the reduction was not significant (Figure 4). Under WW conditions, fruits represented more than 40% of the dry aerial biomass, and only 15 % to 30% under WD. Except for Lycobol, the decrease of the proportion of biomass allocated to fruit was due to a decrease of the number of fruits per plant, while the mass of individual fruit remained constant. Lycobol exhibited an opposite behavior with a low number of fruits under WW conditions, no significant decrease in the number of fruits under WD, but a significant decrease in the individual fruit mass. Under WW treatment Lycobol exhibited similar yields but a lower number of fruits with a higher individual mass compared to other varieties (Figure 5). The fresh vegetative yields (leaves and stems) were higher

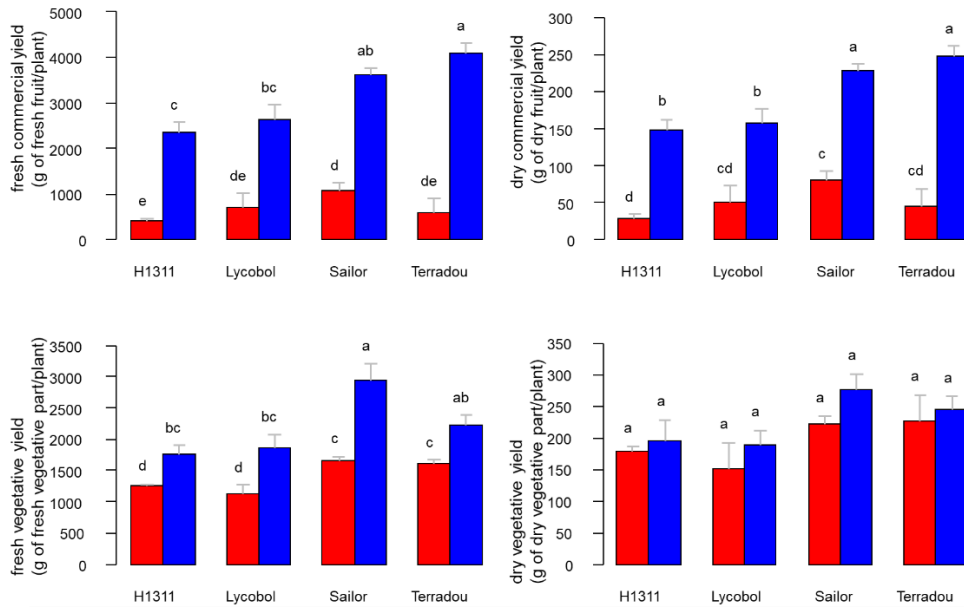


Figure 3: Fresh and dry commercial and vegetative yields of plants from 4 varieties cultivated under WW (blue) and WD (red) conditions. Bars are standard errors of means and letters are fisher LSD pairwise comparisons (Bonferroni adjustment) after ANOVA. Different letters indicate significant differences $P < 0.05$.

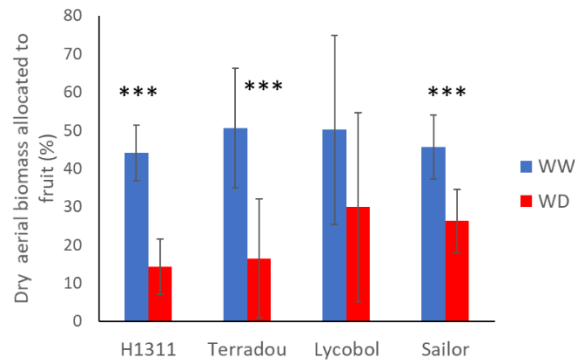


Figure 4: Percentages of dry aerial biomass allocated to fruits, under control (blue) and WD (red) conditions. Data are average values measured on four plants, bars are confidence intervals (95%) and stars correspond to the significance of Dunnett comparison after ANOVA. *** : $Pr > Diff < 0.001$

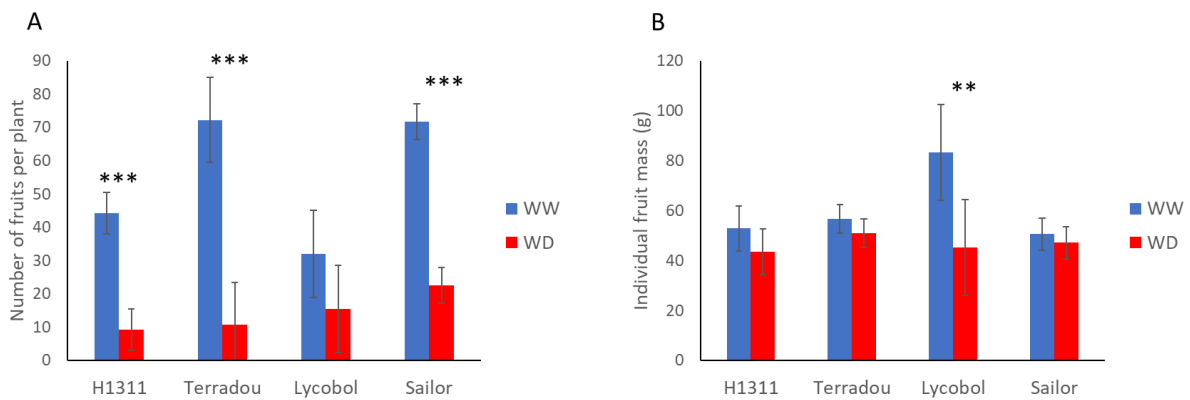


Figure 5: Number of fruits per plant (A) and individual fruit mass (B) under control (blue) and WD (red). Data are average values measured on four plants, bars are confidence intervals (95%) and stars correspond to the significance of Dunnett comparison after ANOVA. **: $Pr > Diff < 0.03$; *** : $Pr > Diff < 0.001$

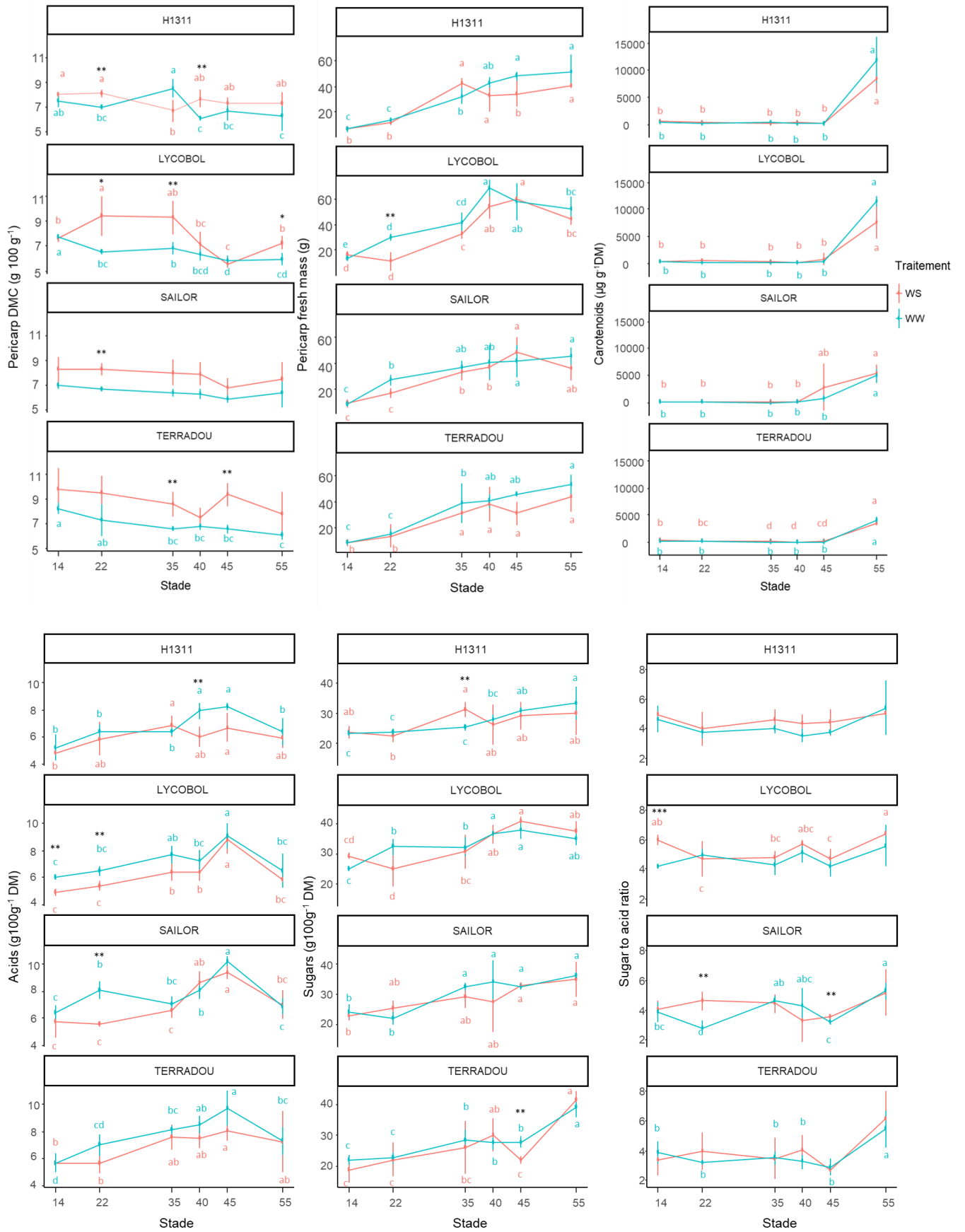
for Sailor and Terradou varieties, compared to H1311 and Lycobol (high lycopene varieties) and decreased by 30% to 43% under WD while the dry vegetative yield was similar for all the varieties.

2. Impact of water deficit on fruit composition and structure during the developmental and maturation process

In this part, only pericarp tissues were used for all analyses. The four varieties presented variations in pericarp fresh mass and composition during the growth and maturation periods with an increase of the pericarp fresh mass and a concomitant accumulation of soluble sugars and lycopene, a decrease in the pericarp dry matter content and a peak of organic acid contents before maturity (Figure 6). These variations and the process underlying these changes have been well documented (Klee and Giovannoni, 2011). As expected, and in agreement with previous works (Constantinescu et al., 2016; Ripoll et al., 2016a; Vilas Boas et al., 2017) WD had a little impact on the composition of the tomato dry matter (Figure 6) except for some carotenoids. The increase in lycopene (the main carotenoid in tomato pericarp) in response to WD was genotype-dependent and significant in one variety (Sailor) which is characterized by low total carotenoid contents.

To investigate in further details the impact of WD on fruit structure, the size of the pericarp cells was determined by image analysis of pericarp sections from outer to inner epidermis. The distributions of cell areas for H1311 and Terradou, at three developmental stages, and under the two water regimes are presented on Figure 7. These distributions showed an increase of median cell areas during the developmental process and stressed the differences between the two varieties, Terradou presenting higher median cell areas than H1311 under WW conditions. In addition, WD tends to reduce cell areas and this effect was observed at late developmental stages (45 and 55 DAA), especially on Terradou variety as indicated by the median (Figure 7). This tendency was confirmed by cell countings on pericarp fragments in pectinase. (Figure 8). Interestingly, regarding the pericarp structure, changes in the number and size of pericarp cells were registered in response to WD. For example, under WD, H1311 showed a reduction in both pericarp fresh mass and cell number whereas for Terradou, the reduction in fresh pericarp mass was not linked to a decrease in the number of cells (Figure 8). These results are in agreements with the findings of Ripoll et al. (2016), showing that the impact of WD on the number of cells was genotype-dependent and also depended on the moment of application of the WD (division or expansion stage). As expected, the number of cells was similar for fruits harvested at 45 and 55 DAA, while the pericarp mass continued to increase.

Chapitre 6-Liens entre les structures et compositions du fruit et de la purée sous l'effet de la contrainte hydrique



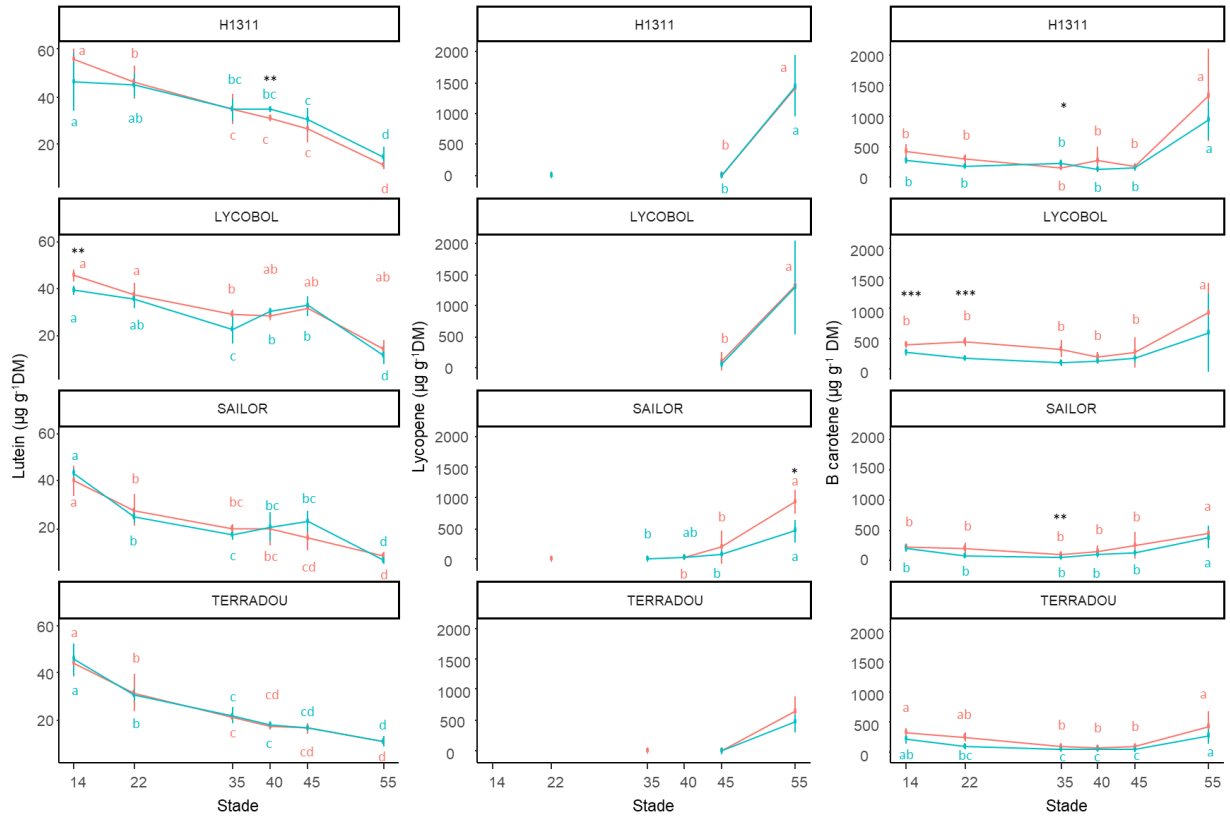


Figure 6: Variations in pericarp fresh mass, dry matter content, and composition at six developmental stages in days after anthesis under WW (blue) and WD (red) conditions. All metabolite contents are expressed on a dry weight basis. Sugars, carotenoids and acids have been calculated as the sum of the main soluble sugars(fructose, sucrose, saccharose), carotenoids (Lutein, Lycopene, β carotene, phytoene) and organic acids (malic and citric) respectively. Data are means of 3 values and bars are standard deviations. Different letters indicate significant differences after ANOVA and pairwise comparison of groups (Tukey post hoc test; significant differences correspond to $P < 0.05$). Stars indicate significant differences between WW and WD after ANOVA and comparison to data under WW condition (Dunnnett post-hoc test, *: $P < 0.05$, **: $P < 0.03$, ***: $P < 0.001$).

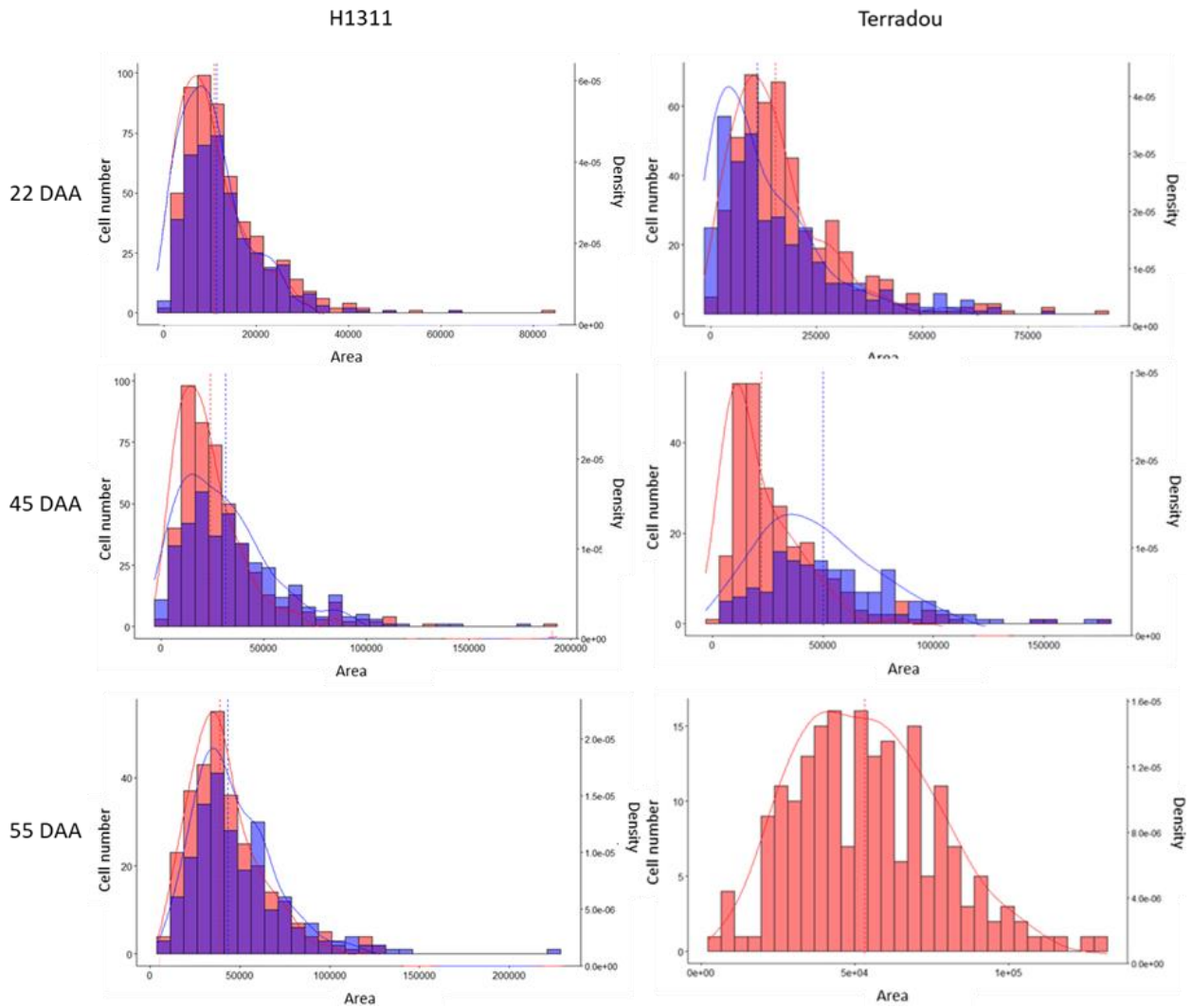


Figure 7: Distribution of pericarp cell area of Terradou and H1311 tomatoes at 22, 45 and 55 days after anthesis, under WW (blue) and WD (red) irrigation treatments. Bars represent the cell number of each area category, lines represent the density, and vertical dotted lines represent the median. Cell areas were measured on confocal microscopy images, for each graph, distributions were calculated with merged data of 3 images from 3 different fruits. Area is in μm^2 . Data were not available for Terradou WW at 55DAA.

