

Memo Sun'Agri Arboriculture



Pommiers (à La Pugère, 13) sous un dispositif agrivoltaïque dynamique de Sun'Agri, source interne

Synthèse générale

Le rapport du GIEC dresse un tableau très **alarmant** des conséquences du **changement climatique**, notamment la multiplication des événements climatiques extrêmes. D'après une revue publiée dans les Comptes-rendus de l'Académie américaine des sciences (PNAS), les récoltes de fruits et légumes pourraient être diminuées de plus de 30% en moyenne si le réchauffement climatique se poursuit à son rythme actuel. Dans le contexte actuel de changement climatique, certaines **adaptations** sont donc nécessaires pour maintenir la production de certains arbres fruitiers dans les zones actuellement productrices.

L'objet de ce mémo est de synthétiser les résultats obtenus sur l'ensemble des dispositifs pilotés par Sun'Agri et d'actualiser les observations faites sur 2019-2020.

L'agrivoltaïsme dynamique est une **protection efficace des arbres fruitiers contre les aléas climatiques**. En effet, face au gel, la structure agrivoltaïque permet une double protection en diminuant les pertes par rayonnement grâce à la couverture des panneaux et en retardant la phénologie ce qui diminue la sensibilité des organes au moment des épisodes de gel. **Les comptages des fleurs gelées sur nos dispositifs de la Pugère (13) en avril 2021 et d'Etoile sur Rhône (26) en mars 2021 confirment une diminution des dégâts sous agrivoltaïsme** en comparaison de la zone témoin. En ce qui concerne les vagues de chaleur, la solution est également efficace. En **réduisant la température maximale des feuilles et en limitant les rayonnements excessifs**, l'agrivoltaïsme permet de limiter les brûlures sur feuilles et de maintenir la croissance des fruits lors des vagues de chaleur. Les **quantifications du jaunissement et de chute des feuilles** lors de l'été 2022 ont **confirmé ce bénéfice**.

La combinaison de la hausse des températures et de la baisse de fréquence des précipitations en été aura également pour conséquence une sécheresse des sols marquée dans le sud de la France notamment et une augmentation de la demande hydrique, entraînant de forts enjeux et **pressions sur la gestion de la ressource en eau** dans les années à venir. Grâce à l'ombrage apporté par la structure agrivoltaïque, le microclimat est plus favorable avec une réduction de l'évapotranspiration et donc des pertes d'eau de la plante entraînant ainsi un statut hydrique plus favorable. **La structure agrivoltaïque permet une économie d'eau d'irrigation de l'ordre de 20-30%. Sur Etoile, avec 25% d'apport en eau en moins, le même confort hydrique a été observé en 2022.**

Les résultats démontrent la **pertinence et la nécessité d'un ombrage dynamique** pour garantir une quantité de lumière suffisante à la plante afin que son acquisition carbonée soit suffisante. Avec une stratégie d'ombrage maximale, les pommiers sous agrivoltaïsme ont montré une **croissance végétative maintenue** en termes de pousses, et même une augmentation de la surface foliaire totale malgré une diminution de l'acquisition carbonée. La forte diminution de la croissance du tronc reflète cependant que cette stratégie de « tracking solaire » permanent n'est pas pérenne. Les stratégies d'ombrage utilisées sur nectarines en 2022 ont quant à elle permis de maintenir la croissance des troncs et des pousses.

Un taux d'ombrage trop important limitera les rendements en fruits par manque d'acquisition carbonée (Récoltes 2019 et 2020 sur la Pugère). **Une stratégie d'ombrage intelligente limite les pertes de production (Etoile sur Rhône 2022), voire maintient le rendement (Loriol 2022).**

La stratégie d'ombrage maximal pendant 3 années a permis d'observer les réponses maximales du pommier à l'ombrage en termes de **qualité des fruits avec une diminution de la concentration en sucres et en coloration** notamment mais peu d'impact en termes de concentration en acide et en fermeté des fruits. Les pommes 'Golden Delicious' sont **restées commercialisables** avec cette stratégie d'ombrage limite (commercialisation des Golden basée sur la couleur et le degré Brix).

En 2022, **l'ombrage réduit** semble atténuer le manque de coloration observé durant les campagnes de plein ombrage. Dans le même temps, la qualité des fruits bien qu'améliorée par rapport à l'ombrage **reste inférieure** aux fruits témoins en termes de concentration en sucres notamment.

Le **pourcentage de fruits déclassés** est cependant **diminué** de près de 10% par rapport aux fruits témoins : l'écran lumineux et thermique a **diminué les brûlures sur fruits**, les **dégâts de chenilles** foreuses et l'intensité de la **rugosité sur fruits**. A l'inverse, les dégâts de bitter, de punaises et ceux dus aux manipulations des fruits lors de la récolte sont à surveiller car favorisés sous agrivoltaïsme.

Le site d'Etoile sur Rhône, avec des taux d'ombrage inférieurs, a présenté un **impact sur la concentration en sucres** mais **pas d'impacts sur la coloration** des nectarines et la **concentration en acides**. Le site de Loriol a quant à lui montré en première année d'exploitation des **cerises moins colorées, sans impact** sur leur commercialisation puisqu'un marché existe pour les cerises rouges.

Table des matières

Table des matières.....	3
1 Contexte général de l'arboriculture face au changement climatique	4
2 Conclusions des programmes de recherche Sunagri 1 & Sunagri 2.....	4
3 La technologie Sun'Agri.....	5
4 Dispositifs suivis.....	8
5 Protection contre le gel.....	13
6 Protéger contre les vagues de chaleur.....	19
7 Protéger contre le stress hydrique.....	25
8 Impact de l'AVD sur la croissance végétative.....	32
9 Impact de l'AVD sur la productivité des cultures.....	38
10 Impact de l'AVD sur la qualité des fruits.....	44

1 Contexte général de l'arboriculture face au changement climatique

D'après les scénarios actuels du réchauffement climatique, si la température continue de croître au rythme actuel, on devrait atteindre une augmentation des températures de + 1.5°C à l'échelle du globe entre 2021 et 2040 (Allan et al., 2021). Ces changements climatiques seront également caractérisés par une intensification des événements extrêmes de type vague de chaleur et grêle. Les impacts du changement climatique ne sont pas répartis de manière homogène sur Terre. La zone nord méditerranéenne (comme la France, Italie et l'Espagne) a été identifiée comme l'une des zones les plus impactées par le changement climatique (Joel et al., 2015). La combinaison de la hausse des températures et de la diminution de fréquence des précipitations en été va avoir pour conséquence une sécheresse des sols marquée dans certaines régions et une augmentation de la demande climatique, entraînant de forts enjeux et pressions sur la gestion de la ressource en eau dans les années à venir.

Ces changements affectent les cultures mais à des degrés différents, en fonction de la sensibilité des espèces aux contraintes abiotiques sévères. En effet, si certaines plantes sont déjà adaptées aux climats chauds et secs comme les amandiers et les oliviers, certaines espèces sont plutôt adaptées à des climats plus tempérés avec des besoins en eau importants. Par exemple, le pommier (*Malus domestica* Borkh.) est une plante pérenne qui semble plutôt sensible aux effets du changement climatique. Les conséquences du changement climatique sont déjà visibles chez les arbres fruitiers avec une augmentation de la perte de production liée aux gelées tardives (Cannell et Smith, 1986), aux épisodes de grêle (Mupambi et al. 2018), aux coups de soleil sur fruits (Wünsche et al. 2001) ou aux arrêts de croissance lors des sécheresses estivales de plus en plus marquées (Šircelj et al., 2007).

Ces espèces vont donc nécessiter des adaptations et des protections parmi lesquelles les filets, qui sont d'ores et déjà une réalité dans les vergers de pommiers avec plus de 17000 hectares sous filets en France et aux alentours de 50% des vergers de pommiers ([lien article](#)). De nombreuses études ont montré que ces filets d'ombrage sont effectivement efficaces pour atténuer les effets négatifs du changement climatique comme les stress hydriques sur les pommiers (do Amarante et al. 2011 ; Shahak et al. 2004). Cependant, d'autres solutions d'ombrage plus modulables et répondants à d'autres enjeux, comme celui de la transition énergétique, peuvent également être mis en place : c'est le cas de l'agrivoltaïsme dynamique.

2 Conclusions des programmes de recherche Sunagri 1 & Sunagri 2



Sun'Agri 1 (2009-2012) : La première phase de ce projet de recherche a permis de montrer l'intérêt de l'agrivoltaïsme via une augmentation de la productivité des terres. Cependant, ce programme a également permis de montrer que la plante a besoin de lumière dans les moments clés. Ce programme a permis de montrer que, sous nos climats, un système agrivoltaïque n'a d'effet globalement positif sur les cultures que **s'il est dynamique et capable de laisser passer un maximum de lumière à certaines heures ou périodes précises**, qui dépendent de la plante, de son état et des conditions météorologiques. Sun'Agri 1 a ainsi conduit à écarter les ombrières fixes.

Sun'Agri 2 (2013-2017) : Dans la deuxième phase du projet, le 1^{er} dispositif complet de pilotage de panneaux pour assurer les besoins des plantes. Ce dispositif combine des équipements spécifiques (hardware) et des **outils logiciels de pilotage** infra-journalier dédiés (software), afin d'optimiser production agricole (prioritaire) et production photovoltaïque (secondaire). Sun'Agri utilise désormais le terme « **agrivoltaïque dynamique (AVD)** » pour souligner la notion de pilotage. En détail, un modèle de rayonnement et de répartition en trois-dimensions a été développé et les connaissances agronomiques se sont étoffées au travers de **deux thèses** (Yassin Elamri et Benoît Valle).