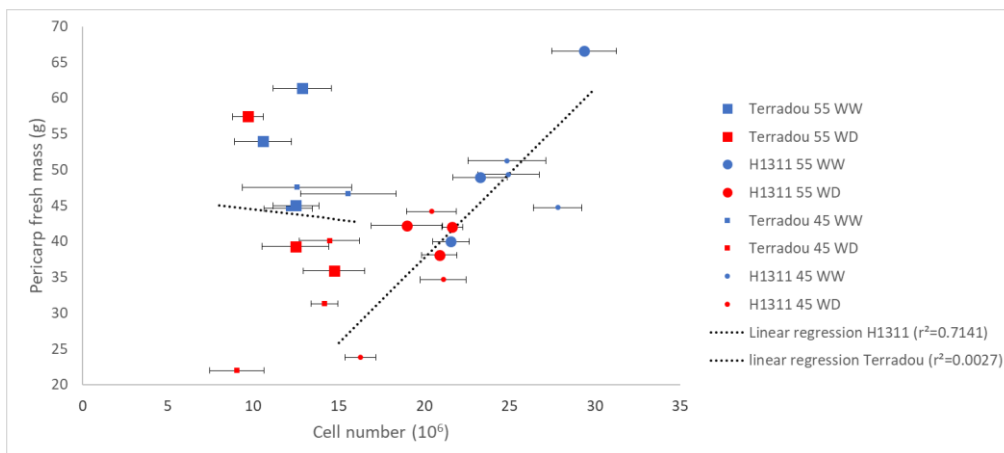


Figure 8: Pericarp fresh mass as a function of cell number. Pericarp cell number was obtained from countings on pericarp fragments deeped in pectinase.

3. Puree quality traits as a function of cultivar, ripening stage, irrigation treatment and process

In order to analyze relationships between fresh fruit quality and puree quality, 3 samples of at least 10 fruits per variety and water regime were collected at 45 and 55 DAA (Figure 2) before being processed according to CB or HB laboratory-scale methods. The fruit developmental stages were characterized by the determination of fruit ethylene release. Fruit ethylene release did not show a clear peak but a constant ethylene release from the breaker stage to the red ripe stage (Supplementary material Figure s 4). For all the varieties, the ethylene release was higher for fruits under WD than for WW fruits. Fruits harvested at 55 days after anthesis were red ripe, and according to the ethylene kinetics, ethylene release at that stage was decreasing, confirming that the fruits were ripe. An exception was observed for Terradou red fruits which presented high ethylene release. This may be due to the small number of stages analyzed for this variety (7). On the contrary, fruits harvested at 45 DAA were not fully ripe, and exhibited orange colors regardless the variety and irrigation treatment.

Combining pre-post-harvest factors, a large range of viscosity was obtained. These variations in puree viscosity are depicted in (Figure 9). As expected, the process and the variety had a great impact on this trait, while WD enhanced it. It should be noted that the highest viscosities were registered using fruits harvested at 45 DAA (Figures 9A and 9B), while in the previous work conducted in 2017, the viscosity increased with the maturity stage (Vilas Boas et al., 2017).

Interestingly, the apparent viscosity of CB and HB purees did not correlate ($r^2=0.0209$ and $r^2=0.001$) to the percentage of the structural dry weight of fresh fruit extrapolated from the Equation 1. This may be explained by the decrease of the structural dry weight usually induced by the process, the lack of precision of the equation and by the importance of the composition and structure of the cell wall material and not only its quantity, as underlined in the precedent chapter with the study of alcohol insoluble solids. The apparent viscosity of purees seemed to be lower for high cell volume, but further analysis is necessary to conclude whether the puree viscosity is really related to cell volume or if the relation observed was due to the maturity stage modifying the cell wall more than the modification of cell volume. Indeed, in our study, fruits exhibiting small cell volume were also not fully ripe (45 DAA), the two factors cell volume and ripening stage being correlated.

A Principal Component Analysis was performed to integrate data on fresh fruit and puree quality traits (Figure 10). Only data on fruits collected at 45 and 55 DAA were included in the data matrix. Supplementary data from pericarp structure and biochemical analysis (measured on different fruit samples) were added. As pericarp structure was conducted only on H1311 and Terradou varieties, the PCA focuses only on these 2 varieties. The first two components (PC1 and PC2) explained 71.8% of the total variance. The score plot (Figures 10 B, C, and D) shows the distribution of the samples and underlines that PC1 separates the two developmental stages whereas the second axis separated the irrigation regimes. The loadings plot shows relations between variables (Figure 10 A).

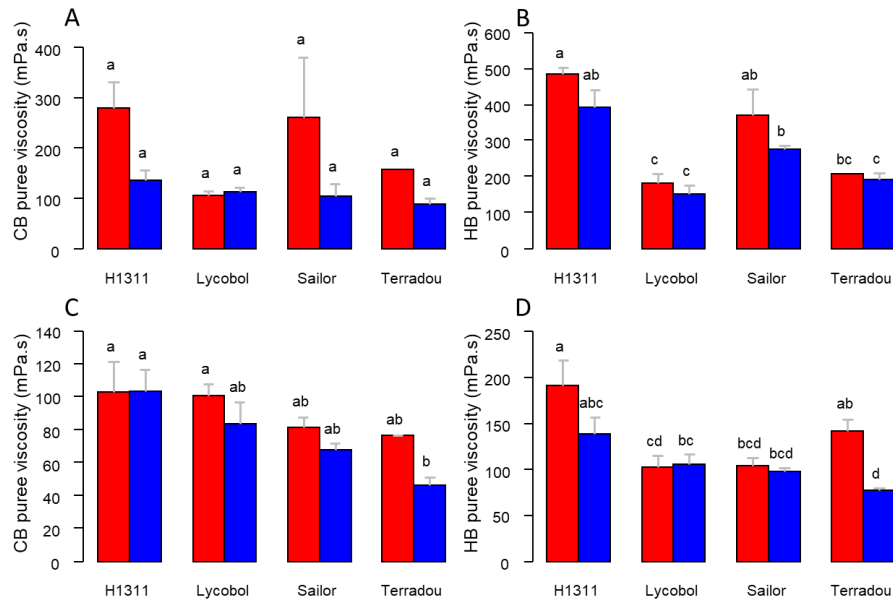


Figure 9: Effect of variety, process, and water regime on the apparent viscosity of purees from fruits harvested at 45 days after anthesis (A, B) and 55 days after anthesis (C, D).

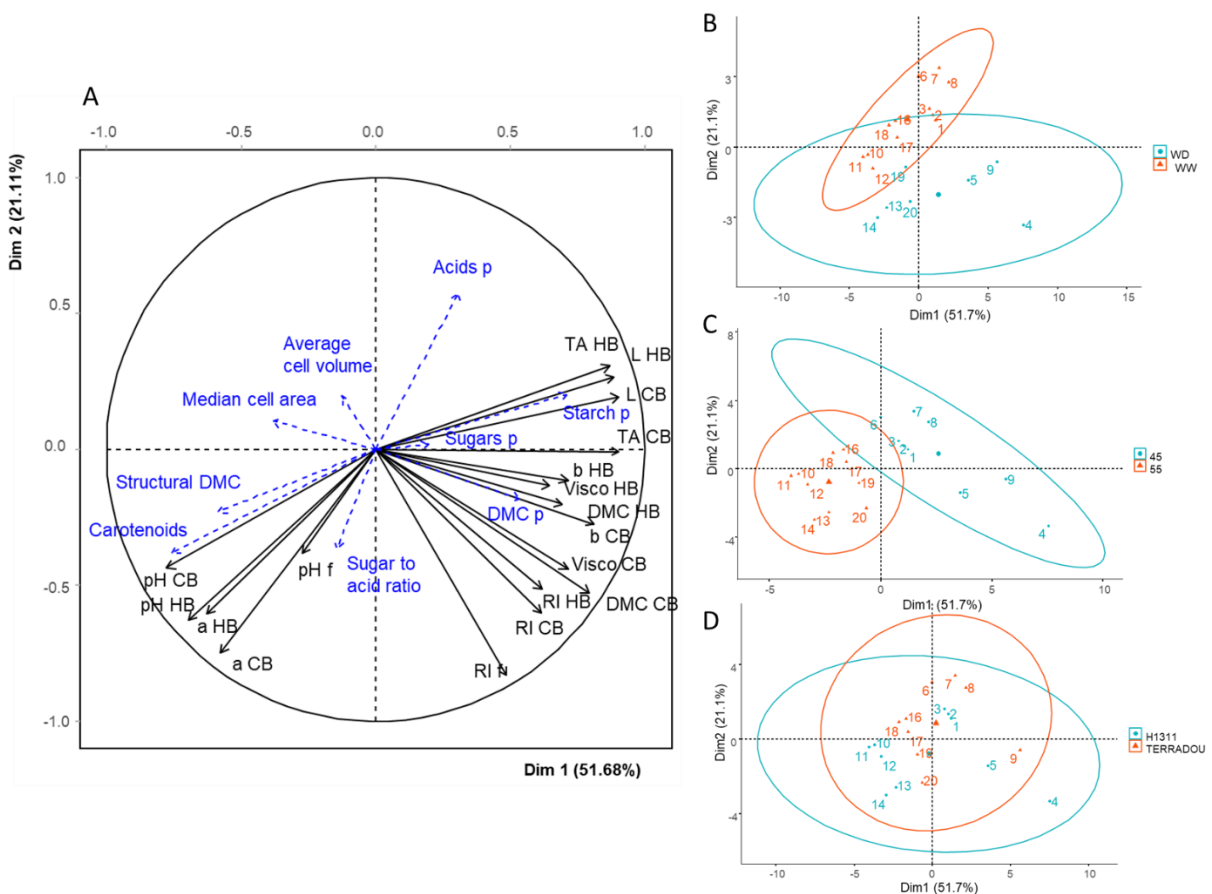


Figure 10: PCA conducted on fresh fruit and corresponding purees biochemical traits, from H1311 and Terradou varieties cultivated under WW and WD irrigation in greenhouse and harvested at two maturity stages. Blue variables are supplementary variables measured on fresh fruits (destructive structural variables)

Unripe fruits (45 DAA) and corresponding purees were associated to high puree titratable acidity, viscosity, dry matter content, b and L values, fruit dry matter content and to low puree and fruit pH. WD was associated with high puree and fruit °Brix, puree a value, fruit carotenoid contents and low median cell area.

Except for carotenoid content, the supplementary variables were poorly correlated to the puree viscosity. This result underlines that the structural variables studied on fresh pericarp were not the most relevant to predict puree viscosity. It would have been interested to analyze alcohol insoluble solids from fresh pericarp, to study a possible correlation with puree viscosity.

Chapitre 7 Discussion

Les travaux présentés ont porté sur la qualité de la purée de tomate, et les différents leviers d'action pouvant la modifier, dans le cadre d'un continuum depuis le champ jusqu'à la conserve et dans un contexte de changement climatique. La qualité de la purée se décline sous plusieurs aspects, et nous nous sommes particulièrement intéressés à la texture et à sa variabilité ainsi qu'aux principales composantes biochimiques impliquées dans le goût (sucres, acides) et la couleur (lycopène), mais également des traits plus complexes comme la composition des sucres structuraux, ou la composition particulière. L'originalité de ces travaux réside dans l'approche multifactorielle qui a permis d'intégrer à la fois les effets d'un déficit en eau et en azote au champ, les effets du procédé de transformation post récolte, et ce sur plusieurs variétés et plusieurs années. Nous avons combiné des expérimentations en conditions de production (champ + CTCPA) et en conditions de laboratoire (serre + hall pilote) qui nous ont permis d'explorer une large gamme de viscosité apparente : pour les purées non concentrées de 63 mPa s à 762 mPa s pour des valeurs d'indice réfractométrique allant de 4.2 à 8.2 °Brix. Pour les purées concentrées en halle de technologie, la gamme de viscosité allait de 617 à 3489 mPa s pour des indices réfractométriques variant de 14.4 à 17.5 °Brix. Les facteurs variété, conditions agro-environnementales au champ et procédé de transformation (break, concentration) ont bien permis d'exprimer un potentiel de viscosité du produit très variable et ainsi d'étudier les mécanismes sous-jacents. Les propriétés d'écoulement des produits obtenus sont typiques d'une purée de tomate, avec un indice n fluctuant autour de 0.25, proche de résultats observés par Diantom et al. (2017), et des valeurs du coefficient de consistance (K) variant de 20 à 85 Pa sⁿ, gamme de valeurs similaire à celle observée précédemment sur jus (Sharma et al., 1996) et purées de tomate (Rao et al., 1981).

La qualité texturale de la purée : Un trait complexe dont la forte variabilité ne s'explique pas uniquement par des variations d'indice réfractométrique ou de teneur en matière sèche.

L'ensemble des facteurs étudiés (variété, eau, azote, procédé) a entraîné des variations de viscosité du produit fini dans des gammes de variations plus ou moins importantes et a impliqué des mécanismes relativement spécifiques. Ce premier résultat souligne la complexité de la viscosité des purées et questionne le critère retenu par l'industrie pour évaluer la qualité des fruits et prédire la viscosité de la purée, à savoir de l'indice réfractométrique.

Dans un premier temps, concernant l'apport des ressources, nous avons pu observer qu'une diminution modérée de l'irrigation augmente la teneur en matière sèche et modifie la viscosité des purées (-23 % à + 20% en CB et -46% à +50% en HB selon les variétés) sans altérer sa qualité biochimique ou sa réactivité lors de la transformation, en cohérence avec les précédents travaux menés (Vilas Boas et al., 2018). Les traits biochimiques tels que le pH, l'acidité titrable, les sucres ou encore la teneur en lycopène

sont avant tout dépendants de la variété (Chapitre 4). Le déficit hydrique modifie principalement la teneur en eau du fruit, tandis que les teneurs en sucres, acides et caroténoïdes, exprimées par g de masse sèche, sont peu modifiées (Chapitre 6). Comparée au déficit hydrique, la diminution de l'engrais azoté semble avoir un effet moindre tant sur les traits biochimiques (chapitre 4) que sur la texture et l'analyse sensorielle du produit en général (chapitre 5). Une interaction entre les déficits en eau et en azote a été cependant observée (Chapitre 4) et souligne l'importance de réfléchir simultanément irrigation et fertilisation, comme observé précédemment par Badr et al. (2016). Concernant la variété la variation de viscosité est plus importante : les variétés H1311 et Terradou sont les plus contrastées, avec une viscosité 50% à 300% plus élevée pour H1311. Les variétés Le procédé a lui aussi un effet majeur et induit des variations de viscosité avec des purées HB 30 à 97% plus visqueuses que les purées CB. Ces résultats montrent donc qu'il est possible d'augmenter la viscosité des purées de tomate par l'application d'un déficit hydrique maîtrisé permettant de réduire l'empreinte en eau de la production de tomate, bien que la variété et le procédé de transformation ont le plus d'effets sur la viscosité. Les variétés dont les rendements ne sont pas trop affectés par le déficit hydrique, et dont la viscosité est importante, telles que H1311 ou Sailor, seraient à privilégier.

Dans un second temps, ces travaux soulèvent la question de la pertinence de l'indice réfractométrique comme indicateur de la texture du fruit. Le Brix est en effet employé dans l'industrie. Cependant selon les variétés, la viscosité des purées est partiellement corrélée à l'indice réfractométrique du fruit comme celui de la purée, ainsi que le démontrent nos données (Chapitre 7-Figure 1). Il est donc nécessaire de développer d'autres indicateurs rapides et fiables, utilisables en industrie et en sélection variétale. La fraction volumique de pulpe du fruit, mesurable après broyage et centrifugation, pourrait être un indicateur plus fiable et facile à mettre en place par les industriels, bien que nos résultats (Chapitre 5) ne valident pas totalement cet indicateur. Des modèles relient en effet la fraction de pulpe de la purée au seuil d'écoulement et au module de stockage des purées (Moelants et al., 2014a). Des travaux pourraient être menés sur la fraction volumique de pulpe sur fruit frais broyé, afin de vérifier si cette dernière est corrélée à la fraction volumique de pulpe après transformation en purée et si elle est corrélée à la viscosité de la purée. La teneur en matière sèche de la pulpe serait une mesure plus longue à mettre en œuvre mais plus précise, mais les résultats du chapitre 4 montrent qu'il faudra sans doute aller vers des mesures qui rendent compte de phénomènes plus précis comme les modifications d'état structuraux des pectines, ou des capacités d'agglomération de particules. L'agglomération des particules, que nous avons montré comme étant une hypothèse forte pour moduler la texture, reste encore inexplorée et notamment pour son évaluation rapide. La spectroscopie proche infrarouge est un outil non destructif pour évaluer la qualité des purées. De récents modèles ont été développés pour évaluer la qualité biochimique des purées de tomates (Aykas et al., 2020; Ayvaz et al., 2016; Bureau et al., 2020) et sont de plus capables de classer des purées et des fruits frais selon leur procédé de transformation ou leur variété (Bureau et al., 2020). Ces résultats apparaissent prometteurs, d'autant que nous avons observé

une corrélation entre la matière sèche structurale du fruit et la viscosité des purées. Des études pourraient être menées pour prédire la viscosité des purées par l'analyse non destructive de la teneur matière sèche, et en particulier de la matière sèche structurale présente dans le fruit, en quantité ou en qualité, qui est reliée à la quantité de pulpe et à la viscosité du produit.

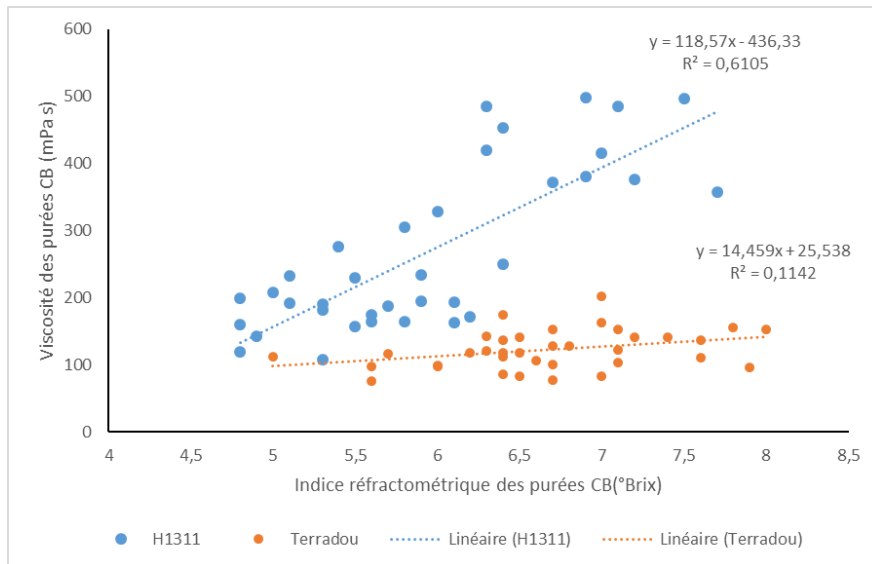
La prise en compte future de la rhéologie dans les plans d'amélioration implique de clarifier les nouveaux mécanismes qui sont révélés par l'étude des purées

Au-delà des applications possibles à l'échelle industrielle, les travaux menés sur les déterminants biochimiques et structuraux de la viscosité des purées ouvrent des pistes de recherche sur les mécanismes modulant la viscosité des purées. En effet nous avons mis en évidence des mécanismes différents (Chapitre 5), induits par la variété ou par le procédé : les différences de viscosité entre variétés sont dues à des différences de fraction de pulpe et de masse sèche de sérum, tandis que les différences de viscosité entre procédés sont dues à des différences de teneur en matière insoluble dans l'alcool (paroi) et à des différences de viscosité du sérum. Il serait pertinent de conduire une étude similaire, en ajoutant des facteurs agro-environnementaux (déficit hydrique, stress thermique et maturité du fruit) afin d'appréhender comment les changements climatiques à venir peuvent interagir avec la variété et le procédé et modifier la viscosité des purées.

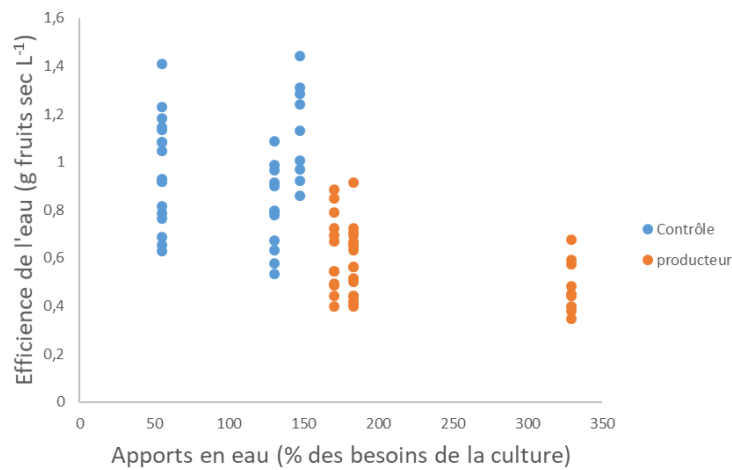
Cela permettrait d'identifier les mécanismes rhéologiques impliqués dans l'augmentation de viscosité observée en cas de déficit hydrique (Chapitre 4) qui n'est pas uniquement due à l'augmentation de la teneur en matière sèche. En intégrant à l'étude différents stades de maturité du fruit, nous pourrions établir à quel stade du développement du fruit les facteurs agro-environnementaux interviennent dans les mécanismes modulant la viscosité.