Sun'Agri 3 (2017-2022) : Dans le cadre de la phase 3 du dispositif, l'objectif est d'industrialiser en tenant compte de la spécificité de chaque culture ciblée en France. Ce programme vise à démontrer les **bénéfices de l'AVD en situation réelle sur les 3 filières visées (cultures viticoles, arboricoles et maraîchage sous serre)**, de développer et d'étendre les modèles de croissance pour chaque plante, d'améliorer l'efficacité de la solution technique et de proposer des référentiels techniques afin d'encourager un **développement harmonieux de cette filière** dans le respect de l'intérêt général.

Tous les dispositifs se situent dans le bassin méditerranéen, où les rayonnements forts et les besoins en eau sont des problématiques actuelles. Des dispositifs pilotes ont ensuite été développés sur d'autres cultures comme la cerise et les nectarines.

3 La technologie Sun'Agri

La technologie Sun'Agri repose sur une structure porteuse de panneaux photovoltaïques placée au-dessus des cultures, et un système de pilotage intelligent des panneaux (trackers pivotant de -90° à $+90^\circ$ orientés Nord/Sud) en fonction des conditions climatiques mesurées in situ, et des besoins en irradiation/protection climatique de la culture.

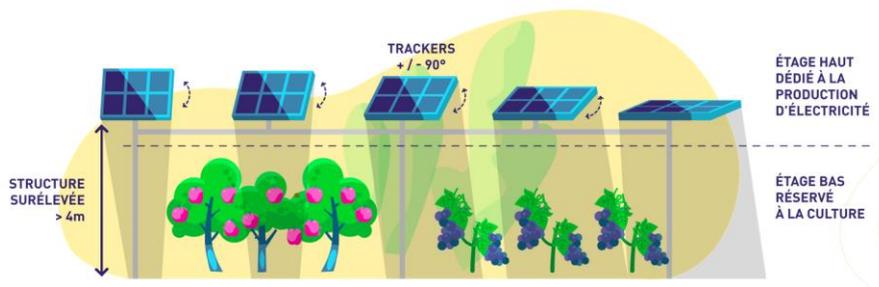


Figure 1: La technologie Sun'Agri

Une structure simple avec trackers spécifiques

Une **technologie spécifique de trackers** fondée sur l'utilisation d'actionneurs de type « slewdrives » (vis sans fin) utilisée pour **une amplitude angulaire complète** (+/-90°).

Des modules photovoltaïques bifaciaux optimisés

L'utilisation des modules bifaciaux permet :

- D'augmenter le productible électrique brut en captant davantage de rayonnement diffus
- De limiter les impacts de l'effacement sur la production électrique

Figure 2: panneaux bifaciaux sur cerisiers



Une orientation favorisant l'homogénéité du rayonnement reçu par la culture

La structure agrivoltaïque dynamique est orientée est/ouest afin de favoriser l'homogénéité du rayonnement reçu sous la structure, comme illustré en suivant, avec :

- (a) la structure Sun'Agri en position d'interception maximale de l'ombrage
- (b) la structure Sun'Agri en position d'interception minimale de l'ombrage
- (c) une structure agrivoltaïque fixe orientée plein sud avec un angle des panneaux à 25°
- (d) une structure agrivoltaïque fixe orientée plein sud avec un angle des panneaux à 25° où trois panneaux sur 4 ont translaté sous le premier afin de laisser passer plus de lumière

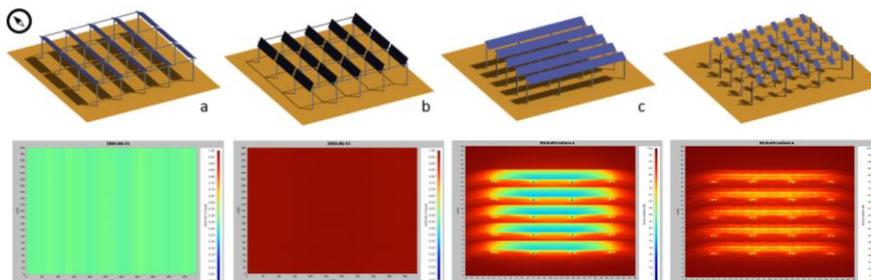


Figure 3: Carte du pourcentage d'irradiation reçue par le sol

Un pilotage fin pour servir la plante

A travers notre logiciel AV-Studio, le système de pilotage de la protection des cultures s'appuie sur des simulateurs de l'interception lumineuse par les panneaux. Des modèles de croissances des cultures, spécifiques à chaque culture cible à protéger, ont également été développés ou sont en développement. Couplés à des données mesurées sur la parcelle au plus près de la plante (état hydrique du sol, indicateurs de fonctionnement de la plante, et variables microclimatiques), nos modèles de pilotage s'adaptent en temps réel aux besoins de la culture.

Différents modèles sont au cœur de cette solution :

- Modèles agronomiques permettant de décrire l'assimilation photosynthétique des plantes sous ombrage fluctuant ;

- Modèles de bilan hydrique décrivant le cycle de l'eau dans le continuum sol/plante/atmosphère sous ombrage fluctuant ;
- Prévisions météorologiques et capteurs in situ ;
- Modèle d'optimisation du positionnement des panneaux permettant de calculer la trajectoire optimale des panneaux infra horaire.

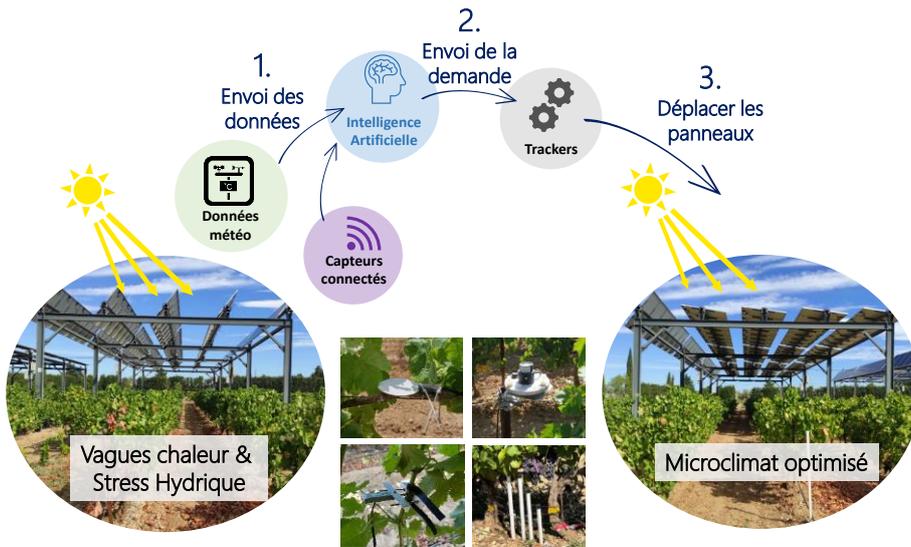


Figure 4: La solution Sun'Agri

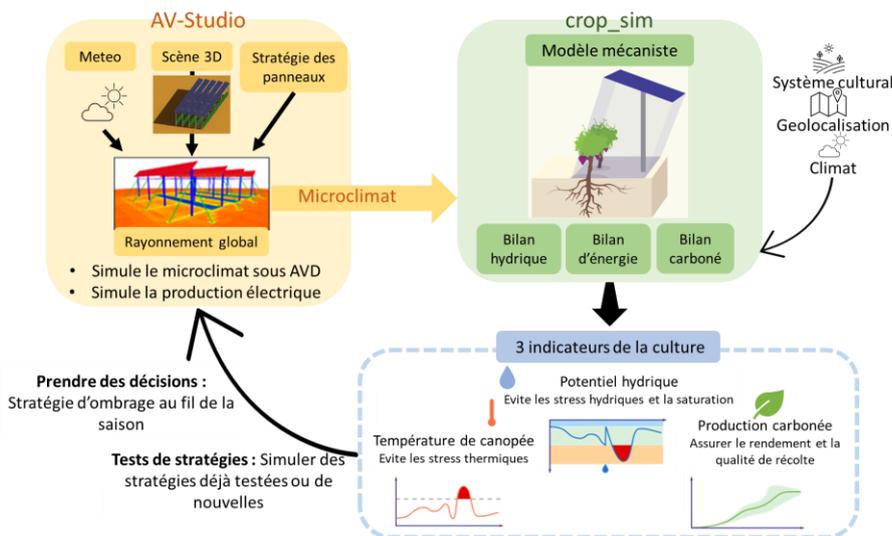


Figure 5: Modélisation agronomique : schéma de principe

Le modèle agronomique prend en compte des phénomènes biologiques complexes régissant le fonctionnement des plantes pérennes comme la photosynthèse, la transpiration ou encore la mise en réserve. Cette dernière variable permet de **prolonger les simulations sur des périodes de plusieurs années consécutives**. Ces modèles ont été **spécifiquement développés pour l'agrivoltaïsme (interception lumineuse de la canopée sous un ombrage fluctuant ou encore les phénomènes transitoires liés aux passages ombre/lumière qui nécessitent une modélisation au pas de temps infra-horaire)** dans le cadre d'un partenariat scientifique.

De plus, pour être utilisables dans le cadre du pilotage opérationnel, ces modèles sont conçus avec un **nombre restreint de paramètres à renseigner** par l'agriculteur à la configuration d'un nouveau site agrivoltaïque. Ils se distinguent ainsi des modèles académiques mais nécessitent en revanche en amont un grand nombre de **données scientifiques sur différents sites et différentes cultures pour leur calibration**.

L'utilisation de modèles agronomiques afin de déterminer les différentes stratégies de pilotage que ce soit de façon stratégique ou de façon tactique permet de **prendre en compte les besoins de la culture, tout au long de son cycle de croissance, beaucoup plus efficacement** que de simples règles heuristiques. En effet, ces modèles permettent de tenir compte des interactions entre processus écophysologiques par exemple pour estimer la température foliaire, qui est reliée à la température de l'air, mais aussi à l'irradiation et à différents mécanismes de fonctionnement de la plante comme la transpiration. Cette **température foliaire est un meilleur paramètre pour déterminer le « bien-être » de la plante qu'un simple seuil de température**.

De nombreux capteurs au plus près des cultures

De nombreux capteurs sont installés sur chaque site afin de caractériser le climat (station météo installée au-dessus de la structure), le microclimat (rayonnement, température ou humidité au niveau du couvert végétal), le sol (tension d'eau) et la plante (flux de sève, température foliaire). **Caractériser le vivant de façon efficiente et robuste (obtenir des valeurs observées répétibles, précises et informatives) n'étant pas chose aisée, différents capteurs sont actuellement testés sur les dispositifs expérimentaux de Sun'Agri.**



Figure 6: Dendromètre, capteur de flux de sève, caméra NIR (à Proche Infrarouge), capteur d'humectation

4 Dispositifs suivis

Sun'Agri dispose aujourd'hui de 5 dispositifs avec lesquels sont étudiés les impacts d'un ombrage spécifique sur arbres fruitiers (Tableau 1), chacun des dispositifs étant adjacent à une zone témoin sans panneaux photovoltaïques.

On distingue les dispositifs expérimentaux, de plus petite taille et où le suivi expérimental est très poussé avec de nombreux capteurs installés pour le suivi du microclimat et de l'état du sol et des cultures, des dispositifs pilotes de plus grande taille où le suivi est moins développé puisque directement exploité par l'agriculteur. Les différentes surfaces, caractéristiques de la structure et GCR (Ground Coverage Ratio) pour les différents projets sont présentés en suivant.

Tableau 1 : Descriptifs des différents dispositifs agrivoltaïques sur arbres fruitiers pilotés par la société Sun'Agri

	Vue du dispositif	Date de construction	Cultures	Modalités (Surface)	Localisation
Dispositif		2019	Pomme	Agrivoltaïsme dyn. (735 m ²) Témoin (1482 m ²)	La Pugère, Mallemort
		2022	Cerise	Agrivoltaïsme dyn. (350 m ²) Témoin (350 m ²)	Loriol
		2022	Pêche Abricot Cerise	Agrivoltaïsme dyn. (350 m ²) Témoin (350 m ²)	Etoile-sur-Rhône
Projets		2022	Pêche Abricot Cerise	Agrivoltaïsme dyn. (2.6 ha) Témoin (1 ha)	Etoile-sur-Rhône
		2022	Poire	Agrivoltaïsme dyn. (2.3 ha) Témoin (0.4 ha)	Llupia

DE arbo « LaPugère » @Malemort	Cerise @Loriol	DE Pêche & Pilote @Etoile	Poire @Llupia
			
> Mar.2019	Q1 2022?		
AVD plein champ: 720m ² (30m*24m) Zone témoin: 1000m ²	AVD : 1440m ² ZT : 1440 m ²	DE : AVD : ~350m ² / ZT : ~350 m ² 2,6 ha – ZT 1,3 ha	2,3 ha ZT : 0,4 ha
Entraxe : 8 m Entre-rang : 4 m 3 tracker / 3 rangs Longueur des panneaux : 1685 mm (PW2450F)	Entraxe : 6 m Entre-rang : 6 m 1 tracker / rang Longueur des panneaux : 2094 mm (DM445M6- B60HSW)	Entraxe : 6 m & 4 m Entre-rang : 6 m & 4 m 1 tracker / rang Longueur des panneaux : 2094 mm (DM445M6- B60HSW) 1755 mm (DM370M6- B60HSW)	Entraxe : 8,5 m Entre-rang : 4,25 m 3 trackers = 3 rangs Longueur des panneaux : 1755 mm (DM370M6- B60HSW)
GCR = 0,4213	GCR = 0,349	GCR1 = 0,349 GCR2 = 0,43875	GCR = 0,4129
Golden 972 de 2010, 4m inter-rang, 1,3m entre-pied = 23*7 = 161 arbres	30 arbres en Burlat + 30 en <u>Bigalise + Primulat</u>	Pêcher Kinolea Abricotier & cerisier	Poirier
Construit (2019) Fin programme Sun'Agri 3	Construit (Q1 2022) Programme 5 ans	Construit (Q1 2022) Programme 5 ans	Construit (Q1 2022) Programme 5 ans

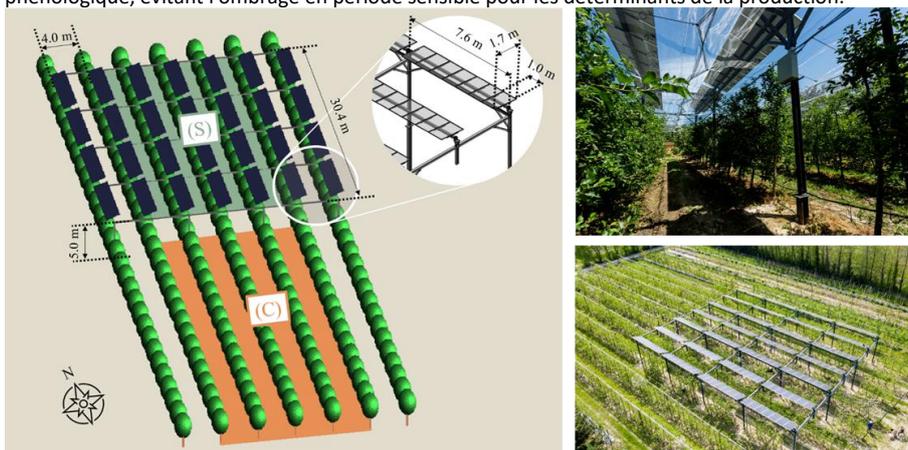
4.1 Dispositif expérimental de la Pugère

Localisation : Domaine expérimental de la Pugère, Malemort (13)

Culture : Pommiers 'Golden Delicious'

Dispositif agrivoltaïque : Installé en février 2019, 735 m² sous les panneaux et une zone témoin

Stratégie d'ombrage : Tracking solaire entre 2019 et 2021 pour observer les réponses limites des pommiers à la solution Sun'Agri. En 2022, la stratégie d'ombrage est pilotage basée sur la sensibilité phénologique, évitant l'ombrage en période sensible pour les déterminants de la production.



Les effets de cette stratégie sur les déterminants de la récolte seront observés en 2023. Les résultats de l'année 2022 concernant :

- La circonférence de troncs,
- La floraison de la parcelle et arbres entiers,
- Les dynamiques des chutes des fleurs et des fruits,
- La production à l'échelle de la parcelle.

Ces résultats 2022 sont étroitement liés à la stratégie d'ombrage maximale menée en 2021.

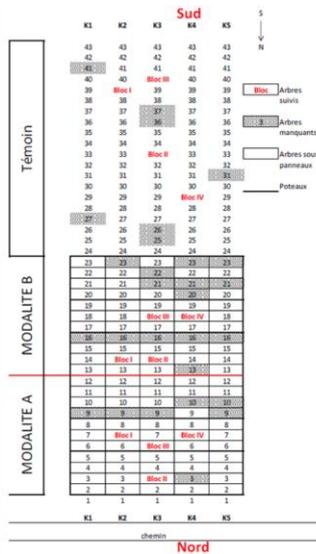
4.2 Dispositif expérimental d'Etoile-sur-Rhône

Localisation : Étoile-sur-Rhône (26)

Culture : Nectarines 'Kinolea'

Dispositif agrivoltaïque : Construit en 2022, 1725 m² sous les panneaux divisés en deux zones (Modalité A, Modalité B) et une zone témoin de 1500 m² au sud de la parcelle.

Stratégies d'ombrage : Définies en fonction des besoins de la culture un pourcentage d'ombrage similaire entre les modalités A et B mais une distribution différente sur la saison : Sur la modalité A, un taux d'ombrage constant a été appliqué sur la saison et sur la modalité B, le taux d'ombrage variait selon les besoins de la plante.