Afin de compléter la compréhension de l'ordre d'importance des différents traits liés à la viscosité des purées, nous pourrions imaginer une séparation de la pulpe et du sérum de différentes purées (variété x procédé) puis l'ajout des différents sérum dans chacune des pulpes et l'étude de la viscosité des purées obtenues, comme cela a été réalisé sur pomme (Leverrier et al., 2016).

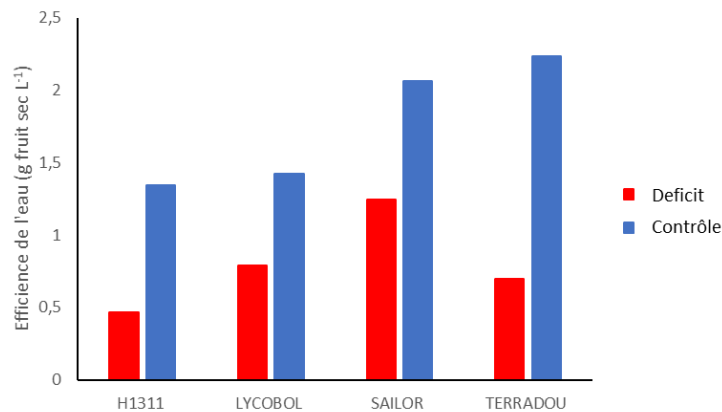
Des phénomènes d'agglomération de particules de lycopène et de paroi ont été mis en évidence (Chapitre 5), en particulier dans les purées hot break. Ce phénomène, observé sur des particules au repos, pourrait participer à la texture des purées et en particulier limiter le phénomène de déphasage, qui est moins présent dans les purées hot break que cold break. Peu de travaux semblent porter sur les interactions entre pectines et lycopène, hormis la mise en évidence d'un lien entre pectines solubles et lycopène dans le sérum (Jazaeri et al., 2018). Une étude calorimétrique pour déterminer la nature de ces interactions serait intéressante. Pour ce qui concerne l'observation dynamique de l'assemblage des particules, il existe des techniques exploratoires. En tomate, ce procédé a par exemple été utilisé pour caractériser la structure de purées homogénéisées sous haute pression puis soumises à un cisaillement (Bayod and Tornberg, 2011).



Chapitre 7-Figure 1: Viscosité des purées de tomate CB en fonction de leur indice réfractométrique, sur les variétés H1311 et Terradou entre 2019 et 2021. Une MANOVA et un test de Wilks confirment une interaction de la variété sur les variables dépendantes « viscosité et « Brix » (p value<0.0001).



Chapitre 7-Figure 2: Efficacité de l'eau en fonction des apports en eau (irrigation+pluie) exprimés en pourcentage de l'évapotranspiration de la culture. Les données proviennent de l'ensemble des variétés cultivées entre 2019 et 2021, selon les conditions de notre essai et les conditions du producteur.



Chapitre 7-Figure 3: Effet du déficit hydrique sur l'efficacité de l'eau lors de la culture menée en serre en 2020 sur 4 variétés

En conséquence la sélection variétale des tomates d'industrie doit s'intéresser à des variables rhéologiques spécifiques. Faire le lien entre ces variables et la structure et composition des fruits frais est un donc enjeu majeur. Nous avons commencé à explorer ces liens en analysant la structure cellulaire et la composition du péricarpe. Le volume cellulaire moyen semble être corrélé négativement à la viscosité mais des études plus approfondies sont nécessaires pour faire le lien avec les paramètres rhéologiques et biochimiques qui expliquent les variations de viscosité.

Réduire les intrants : des compromis à trouver entre rendement et qualité :

La réduction de l'irrigation, lorsqu'elle est maîtrisée, permet de conserver un rendement en biomasse sèche de fruit ou de limiter sa diminution, de conserver les propriétés biochimiques et nutritionnelles du fruit et des purées, voire de les améliorer, tout en augmentant la viscosité des purées (Chapitres 4 et 6). Il est primordial de considérer les rendements au regard des intrants apportés à la culture, et en particulier de l'eau étant donnée l'empreinte de la production de tomate irriguée dans un climat méditerranéen. Pour cela, l'efficacité de l'eau est un indicateur pertinent. Nos travaux mettent en avant une gamme d'irrigation pour laquelle l'efficacité de l'eau est optimale, autour de 120% de restauration de l'eau évapotranspirée (Chapitre 4). Cette valeur élevée peut s'expliquer par une sous-estimation des besoins en eau, en particulier lors d'épisodes de canicule qui ont pu modifier l'évaporation de l'eau au niveau du sol, nécessitant une réévaluation des coefficients culturels et une meilleure prise en compte du compartiment sol-racines (drainage, ruissellement, rétention, profondeur racinaire...). Dans le cadre du projet Tom'Ability, une partie des parcelles étudiées en plein champ a été conduite selon les pratiques d'un agriculteur référent, avec une irrigation bien supérieure à l'évapotranspiration de la plante. Les rendements secs n'étaient cependant pas supérieurs à ceux observés dans notre étude, et l'efficacité de l'eau était moindre. Ces résultats montrent qu'il est possible de diminuer l'irrigation telle qu'elle est mise en place par l'agriculteur et d'augmenter l'efficacité de l'eau pour les cultures de tomates d'industrie (Chapitre 7-Figure 2).

Toutefois, une réduction de l'irrigation de 50% par rapport aux besoins de la plante après anthèse semble conduire à un stress trop important, et une forte diminution du nombre de fruits (Chapitre 4). Ce résultat est confirmé par les données d'efficacité de l'eau obtenues lors de l'essai en serre où la température est pourtant régulée : une irrigation à 57% des besoins de la plante diminue l'efficacité de l'eau de 40% à 69% selon la variété (Chapitre 7-Figure 3).

S'il est possible d'améliorer la qualité texturale des purées de tomate en appliquant un déficit hydrique, celui-ci doit être modéré, et compris entre 70% et 120% de l'évaporation de la plante. A titre d'exemple en 2020, passer de l'irrigation appliquée par le producteur référent de notre étude (171% de l'évaporation) à 120% a permis une économie d'eau de 27% sur l'ensemble du cycle de culture, soit quasiment 800 m³ par hectare pour une diminution de 26% du rendement frais mais de seulement 18% du rendement sec. Extrapolé à l'échelle nationale, cela reviendrait à une économie d'eau de l'ordre de

1.7 Mm³ durant l'été, période de pression sur la ressource en eau. Ces valeurs sont cependant propres au climat de la zone de culture et aux variétés cultivées, ainsi qu'au stade de développement de la culture au moment de l'application du déficit hydrique. Des travaux montrent aussi qu'en période de canicule, l'augmentation de l'irrigation peut aider à lutter contre le stress thermique (Birthal et al., 2021; Rosa, 2022). Le changement climatique, avec la montée des températures, risque de modifier l'effet du déficit hydrique sur la qualité des fruits et purées. En effet, (Lovelli et al., 2016) ainsi que nos travaux montrent une diminution de l'efficacité de l'eau en cas de déficit hydrique appliqué lors d'épisodes de canicule. De plus amples études pourraient être menées en serre sur l'effet du déficit hydrique à différentes températures (25, 30 et 35°C) et à différents stades de développement de la plante. Le moment d'application du déficit hydrique et son intensité modulent les effets sur la qualité des fruits et les rendements. Des essais pourraient être menés en serre en appliquant un déficit lors de différents stades de croissance de la plante, et par exemple explorer l'effet d'un déficit hydrique court et précoce sur la tolérance de la plante.

Enfin, au-delà de la qualité texturale et des rendements, l'effet du déficit hydrique sur la qualité nutritionnelle pourrait être étudié. La qualité nutritionnelle des tomates est largement liée à leur teneur en caroténoïdes, qui dépend avant tout de la variété, mais aussi à la biodisponibilité de ces caroténoïdes. Dans le cas de citrus, un faible taux de méthylation des pectines augmente la bioaccessibilité des caroténoïdes (di Corcia et al., 2022) et nous pourrions étudier l'interaction du déficit hydrique et du procédé de transformation sur la bioaccessibilité des caroténoïdes dans le cas de la purée de tomates.

Chapitre 8 Conclusion

Les résultats ont permis de répondre partiellement aux objectifs de la thèse. Nous avons en effet évalué les effets des interactions agro-environnementales et du procédé de transformation sur la qualité des purées, en tenant compte des modifications de rendement induites par ces effets environnementaux. En particulier, une diminution maîtrisée de l'irrigation est envisageable, avec des bénéfices environnementaux et sur la qualité des purées de tomate. Nous avons décrit les principaux déterminants rhéologiques impliqués dans la viscosité des purées de tomate, et avons montré qu'ils sont de nature différente si la viscosité est modifiée par la variété ou par le procédé. Mais surtout, nous avons mis en évidence la complexité de la viscosité du produit fini en fonction des multiples facteurs qui interagissent tout le long de la filière. Les résultats ouvrent des perspectives plutôt rassurantes quant à la possibilité de maîtriser la viscosité et d'accroître l'efficacité de l'eau au travers de la sélection variétale et d'une gestion fine de l'irrigation en fonction des stades de développement de la culture. Les producteurs et les industriels doivent donc travailler conjointement sur un ensemble de critères de qualité du fruit frais pour prédire la qualité texturale des purées, et ces travaux ouvrent des pistes d'étude en soulignant l'importance des pectines et de l'agglomération des particules sur la viscosité des purées de tomate.

Références bibliographiques

- Abbasi-Parizad, P., De Nisi, P., Adani, F., Pepé Sciarria, T., Squillace, P., Scarafoni, A., Iametti, S., Scaglia, B., 2020. Antioxidant and anti-inflammatory activities of the crude extracts of raw and fermented tomato pomace and their correlations with aglycate-polyphenols. *Antioxidants* 9, 179. <https://doi.org/10.3390/antiox9020179>
- Abson, R., Wolf, B., Hill, S., Foster, T., 2012. Contributions of the particulates and soluble materials to the viscosity behaviour of tomato puree. pp. 351–357. <https://doi.org/10.1039/9781849734554-00351>
- Alba, R., Payton, P., Fei, Z., McQuinn, R., Debbie, P., Martin, G.B., Tanksley, S.D., Giovannoni, J.J., 2005. Transcriptome and selected metabolite analyses reveal multiple points of ethylene control during tomato fruit development. *Plant Cell* 17, 2954–2965. <https://doi.org/10.1105/tpc.105.036053>
- Albersheim, P. (Ed.), 2011. *Plant cell walls: from chemistry to biology*. Garland Science, New York, NY.
- Alsamir, M., Mahmood, T., Trethowan, R., Ahmad, N., 2021. An overview of heat stress in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Saudi J. Biol. Sci.* 28, 1654–1663. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.11.088>
- Andrea, O., Catia, B., Paolo, B., Marcello, G., Francesco, T., 2009. Is CropSyst adequate for management-oriented simulation of growth and yield of processing tomato ? *J. Appl. Hortic.* 11, 17–22. <https://doi.org/10.37855/jah.2009.v11i01.03>
- ANSES, 2022. Ciqual Table de composition nutritionnelle des aliments [WWW Document]. URL <https://ciqual.anses.fr/> (accessed 6.16.22).
- Anthon, G.E., Barrett, D.M., 2012. Pectin methylesterase activity and other factors affecting pH and titratable acidity in processing tomatoes. *Food Chem.* 132, 915–920. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.11.066>
- Anthon, G.E., LeStrange, M., 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. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4312>
- Arbex de Castro Vilas Boas, A., 2018. 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. Avignon Université, Avignon.
- Atkinson, N.J., Dew, T.P., Orfila, C., Urwin, P.E., 2011. Influence of combined biotic and abiotic stress on nutritional quality parameters in tomato (*Solanum lycopersicum*). *J. Agric. Food Chem.* 59, 9673–9682. <https://doi.org/10.1021/jf202081t>
- Augusto, P., Falguera, V., Cristianini, M., Ibarz, A., 2012. Rheological behavior of tomato juice: steady-state shear and time-dependent modeling. *Food Bioprocess Technol.* 5, 1715–23. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0472-8>
- Aykas, D., Borba, K., Rodriguez-Saona, L., 2020. Non-Destructive Quality Assessment of Tomato Paste by Using Portable Mid-Infrared Spectroscopy and Multivariate Analysis. *Foods Basel Switz.* 9. <https://doi.org/10.3390/foods9091300>
- Ayvaz, H., Sierra-Cadavid, A., Aykas, D.P., Mulqueeney, B., Sullivan, S., Rodriguez-Saona, L.E., 2016. Monitoring multicomponent quality traits in tomato juice using portable mid-infrared (MIR) spectroscopy and multivariate analysis. *Food Control* 66, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.031>
- Badr, M.A., Abou-Hussein, S.D., El-Tohamy, W.A., 2016. Tomato yield, nitrogen uptake and water use efficiency as affected by planting geometry and level of nitrogen in an arid region. *Agric. Water Manag.* 169, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.012>
- Barbagallo, R.N., Chisari, M., Branca, F., Spagna, G., 2008. Pectin methylesterase, polyphenol oxidase and physicochemical properties of typical long-storage cherry tomatoes cultivated under water stress regime. *J. Sci. Food Agric.* 88, 389–396. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3098>

- Barbagallo, R.N., Patanè, C., Rosa, S., 2014. Enzymatic profile in processing tomato as affected by water stress in semi-arid environment. *Acta Hort.* 1038, 367–373. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1038.43>
- Barrett, D.M., Garcia, E., Wayne, J.E., 1998. Textural modification of processing tomatoes. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 38, 173–258. <https://doi.org/10.1080/10408699891274192>
- Barringer, S.A., 2004. Vegetables: Tomato processing, in: *Food Processing*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 473–490. <https://doi.org/10.1002/9780470290118.ch29>
- Barrios-Masias, F.H., Jackson, L.E., 2014. California processing tomatoes: Morphological, physiological and phenological traits associated with crop improvement during the last 80 years. *Eur. J. Agron.* 53, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.007>
- Bayod, E., Månsson, P., Innings, F., Bergenståhl, B., Tornberg, E., 2007. Low shear rheology of concentrated tomato products. Effect of particle size and time. *Food Biophys.* 2, 146–157. <https://doi.org/10.1007/s11483-007-9039-2>
- Bayod, E., Tornberg, E., 2011. Microstructure of highly concentrated tomato suspensions on homogenisation and subsequent shearing. *Food Res. Int.* 44, 755–764. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.01.005>
- Beillouin, D., Schauburger, B., Bastos, A., Ciais, P., Makowski, D., 2020. Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 375, 20190510. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0510>
- BeMiller, J.N., 2019. 5 - Polysaccharides: Properties, in: BeMiller, J.N. (Ed.), *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists (Third Edition)*. AACC International Press, pp. 103–157. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812069-9.00005-4>
- BeMiller, J.N., 2018. *Carbohydrate chemistry for food scientists*. Elsevier.
- Benard, C., Gautier, H., Bourgaud, F., Grasselly, D., Navez, B., Caris-Veyrat, C., Weiss, M., Génard, M.M., 2009. Effects of low nitrogen supply on tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit yield and quality with special emphasis on sugars, acids, ascorbate, carotenoids, and phenolic compounds. *J. Agric. Food Chem.* 57, 4112–4123. <https://doi.org/10.1021/jf8036374>
- Bernhard, A., 2010. The nitrogen cycle: processes, players, and human impact. *Nature Education*.
- Bertin, N., Causse, M., Brunel, B., Tricon, D., Genard, M., 2009. Identification of growth processes involved in QTLs for tomato fruit size and composition. *J. Exp. Bot.* 60, 237–248. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern281>
- Bertin, N., Génard, M., 2018. Tomato quality as influenced by preharvest factors. *Sci. Hortic.* 233, 264–276. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.056>
- Birthal, P.S., Hazrana, J., Negi, D.S., Pandey, G., 2021. Benefits of irrigation against heat stress in agriculture: Evidence from wheat crop in India. *Agric. Water Manag.* 255, 106950. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106950>
- Blumenkrantz, N., Asboe-Hansen, G., 1973. New method for quantitative determination of uronic acids. *Anal. Biochem.* 54, 484–489. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(73\)90377-1](https://doi.org/10.1016/0003-2697(73)90377-1)
- Boote, K.J., Rybak, M.R., Scholberg, J.M.S., Jones, J.W., 2012. Improving the CROPGRO-Tomato model for predicting growth and yield response to temperature. *HortScience* 47, 1038–1049. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.8.1038>
- Bourne, M.C., 1982. CHAPTER 1 - Texture, Viscosity, and Food, in: Bourne, M.C. (Ed.), *Food Texture and Viscosity*. Academic Press, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-119080-4.50006-0>
- Buergy, A., Rolland-Sabaté, A., Leca, A., Renard, C.M.G.C., 2020. Pectin modifications in raw fruits alter texture of plant cell dispersions. *Food Hydrocoll.* 107, 105962. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105962>
- Bureau, S., Arbex de Castro Vilas Boas, A., Giovinazzo, R., Jaillais, B., Page, D., 2020. Toward the implementation of mid-infrared spectroscopy along the processing chain to improve quality of the tomato based products. *LWT* 130, 109518. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109518>
- Burton-Freeman, B., Reimers, K., 2011. Tomato consumption and health: emerging benefits. *Am. J. Lifestyle Med.* 5, 182–191. <https://doi.org/10.1177/1559827610387488>

- Bustamante, S.C., Hartz, T.K., 2015. Nitrogen management in organic processing tomato production: nitrogen sufficiency prediction through early-season soil and plant monitoring. *HortScience* 50, 1055–1063. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.7.1055>
- Cammarano, D., Jamshidi, S., Hoogenboom, G., Ruane, A.C., Niyogi, D., Ronga, D., 2022. Processing tomato production is expected to decrease by 2050 due to the projected increase in temperature. *Nat. Food* 3, 437–444. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00521-y>
- Candido, V., Campanelli, G., D’Addabbo, T., Castronuovo, D., Perniola, M., Camele, I., 2015. Growth and yield promoting effect of artificial mycorrhization on field tomato at different irrigation regimes. *Sci. Hortic.* 187, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.02.033>
- Carpita, N.C., Gibeaut, D.M., 1993. Structural models of primary cell walls in flowering plants: consistency of molecular structure with the physical properties of the walls during growth. *Plant J. Cell Mol. Biol.* 3, 1–30. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313x.1993.tb00007.x>
- Carrington, C.M.S., Greve, L.C., Labavitch, J.M., 1993. Cell wall metabolism in ripening fruit (VI. Effect of the antisense polygalacturonase gene on cell wall changes accompanying ripening in transgenic tomatoes). *Plant Physiol.* 103, 429–434. <https://doi.org/10.1104/pp.103.2.429>
- Casa, R., Roupahel, 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. <https://doi.org/10.1080/14620316.2014.11513097>
- Cassity-Duffey, K., Cabrera, M., Gaskin, J., Franklin, D., Kissel, D., Saha, U., 2020. Nitrogen mineralization from organic materials and fertilizers: Predicting N release. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 84, 522–533. <https://doi.org/10.1002/saj2.20037>
- Cerekovic, N., Todorovic, M., Snyder, R.L., Boari, F., Pace, B., Cantore, V., 2010. Evaluation of the crop coefficients for tomato crop grown in a Mediterranean climate 91–94.
- Cheng, H.M., Koutsidis, G., Lodge, J.K., Ashor, A.W., Siervo, M., Lara, J., 2019. Lycopene and tomato and risk of cardiovascular diseases: A systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 59, 141–158. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1362630>
- Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Xiang, Y., Tang, Z., Pei, S., Zeng, H., Zhang, C., Dai, Y., Li, Z., Zou, Y., Zhang, F., 2021. Effects of nitrogen supply on tomato yield, water use efficiency and fruit quality: A global meta-analysis. *Sci. Hortic.* 290, 110553. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110553>
- Cheniclet, C., Rong, W.Y., Causse, M., Frangne, N., Bolling, L., Carde, J.-P., Renaudin, J.-P., 2005. Cell expansion and endoreduplication show a large genetic variability in pericarp and contribute strongly to tomato fruit growth. *Plant Physiol.* 139, 1984–1994. <https://doi.org/10.1104/pp.105.068767>
- Chevalier, C., Nafati, M., Mathieu-Rivet, E., Bourdon, M., Frangne, N., Cheniclet, C., Renaudin, J.-P., Gévaudant, F., Hernould, M., 2011. Elucidating the functional role of endoreduplication in tomato fruit development. *Ann. Bot.* 107, 1159–1169. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq257>
- Commissariat général au développement durable, 2019. Rapport de synthèse, l’environnement en France.
- Compton, J.E., Harrison, J.A., Dennis, R.L., Greaver, T.L., Hill, B.H., Jordan, S.J., Walker, H., Campbell, H.V., 2011. Ecosystem services altered by human changes in the nitrogen cycle: a new perspective for US decision making. *Ecol. Lett.* 14, 804–815. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01631.x>
- Constantinescu, D., MEMMAH, M., Vercambre, G., Génard, M., Baldazzi, V., Causse, M., Albert, E., Brunel, B., Valsesia, P., Bertin, N., 2016. Model-Assisted Estimation of the Genetic Variability in Physiological Parameters Related to Tomato Fruit Growth under Contrasted Water Conditions. *Front. Plant Sci.* 7, np. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01841>
- Cook, B.I., Mankin, J.S., Anchukaitis, K.J., 2018. Climate change and drought: from past to future. *Curr. Clim. Change Rep.* 4, 164–179. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0093-2>
- Cookson, P.J., Kiano, J.W., Shipton, C.A., Fraser, P.D., Romer, S., Schuch, W., Bramley, P.M., Pyke, K.A., 2003. Increases in cell elongation, plastid compartment size and phytoene synthase