4.3 Dispositif expérimental de Loriol

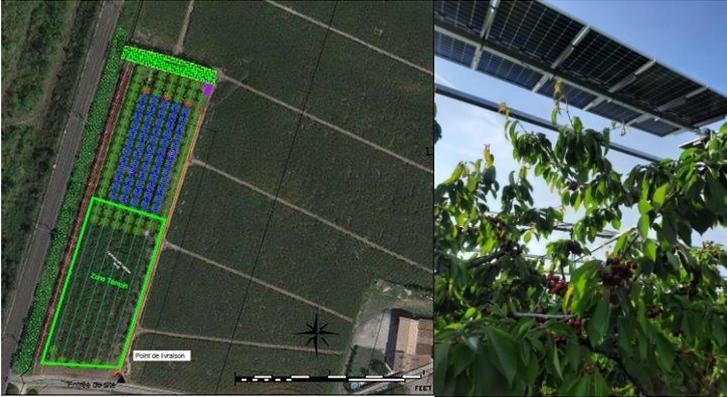
Localisation : Loriol (26)

Culture : Cerises 'Bigalise', 'Burlat' et 'Primulat'

Dispositif agrivoltaïque : Construit en 2022, 1500 m² sous les panneaux divisés en deux zones de pilotage (Partie Nord vs Partie Sud) et une zone témoin de 3000 m².

Stratégies d'ombrages : Définies en fonction des besoins de la culture un pourcentage d'ombrage similaire entre les modalités Nord et Sud mais une distribution différente sur la saison : Sur

la modalité Sud, un taux d'ombrage constant a été appliqué sur la saison et sur la modalité Nord, le taux d'ombrage variait selon les besoins de la plante.



4.4 Dispositif expérimental de Llupia

Localisation : Llupia (66)

Culture : Poires 'Harrow sweet'

Dispositif agrivoltaïque : Construit en 2021, 2.3 ha sous dispositif agrivoltaïque (puissance électrique installée de 1.77 MWc) et 0.4 ha de zone témoin

Stratégie d'ombrage : Définie en fonction des besoins de la culture



5 Protection contre le gel

5.1 Contexte



Figure 7: Pistil gelé de cerise
(source : CTIFL)

Le rendement des cultures horticoles dépend fortement des conditions climatiques de chaque année. Par exemple, les pommiers sont particulièrement vulnérables pendant leur période de floraison, où quelques jours de gel peuvent entraîner d'importantes réductions de production (Chen et al. 2023). Les gelées printanières peuvent affecter quantitativement (gel du pistil entraînant la chute des fleurs, cf photo) ou qualitativement (craquelure ou microlésion sur fruits les rendant plus sensibles aux pathogènes) la production.

Un fort épisode de gel début avril 2021 a ainsi entraîné une baisse des calibres et des volumes non négligeables sur la production de pommes en PACA (Agreste, 2021), avec au niveau national, une diminution de 20 % de la production de pommes en 2021 comparé aux rendements moyens, faisant de 2021 l'année avec les plus faibles rendements nationaux enregistrés depuis 1981, tandis que les rendements potentiels avant le gel étaient plutôt élevés (Agreste, 2021).

Dans un contexte de changement climatique, bien que le nombre de jours de gel soit en baisse (Giannakopoulos et al. 2009), les hivers plus chauds entraînent une floraison plus précoce des arbres fruitiers comme le pommier ou les oliviers (El Yaacoubi et al., 2014). Ce phénomène d'avancement de la date de floraison mène à des risques accrus de dégâts liés au gel (Pfleiderer et al. 2019) puisque la sensibilité de la culture au gel augmente avec le stade phénologique (cf graphique, d'après les données CTIFL et CIRAME). Pour un bouton floral de pommier, le seuil critique de dégâts liés au gel est à -3.5°C contre -2.2°C pour une fleur ouverte en période de pleine floraison (CTIFL, 1998).

SEUILS DE SENSIBILITÉ AU GEL D'ESPÈCES FRUITIÈRES

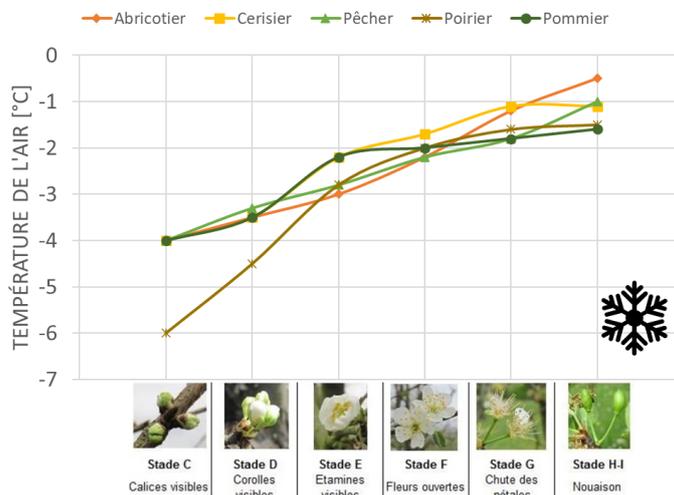


Figure 8: Seuils de sensibilité au gel d'espèces fruitières (Source : CTIFL et CIRAME)

Il existe différents types de gel pouvant provoquer des dégâts sur les plantes et qui dépendent des conditions météorologiques dont le gel radiatif et le gel advectif. Le **gel advectif** se définit comme un

refroidissement généralisé à hauteur des cultures agricoles dû à l'arrivée d'une masse d'air froid, pouvant être accompagnée de vent à forte vitesse (Hirschy et al. 2020). Mécanisme principal des gelées d'hiver, il peut également se produire au printemps et entraîner des conséquences sur les productions agricoles à développement précoce. Le **gel radiatif**, ou gel de rayonnement, est plus fréquent au printemps. Il se produit au cours de la nuit lorsque la vitesse du vent est faible à nulle et que le ciel est clair : le sol perd la chaleur accumulée durant la journée par rayonnement thermique sans que cette perte ne soit compensée par un rayonnement inverse (Hirschy et al. 2020, cf illustration). Ce type de gel apparaît à proximité du sol et présente une grande hétérogénéité spatiale selon le taux d'humidité de l'air par exemple.

A noter que les gels advectif et radiatif peuvent également intervenir simultanément et engendrer des dégâts plus conséquents.

On différencie également les **gelées noires** et les **gelées blanches**, selon l'intensité : les gelées blanches sont celles généralement de plus faible intensité (entre 0°C et -5°C) et associée à de l'humidité (une fine couche de cristaux de glace se forme à la surface des plantes) contrairement aux gelées noires, plus intenses qui entraîne sur le végétale une destruction des tissus qui finissent par se nécroser et prendre une couleur noire tout en se desséchant. L'effet d'une gelée noire en plein printemps est dévastateur sur des végétaux en pleine croissance mais encore très fragiles.

Avant de déployer un moyen de lutte contre le gel, il est donc nécessaire d'identifier le type de gel qui a lieu. Les méthodes de lutte passive, préventives, sont les plus économiques et les plus efficaces : choix de la parcelle, choix de la variété, enherbement du sol et nutrition de la plante (Hirschy et al. 2020). En complément, les méthodes de lutte active permettent de modifier localement le microclimat : tour anti-gel permettant un brassage de l'air, chauffeuses ou bougies, combustion de gaz permettant de réchauffer l'air ambiant, câbles chauffants et tubes infra-rouge, solutions de chauffage dynamique, solutions d'aspersion, voiles de fumées et brouillard et bâches anti-gel (Hirschy et al. 2020). Ces méthodes de lutte active représentent un investissement financier et en main d'œuvre très lourd pour les exploitations pour une efficacité variable. L'agrivoltaïsme pourrait représenter une solution innovante contre le gel via plusieurs effets sur la culture et le microclimat.

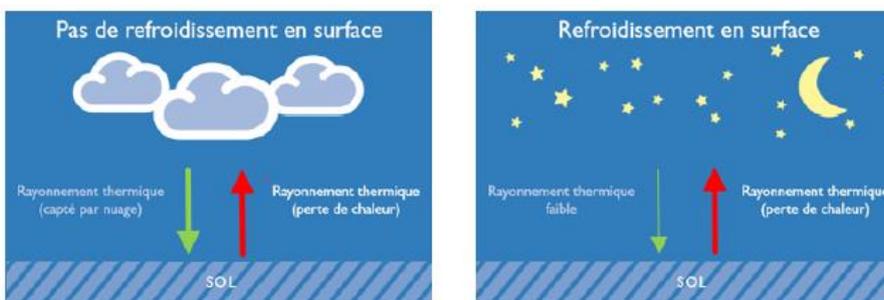
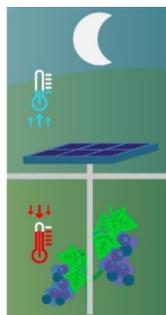


Figure 9: Représentation graphique d'une situation sans (gauche) et avec gel radiatif (droite) (Source : Hirschy et al. 2020)

5.2 Enjeux de la solution

Les stratégies de pilotage envisagées par Sun'Agri incluent une protection face au froid : Les panneaux du dispositif AVD s'orientent horizontalement en dessous d'un seuil de température défini et jusqu'à ce que la température repasse au-dessus de ce seuil, afin de limiter les pertes thermiques par rayonnement dans les grandes longueurs d'onde et ainsi de protéger les cultures contre le gel.



5.3 Protocoles expérimentaux mis en place

Site concerné	Variable observée	Type de mesure
La Pugère	Température de l'air	Capteur de température
	Température proche sol	Capteurs IR
	Phénologie	Identification du stade phénologique de chaque arbre
	Dégâts du gel sur fleurs	Observation du pistil sur échantillonnage de fleurs
	Chute des fleurs	Comptage des fleurs chutées
	Rendement	Pesée à la récolte
Étoile-sur-Rhône	Température de l'air	Capteur de température
	Phénologie	Identification du stade phénologique majoritaire de chaque modalité
	Dégâts du gel sur fleurs	Observation du pistil sur échantillonnage de fleurs
	Rendement	Pesée à la récolte

5.4 Résultats

Les résultats disponibles à ce jour et présentés ci-après proviennent des sites expérimentaux de la Pugère (pommes) et d'Etoile sur Rhône (nectarines).