- activity underlie the phenotype of the high pigment-1 mutant of tomato. *Planta* 217, 896–903. <https://doi.org/10.1007/s00425-003-1065-9>
- Cullen, P. J., Duffy, A. P., O'Donnell, C. P., 2001. On-Line Rheological Characterization of Pizza Sauce Using Tube Viscometry. *J. Food Process Eng.* 24, 145–159. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2001.tb00537.x>
- Damidaux, R., Bap, D., Agronomique), A. (analyse S.-économique D.I. de la R.P., 2015a. Création de tomates de qualité pour le frais et l'industrie : F1 GARANCE et F1 TERRADOU (report).
- Damidaux, R., Bap, D., Agronomique), A. (analyse S.-économique D.I. de la R.P., 2015b. Création de tomates de qualité pour le frais et l'industrie : F1 GARANCE et F1 TERRADOU (report).
- Davies, J.N., Hobson, G.E., 1981. The constituents of tomato fruit--the influence of environment, nutrition, and genotype. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 15, 205–280. <https://doi.org/10.1080/10408398109527317>
- De Mendiburu, F., Yaseen, M., 2020. agricolae: statistical procedures for agricultural research.
- di Corcia, S., Dornier, M., Palmade, L., Dhuique-Mayer, C., 2022. Enhancement of the in vitro bioavailable carotenoid content of a citrus juice combining crossflow microfiltration and high-pressure treatments. *Food Res. Int.* 156, 111134. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111134>
- Diantom, A., Curti, E., Carini, E., Vittadini, E., 2017. Effect of added ingredients on water status and physico-chemical properties of tomato sauce. *Food Chem., Special Issue: 9th International Conference on Water in Food* 236, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.160>
- Diaz, J.V., Anthon, G.E., Barrett, D.M., 2009. Conformational changes in serum pectins during industrial tomato paste production. *J. Agric. Food Chem.* 57, 8453–8458. <https://doi.org/10.1021/jf901207w>
- Doorenbos, J., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements (Guidelines). FAO, Rome.
- Doorenbos, Pruitt, 1977. Crop water requirements. FAO Irrigation Drainage Paper No. 24. FAO irrigation and drainage paper.
- Dufour, C., Caris-Veyrat, C., Bouvellec, C., Renard, C., 2014. Le devenir des polyphénols et caroténoïdes dans les fruits et légumes traités thermiquement. *Innov. Agron.* 42, 125–137.
- Dumas, Y., Dadomo, M., Lucca, G.D., Grolier, P., 2003. Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *J. Sci. Food Agric.* 83, 369–382. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1370>
- Egea, I., Barsan, C., Bian, W., Purgatto, E., Latche, A., Chervin, C., Bouzayen, M., Pech, J.-C., 2010. Chromoplast differentiation: Current status and perspectives. *Plant Cell Physiol.* 51, 1601–1611. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcq136>
- Egea, I., Bian, W., Barsan, C., Jauneau, A., Pech, J.-C., Latché, A., Li, Z., Chervin, C., 2011. Chloroplast to chromoplast transition in tomato fruit: spectral confocal microscopy analyses of carotenoids and chlorophylls in isolated plastids and time-lapse recording on intact live tissue. *Ann. Bot.* 108, 291–297. <https://doi.org/10.1093/aob/mcr140>
- Englyst, H., Wiggins, H.S., Cummings, J.H., 1982. Determination of the non-starch polysaccharides in plant foods by gas-liquid chromatography of constituent sugars as alditol acetates. *The Analyst* 107, 307–318. <https://doi.org/10.1039/an9820700307>
- Ercin, A.E., Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., 2012. The water footprint of France (No. 56), Value of Water Research Report. UNESCO-IHE.
- Espinosa, L., 2012. Texture de la purée de pomme : influence de la structure sur les propriétés rhéologiques et la perception sensorielle - effet du traitement mécanique. AgroParisTech, Paris.
- Fanciullino, A.L., Bidet, L.P.R., Urban, L., 2014. Carotenoid responses to environmental stimuli: integrating redox and carbon controls into a fruit model. *Plant Cell Environ.* 37, 273–289. <https://doi.org/10.1111/pce.12153>
- FAO, 2021. Inorganic fertilizers 1961–2019. (FAOSTAT Analytical Brief Series No. 27). Rome.

- FAO, 2017. Water for sustainable food and agriculture, a report produced for the G20 presidency of Germany. Rome.
- FAO, 2015. Climate change and food security: risks and responses.
- FAO, 1984. Fertilizer and plant nutrition guide (FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin No. 9). Land and Water Development Division.
- FAO, 1981. Standard for processed tomato concentrates.
- Farneselli, M., Tosti, G., Onofri, A., Benincasa, P., Guiducci, M., Pannacci, E., Tei, F., 2018. Effects of N sources and management strategies on crop growth, yield and potential N leaching in processing tomato. *Eur. J. Agron.* 98, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.006>
- FiBL Suisse, 2011. Fiche d'informations sur les propriétés sensorielles de la sauce tomate biologique-Element livrable 6.3.
- Fishman, M.L., Chau, H.K., Kolpak, F., Brady, J., 2001. Solvent effects on the molecular properties of pectins. *J. Agric. Food Chem.* 49, 4494–4501. <https://doi.org/10.1021/jf001317l>
- Flory, P.J., 1953. Molecular configuration of polyelectrolytes. *J. Chem. Phys.* 21, 162–163. <https://doi.org/10.1063/1.1698574>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Francaviglia, R., Di Bene, C., 2019. Deficit drip irrigation in processing of tomato production in the mediterranean basin: a data analysis for Italy 9. <https://doi.org/10.3390/agriculture9040079>
- France AgriMer, 2020. Panorama statistique 2020 des fruits et légumes transformés.
- Fullana-Pericàs, M., Conesa, M.À., Douthe, C., El Aou-ouad, H., Ribas-Carbó, M., Galmés, J., 2019. Tomato landraces as a source to minimize yield losses and improve fruit quality under water deficit conditions. *Agric. Water Manag.* 223, 105722. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105722>
- Gao, R., Wu, Z., Ma, Q., Lu, Z., Ye, F., Zhao, G., 2021. Effects of breaking methods on the viscosity, rheological properties and nutritional value of tomato paste. *Foods*. <https://doi.org/10.3390/foods10102395>
- Garofalo, P., A.V., V., Ruggieri, S., Rinaldi, M., 2011. Water and radiation use efficiencies of irrigated biomass sorghum in a Mediterranean environment. *Ital. J. Agron.* 6, 133–139. <https://doi.org/10.4081/ija.2011.e21>
- Gawkowska, D., Cybulska, J., Zdunek, A., 2018. Structure-related gelling of pectins and linking with other natural compounds: A review. *Polymers* 10, 762. <https://doi.org/10.3390/polym10070762>
- Génard, M., Gouble, B., 2005. ETHY. A Theory of Fruit Climacteric Ethylene Emission. *Plant Physiol.* 139, 531–545. <https://doi.org/10.1104/pp.105.063339>
- Gillaspy, G., Ben-David, H., Gruissem, W., 1993. Fruits: A developmental perspective. *Plant Cell* 5, 1439–1451. <https://doi.org/10.1105/tpc.5.10.1439>
- Giorgi, F., 2006. Climate change Hot-Spots. *Geophys Res Let* 33doi, 101029/. <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Giovannucci, E., Rimm, E.B., Liu, Y., Stampfer, M.J., Willett, W.C., 2002. A prospective study of tomato products, lycopene, and prostate cancer risk. *JNCI J. Natl. Cancer Inst.* 94, 391–398. <https://doi.org/10.1093/jnci/94.5.391>
- Giuliani, M., Gatta, G., Nardella, E., Tarantino, E., 2016. Water saving strategies assessment on processing tomato cultivated in Mediterranean region. *Ital. J. Agron.* 11, 69–76. <https://doi.org/10.4081/ija.2016.738>
- Giuliani, M., Nardella, E., A., G., Gatta, G., 2017. Deficit irrigation and partial root-zone drying techniques in processing tomato cultivated under mediterranean climate conditions. *Sustainability* 9, 2197. <https://doi.org/10.3390/su9122197>
- Gomez, L., Rubio, E., Augé, M., 2002. A new procedure for extraction and measurement of soluble sugars in ligneous plants. *J. Sci. Food Agric.* 82, 360–369. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1046>

- Goodman, C. I., Fawcett, S., Barringer, S. a., 2002. Flavor, viscosity, and color analyses of hot and cold break tomato juices. *J. Food Sci.* 67, 404–408. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb11418.x>
- Hadley Wickham, 2016. *ggplot2: elegant graphics for data analysis.*
- Hanson, B., May, D., 2006. New crop coefficients developed for high-yield processing tomatoes. *Calif. Agric.* 60, 95–99. <https://doi.org/10.3733/ca.v060n02p95>
- Hanson, B., May, D., 2006. New crop coefficients developed for high-yield processing tomatoes. *Calif. Agric.* 60, 95–99.
- Hanson, B.R., May, D.M., 2006a. Crop coefficients for drip-irrigated processing tomato. *Agric. Water Manag.* 81, 381–399. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.007>
- Hanson, B.R., May, D.M., 2006b. Crop coefficients for drip-irrigated processing tomato. *Agric. Water Manag.* 81, 381–399. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.007>
- Hartz, T., Bottoms, T., 2009. Nitrogen requirements of drip-irrigated processing tomatoes. *HortScience* 44, 1988–1993. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.7.1988>
- Hassan, I., Ai-Jawhari, H., 2020. Nanocellulose for sustainable future applications. pp. 1–12. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11155-7_16-1
- Hayes, W.A., Smith, P.G., Morris, A.E., 1998a. The production and quality of tomato concentrates. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 38, 557–564.
- Hayes, W.A., Smith, P.G., Morris, A.E.J., 1998b. The production and quality of tomato concentrates. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 38, 537–564. <https://doi.org/10.1080/10408699891274309>
- Hayes, W.A., Smith, P.G., Morris, A.E.J., 1998c. The production and quality of tomato concentrates. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 38, 537–564. <https://doi.org/10.1080/10408699891274309>
- Helyes, L., Brandt, S., Reti, K., 2003. Appreciation and analysis of lycopene content of tomato, in: Tijskens, L.M.M., Vollebregt, H.M. (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Quality in Chains, Vols 1 and 2: An Integrated View on Fruit and Vegetable Quality.* Int Soc Horticultural Science, Leuven 1, pp. 531–537.
- Ho, L.C., Grange, R.I., Picken, A.J., 1987. An analysis of the accumulation of water and dry matter in tomato fruit. *Plant Cell Environ.* 10, 157–162. <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11602110>
- Ho, L.C., Hewitt, J.D., 1986. Fruit development, in: Atherton, J.G., Rudich, J. (Eds.), *The Tomato Crop: A Scientific Basis for Improvement, The Tomato Crop.* Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 201–239. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3137-4_5
- Ho, L.C., White, P.J., 2005. A Cellular Hypothesis for the Induction of Blossom-End Rot in Tomato Fruit. *Ann. Bot.* 95, 571–581. <https://doi.org/10.1093/aob/mci065>
- Hobson, G., Grierson, D., 1993. Tomato, in: Seymour, G.B., Taylor, J.E., Tucker, G.A. (Eds.), *Biochemistry of Fruit Ripening.* Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 405–442. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1584-1_14
- Hoekstra, A., Mekonnen, M., 2012. The water footprint of humanity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 109, 3232–7. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>
- Hoekstra, A.Y. (Ed.), 2011. *The water footprint assessment manual: setting the global standard.* Earthscan, London ; Washington, DC.
- Hoerling, M., Eischeid, J., Perlwitz, J., Quan, X., Zhang, T., Pegion, P., 2011. On the increased frequency of mediterranean drought. *J. Clim.* 25, 2146–2161. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00296.1>
- Hongsoongnorn, P., Chambers Iv, E., 2008. A lexicon for texture and flavor characteristics of fresh and processed tomatoes. *J. Sens. Stud.* 23, 583–599. <https://doi.org/10.1111/j.1745-459X.2008.00174.x>
- Hortimedia, 2021. Les nouvelles calibreuses RODA mesurent le Brix grâce à la technologie NIR.
- Hoshikawa, K., Pham, D., Ezura, H., Schafleitner, R., Nakashima, K., 2021. Genetic and molecular mechanisms conferring heat stress tolerance in tomato plants. *Front. Plant Sci.* 12, 786688. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.786688>

- Hou, X., Zhang, W., TS, D., Kang, S., Davies, W., 2019. Responses of water accumulation and solute metabolism in tomato fruit to water scarcity and Implications for main fruit quality variables. *J. Exp. Bot.* 71. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz526>
- Houlton, B.Z., Almaraz, M., Aneja, V., Austin, A.T., Bai, E., Cassman, K.G., Compton, J.E., Davidson, E.A., Erisman, J.W., Galloway, J.N., Gu, B., Yao, G., Martinelli, L.A., Scow, K., Schlesinger, W.H., Tomich, T.P., Wang, C., Zhang, X., 2019. A world of cobenefits: solving the global nitrogen challenge. *Earths Future* 7, 865–872. <https://doi.org/10.1029/2019EF001222>
- IPCC, Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., 2022. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (Summary for policy makers), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. IPCC, Switzerland.
- Janoria, M.P., Rhodes, A.M., 1974. Juice viscosity as related to various juice constituents and fruit characters in tomatoes. *Euphytica* 23, 553–562. <https://doi.org/10.1007/BF00022476>
- Jazaeri, S., Mohammadi, A., Kermani, A.M.P., Paliyath, G., Kakuda, Y., 2018. Characterization of lycopene hydrocolloidal structure induced by tomato processing. *Food Chem.* 245, 958–965. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.077>
- Jeffery, J.L., Turner, N.D., King, S.R., 2012. Carotenoid bioaccessibility from nine raw carotenoid-storing fruits and vegetables using an in vitro model. *J. Sci. Food Agric.* 92, 2603–2610. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5768>
- Jowitt, R., 1974. The Terminology of Food Texture. *J. Texture Stud.* 5, 351–358. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1974.tb01441.x>
- Jürkenbeck, K., Spiller, A., Meyerding, S.G.H., 2019. Tomato attributes and consumer preferences – a consumer segmentation approach. *Br. Food J.* 122, 328–344. <https://doi.org/10.1108/BFJ-09-2018-0628>
- Klee, H.J., Giovannoni, J.J., 2011. Genetics and control of tomato fruit ripening and quality attributes. *Annu. Rev. Genet.* 45, 41–59. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-110410-132507>
- Klunklin, W., Savage, G., 2017. Effect on Quality Characteristics of Tomatoes Grown Under Well-Watered and Drought Stress Conditions. *Foods* 6, 56. <https://doi.org/10.3390/foods6080056>
- Koh, E., Charoenprasert, S., Mitchell, A., 2012. Effects of industrial tomato paste processing on ascorbic acid, flavonoids and carotenoids and their stability over one-year storage. *J. Sci. Food Agric.* 92, 23–8. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4580>
- Koocheki, A., Ghandi, A., Razavi, S.M.A., Mortazavi, S.A., Vasiljevic, T., 2009. The rheological properties of ketchup as a function of different hydrocolloids and temperature. *Int. J. Food Sci. Technol.* 44, 596–602. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01868.x>
- Kubo, M.T.K., Rojas, M.L., Miano, A.C., Augusto, P.E.D., 2019. Chapter 1 Rheological properties of tomato products 1–25. <https://doi.org/10.1039/9781788016247-00001>
- Le Bourvellec, C., Bouzerzour, K., Ginies, C., Regis, S., Plé, Y., Renard, C., 2011. Phenolic and polysaccharidic composition of applesauce is close to that of apple flesh. *J. Food Compos. Anal.* 24, 537–547. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.12.012>
- Lê, S., Le, T., Cadoret, M., 2015. Napping and sorted Napping as a sensory profiling technique, in: *Rapid Sensory Profiling Techniques and Related Methods: Applications in New Product Development and Consumer Research*. pp. 197–213. <https://doi.org/10.1533/9781782422587.2.197>
- Lee, Y., Bobroff, S., Mccarthy, K.L., 2002. Rheological characterization of tomato concentrates and the effect on uniformity of processing. *Chem. Eng. Commun.* 189, 339–351. <https://doi.org/10.1080/00986440212085>
- Leverrier, C., 2016. Relations structure/propriétés de suspensions de particules végétales. Paris Saclay.
- Leverrier, C., Almeida, G., Espinosa-Mu noz, L., Cuvelier, G., 2016. Influence of particle size and concentration on rheological behaviour of reconstituted apple purees. *Food Biophys.* 11, 235–247. <https://doi.org/10.1007/s11483-016-9434-7>

- Leverrier, C., Moulin, G., Cuvelier, G., Almeida, G., 2017. Assessment of deformability of soft plant cells by 3D imaging. *Food Struct.* 14, 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2017.07.002>
- Lin, H., Aizawa, K., Inakuma, T., Yamauchi, R., Kato, K., 2005. Physical properties of water-soluble pectins in hot- and cold-break tomato pastes. *Food Chem.* 93, 403–408. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.09.036>
- Litskas, V.D., Migeon, A., Navajas, M., Tixier, M.-S., Stavriniades, M.C., 2019. Impacts of climate change on tomato, a notorious pest and its natural enemy: small scale agriculture at higher risk. *Environ. Res. Lett.* 14, 084041. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3313>
- Liu, J., Wang, W., Wang, L., Sun, Y., 2015. Exogenous melatonin improves seedling health index and drought tolerance in tomato. *Plant Growth Regul.* 77, 317–326. <https://doi.org/10.1007/s10725-015-0066-6>
- Lopez-Sanchez, P., Nijssse, J., Blonk, H.C.G., Bialek, L., Schumm, S., Langton, M., 2011. Effect of mechanical and thermal treatments on the microstructure and rheological properties of carrot, broccoli and tomato dispersions. *J. Sci. Food Agric.* 91, 207–217. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4168>
- Loubier, S., Campardon, M., Morardet, S., 2013. L'irrigation diminue-t-elle en France ? Premiers enseignements du recensement agricole de 2010. *Sci. Eaux Territ.* Numéro 11, 12–19. <https://doi.org/10.3917/set.011.0012>
- Lovelli, S., Potenza, G., Castronuovo, D., Perniola, M., Candido, V., 2016. Yield, quality and water use efficiency of processing tomatoes produced under different irrigation regimes in Mediterranean environment. *Ital. J. Agron.* 11. <https://doi.org/10.4081/ija.2016.795>
- Lu, J., Shao, G., Gao, Y., Zhang, K., Wei, Q., Cheng, J., 2021. Effects of water deficit combined with soil texture, soil bulk density and tomato variety on tomato fruit quality: A meta-analysis. *Agric. Water Manag.* 243, 106427. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106427>
- Manzo, N., Santini, A., Pizzolongo, F., Aiello, A., Romano, R., 2019. Degradation kinetic (D100) of lycopene during the thermal treatment of concentrated tomato paste. *Nat. Prod. Res.* 33, 1835–1841. <https://doi.org/10.1080/14786419.2018.1477147>
- Marsh, G.L., Buhler, J.E., Leonard, S.J., 1980. Effect of Composition Upon Bostwick Consistency of Tomato Concentrate. *J. Food Sci.* 45, 703–706. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1980.tb04137.x>
- Mbow, C., Rosenzweig, C., Barioni, L.G., Benton, T.G., Herrero, M., Krishnapillai, M., Liwenga, E., Pradhan, P., Rivera-Ferre, M.G., Sapkota, T., Tubiello, F.N., Xu, Y., 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystem T.G.Benton,M.Herrero,M.Krishnapillai,E.Liwenga,P.Pradhan,M.G.Rivera-Ferre, T. Sapkota, F.N. Tubiello, Y. Xu. pp. 437–550.
- Mccarthy, K.L., Sacher, R.F., Garvey, T.C., 2008. Relationship Between Rheological Behavior and Bostwick Measurement During Manufacture of Ketchup. *J. Texture Stud.* 39, 480–495. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2008.00155.x>
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 1577–1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., 2010. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products (No. 47), Value of Water Research Report.
- Melton, L.D., Smith, B.G., 2001. Determining the degree of methylation and acetylation of pectin. *Curr. Protoc. Food Anal. Chem.* 00, E3.4.1-E3.4.6. <https://doi.org/10.1002/0471142913.fae0304s00>
- Mezger, T., 2014. The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers, 4. ed. ed, European coatings tech files. Vincentz Network, Hannover.
- Mingo, D., Theobald, J., Bacon, M., Davies, W., Dodd, I., 2004. Biomass allocation in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown under partial rootzone drying: Enhancement of root growth. *Funct. Plant Biol. - FUNCT PLANT BIOL* 31. <https://doi.org/10.1071/FP04020>

- Mishra, A.K., Singh, V.P., 2010. A review of drought concepts. *J. Hydrol.* 391, 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Moelants, K.R.N., Cardinaels, R., Jolie, R.P., Verrijssen, T.A.J., Van Buggenhout, S., Van Loey, A.M., Moldenaers, P., Hendrickx, M.E., 2014a. Rheology of concentrated tomato-derived suspensions: Effects of particle characteristics. *Food Bioprocess Technol.* 7, 248–264. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1070-3>
- Moelants, K.R.N., Cardinaels, R., Van Buggenhout, S., Van Loey, A.M., Moldenaers, P., Hendrickx, M.E., 2014b. 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. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12059>
- Moelants, K.R.N., Jolie, R.P., Palmers, S.K.J., Cardinaels, R., Christiaens, S., Van Buggenhout, S., Van Loey, A.M., Moldenaers, P., Hendrickx, M.E., 2013. The Effects of process-induced pectin changes on the viscosity of carrot and tomato sera. *Food Bioprocess Technol.* 6, 2870–2883. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-1004-5>
- Mohr, W.P., 1987. Tomato fruit properties affecting consistency of concentrated product. *Can. J. Plant Sci.* 67, 881–890. <https://doi.org/10.4141/cjps87-125>
- Monaco, R.D., Cavella, S., Iaccarino, T., Mincione, A., Masi, P., 2003. The role of the knowledge of color and brand name on the consumer's hedonic ratings of tomato purees. *J. Sens. Stud.* 18, 391–408. <https://doi.org/10.1111/j.1745-459X.2003.tb00396.x>
- Montagu, K.D., Goh, K.M., 1990. Effects of forms and rates of organic and inorganic nitrogen fertilisers on the yield and some quality indices of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Miller). *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* 18, 31–37. <https://doi.org/10.1080/01140671.1990.10428067>
- Mozafar, A., 1993. Nitrogen fertilizers and the amount of vitamins in plants: A review. *J. Plant Nutr.* 16, 2479–2506. <https://doi.org/10.1080/01904169309364698>
- Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R.A., Carrao, H., Spinoni, J., Vogt, J., Feyen, L., 2018. Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophys. Res. Lett.* 45, 3285–3296. <https://doi.org/10.1002/2017GL076521>
- Ochoa-Villarreal, M., Aispuro, E., Vargas-Arispuro, I., Martínez-Téllez, M., 2012. Plant cell wall polymers: Function, structure and biological activity of their derivatives. <https://doi.org/10.5772/46094>
- Ong, J.J.-X., Steele, C.M., Duizer, L.M., 2018. Challenges to assumptions regarding oral shear rate during oral processing and swallowing based on sensory testing with thickened liquids. *Food Hydrocoll.* 84, 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.043>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (Ed.), 2010. Sustainable management of water resources in agriculture. IWA Publishing, London.
- Ouden, F.W.C., Vliet, T., 2006. Particle size distribution in tomato concentrate and effects on rheological properties. *J. Food Sci.* 62, 565–567. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb04431.x>
- Pabón-Mora, N., Litt, A., 2011. Comparative anatomical and developmental analysis of dry and fleshy fruits of Solanaceae. *Am. J. Bot.* 98, 1415–1436. <https://doi.org/10.3732/ajb.1100097>
- Page, D., Labadie, C., Reling, P., Bott, R., Garcia, C., Gaillard, C., Fourmaux, B., Bernoud-Hubac, N., Goupy, P., Georgé, S., Caris-Veyrat, C., 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 Chem.* 274, 500–509. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.062>
- Page, D., Van Stratum, E., Degrou, A., Renard, C.M.G.C., 2012. Kinetics of temperature increase during tomato processing modulate the bioaccessibility of lycopene. *Food Chem.* 135, 2462–2469. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.028>
- Pagès, J., 2005. Collection and analysis of perceived product inter-distances using multiple factor analysis: Application to the study of 10 white wines from the Loire Valley. *Food Qual. Prefer.* 16, 642–649. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2005.01.006>

- Pagès, J., 2004. Multiple Factor Analysis: Main Features and Application to Sensory Data. *Rev. Colomb. Estad.* 27, 1–26.
- Pages, J., 2003. Direct collection of sensory distances: application to the evaluation of ten white wines of the Loire Valley (France). *Sci. Aliments Fr.*
- Pagès, J., Husson, F., 2005. Multiple factor analysis with confidence ellipses: a methodology to study the relationships between sensory and instrumental data. *J. Chemom.* 19, 138–144. <https://doi.org/10.1002/cem.916>
- Patanè, C., Cosentino, S.L., 2010. Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate. *Agric. Water Manag.* 97, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.021>
- Patanè, C., Saita, A., 2015. Biomass, fruit yield, water productivity and quality response of processing tomato to plant density and deficit irrigation under a semi-arid Mediterranean climate. *Crop Pasture Sci.* 66. <https://doi.org/10.1071/CP14152>
- Patanè, C., Tringali, S., 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. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.030>
- Pathak, T., Stoddard, C., 2018. Climate change effects on the processing tomato growing season in California using growing degree day model. *Model. Earth Syst. Environ.* 4. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0460-y>
- Pelta, R., Beerli, O., Tarshish, R., Shilo, T., 2022. Forecasting seasonal plot-specific crop coefficient (Kc) protocol for processing tomato using remote sensing, meteorology, and artificial intelligence. *Precis. Agric.* <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09910-6>
- Petropoulos, S.A., Fernandes, A., Xyrafis, E., Polyzos, N., Antoniadis, V., Barros, L., Ferreira, I.C.F.R., 2020. The optimization of nitrogen fertilization regulates crop performance and quality of processing tomato (*Solanum lycopersicum*L. cv. Heinz 3402). *Agron.-Basel* 10, 715. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050715>
- Pnueli, L., Carmel-Goren, L., Hareven, D., Gutfinger, T., Alvarez, J., Ganai, M., Zamir, D., Lifschitz, E., 1998. The SELF-PRUNING gene of tomato regulates vegetative to reproductive switching of sympodial meristems and is the ortholog of CEN and TFL1. *Dev. Camb. Engl.* 125, 1979–1989. <https://doi.org/10.1242/dev.125.11.1979>
- Polade, S.D., Gershunov, A., Cayan, D.R., Dettinger, M.D., Pierce, D.W., 2017. Precipitation in a warming world: Assessing projected hydro-climate changes in California and other Mediterranean climate regions. *Sci. Rep.* 7, 10783. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11285-y>
- Porretta, S. (Ed.), 2019. *Tomato chemistry, industrial processing and product development*; Food Chemistry, Function and Analysis. Royal Society of Chemistry, Cambridge. <https://doi.org/10.1039/9781788016247>
- Pulupol, L.U., Behboudian, M.H., Fisher, K.J., 1996. Growth, yield, and postharvest attributes of glasshouse tomatoes produced under deficit irrigation. *HortScience* 31, 926–929. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.31.6.926>
- Quinet, M., Angosto, T., Yuste-Lisbona, F.J., Blanchard-Gros, R., Bigot, S., Martinez, J.-P., Lutts, S., 2019. Tomato fruit development and metabolism. *Front. Plant Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01554>
- R Core Team, 2022. *R: a language and environment for statistical computing.*
- Ragab, R., 2015. Integrated management tool for water, crop, soil and N-fertilizers: the saltmed model. *Irrig. Drain.* 64, 1–12. <https://doi.org/10.1002/ird.1907>
- Rao, M.A., 2014. *Rheology of fluid, semisolid, and solid foods: principles and applications*, Third edition. ed, Food engineering series,. Imprint: Springer,.
- Rao, M.A., Bourne, M.C., Cooley, H.J., 1981. Flow Properties of Tomato Concentrates. *J. Texture Stud.* 12, 521–538. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1981.tb00265.x>

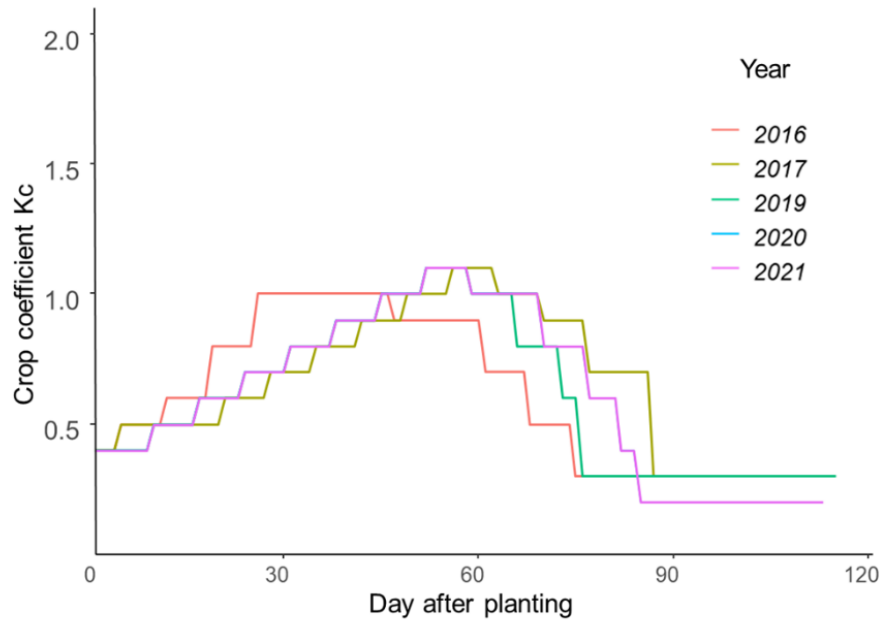
- Renaudin, J.-P., Deluche, C., Cheniclet, C., Chevalier, C., Frangne, N., 2017. Cell layer-specific patterns of cell division and cell expansion during fruit set and fruit growth in tomato pericarp. *J. Exp. Bot.* 68, 1613–1623. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx058>
- Ribas-Agustí, A., Gouble, B., Bureau, S., Maingonnat, J.-F., Audergon, J.-M., Renard, C.M.G.C., 2017. Towards the use of biochemical indicators in the raw fruit for improved texture of pasteurized apricots. *Food Bioprocess Technol.* 10, 662–673. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1850-7>
- Ripoll, J., Brunel, B., L'hôtel, J.-C., Garcia, G., Bertin, N., Urban, L., 2016a. Impact of water deficit on tomato fruit growth and quality depending on the fruit developmental stage. *Acta Hortic.* 1112, np. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1112.24>
- Ripoll, J., Urban, L., Brunel, B., Bertin, N., 2016b. Water deficit effects on tomato quality depend on fruit developmental stage and genotype. *J. Plant Physiol.* 190, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.10.006>
- Ripoll, J., Urban, L., Staudt, M., Lopez-Lauri, F., Bidet, L.P.R., Bertin, N., 2014. Water shortage and quality of fleshy fruits-making the most of the unavoidable. *J. Exp. Bot.* 65, 4097–4117. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru197>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Ronga, D., Francia, E., Rizza, F., Badeck, F.-W., Caradonia, F., Montevecchi, G., Pecchioni, N., 2019a. Changes in yield components, morphological, physiological and fruit quality traits in processing tomato cultivated in Italy since the 1930's. *Sci. Hortic.* 257, 108726. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108726>
- Ronga, D., Parisi, M., Pentangelo, A., Mori, M., Di Mola, I., 2019b. Effects of nitrogen management on biomass production and dry matter distribution of processing tomato cropped in southern Italy. *Agronomy* 855, 1–16. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120855>
- Rosa, L., 2022. Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: biophysical potentials and feedbacks. *Environ. Res. Lett.* 17, 063008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7408>
- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A.C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K.J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T.A.M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H., Jones, J.W., 2014. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 3268–3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
- Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L., Pizzigalli, C., Lionello, P., 2014. Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agric. Water Manag.* 147. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.008>
- Saeman, J.F., Moore, W.E., Mitchell, R.L., Millett, M.A., 1954. Technique for the determination of pulp constituents by quantitative paper chromatography. *Tappi* 336–343.
- Salas-Tovar, J.A., Flores-Gallegos, A.C., Contreras-Esquivel, J.C., Escobedo-García, S., Morlett-Chávez, J.A., Rodríguez-Herrera, R., 2017. Analytical methods for pectin methylesterase activity determination: a review. *Food Anal. Methods* 10, 3634–3646. <https://doi.org/10.1007/s12161-017-0934-y>
- Sánchez, M.C., Valencia, C., Gallegos, C., Ciruelos, A., Latorre, A., 2002. Influence of processing on the rheological properties of tomato paste. *J. Sci. Food Agric.* 82, 990–997. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1141>

- Saure, M.C., 2001. Blossom-end rot of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) — a calcium- or a stress-related disorder? *Sci. Hortic.* 90, 193–208. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(01\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00227-8)
- Scott, C.L., Downey, R.G., 2007. Types of food aversions: animal, vegetable, and texture. *J. Psychol.* 141, 127–134. <https://doi.org/10.3200/JRLP.141.2.127-134>
- Sérino, S., Gomez, L., Costagliola, G., Gautier, H., 2009. HPLC assay of tomato carotenoids: validation of a rapid microextraction technique. *J. Agric. Food Chem.* 57, 8753–8760. <https://doi.org/10.1021/jf902113n>
- Shamshiri, R., Jones, J., Thorp, K., Ahmad, D., Che Man, H., Taheri, S., 2018. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *Int. Agrophysics* 32, 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Sharma, S.K., LeMaguer, M., Liptay, A., Poysa, V., 1996. Effect of composition on the rheological properties of tomato thin pulp. *Food Res. Int.* 29, 175–179. [https://doi.org/10.1016/0963-9969\(96\)00010-5](https://doi.org/10.1016/0963-9969(96)00010-5)
- Shi, J., Le Maguer, M., 2000. Lycopene in tomatoes: chemical and physical properties affected by food processing. *Crit. Rev. Biotechnol.* 20, 293–334. <https://doi.org/10.1080/07388550091144212>
- Sikorska-Zimny, K., Badałek, E., Grzegorzewska, M., Ciecierska, A., Kowalski, A., Kosson, R., Tuccio, L., Mencaglia, A.A., Ciaccheri, L., Mignani, A.G., Kaniszewski, S., Agati, G., 2019. Comparison of lycopene changes between open-field processing and fresh market tomatoes during ripening and post-harvest storage by using a non-destructive reflectance sensor. *J. Sci. Food Agric.* 99, 2763–2774. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9484>
- Sila, D.N., Van Buggenhout, S., Duvetter, T., Fraeye, I., De Roeck, A., Van Loey, A., Hendrickx, M., 2009. Pectins in processed fruits and vegetables: part II-structure-function relationships. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 8, 86–104. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00071.x>
- SONITO, 2019. L'interprofession de la tomate destinée à la transformation: Chiffres clés, tonnages traités [WWW Document]. SONITO. URL <http://www.sonito.fr/page.php?theme=3&class=18> (accessed 10.13.20).
- SONITO, 2011. L'interprofession de la tomate destinée à la transformation: La tomate transformée [WWW Document]. URL <http://www.sonito.eu/page.php?theme=2&class=14> (accessed 9.20.22).
- Steffe, J.F., 1996. *Rheological methods in food process engineering*. Freeman Press.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Stevens, M.A., Rick, C.M., 1986. Genetics and breeding, in: Atherton, J.G., Rudich, J. (Eds.), *The Tomato Crop: A Scientific Basis for Improvement*, The Tomato Crop. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 35–109. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3137-4_2
- Sticklen, M.B., 2008. Plant genetic engineering for biofuel production: towards affordable cellulosic ethanol. *Nat. Rev. Genet.* 9, 433–443. <https://doi.org/10.1038/nrg2336>
- Stokes, J.R., 2012. 'Oral' rheology, in: *Food Oral Processing*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 225–263. <https://doi.org/10.1002/9781444360943.ch11>
- Tanglertpaibul, T., Rao, M.A., 1987. Intrinsic viscosity of tomato serum as affected by methods of determination and methods of processing concentrates. *J. Food Sci.* 52, 1642–1645. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1987.tb05895.x>
- Tarantino, 1991. Determinazione dei coefficienti culturali mediante lisimetri.