5.4.1 Une sensibilité des fleurs liée à leur stade phénologique

- **Pommiers :**

Lors d'un épisode de gel le 24 mars 2020 sur le dispositif agrivoltaïque de la Pugère, les fleurs sous ombrage présentaient un **léger retard phénologique en comparaison des fleurs témoins** avec 7.8% des arbres au stade de bourgeons d'hiver contre seulement 5.9% des arbres témoins à ce stade et a contrario 51.7% des arbres sous ombrage au stade bouton rose contre 56.5% des arbres témoins à ce

stade. La sensibilité au gel augmentant avec l'avancée des stades floraux, ce léger retard phénologique a permis de **limiter la sensibilité au gel des fleurs** sous agrivoltaïsme.

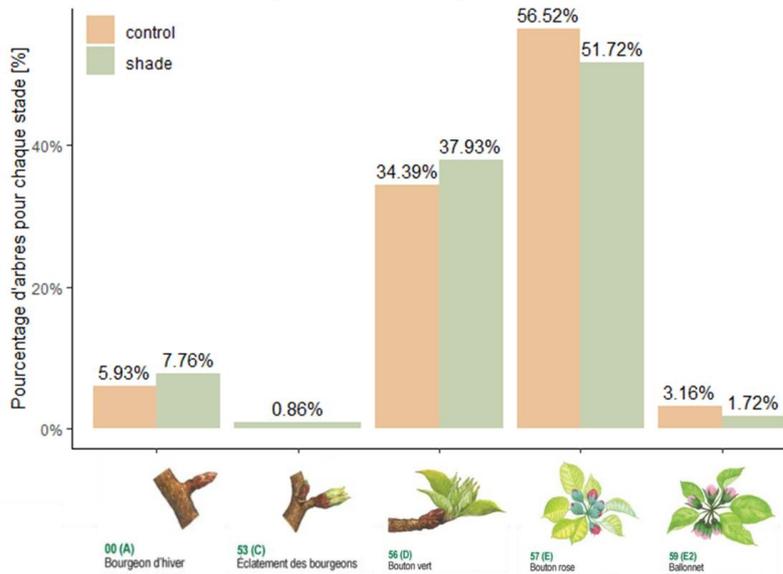


Figure 10: Pourcentage de pommiers dans chaque stade phénologique [%] le 24 mars 2020 sur le dispositif agrivoltaïque de la Pugère sous les panneaux photovoltaïques (shade) et témoin (control) (source : thèse Perrine Juillion avec INRAE PSH Avignon)

- **Autres dispositifs :**

Lors des autres épisodes de gel, le **suivi phénologique n'était pas assez fin pour attester d'un retard phénologique** sous la structure agrivoltaïque.

5.4.2 Une augmentation de la température à proximité des plantes

- **Pommiers :**

Lors du gel du 7-8 avril 2021 sur la parcelle expérimentale de pommiers à Mallemort, le seuil thermique de dégâts à 10% était de -2.2°C (CTIFL, 1998) pour le stade phénologique majoritaire : la pleine floraison. Pendant un peu plus de 5h30, la température est descendue à moins de $-2,2^{\circ}\text{C}$. A une telle température, 10% des fleurs subissent des dégâts. Sur cette plage horaire, 3h20 ont été passées à moins de $-3,9^{\circ}\text{C}$. En théorie, 90% des fleurs ont subi d'importants dégâts. Si on regarde l'effet des panneaux photovoltaïques sur la **température de l'air**, on observe **très peu d'effets**. Cependant, la température de surface mesurée par des capteurs infrarouges, reflétant majoritairement la température du sol à cette époque de l'année où la canopée est très peu développée, a ainsi révélé **jusqu'à $0,8^{\circ}\text{C}$ de plus en température du sol sous panneaux photovoltaïques** autour de 5h.

En 2022, 3 jours de gel (2h à $-1,5^{\circ}\text{C}$) ont été enregistrés sur la période du 4 au 6 avril, **sans conséquences** sur le verger (fleurs non développées). Pour cette raison, aucune étude détaillée de protection contre le gel n'a été réalisée en 2022.

- **Nectarines :**

Lors de l'épisode de gel du 6-9 mars 2022 sur la parcelle expérimentale de nectarines à Etoile-sur-Rhône, **des bougies antigel** ont été mises en place en plus de la stratégie de protection du gel des panneaux solaires. Si les bougies ont augmenté la température de l'air de 2°C , le **réchauffement dû à la structure agrivoltaïque était d'environ $0,3^{\circ}\text{C}$ en température de l'air** par rapport au témoin.

5.4.3 Une diminution des dégâts sur les fleurs et des impacts variables sur le rendement

- **Pommiers :**

Lors du gel du 7-8 avril 2021 sur la parcelle expérimentale de pommiers à Mallemort, pour quantifier les dégâts du gel, des échantillonnages ont eu lieu le 13 avril 2021. Des dégâts liés au gel étaient visibles sur l'ensemble de la parcelle, comme illustré par les différentes photographies.



Source : Sun'Agri

Sur les deux modalités 25 corymbes (groupement de fleurs) au stade avancé de chute des premiers pétales (G) et 25 corymbes au stade ballonnet lorsque les sépales laissent apparaître les pétales (E2) ont été échantillonnés. Le système agrivoltaïque n'a pas permis une meilleure protection pour les corymbes au **stade E2 avec des dégâts similaires au témoin**. Cependant, à ce stade phénologique, aucun dégât mortel du gel n'a été observé avec 85% de fleurs sans dégâts et 15% de fleurs avec des dégâts légers. Les corymbes au stade G présentaient des proportions de dégâts plus élevées. Les **panneaux photovoltaïques semblent avoir permis une protection contre le gel** avec 19% de corymbes sans dégâts contre seulement 4% sur le témoin, **et 0% de dégâts mortels contre 32% sur le témoin**. La chute des fleurs a ainsi été très importante pour la modalité témoin avec 85% de chute contre 57% sous dispositif agrivoltaïque cette année-là. Alors que le rendement attendu était de 40 t/ha, en raison d'une faible densité de floraison accentuée par les effets du gel, les **arbres sous le système agrivoltaïque ont produit 20 t/ha et les arbres témoins 10 t/ha**.

- **Nectarines :**

Lors de l'épisode de gel du 6-9 mars 2022 sur la parcelle expérimentale de nectarines à Etoile-sur-Rhône le stade phénologique était la floraison. L'observation des dégâts une semaine après cet épisode de gel a permis d'observer un pourcentage moyen de **fleurs gelées de 8 à 9% sous les structures agrivoltaïques contre 33%** sur la partie témoin. Cependant, la floribondité était importante cette année 2022, ce qui a permis de ne **pas avoir de conséquences sur le rendement** à la récolte. Peu d'effet de la modalité d'ombrage a été observé.

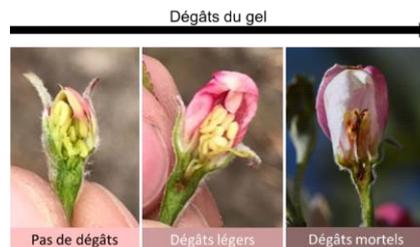


Figure 11: Classification des dégâts du gel sur les fleurs de pommiers en fonction de la couleur du pistil

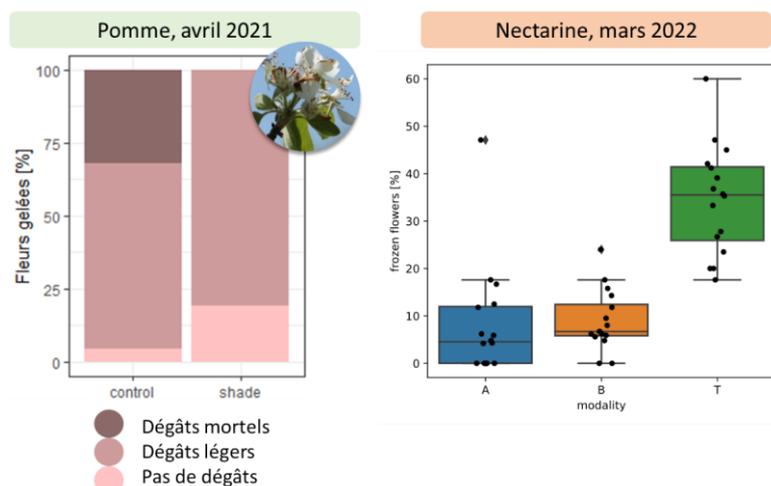


Figure 12: Dégâts du gel en avril 2021 sur les fleurs des pommiers du dispositif agrivoltaïque de la Pugère sous panneaux photovoltaïques (shade) et témoins (control) pour le stade de floraison avancé (figure de gauche) et sur les fleurs de nectarine du dispositif expérimental d'Etoile-sur-Rhône sous panneaux photovoltaïques (A,B) et témoin (T) (figure de droite)

(Source : Thèse Perrine Juillion avec INRAE PSH Avignon / Sun'Agri)

5.4.4 Tableau récapitulatif

Effet de l'agrivoltaïsme dynamique	Pommiers		Nectarines
	Mars 2020	Avril 2021	Mars 2022
Phénologie	Léger retard	ns	ns
Température à proximité des plantes		↗	↗
Dégâts du gel sur fleurs		↘	↘

Le décalage phénologique observé sous dispositif d'ombrage a été observé une année mais des expérimentations plus détaillées sur cette variable vont être effectués en 2023. Dans le cas d'un **gel advectif**, c'est surtout le **décalage phénologique** qui réduit les dégâts sous ombrage puisque le seuil thermique critique de dégâts dû au gel diminue avec l'avancement phénologique (CTIFL, 1998). Ce premier axe de retard phénologique est le plus intéressant pour la protection face au gel. Le deuxième axe de protection face au gel est la **diminution des pertes par rayonnement** grâce à la couverture des panneaux. Dans le cas de **gel radiatif**, cette **diminution des pertes par rayonnement** peut effectivement permettre une diminution des dégâts sous dispositif agrivoltaïque.