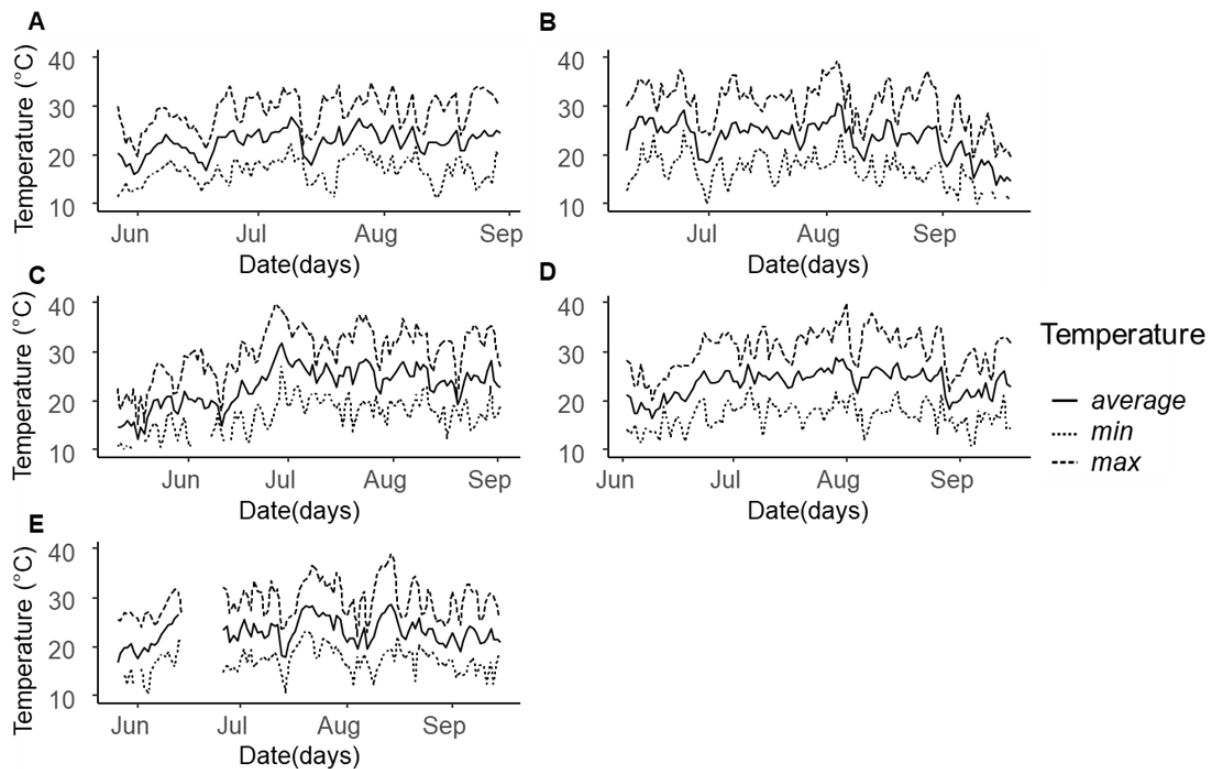
- Thakur, N., Raigond, P., Singh, Y., Mishra, T., Singh, B., Lal, M.K., Dutt, S., 2020. Recent updates on bioaccessibility of phytonutrients. *Trends Food Sci. Technol.* 97, 366–380. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.019>
- Tieman, D.M., Harriman, R.W., Ramamohan, G., Handa, A.K., 1992. An antisense pectin methyltransferase gene alters pectin chemistry and soluble solids in tomato fruit. *Plant Cell* 4, 667–679. <https://doi.org/10.1105/tpc.4.6.667>
- Tomato News, 2021a. Global imports of tomato products, updated October 1, 2021 [WWW Document]. URL https://www.tomatonews.com/en/global-imports-of-tomato-products-updated-october-1-2021_2_1471.html (accessed 10.11.21).
- Tomato News, 2021b. Un marché mondial des sauces en parfaite santé [WWW Document]. URL https://www.tomatonews.com/fr/un-marche-mondial-des-sauces-en-parfaite-sante_2_1527.html (accessed 9.15.22).
- Tomato News, 2020. France : troisième marché mondial en 2020 [WWW Document]. URL https://www.tomatonews.com/fr/france-troisieme-marche-mondial-en-2020_2_1271.html (accessed 2.15.22).
- Tornberg, E., 2017. Chapter 8 - Influence of fibers and particle size distribution on food rheology, in: Ahmed, J., Ptaszek, P., Basu, S. (Eds.), *Advances in Food Rheology and Its Applications*, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Woodhead Publishing, pp. 177–208. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100431-9.00008-5>
- Tramblay, Y., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S.M., Volaire, F., Boone, A., Le Page, M., Llasat, M.C., Albergel, C., Burak, S., Cailleret, M., Kalin, K.C., Davi, H., Dupuy, J.-L., Greve, P., Grillakis, M., Hanich, L., Jarlan, L., Martin-StPaul, N., Martínez-Vilalta, J., Mouillot, F., Pulido-Velazquez, D., Quintana-Seguí, P., Renard, D., Turco, M., Türkeş, M., Trigo, R., Vidal, J.-P., Vilagrosa, A., Zribi, M., Polcher, J., 2020. Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. *Earth-Sci. Rev.* 210, 103348. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103348>
- USDA, 1994. United States standards for grades of tomato sauce.
- Vaissie, P., Monge, A., Husson, F., 2021. Factoshiny: perform factorial analysis from “FactoMineR” with a shiny application.
- Valencia, C., Sanchez, M.C., Ciruelos, A., Gallegos, C., 2004. Influence of tomato paste processing on the linear viscoelasticity of tomato ketchup. *Food Sci. Technol. Int.* 10, 95–100. <https://doi.org/10.1177/1082013204043880>
- Vázquez, N., Pardo, A., Suso, M.L., Quemada, M., 2006. Drainage and nitrate leaching under processing tomato growth with drip irrigation and plastic mulching. *Agric. Ecosyst. Environ.* 112, 313–323. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.07.009>
- Veit-Köhler, U., Krumbein, A., Kosegarten, H., 1999. Effect of different water supply on plant growth and fruit quality of *Lycopersicon esculentum*. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 162, 583–588. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-2624\(199912\)162:6<583::AID-JPLN583>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-2624(199912)162:6<583::AID-JPLN583>3.0.CO;2-P)
- Vilas Boas, A.A. de C., Page, D., Giovinazzo, R., Bertin, N., Fanciullino, A.-L., 2018. Tomato fruit quality and processing ability are impacted by irrigation regime as well as genotype and maturity stage”, in: 13. World Processing Tomato Congress & 15. ISHS Symposium on the Processing Tomato, *Acta Horticulturae*. Athènes, Greece, p. np.
- Vilas Boas, A.A. de C., 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, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01725>
- Wang, D., Yeats, T.H., Uluisik, S., Rose, J.K.C., Seymour, G.B., 2018. Fruit softening: Revisiting the role of pectin. *Trends Plant Sci.* 23, 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.01.006>
- Wang, T., Zabolina, O., Hong, M., 2012. Pectin–cellulose interactions in the *Arabidopsis* primary cell wall from two-dimensional magic-angle-spinning solid-state nuclear magnetic resonance. *Biochemistry* 51, 9846–9856. <https://doi.org/10.1021/bi3015532>

- Wang, X., Yun, J., Shi, P., Li, Z., Li, P., Xing, Y., 2019. Root growth, fruit yield and water use efficiency of greenhouse grown tomato under different irrigation regimes and nitrogen levels. *J. Plant Growth Regul.* 38, 400–415. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9850-7>
- Warner, J., Zhang, T.Q., Hao, X., 2011. Effects of nitrogen fertilization on fruit yield and quality of processing tomatoes. *Can. J. Plant Sci.* <https://doi.org/10.4141/P03-099>
- Willcox, J.K., Catignani, G.L., Lazarus, S., 2003. Tomatoes and cardiovascular health. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 43, 1–18. <https://doi.org/10.1080/10408690390826437>
- Winans, K., Brodt, S., Kendall, A., 2020. Life cycle assessment of California processing tomato: an evaluation of the effects of evolving practices and technologies over a 10-year (2005–2015) timeframe. *Int. J. Life Cycle Assess.* 25, 538–547. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01688-6>
- WPTC, 2021. WPTC crop update as of 21 October 2021.
- Wu, J., Gamage, M., Vilku, K., Simons, L.K., Mawson, R., 2008. Effect of thermosonication on quality improvement of tomato juice. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 9, 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.07.007>
- Yoo, B., Rao, M. a., 1994. Effect of unimodal particle size and pulp content on rheological properties of tomato puree. *J. Texture Stud.* 25, 421–436. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1994.tb00772.x>
- Zegbe, J.A., Behboudian, M.H., Clothier, B., 2006. Responses of ‘Petopride’ processing tomato to partial rootzone drying at different phenological stages. *Irrig. Sci.* 24, 203–210. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0018-4>
- Zhao, S., Qin, Z., Zhang, R., Li, N., Liu, L., Yu, J., Xing, M., Qu, Y., 2021. The physical and chemical properties of hemp fiber prepared by alkaline pectinase-xylanase system. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-451112/v1>
- Zhu, Y., Shen, M., Sims, C.A., Marshall, M.R., House, L.A., Sarnoski, P.J., 2018. Consumer preference and willingness to pay for tomato juice. *Int. Food Agribus. Manag. Rev.* 21, 1167–1183. <https://doi.org/10.22434/IFAMR2017.0117>
- Zotarelli, L., Dukes, M.D., Scholberg, J.M.S., Muñoz-Carpena, R., Icerman, J., 2009. Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agric. Water Manag.* 96, 1247–1258. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.019>

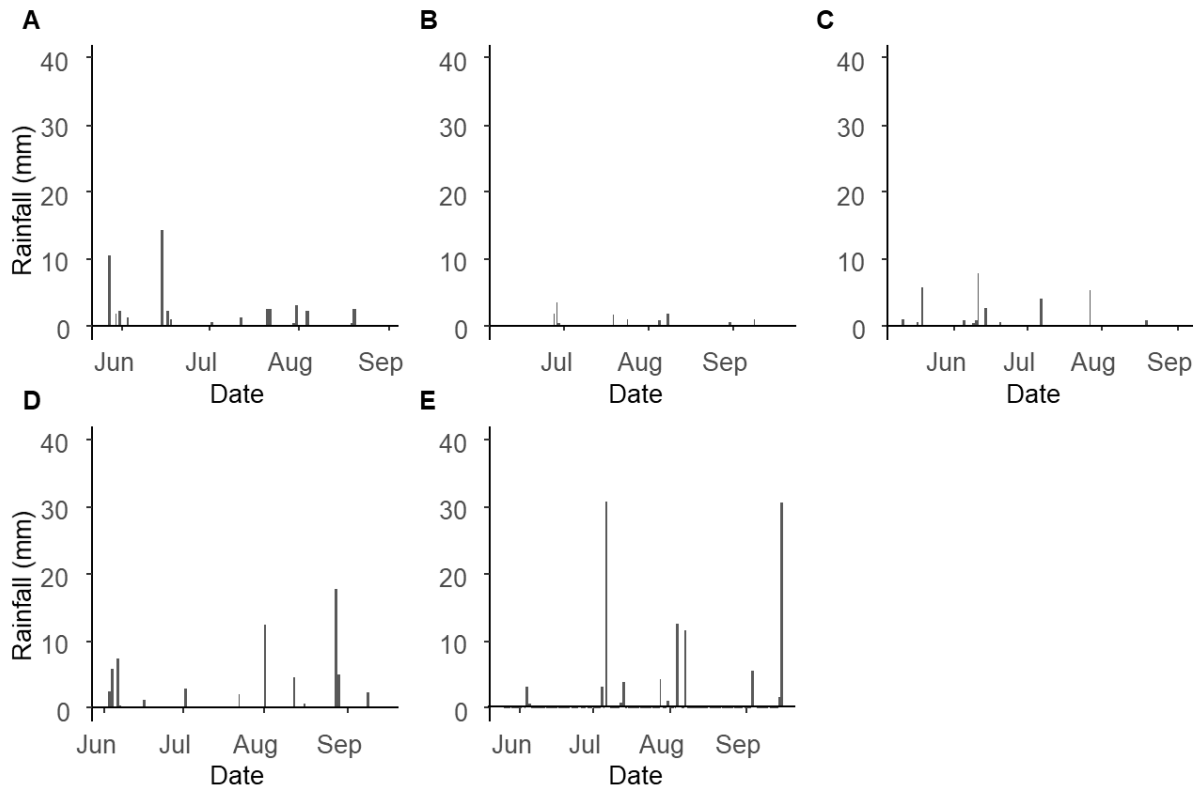
Annexes du chapitre IV



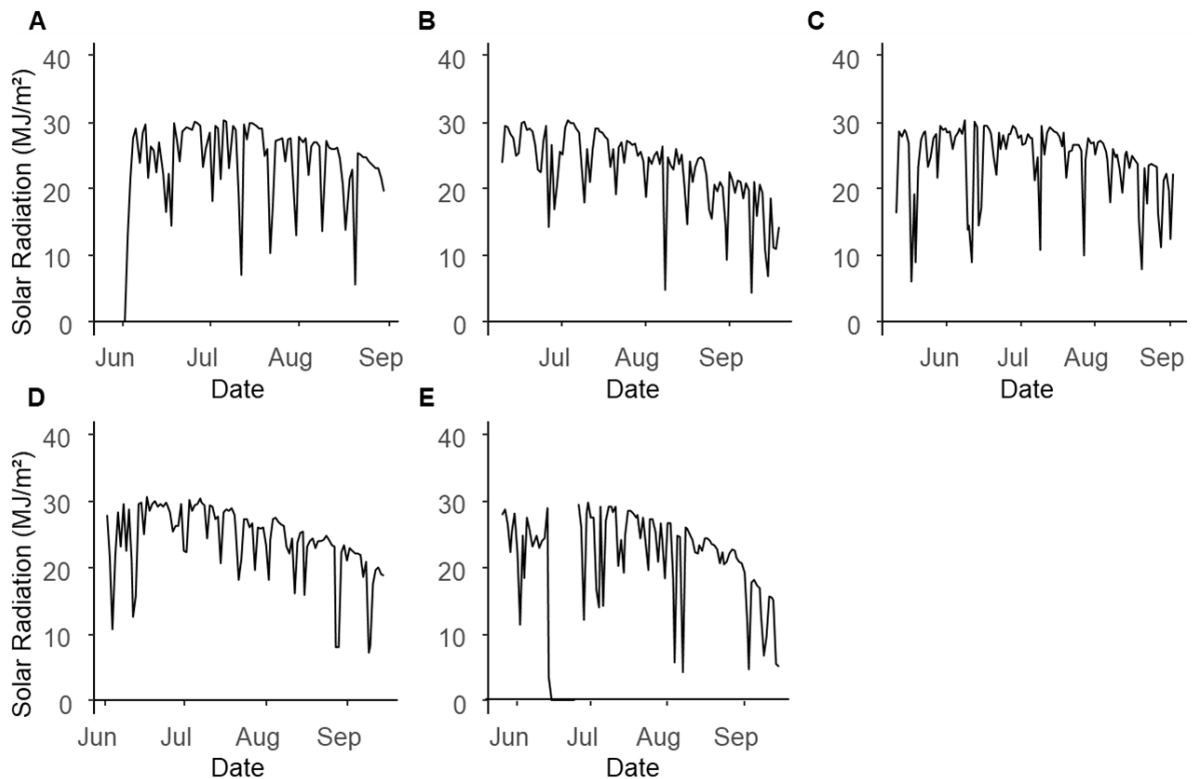
Supplementary material Figure S 1 : Variations of crop coefficient K_c during the culture. The different colours represent the 5 seasons: 2016 is in orange, 2017 in brown, 2019 in green, 2020 in blue and 2021 in purple.



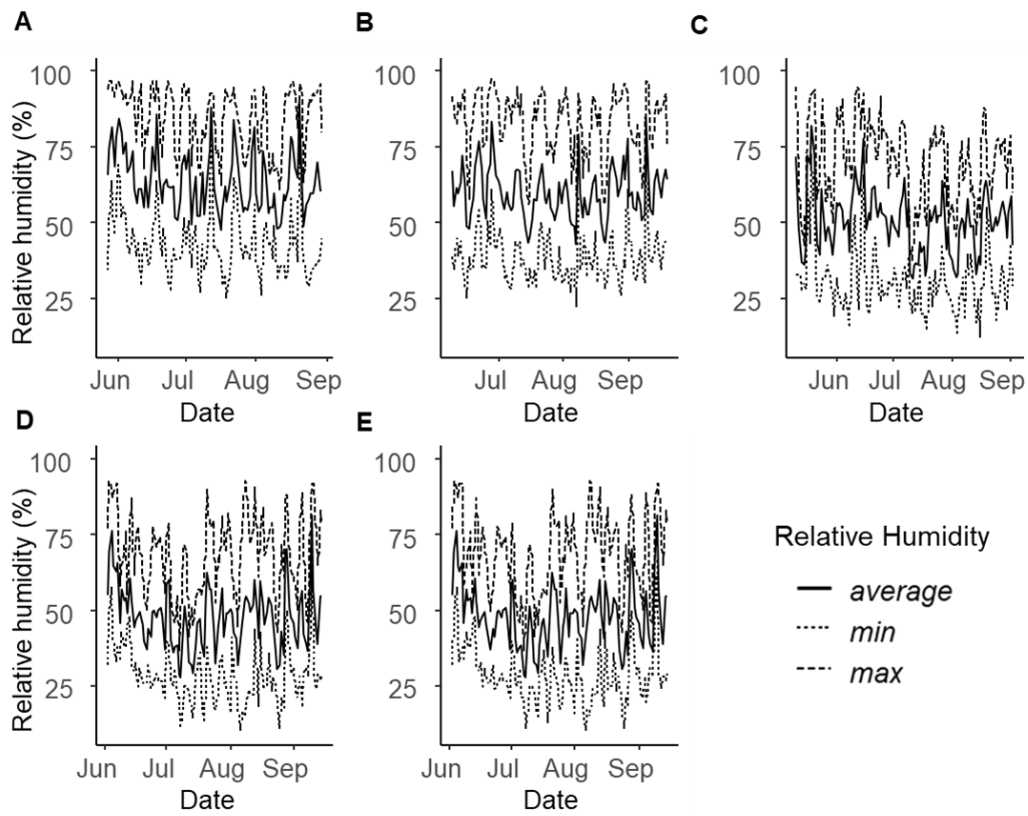
Supplementary material Figure S 2 : Daily air temperatures monitored in the open-field in 2016 (A), 2017 (B), 2019 (C), 2020 (D) and 2021 (E). Lines are average temperatures; dotted lines are minimum temperatures (min) and long dash lines are maximum temperatures (max).



Supplementary material Figure S 3: Rainfall recorded daily during the time-course of the open-field experiments in 2016 (A), 2017(B), 2019 (C), 2020 (D) and 2021 (E).



Supplementary material Figure S 4: Daily solar radiations during the experiments in 2016 (A), 2017 (B), 2019 (C), 2020 (D), 2021 (E)



Supplementary material Figure S 5: Variations in relative humidity in the field during the experiments in 2016 (A), 2017 (B), 2019 (C), 2020 (D) and 2021 (E).

Supplementary material table s 1 : Effects of water and nitrogen supply on tomato yields. WW and WD indicate control and water deficit irrigation. HN and LN indicate high and low nitrogen supply. Prod indicates the reference producer field. CY fb is the fresh commercial yields (g fresh fruit plant⁻¹), DMC is fruit dry matter content (g 100g⁻¹ fresh fruit), WUE is the water use efficiency based on dry yield (g of dry fruit L⁻¹), MF is the average mass of individual fruit (g), NF is the number of fruits per plant. P values are from ANOVA and letters from Tukey post-hoc test.

Year	Treatment	Terradou					H1311					Sailor					Lycobol						
		CY fb	DMC	WUE	MF	NF	CY fb	DMC	WUE	MF	NF	CY fb	DMC	WUE	MF	NF	CY fb	DMC	WUE	MF	NF		
2016	WW-HN	2,68	6,9 a	1,56 a	62	43	2,34	6,7 a	1,30 a	57	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	WW-LN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	WD-HN	2,76	7,3 b	2,17 b	65	42	2,35	7,2 b	1,81 b	60	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	WD-LN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PROD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	p value	0,649	0,010	<0,01	0,279	0,688	0,93	<0,001	0,001	0,24	0,76												
2017	WW-HN	2,16	6,5 a	0,66	62	45	1,42 b	6,2 a	0,42 a	57	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	WW-LN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	WD-HN	1,63	8,2 b	0,97	54	37	1,17 a	7,7 b	0,66 b	54	31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	WS-LN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PROD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	p value	0,107	<0,001	0,08	0,195	0,203	0,045	<0,001	<0,001	0,282	0,111												
2019	WW-HN	1,44 a	7,9	1,19	56	30 bc	1,21	7,5	1,06 b	53	25	0,99 a	6,8 a	0,78	51	21 ab	0,93 b	8,1	0,88 bc	63	17 bc		
	WW-LN	1,49 a	8,2	1,29	63	28 abc	0,98	8,0	1,05 b	48	21	0,97 a	7,2 abc	0,81	59	18 a	0,67 ab	8,1	0,63 ab	58	13 ab		
	WD-HN	1,07 a	8,4	1,13	56	23 ab	1,01	7,5	0,89 b	54	20	0,83 a	7,9 c	0,88	49	18 a	1,01 bc	7,4	1,01 c	62	17 bc		
	WD-LN	0,88 a	8,1	0,91	57	21 a	0,91	8,3	1,00 b	51	20	0,74 a	7,8 bc	0,77	51	16 a	0,41 a	8,3	0,45 a	53	9 a		
	PROD	2,195 b	7,3	0,78	66	35 c	1,15	7,5	0,42 a	56	25	1,84 b	7,0 ab	0,63	64	31 b	1,42 c	7,4	0,51 a	70	21 c		
	p value	0,001	0,072	0,099	0,139	0,003	0,183	0,160	0,001	0,311	0,100	0,001	0,002	0,470	0,150	0,006	0,001	0,119	0,001	0,102	<0,001		
2020	WW-HN	1,77 ab	6,6 ab	1,01 bc	63 b	30 a	1,13	6,0	0,58	59 b	21	1,71 b	5,8	0,86	59	31	1,52 ab	5,7 ab	0,75 abc	62 a	25 ab		
	WW-LN	1,22 a	6,4 ab	0,67 a	57 ab	24 a	1,10	5,6	0,54	52 ab	22	1,19 a	5,8	0,60	57	23	1,15 a	6,3 b	0,63 ab	60 a	20 ab		
	WD-HN	1,51 ab	7,5 b	1,31 c	48 a	33 ab	1,29	5,4	0,81	47 a	28	1,17 a	6,7	0,56	50	24	1,40 ab	6,6 b	1,08 c	53 a	26 b		
	WD-LN	1,33 a	7,3 b	1,11 c	56 ab	27 a	1,19	5,0	0,70	59 b	21	1,26 ab	6,8	0,99	57	23	1,20 a	6,6 b	0,92 bc	63 a	19 a		
	PROD	2,102 b	5,6 a	0,76 ab	59 b	42 b	1,63	5,1	0,53	60 b	29	1,78 b	5,9	0,69	62	31	1,80 b	4,6 a	0,53 a	74 b	26 ab		
	p value	0,006	<0,001	<0,001	0,011	0,003	0,118	0,414	0,165	0,005	0,090	0,030	0,279	0,296	0,079	0,068	0,006	0,001	0,004	0,001	0,020		
2021	WW-HN	2,41 bc	7,8 b	1,29 c	67	36 ab	2,03 b	6,7	0,93 b	67	30 b	2,67 c	6,4	1,16 ab	69 b	39 b	-	-	-	-	-		
	WW-LN	1,69 a	7,7 ab	0,89 b	69	25 a	1,28 a	7,2	0,36 a	62	11 a	1,49 a	6,7	0,68 ab	63 ab	24 a	-	-	-	-	-		
	WD-HN	2,07 ab	8,1 b	1,30 c	62	33 ab	1,81 ab	6,5	0,92 b	65	28 b	1,75 ab	6,4	0,87 b	67 b	26 a	-	-	-	-	-		
	WD-LN	1,98 ab	7,8 ab	1,19 c	68	29 a	1,32 a	6,9	0,71 ab	70	19 ab	1,24 a	6,6	0,63 ab	65 b	22 a	-	-	-	-	-		
	PROD	2,58 c	7,3 a	0,61 a	61	43 b	1,81 ab	6,4	0,37 a	67	27 b	2,29 bc	6,2	0,46 a	56 a	41 b	-	-	-	-	-		
	p value	0,001	<0,001	<0,001	0,273	0,008	0,006	0,110	0,003	0,399	0,005	<0,001	0,223	<0,001	0,006	0,001							

Supplementary material table s 2 : Effects of water supply on quality traits of fresh fruits and purees. WW and WD indicate control and water deficit irrigation RI is the refractive index ($^{\circ}$ Brix), TA is titratable acidity (mEq 100g⁻¹), Ly fb is translycopene content of fresh fruit (mg g⁻¹) Ly db is translycopene content of dry fruit (mg g⁻¹), PME is pectinmethylesterase activity (nKatal g⁻¹), PG is polygalacturonase activity (nKatal.g⁻¹), η 50 is puree apparent viscosity (mPa s) and DMC is puree dry matter content (g 100g⁻¹ fresh fruit). p values are from a Kruskal Wallis test and letters from a Dunnett pairwise comparison.

Year	Product	Irrigation	Terradou						H1311						Sailor						Lykobel						
			pH	RI	TA	Ly fb	PME	PG	pH	RI	TA	Ly fb	PME	PG	pH	RI	TA	Ly fb	PME	PG	pH	RI	TA	Ly fb	PME	PG	
2019	Fresh fruit	WW	4,4	6,8	6,6	-	2111	5,9	4,6 b	6,1	6,6	-	3421	9,5	4,3	5,0	6,2 b	-	-	-	4,5	6,0	5,5	-	-	-	
		WD	4,5	6,9	6,6	-	-	-	4,5 ab	6,3	7,3	-	-	-	4,5	6,4	5,7 ab	-	-	-	4,6	6,4	5,7	-	-	-	
		PROD	4,3	6,1	6,0	-	-	-	4,4 a	6,1	7,0	-	-	-	4,4	5,2	5,4 a	-	-	-	4,6	6,0	5,3	-	-	-	
		p value	0,074	0,115	0,236				0,048	0,651	0,108				0,074	0,077	0,039				0,059	0,550	0,491				
2020	Fresh fruit	WW	4,3	5,9	6,4	0,07 ab	2434	8,2	4,4 b	4,8	6,4	0,20	2597	7,2	4,3	5,0	5,6	0,10	2780	5,4	4,4	5,0 ab	4,9	0,23 ab	3025	6,0	
		WD	4,4	6,9	7,3	0,10 b	-	-	4,2 a	5,5	7,3	0,18	-	-	4,2	5,9	6,6	0,11	-	-	4,5	6,1 b	5,2	0,29 b	-	-	
		PROD	4,3	5,8	7,3	0,06 a	-	-	4,3 ab	5,0	6,3	0,22	-	-	4,3	5,3	5,5	0,07	-	-	4,4	4,8 a	4,9	0,20 a	-	-	
		p value	0,156	0,064	0,118	0,027			0,048	0,182	0,066	0,113			0,670	0,069	0,066	0,051			0,059	0,050	0,202	0,027			
2021	Fresh fruit	WW	4,3	6,8 ab	7,8	-	-	-	4,3	5,5	7,4	-	-	-	4,3	5,5	6,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		WD	4,3	7,3 b	7,8	-	-	-	4,3	5,6	7,3	-	-	-	4,4	5,7	6,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		PROD	4,3	6,4 a	7,7	-	-	-	4,3	5,3	7,1	-	-	-	4,3	5,2	6,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		p value	0,64	0,04	0,84				0,066	0,136	0,329				0,41	0,098	0,43										
year effect	Fresh fruit	2019	4,4 b	6,6	6,4 a				4,5 b	6,1 b	7,0 ab				4,4 b	5,6	5,8 a				4,6 b	6,1 b	5,5 b				
		2020	4,3 ab	6,2	7,0 ab				4,3 a	5,1 a	6,7 a				4,3 a	5,4	5,9 ab				4,4 a	5,3 a	5,0 a				
		2021	4,3 a	6,8	7,8 b				4,3 a	5,5 ab	7,3 b				4,3 ab	5,5	6,5 b										
		p value	0,013	0,082	<0,001				<0,001	<0,001	0,049				0,039	0,637	0,022				0,004	0,019	0,01				

Year	Process	Irrigation	pH	RI	TA	Ly fb	η50	DMC	pH	RI	TA	Ly fb	η50	DMC	pH	RI	TA	Ly fb	η50	DMC	pH	RI	TA	Ly fb	η50	DMC
2019	CB	WW	4,5	7,2	6,3	-	116	8,0	4,4 ab	6,8	6,7	-	450	7,9	4,4	5,9	5,9	-	205	6,9	4,5	6,3	5,8	-	215	7,2
		WD	4,5	7,4	5,7	-	130	8,1	4,4 b	7,1	6,9	-	428	8,3	4,5	6,9	5,5	-	245	7,6	4,5	6,9	5,6	-	236	7,8
		PROD	4,4	6,3	5,2	-	110	7,3	4,3 a	6,7	5,8	-	312	7,7	4,4	5,8	4,9	-	125	6,8	4,4	6,5	5,3	-	182	7,2
	p value	0,393	0,077	0,058		0,393	0,113	0,046	0,578	0,099		0,39	3	0,430	0,249	0,066	0,177		0,051	0,066	0,067	0,200	0,393		0,393	0,193
2019	HB	WW	4,5	7,3	5,9	-	282	8,2	5	7	6	-	552	7,9	4,4	5,7	6,1	-	295	6,6	4,7	6,3	4,9	-	337	7,1
		WD	4,4	7,4	6,2	-	268	8,3	4	7	6	-	488	8,0	4,4	6,7	6,0	-	275	7,5	4,7	7,0	4,6	-	389	8,0
		PROD	4,3	6,7	5,9	-	208	7,2	4	6	7	-	398	7,6	4,4	6,1	5,0	-	258	7,0	4,5	6,3	5,2	-	235	7,1
	p value	0,172	0,288	0,875		0,148	0,113	0,066	0,502	0,252		0,14	8	0,561	0,957	0,078	0,113		0,670	0,113	0,390	0,233	0,670		0,058	0,118
2020	CB	WW	4,3	5,9	5,7	0,05	97	6,2	4,3	5,0	6,2	0,11	185	5,3	4,4	4,9	5,0	0,12	220	5,9	4,3	4,8	4,7	0,18	116	5,4
		WD	4,3	6,7	6,5	0,07	81	6,8	4,3	6,1	6,8	0,25	221	6,5	4,4	5,5	5,6	0,09	189	6,6	4,4	5,6	4,8	0,18	90	6,1
		PROD	4,4	6,0	6,8	0,05	96	6,4	4,4	5,5	5,8	0,27	160	6,0	4,4	5,3	4,8	0,08	187	6,1	4,5	5,2	4,7	0,24	124	5,8
	p value	0,387	0,059	0,105	0,066	0,252	0,193	0,103	0,090	0,099	0,066	0	0,113	0,107	0,090	0,252	0,061	0,177	0,148	0,166	0,094	0,875	0,193	0,288	0,202	
2020	HB	WW	4,3	5,6	5,8	0,04	215	6,2	4,3	4,9	5,6	0,09	264	5,8	4,4	5,1	5,5	0,21	133	5,8	4,3	4,8	4,7	0,17	105	5,2
		WD	4,4	6,6	6,3	0,06	138	7,1	4,5	5,7	5,6	0,14	354	6,5	4,3	5,7	5,6	0,10	107	6,3	4,5	5,6	4,9	0,18	115	6,3
		PROD	4,4	5,9	6,5	0,06	153	6,5	4,5	5,3	5,8	0,19	242	6,4	4,4	5,4	5,0	0,08	112	6,0	4,5	5,2	4,9	0,18	206	6,0
	p value	0,246	0,059	0,193	0,061	0,061	0,113	0,066	0,255	0,925	0,051	0,06	1	0,301	0,618	0,223	0,161	0,670	0,670	0,066	0,054	0,159	0,864	0,491	0,061	0,061
2021	CB	WW	4,3	6,2	6,6	-	121	6,8	4,3	5,4	6,5	-	225	6,2	4,3	5,2	5,9	-	99	6,0	-	-	-	-	-	-
		WD	4,3	6,7	6,5	-	115	7,4	4,3	5,6	6,8	-	180	6,5	4,3	5,4	5,8	-	113	7,0	-	-	-	-	-	-
		PROD	4,4	5,7	6,3	-	80	6,2	4,3	5,1	6,3	-	170	6,2	4,3	5,1	5,7	-	92	5,9	-	-	-	-	-	-
	p value	0,238	0,113	0,733		0,066	0,051	0,731	0,282	0,957		0,67	0	0,790	0,164	0,141	0,904		0,751	0,202						
2021	HB	WW	4,3	5,9	6,6	-	204	6,9	4,4	5,2	6,5	-	300	6,6	4,360	5,100	5,523	-	224	6,0	-	-	-	-	-	-
		WD	4,3	6,9	6,8	-	198	7,9	4,4	5,5	6,5	-	243	6,7	4,387	5,367	5,900	-	238	5,3	-	-	-	-	-	-
		PROD	4,4	5,9	6,3	-	129	6,7	4,4	4,8	5,9	-	264	6,1	4,507	5,167	5,383	-	221	6,0	-	-	-	-	-	-
	p value	0,807	0,065	0,088		0,051	0,066	0,572	0,054	0,393		0,28	8	0,430	0,174	0,172	0,252		0,587	0,986						

year effect	CB	2019	4,5 b	7,0 b	5,8 a	-	118 b	7,8 b	4,4 b	6,8 b	6,5	-	397 b	7,9 b	4,5 b	6,2 b	5,4	-	192 b	7,1 b	4,5 b	6,2 b	5,4	-	192 b	7,1 b
		2020	4,3 a	6,2 a	6,3 ab	-	91 a	6,5 a	4,3 a	5,5 a	6,3	-	188 a	5,9 a	4,4 ab	5,4 a	5,3	-	117 ab	6,0 a	4,4 a	5,4 a	5,3	-	117 a	6,0 a
		2021	4,3 a	6,2 ab	6,5 b	-	105 ab	6,8 a	4,3 a	5,4 a	6,5	-	192 a	6,3 a	4,3 a	5,3 a	5,8	-	104 a	6,3 a				-		
		p value	0,006	0,023	0,026		0,036	0,001	0,009	<0,001	0,481		0,003	<0,001	0,001	0,001	0,142		0,005	0,001	0,010	0,004	0,825		0,009	<0,001
year effect	HB	2019	4,4	7,1 b	6,0	-	252 b	7,9 b	4,4	6,7 b	6,2	-	479 b	7,8 b	4,4	6,2 b	5,7	-	276 b	7,1 b	4,4	6,2 b	5,7	-	276 b	7,1 b
		2020	4,4	6,0 a	6,2	-	169 a	6,6 a	4,4	5,3 a	5,7	-	286 a	6,2 a	4,4	5,2 a	5,1	-	199 a	6,2 a	4,4	5,2 a	5,1	-	199 a	6,2 a
		2021	4,3	6,3 a	6,5	-	177 a	7,1 ab	4,4	5,1 a	6,3	-	269 a	6,4 a	4,4	5,2 a	5,6	-	227 ab	5,8 a				-		
		p value	0,276	0,004	0,092		0,004	0,002	0,392	<0,001	0,051		<0,001	<0,001	0,584	0,001	0,110		0,012	<0,001	0,791	0,002	0,070		0,012	0,003

Annexes du chapitre V

Year	Variety	Nitrogen	Process	η_{50}^a (mPa.s)	K (Pa.s ⁿ)	n	FS (Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)	δ (°)
2019	H1311	HN	CB	1235	22,0	0,259	26	653	177	15,15
			HB	2280	43,8	0,234	57	1178	320	15,20
		LN	CB	1165	20,0	0,261	24	622	165	14,87
			HB	2244	43,2	0,258	53	1147	336	16,32
	Terradou	HN	CB	617	12,5	0,205	13	302	84	15,55
			HB	912	28,7	0,226	36	838	242	16,11
		LN	CB	754	17,6	0,170	16	421	112	14,94
			HB	1400	16,2	0,252	20	472	136	16,06
2020	H1311	HN	CB	1930	41,6	0,238	44	1000	285	15,98
			HB	2484	85,8	0,200	83	2082	600	17,46
	Lycobol	HN	CB	1094	23,3	0,208	22	550	157	15,93
			HB	1479	29,8	0,220	39	948	270	15,90
	Sailor	HN	CB	1883	37,7	0,237	45	1104	316	15,28
			HB	3489	61,2	0,277	100	2471	777	16,49
	Terradou	HN	CB	1175	27,0	0,197	27	655	179	15,90
			HB	2388	47,2	0,257	57	1556	461	16,07

Supplementary material table s 1 : Rheological parameters evaluated on tomato purees processed in a pilot plant in 2019 and 2020. HN is High Nitrogen fertilisation in the field, LN is Low Nitrogen fertilization in the field. CB and HB are respectively Cold Break and Hot Break processes. η_{50} is the apparent viscosity measured for a shear rate of 50 s⁻¹, K is the coefficient of consistency, n is the flow behaviour index, FS is the Flow Stress, G' is the storage modulus, G'' is the loss modulus and δ is the phase shift.

Year	Variety	Nitrogen	Process	Puree										Serum	
				η_{50}	DMC	SSC	TA	pH	AIS	proportion of small particles	proportion of large particles	pulp volume fraction	pulp DMC fraction	η_{100} serum	DMC serum
				(mPa s)	(g/100g)	(*Brix)	(mEq/100g)		(g/100g DMC)	(% of puree DMC)	(% of puree DMC)	(% of puree volume)	(% of puree DMC)	(mPa s)	(g/100g)
2019	H1311	HN	CB	1235	14,8	14,7	15,1	4,3	18,5	6,3	16,6	30,2	35,0	1,68	14,1
			HB	2280	15,8	14,5	15,9	4,3	22,3	5,4	18,9	25,8	39,4	1,62	14,6
	LN	CB	1165	14,7	14,6	14,5	4,4	16,7	6,3	17,0	28,4	34,7	1,61	14,2	
		HB	2244	16,1	14,4	14,3	4,3	19,6	4,6	23,0	27,3	41,3	1,62	14,2	
	Terradou	HN	CB	617	15,5	15,5	13,5	4,5	13,7	4,9	12,3	25,6	26,3	1,63	15,7
			HB	912	16,5	15,3	14,4	4,4	17,8	4,3	19,0	21,8	34,9	2,49	15,5
		LN	CB	754	16,5	16,9	15,2	4,4	12,9	4,5	14,2	23,3	26,5	1,77	16,9
			HB	1400	15,4	14,7	13,3	4,4	17,8	4,8	13,6	20,7	30,3	2,17	15,0
2020	H1311	HN	CB	1930	15,7	15,3	17,3	4,2	16,7	4,3	20,4	27,3	39,6	1,70	14,6
			HB	2484	16,8	15,1	17,3	4,2	25,0	2,9	21,0	29,2	43,0	2,70	13,6
	Lycobol	HN	CB	1094	15,8	15,4	13,9	4,3	16,1	4,5	17,8	22,3	32,2	1,71	15,0
			HB	1479	16,4	15,2	14,1	4,3	16,5	5,1	18,6	25,8	37,2	1,91	14,5
	Sailor	HN	CB	1883	17,5	17,5	16,0	4,4	17,8	3,8	15,1	24,1	37,3	1,73	15,9
			HB	3489	17,2	15,4	14,4	4,4	24,0	2,2	28,1	33,3	41,9	2,16	14,1
	Terradou	HN	CB	1175	17,1	17,3	15,8	4,4	13,6	3,7	13,2	21,0	29,4	1,70	16,2
			HB	2388	17,3	16,2	15,2	4,3	19,0	1,8	20,8	22,4	33,6	2,10	14,9
	Correlation to puree apparent viscosity				0,45	<0,0001	0,35	<0,0001	0,84	<0,0001	0,83	0,54	0,80	0,30	<0,0001

Supplementary material table s 2 : biochemical and structural traits of tomato puree and serum processed in pilot plant and their correlation to the puree apparent viscosity. HN is High Nitrogen fertilisation in the field, LN is Low Nitrogen fertilization in the field. CB and HB are respectively Cold Break and Hot Break processes. DMC refers to dry matter content, SSC refers to soluble solid content, TA refers to titratable acidity, AIS refers to alcohol insoluble solids, η_{100} refers to the apparent viscosity for a shear rate of 100s^{-1} . r^2 is the coefficient of correlation for the linear correlation between the apparent viscosity and each biochemical and structural trait.

year	variety	Nitrogen	Fresh fruit			CB puree			HB puree	
			DMC (g 100 g ⁻¹)	SSC (°Brix)	η_{50}^a (mPa s)	DMC (g 100 g ⁻¹)	SSC (°Brix)	η_{50}^a (mPa s)	DMC (g 100 g ⁻¹)	SSC (°Brix)
2019	H1311	HN	7,52	6,07	1235	14,8	14,7	2280	15,8	14,5
	H1311	LN	7,55	5,43	1165	14,7	14,6	2244	16,1	14,4
	Terradou	HN	7,91	6,83	617	15,5	15,5	912	16,5	15,3
	Terradou	LN	8,24	6,80	754	16,5	16,9	1400	15,4	14,7
2020	H1311	HN	5,95	4,80	1930	15,7	15,3	2484	16,8	15,1
	Lycobol	HN	5,69	5,00	2484	16,8	15,1	1479	16,4	15,2
	Sailor	HN	5,79	5,00	1883	17,5	17,5	3489	17,2	15,4
	Terradou	HN	6,59	5,87	1175	17,1	17,3	2388	17,3	16,2
Correlation to fresh TSS			1,00	0,89	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<u>Correlation to fresh DMC</u>			<u>0,89</u>	<u>1,00</u>	<u><0,0001</u>	<u><0,0001</u>	<u>0,13</u>	<u><0,0001</u>	<u><0,0001</u>	<u><0,0001</u>

Supplementary material table s 3 : Fresh tomato fruits dry mater content (DMC) and soluble solid content (SSC) and their correlations to the CB and HB corresponding purees viscosity (η_{50}), DMC and SSC. Correlation is the value of the coefficient r^2 for linear correlation.

test		PLS*	PLS-DA**	PLS-DA**
variable explicated		η_{50}	Process	Variety
significance	R ² X	0,651	0,571	0,88
	R ² Y	0,866	0,763	0,974
		VIP score	VIP score	VIP score
Variables	puree DMC (g/100g fresh weight)	0,854	0,653	0,754
	puree SSC (°Brix)	0,456	0,880	1,058
	Titratable Acidity (mEq/100g)	0,603	1,019	0,784
	pH	0,794	0,788	1,044
	serum viscosity (mPa.s)	0,629	1,297	0,638
	serum DMC (g/100g fresh weight)	0,992	0,925	1,247
	AIS (% of puree DMC)	1,408	1,303	0,942
	proportion of small particles	1,081	0,700	0,729
	proportion of large particles	1,395	1,123	0,916
	pulp volume fraction (%)	0,910	1,038	1,354
	pulp DMC fraction (%)	1,328	1,038	1,246

* Test conducted on the purees from H1311 Terradou Sailor and Lycobol varieties cultivated in 2019 and 2020 under HN and LN fertilization (16 purees)

** Test conducted on purees from Terradou and H1311 varieties from 2019 and 2020 under HN and LN fertilization (12 purees)

Supplementary material table s 4 : Table of VIP score for PLS and PLS-DA conducted on purees. PLS are Partial Least Square, PLS-DA are Partial Least Square Discriminant Analysis. η_{50} is the puree viscosity at 50 s⁻¹. Process is CB or HB, Variety is H1311 or Terradou. DMC refers to dry matter content, SSC refers to soluble solid content and AIS refers to alcohol insoluble solids. For each analysis the three highest VIP are in bold letters.