6 Protéger contre les vagues de chaleur

6.1 Contexte

On considère que plus de 90% de la masse sèche de la plante est issue du carbone photo synthétisé, d'où l'importance d'optimiser cette activité photosynthétique (Miller, 2015). En effet, lors des périodes estivales, les forts rayonnements peuvent provoquer des dommages s'ils sont en excès, impliquant une photo-inhibition qui diminuera la photosynthèse nette de la feuille, et à terme sa croissance et sa productivité (Guo et al., 2006).

La température des feuilles est également importante pour maintenir une activité photosynthétique élevée. Crews et al. (1975) ont montré qu'une augmentation importante du taux de photosynthèse était obtenue en augmentant la température entre 15°C et 30°C pour les pêchers 'Loring' mais que la photosynthèse diminuait fortement si la température des feuilles dépassait 30°C. Une autre étude sur des feuilles de pêcher 'Opal' indique une photosynthèse nette qui diminue fortement au-dessus de 36°C et qui devient nulle au-dessus de 40°C de température de feuilles (Li et al. 2001). Au-dessus d'une certaine température foliaire, un dessèchement foliaire, également appelé « folletage » peut avoir lieu. Les rayonnements excessifs couplés à des températures élevées peuvent également mener à une brûlure des feuilles et des fruits, diminuant considérablement la production de l'arbre et sa capacité à photo-synthétiser.

Pour des journées de forte luminosité et des vagues de chaleur, l'ombrage pourrait donc permettre une diminution des dommages et un maintien de l'activité photosynthétique (Romo-Chacón et al. 2007). Une vague de chaleur est définie comme la succession de trois jours et trois nuits où les températures ne descendent pas en dessous du seuil nocturne et journalier définis pour cette zone ([lien vers seuils de chaleur \[source visactu\]](#)).

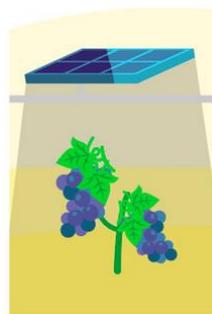
Plusieurs études rapportent ainsi un maintien de l'activité photosynthétique sous ombrage lorsque les conditions lumineuses sont saturantes (Romo-Chacón et al. 2007 ; Solomakhin et Blanke 2008) voire une activité photosynthétique supérieure aux arbres témoins (Miller, 2015).



6.2 Enjeux de la solution

Les stratégies de pilotage envisagées par Sun'Agri incluent une protection face aux périodes de rayonnements excessifs et les vagues de chaleur : Les panneaux du dispositif AVD s'orientent perpendiculairement aux rayons du soleil au-dessus d'un seuil de rayonnement et/ou de température afin de protéger la culture. Ces seuils vont varier selon la culture et la variété essentiellement.

L'enjeu de la solution d'agrivoltaïsme est donc de protéger la culture lors des vagues de chaleur et des rayonnements excessifs tout en permettant à la plante une activité photosynthétique suffisante aux moments-clés.



6.3 Protocoles expérimentaux mis en place

Site concerné	Variable observée	Type de mesure
La Pugère	Taux d'ombrage	Simulation du rayonnement AV Studio
	Température de la canopée	Capteurs IR

	Dégâts des vagues de chaleur sur feuilles	Comptage des feuilles saines, chutées et atteintes de folletage
	Activité photosynthétique	Courbe de la réponse de la photosynthèse au rayonnement
	Croissance des fruits en période de vague de chaleur	Mesure du diamètre des fruits de manière hebdomadaire

6.4 Résultats

Les résultats disponibles à ce jour et présentés ci-après proviennent des sites expérimentaux de la Pugère (pommes), d'Etoile sur Rhône (nectarines) et Loriol (cerises) pour certains.

6.4.1 Une diminution du rayonnement et de la température de la canopée

L'ombrage maximal sur le site expérimental de la Pugère a permis d'observer **une réduction moyenne du rayonnement de 50 %** avec une **fluctuation journalière du taux d'ombrage entre 4 et 87%**.

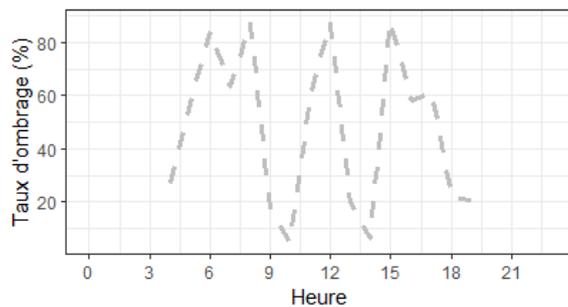


Figure 13: Taux d'ombrage (%) au cours d'une journée typique sur le dispositif expérimental de la Pugère en tracking solaire (source : Juillion et al. 2022)

Les capteurs infra-rouges dirigés vers la canopée mesurant la température foliaire au sein du dispositif expérimental de la Pugère ont permis de montrer une **diminution de l'amplitude thermique journalière** sous la structure agrivoltaïque. En effet, sous l'ombrage maximal, des **températures foliaires maximales plus faibles** (jusqu'à -4°C , cf Figure 8) et des **températures minimales plus fortes** ($+0.5^{\circ}\text{C}$) ont été enregistrées.

Si l'allure de la courbe des températures de surface de la canopée va dans le même sens que la température de l'air, les différences entre les différentes modalités sont plus importantes pour la température de surface de la canopée. Pendant les périodes de températures extrêmes (canicules, coup de froid...), les différences se creusent entre les traitements.

Par exemple, le microclimat créé par les panneaux photovoltaïques a permis de conserver des températures foliaires moins extrêmes pendant les canicules de fin juin et mi-juillet 2019, avec une différence de température de **surface de la canopée d'environ 4°C le 28/06/2019** dans l'après-midi entre la modalité sous structure agrivoltaïque et la modalité témoin.

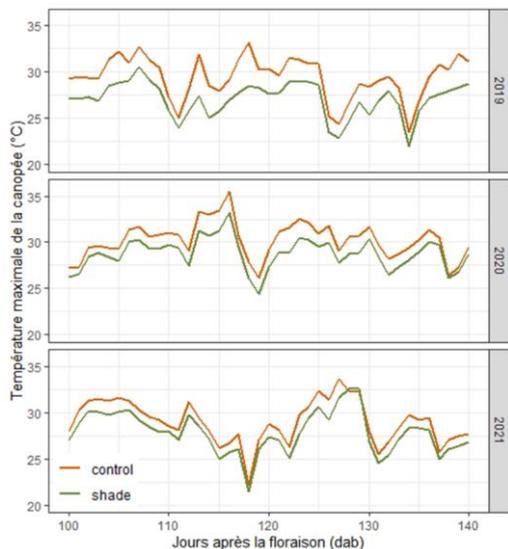


Figure 14 : Température maximale de la canopée sur le dispositif expérimental de la Pugère en période estivale entre 2019-2021 pour des arbres témoins (control) et sous ombrage maximal (shade)

6.4.2 Une croissance des fruits maintenue en période de vagues de chaleur

L'ombrage maximal de la Pugère a permis de **maintenir la croissance des fruits lors de la vague de chaleur** de fin juin 2019, épisode caniculaire de cette année-là. En effet, on observe un ralentissement de la croissance pendant la canicule pour les fruits témoins (chute de la croissance jusqu'à $0,2 \text{ mm.jour}^{-1}$ pour une croissance attendue de $0,4 \text{ mm.jour}^{-1}$). La croissance des fruits à l'ombre est restée plus proche de la trajectoire annuelle. Le témoin est ensuite revenu sur sa trajectoire initiale après la canicule. Cependant, la **variabilité des mesures de croissance** des fruits rend difficile l'établissement d'un lien direct entre les températures élevées en un seul jour et le ralentissement de la croissance.

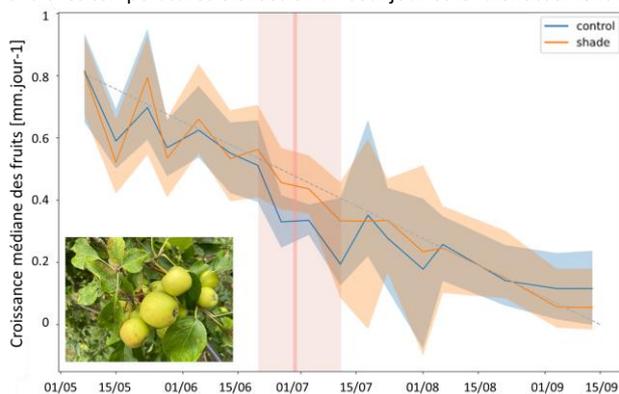
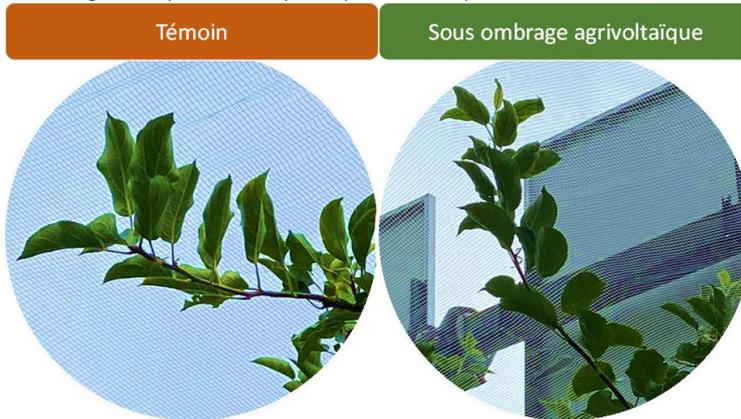


Figure 15: Croissance médiane des fruits et amplitude des mesures en bande plus claires [mm.jour-1] entre mai et septembre 2019 pour des fruits témoins (control) et sous tracking solaire (shade). La ligne pointillée noire indique la droite de trajectoire de croissance des fruits. La période surlignée en rouge indique la période de vagues de chaleur (Source Sun'Agri)

6.4.3 Un effet bénéfique sur les feuilles

La réduction du rayonnement sous la structure agrivoltaïque a permis aux feuilles de limiter la photo-inhibition. Cette protection se traduit par une réponse physiologique des arbres : les **feuilles apicales se recroquevillent sur les arbres témoins pour éviter la photo-inhibition** quand les feuilles des arbres sous la structure agrivoltaïque s'étalent pour optimiser la captation de la lumière :



La réduction du rayonnement et de l'amplitude thermique des feuilles a également permis de **réduire les brûlures sur feuilles** sous la structure agrivoltaïque :



Photographies prises en août 2022

Le 10 août 2022, un jaunissement important des feuilles est apparu en parcelle (cf photographie au-dessus). Un échantillonnage aléatoire de rameaux a été réalisé le 30/08/22 pour **quantifier l'effet des panneaux photovoltaïques sur la chute des feuilles et leur jaunissement**. Les comptages ont indiqué **21% de feuilles chutées pour la modalité témoin en moyenne contre seulement 2% pour la modalité ombrée**. En moyenne sur les feuilles restantes, 21% de leur surface est jaunissante pour la modalité témoin, contre 8% pour la modalité ombrée. Près de **86% du feuillage de la modalité témoin commençait ou était complètement jaune contre à peine 27% pour la modalité ombrée**. Un jaunissement estival du feuillage est observé tous les ans pour Golden, du fait de sa prédisposition génétique. Avant 2021, aucune différence n'avait été quantifiée entre les deux modalités, ce qui est

désormais le cas. À la suite des campagnes 2021 et 2022, il semble que l'ombrage modulé ait apporté une **bonne protection face au jaunissement estival** sur feuilles. Ces résultats sont à confirmer en 2023 sur un échantillonnage plus important.

6.4.4 Des risques associés à une diminution trop importante du rayonnement

Dans le cas du dispositif expérimental de la Pugère, l'ombrage des panneaux photovoltaïques n'a pas seulement été apporté lors des rayonnements excessifs mais tout au long de la saison entre 2019 et juillet 2021. Cette diminution importante a révélé les risques associés à une diminution trop importante du rayonnement avec :

- Une **diminution de l'activité photosynthétique** due à une diminution du rayonnement incident sous la structure agrivoltaïque
- Un **changement dans la morphologie foliaire** avec une augmentation de la surface foliaire spécifique (SLA = ratio surface/masse sèche) de 22% en moyenne sous la structure agrivoltaïque pour des feuilles à l'extérieur de la canopée. Les **feuilles sont donc plus grandes et plus fines** sous la structure agrivoltaïque, ce qui est associé à des **risques de pertes d'eau par transpiration et de sensibilité aux ravageurs**.
- Pour un fort rayonnement, à **rayonnement équivalent**, les feuilles sous ombrage maximal de la structure agrivoltaïque ont une **activité photosynthétique 20% inférieure à celle des arbres témoins**. Pour un faible rayonnement ($\leq 120 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), les feuilles sous ombrage présentaient au contraire une activité photosynthétique supérieure à celle des feuilles témoins.

Il semble donc essentiel **d'apporter l'ombrage aux bons moments** afin de ne pas trop impacter l'activité photosynthétique et donc la productivité de l'arbre.

6.5 Tableau récapitulatif des résultats

Effet de l'agrivoltaïsme dynamique	Pommiers			
	2019	2020	2021	2022
Température maximale de la canopée	↘	↘	↘	↘
Température minimale de la canopée	↗	↗	↗	↗
Dégâts des vagues de chaleur sur feuilles (visuellement entre 2019-2021, quantifié en 2022)	↘	↘	↘	↘
Activité photosynthétique pour un faible rayonnement	↗	↗	↗	
Activité photosynthétique pour un fort rayonnement	↘	↘	↘	
Croissance des fruits en vague de chaleur	↘			
Surface foliaire spécifique des feuilles	↗	↗	↗	↗

En réduisant la température maximale des feuilles et en limitant les rayonnements excessifs, l'agrivoltaïsme a permis de limiter les brûlures sur feuilles sur pommier (jaunissement et chute des feuilles) et de maintenir la croissance des fruits lors des vagues

de chaleur. Un ombrage dynamique est cependant nécessaire pour garantir une quantité de lumière suffisante à la plante afin que son acquisition carbonée soit satisfaisante.

7 Protéger contre le stress hydrique

7.1 Contexte

L'avenir de l'alimentation et de l'agriculture fait face à des incertitudes qui soulèvent de nombreuses questions concernant ses performances et sa durabilité. Les incertitudes tournent autour de différents facteurs et notamment l'état des ressources naturelles et le changement climatique.

L'état des ressources naturelles inquiète et notamment les ressources en eau. L'irrigation est cruciale pour les approvisionnements alimentaires du globe. La FAO estime que les pays en développement devraient étendre leurs superficies irriguées qui passeraient de 202 millions d'hectares aujourd'hui à 242 millions d'hectares en 2030. Au niveau mondial, la planète dispose de suffisamment d'eau, mais certaines régions seront néanmoins victimes de graves pénuries. Les pays en développement devraient connaître une augmentation de 14 pour cent des prélèvements d'eau pour l'irrigation d'ici 2030. Si l'on regarde le cas de la France et notamment du sud de la France, le rapport du Schéma Régional d'Aménagement de Développement Durable et d'Égalité des Territoires [SRADDET-Jan.2020] souligne un effet néfaste du changement climatique pour la région Occitanie, avec spécifiquement « une fragilisation de la ressource en eau, que ce soit au niveau de la quantité par une diminution des précipitations et/ou une augmentation de l'évapotranspiration, ou que ce soit au niveau de la qualité par une diminution des débits et/ou une augmentation de la température », ainsi qu'un « impact hétérogène sur la production agricole régionale, certainement plus marqué pour la viticulture, l'arboriculture (...) ».

Le 27 février 2022, le GIEC a publié la seconde partie de son sixième rapport. Ce nouveau rapport dresse un tableau très alarmant des conséquences du changement climatique, notamment la multiplication des événements climatiques extrêmes. La température de la planète devrait augmenter de 1,5°C dès 2030, soit dix ans plus tôt que la précédente prévision du GIEC. Le GIEC étudie cinq scénarios et le plus pessimiste prévoit un réchauffement compris entre 3,3 et 5,7°C.

La combinaison de la hausse des températures et de la baisse de fréquence des précipitations en été va avoir pour conséquence une sécheresse des sols marquée dans le sud de la France notamment et une augmentation de la demande hydrique, entraînant de forts enjeux et pressions sur la gestion de la ressource en eau dans les années à venir.

En diminuant le rayonnement incident et donc les demandes climatiques, les pertes hydriques via les stomates de la plante sont diminuées sous les dispositifs d'ombrage (Mupambi 2018). Une réduction de 30% de l'évapotranspiration a été observée pour des pommiers sous filets d'ombrage à 10% (McCaskill et al., 2016) et des laitues dans un système agrivoltaïque fixe (Marrou et al. 2013). Cette diminution de la transpiration va permettre de maintenir un potentiel hydrique plus favorable sous les dispositifs d'ombrage à irrigation équivalente, comme observé sur des vergers de pommes sous filets d'ombrage (Shahak et al. 2004, Lopez et al. 2018). Les dispositifs d'ombrage permettent donc de réduire les apports en eau. Une étude égyptienne a rapporté une réduction de 20 % de l'irrigation pour des orangers sous 25 % d'ombre par rapport à un verger témoin avec une irrigation optimale (Esmail et al., 2017). Dans une étude espagnole de 2012, la réduction de la lumière de 18 % avec un filet d'ombrage noir a entraîné une réduction de 25 % de l'irrigation des pêchers pour un statut hydrique similaire à celui des pêchers témoins (Girona et al., 2012).