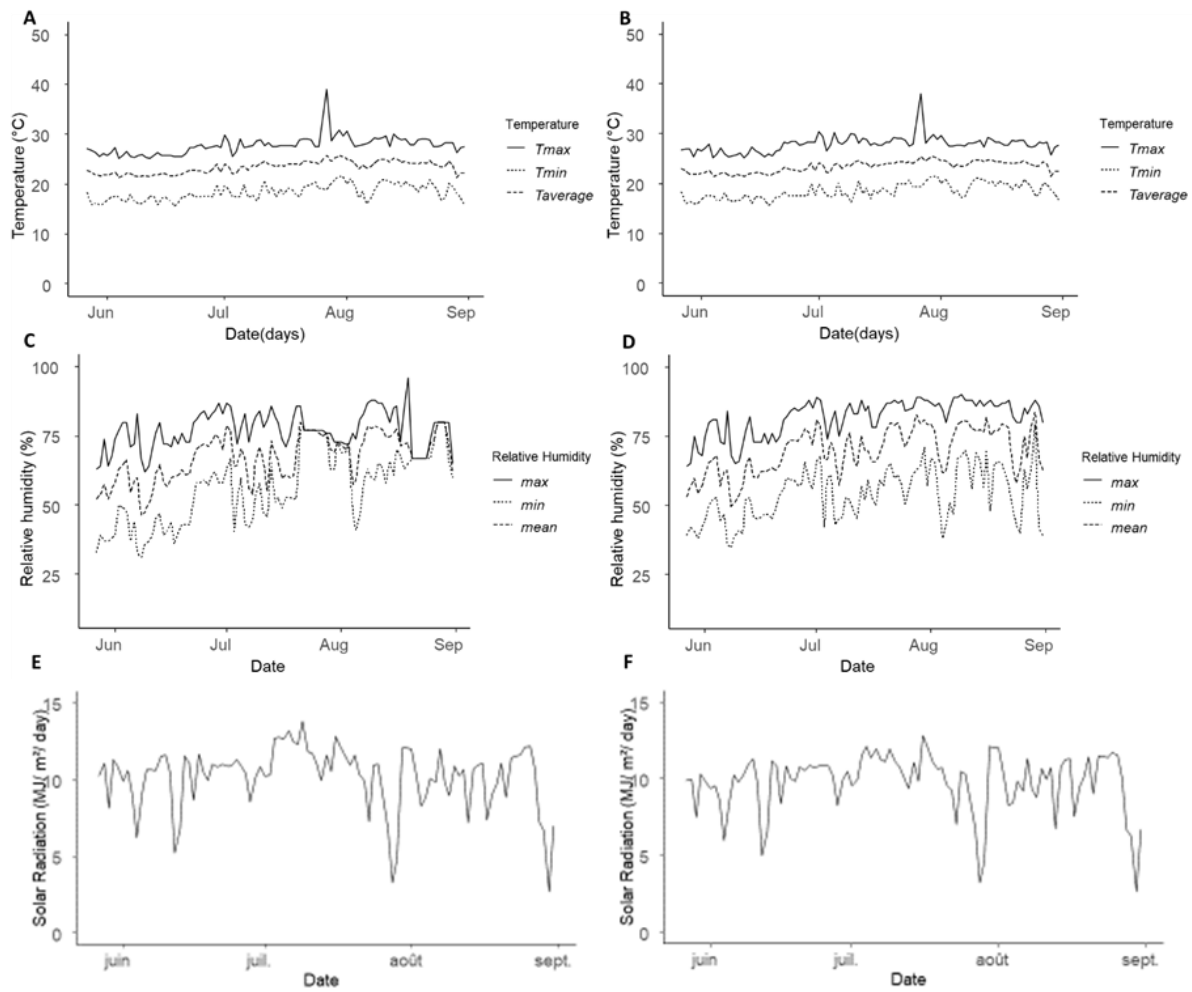
Year	Variety	Nitrogen	AIS yield	rha	fuc	ara	xyl	man	gal	nc glu	c glu	galA	meoh	DM	R1	R2	R3	R4	PME activity	PG activity
			(% of DMC)	(mg g ⁻¹ of AIS)	(mg g ⁻¹ of AIS)	(mg g ⁻¹ of AIS)	(mg g ⁻¹ of AIS)	(mg g ⁻¹ of AIS)	(mg g ⁻¹ of AIS)	(mg g ⁻¹ of AIS)	(mg g ⁻¹ of AIS)	(mg g ⁻¹ of AIS)	(mg g ⁻¹ of AIS)	(mg g ⁻¹ of AIS)	(%)	(Rha+Ara+Gal)	(Ara+Gal)/Rha	Gal A/Rha	Ara/Gal	(nkatal g ⁻¹)
2019	Terradou	LN	23,7	7,1	<d.l.	15,6	32,8	34,0	22,0	10,8	179,1	227,3	8,6	20,0	4,3	5,2	26,5	0,9	2305,0	6,2
2019	Terradou	HN	21,1	7,4	<d.l.	15,1	30,0	36,9	20,1	8,7	145,0	251,8	10,8	23,8	5,0	4,7	28,4	0,9	2111,0	5,9
2019	h1311	LN	34,7	7,7	<d.l.	15,1	31,8	36,2	24,6	12,4	185,6	322,5	8,6	16,3	5,8	5,1	35,3	0,8	3184,0	6,2
2019	h1311	HN	27,6	7,1	<d.l.	16,9	30,5	42,2	23,4	8,8	150,3	304,1	7,2	12,9	5,4	5,7	36,7	0,9	3420,0	9,5
2020	Terradou	HN	21,3	6,8	<d.l.	12,4	26,6	29,5	19,9	7,8	134,9	284,5	10,7	21,3	6,1	4,7	34,9	0,8	2433,0	7,8
2020	h1311	HN	31,9	5,8	<d.l.	10,5	24,4	24,3	17,8	9,1	125,8	359,5	13,1	20,6	9,0	4,8	51,2	0,7	2597,0	7,2

Supplementary material table s 5 : Composition of Alcohol Insoluble Solids from fresh fruits and enzymatic activity. Rha refers to rhamnose, fuc refers to fucose, ara to arabinose, xyl to xylose, man to mannose, gal to galactose, glu to total glucose, nc glu to non-cellulosic glucose, c glu to cellulosic glucose, gal A to galacturonic acid, meoh to methanol, DM to degree of methylation. PME is pectin methylesterase, PG is polygalacturonase.

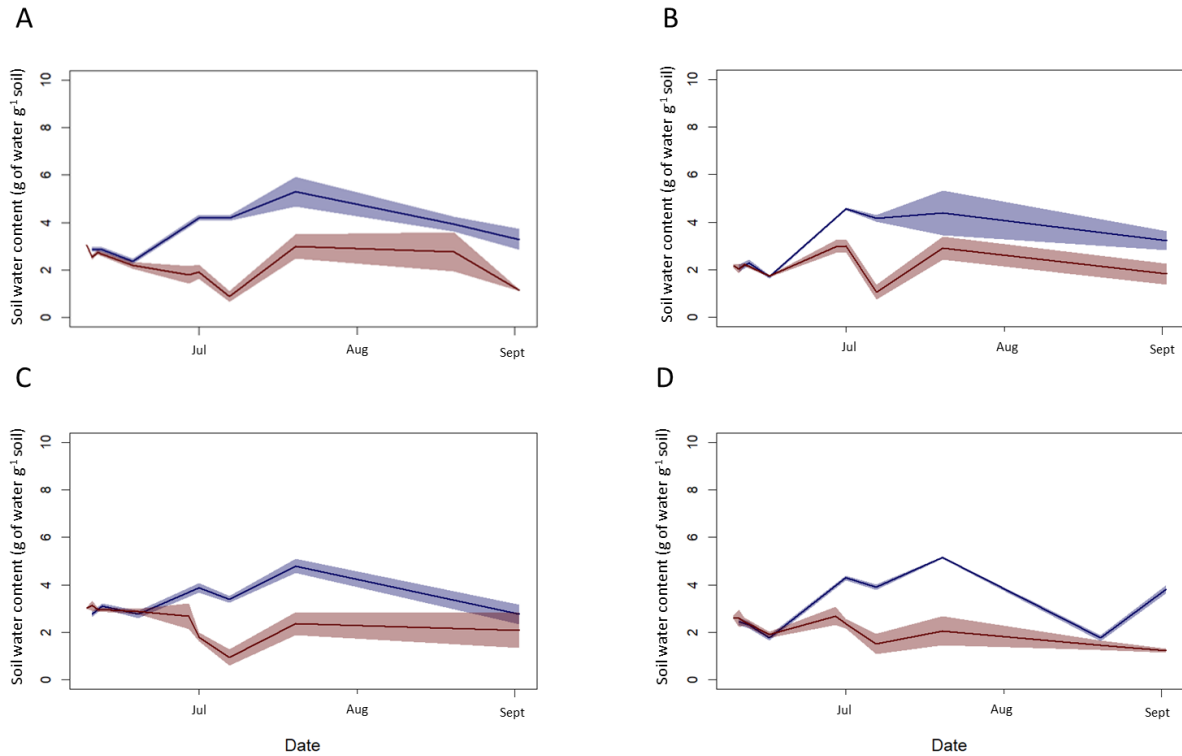
Year	Variety	Nitrogen	Process	rha (mg.g ⁻¹ of AIS)	fuc (mg.g ⁻¹ of AIS)	ara (mg.g ⁻¹ of AIS)	xyl (mg.g ⁻¹ of AIS)	man (mg.g ⁻¹ of AIS)	gal (mg.g ⁻¹ of AIS)	nc glu (mg.g ⁻¹ of AIS)	c glu (mg.g ⁻¹ of AIS)	galA (mg.g ⁻¹ of AIS)	meoh (mg.g ⁻¹ of AIS)	DM (%)	R1	R2	R3	R4
2019	Terradou	LN	CB	5,2	0,0	16,6	38,0	29,1	33,1	22,8	114,6	182,4	0,7	2,3	2,8	9,2	29,0	0,6
2019	Terradou	LN	HB	4,0	0,2	12,7	29,6	24,1	28,1	23,5	92,4	235,1	4,2	9,9	4,5	9,9	48,9	0,6
2019	Terradou	HN	CB	5,6	0,4	15,3	36,3	30,3	33,5	21,5	133,3	209,0	0,6	1,7	3,3	8,5	31,1	0,6
2019	Terradou	HN	HB	4,7	0,0	14,9	31,0	23,7	28,5	25,2	95,8	212,4	5,5	14,1	3,8	9,0	37,4	0,6
2019	h1311	LN	CB	11,5	0,0	21,7	49,3	42,7	40,8	12,6	251,4	196,8	0,8	2,1	2,3	5,3	14,2	0,7
2019	h1311	LN	HB	10,5	0,0	20,0	44,6	39,8	40,0	15,7	221,9	235,6	5,2	12,2	2,8	5,5	18,6	0,6
2019	h1311	HN	CB	4,7	0,2	13,4	30,5	26,2	25,6	19,4	93,1	217,7	0,9	2,1	4,2	8,0	38,2	0,6
2019	h1311	HN	HB	4,8	0,0	12,6	28,2	24,3	24,1	12,7	99,2	254,5	1,1	2,4	5,2	7,5	44,4	0,6
2020	Terradou	HN	CB	10,3	1,7	20,7	57,0	38,9	34,8	19,2	181,5	184,9	0,6	1,7	2,4	5,3	14,9	0,7
2020	Terradou	HN	HB	7,6	1,8	16,2	43,4	32,3	30,1	15,3	138,7	266,4	4,4	9,0	4,2	6,0	29,2	0,7
2020	h1311	HN	CB	7,0	2,4	18,7	50,8	38,7	36,1	12,9	157,7	134,0	0,4	1,8	1,8	7,5	15,8	0,6
2020	h1311	HN	HB	8,5	1,3	14,6	36,6	31,7	31,6	12,0	157,6	156,3	6,4	22,5	2,4	5,2	15,2	0,6

Supplementary material table s 6 : Composition of Alcohol Insoluble Solids from tomato purees processed in pilot plant. Rha refers to rhamnose, fuc refers to fucose, ara to arabinose, xyl to xylose, man to mannose, gal to galactose, glu to total glucose, nc glu to non-cellulosic glucose, c glu to cellulosic glucose, gal A to galacturonic acid, meoh to methanol, DM to degree of methylation.

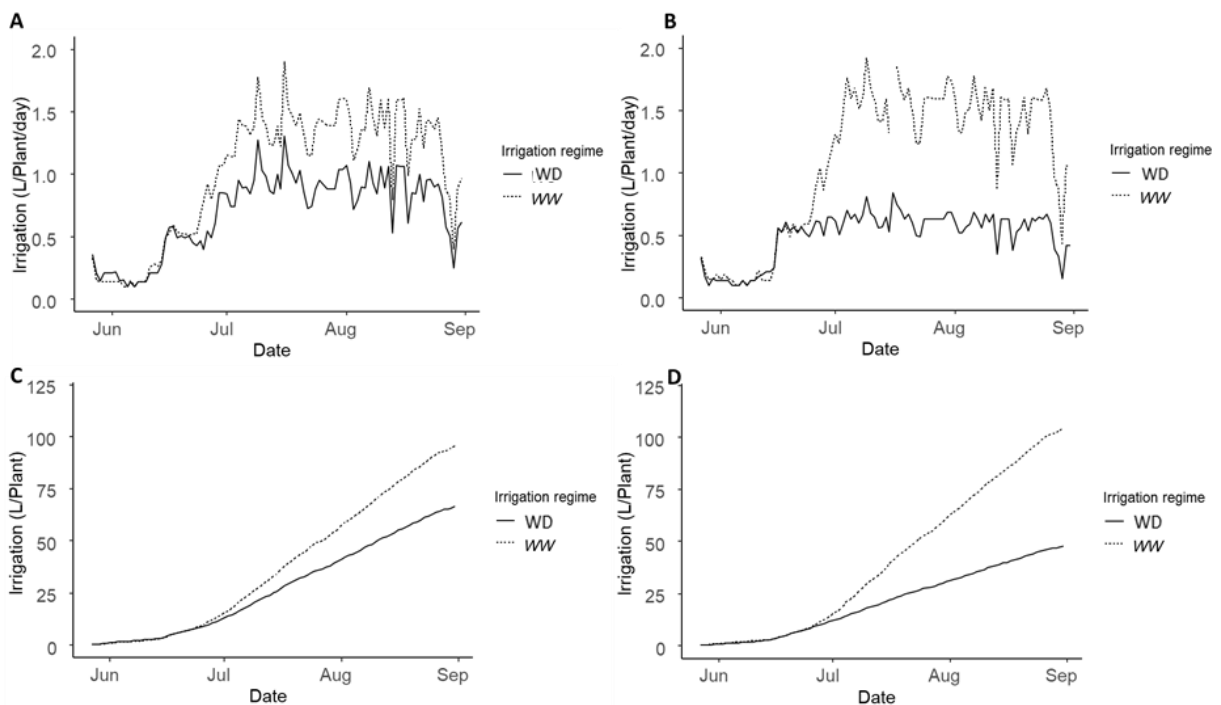
Annexes du chapitre VI



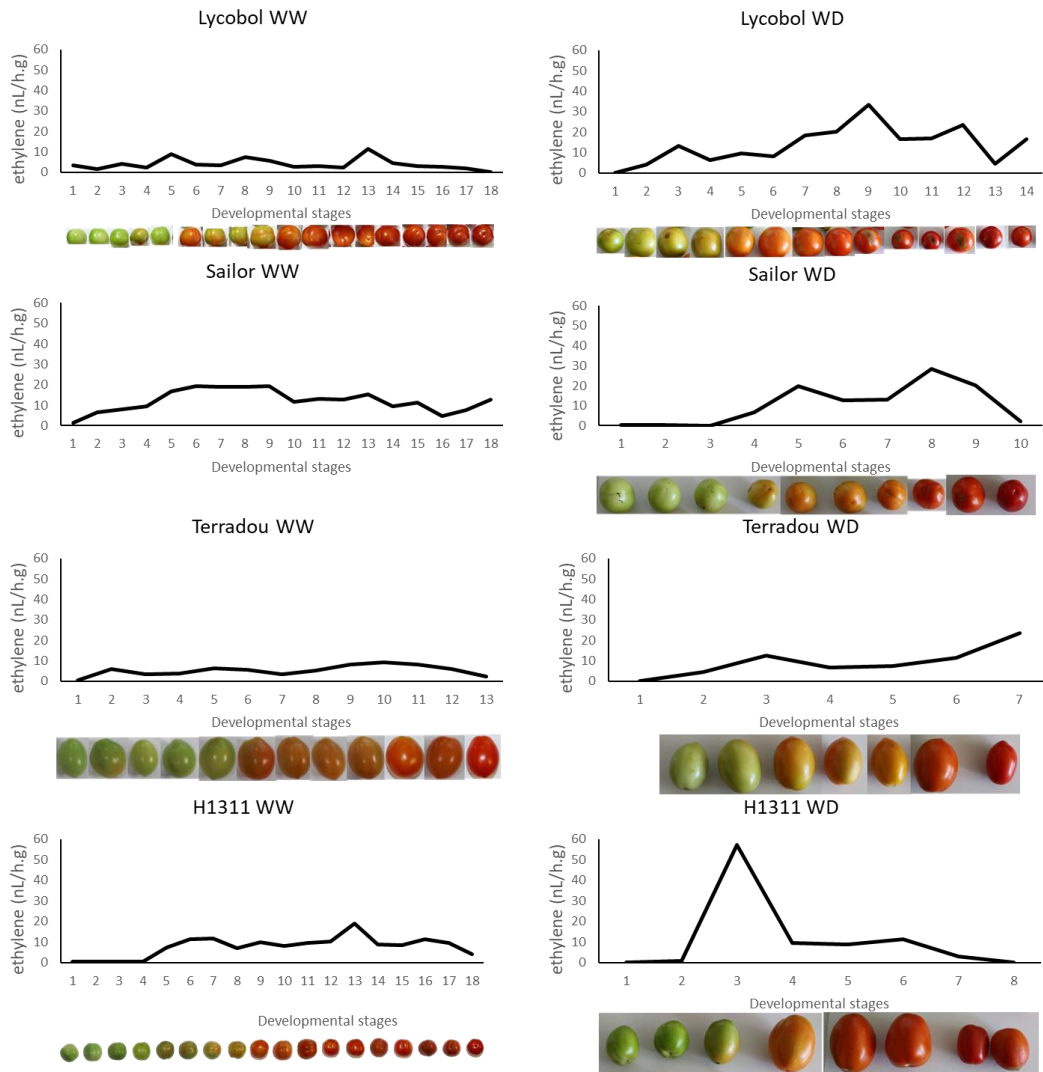
Supplementary material figure S 1 : Climate data in the two compartments of the greenhouse. Daily temperatures in compartment 1 (A) and 2 (B), daily relative humidity in compartment 1 (C) and 2 (D) and solar radiation in compartment 1 (E) and 2 (F).



Supplementary material figure S2 : Evolution of soil water content for well- watered (blue line) and WD (red line) plants. Lines are the mean values and colored areas the standard error of mean. A : H1311, B : Terradou, C : Lycobol, D : Sailor



Supplementary material figure S3 : Water supply of WW and WD plants in the greenhouse. Daily irrigation in compartment 1 (A) and 2 (B) and cumulative irrigation of all the experiment in compartment 1 (C) and 2 (D). Dotted lines are WW and lines are WD plants.



Supplementary material figure S 6 : Ethylene release from green stage to red ripe stage, according to variety and water regime. For each variety 7 to 18 developmental stages were defined according to the fruit color. Photos of each fruit are presented along the abscissa axis, and numeration is arbitrary. The ethylene release was measured on series of fruits to link color to ethylene peak and visually determine the 2 stages of fruits harvested (not fully ripe and ripe).