7.2 Enjeux de la solution

Les stratégies de pilotage envisagées par Sun'Agri incluent une protection face aux périodes de fortes chaleurs : Les panneaux du dispositif AVD s'orientent perpendiculairement aux rayons du soleil afin d'ombrer au maximum la culture. **Grace à cet ombrage, le microclimat va être plus favorable avec une réduction de l'évapotranspiration et donc des pertes d'eau de la plante entraînant ainsi une meilleure gestion du stress hydrique en cas de forte chaleur, forte irradiation et donc limiter les apports en eau.**

7.3 Protocoles expérimentaux mis en place

Site concerné	Variable observée	Type de mesure
La Pugère	Température et humidité de l'air	Capteurs proche canopée
	Quantité d'eau apportée	Compteur eau irrigation
	Statut hydrique	Mesure du potentiel hydrique à midi
	Stock en eau dans le sol	Sondes à neutrons
Étoile-sur-Rhône	Température	Capteurs proche canopée
	Quantité d'eau apportée	Compteur eau irrigation
	Statut hydrique	Mesure du potentiel hydrique à midi
Loriol	Statut hydrique	Mesure du potentiel hydrique à midi

7.4 Résultats

Les résultats disponibles à ce jour et présentés ci-après proviennent des sites expérimentaux de la Pugère (pommes), d'Étoile sur Rhône (nectarines) et Loriol (cerises) pour certains.

7.4.1 Un microclimat plus favorable

- Pommiers en ombrage maximal :

Sur le site expérimental de La Pugère, les expérimentations 2019-2021 ont été menées suivant les stratégies d'ombrage suivantes : panneaux solaires en position d'ombrage maximal toute la saison avec un taux d'ombrage variable entre 4% et 88% pendant la journée impliquant un taux d'ombrage moyen de 50-55%.

Les stratégies d'ombrage testées sur 2019-2021 ont permis de mettre en évidence une diminution de la température de l'air **jusqu'à -3.8°C**, et une augmentation de l'humidité relative **jusqu'à +14%**. En moyenne une diminution de 1.2°C et une augmentation de 2% de l'humidité relative ont été observées aux mois de juillet 2019, 2020 et 2021.

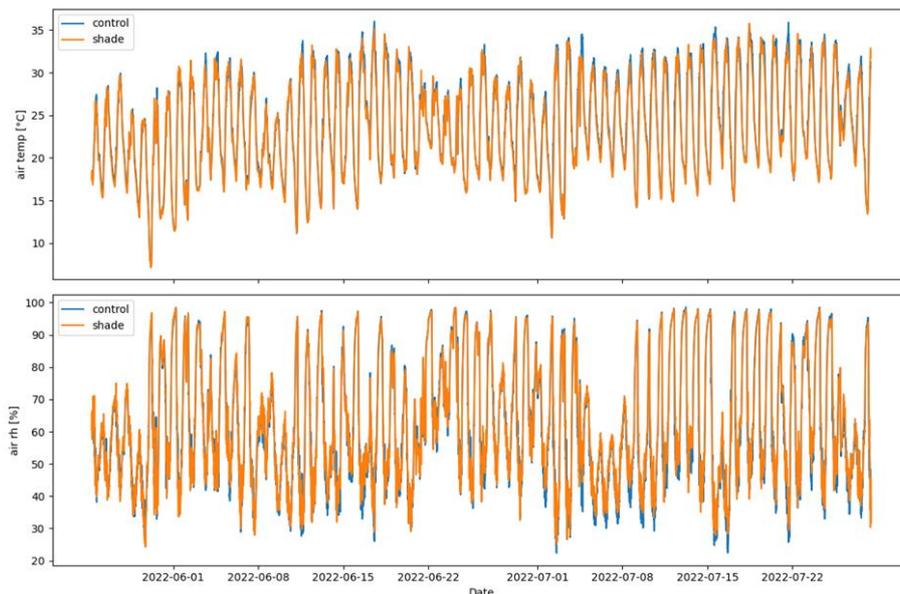


Figure 16 : Température de l'air (°C) et humidité relative de l'air (%) pendant la période estivale 2022 pour les modalités ombrée (shade) et témoin (control)

Le graphique de 2022 (capteurs de température et d'humidité de l'air pour caractériser la période caniculaire sous ombrage maximal en été 2022 ; installation des capteurs réalisée le 15 mai 2022) peut confirmer la tendance observée les années précédentes où la température de l'air autour des arbres témoins a toujours la valeur la plus élevée de la journée pendant la période estivale. **Cela indiquerait un environnement moins stressant pour les arbres cultivés sous panneaux solaires.**

- Nectarines :

Sur le site expérimental d'Etoile sur Rhône, lors d'une journée estivale ventée (04/08/2022), aucune différence significative n'a été observée entre les modalités sous la structure agrivoltaïque et la modalité témoin en ce qui concerne la température maximale. A contrario, lors d'une journée estivale non ventée (05/08/2022), des différences de **-2 à -3 °C pour les modalités agrivoltaïques** en comparaison de la modalité témoin ont été mesurées. Ces variations inter journalières semblent être liées au vent qui homogénéise la température sur la parcelle.

7.4.2 Une diminution des apports en eau

- **Pommiers en ombrage maximal :**

Sur le dispositif expérimental en pommiers de la Pugère, il a été mesuré une économie d'eau sous AVD avec des apports en irrigation **jusqu'à 30% inférieurs** par rapport à la zone témoin (-22% en moyenne entre 2019 et 2021). Cette réduction de l'irrigation est observée grâce aux débitmètres installés au niveau des tuyaux d'irrigation. L'irrigation totale de la floraison à la chute des feuilles a varié entre 750 et 1 150 mm sur les 3 années d'expérimentations en ombrage maximal, avec de grandes différences entre les saisons et les modalités.

L'année 2022 a été particulièrement chaude et sèche. La gestion de l'irrigation a été réalisée à l'aide de tensiomètres et la quantité d'irrigation a été enregistrée avec des compteurs volumétriques en 2022. Cependant, en 2022, une irrigation quasi similaire a été appliquée entre les deux modalités à cause de plusieurs problèmes techniques en saison : une inversion des consignes d'irrigation en début d'été entre les deux modalités et une panne de l'électrovanne sur la modalité témoin en fin d'été ayant

mené à 2 semaines sans irrigation sur cette modalité témoin. Si le premier problème technique a pu être rattrapé en saison, le deuxième problème n'a pas pu être rattrapé. Dans le cas où ce 2^{ème} problème n'aurait pas eu lieu, une réduction de 21% de l'eau d'irrigation aurait été enregistrée pour la modalité sous ombrage, ce qui est cohérent avec les années précédentes.

L'économie d'eau théorique attendue sous AVD reste ainsi de l'ordre de 20% par rapport à la Référence.



Objectif confort eau dans le sol

Ref : 700 mm

Année	Proportion irrigation sous ombrage	Cumul irrigation témoin
2019	- 30 %	1 150 mm
2020	- 6 %	750 mm
2021	- 30 %	1 380 mm
2022	-1%	914 mm

Problèmes techniques en 2022

Les arbres témoins ont reçu plus d'eau d'irrigation que les besoins en eau des arbres pour maintenir les arbres en grand confort hydrique pour les besoins expérimentaux. En effet, en moyenne, 1093 mm d'eau ont été apportés sur la saison contre 700 mm avant notre expérimentation sur cette même parcelle.

- **Nectarines :**

Sur le dispositif expérimental d'Etoile sur Rhône en nectarines, une **diminution de 25% de l'irrigation** a été appliquée sous les dispositifs agrivoltaïques en comparaison du témoin.

7.4.3 Un statut hydrique plus confortable

- **Pommiers :**

Bien que toutes nos expérimentations menées sur le site de La Pugère aient été menées afin d'offrir des **conditions hydriques confortables aux différentes modalités** suivies, le statut hydrique sous la structure agrivoltaïque est resté plus élevé que celui du témoin sur toute la durée de la période estivale irriguée grâce au microclimat plus favorable décrit ci-dessus. Pendant la journée, le potentiel hydrique de la tige des pommiers sous panneaux photovoltaïques est resté environ **20 % plus élevé (+ 0,25 MPa en moyenne)** que le témoin et ce sur les trois saisons d'expérimentation (2019-2021), reflétant un **meilleur confort hydrique des arbres ombrés malgré les diminutions d'apports en eau.**

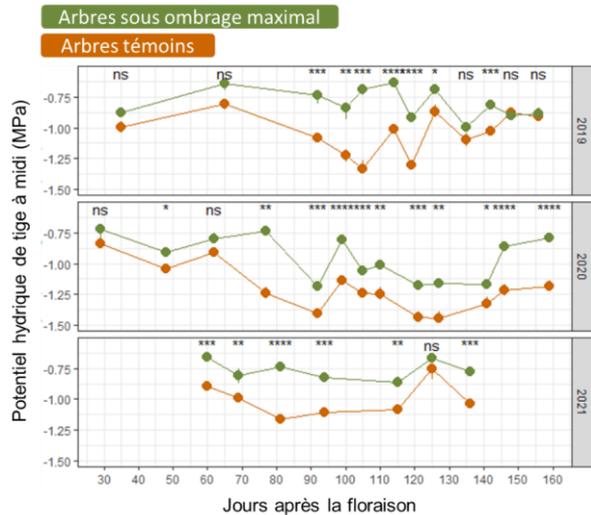


Figure 17: Statut hydrique de tige à midi (MPa) sur l'ensemble des saisons 2019-2021 sous ombrage maximal et sur la partie témoin pour le dispositif expérimental de la Pugère en pommiers. (Juillion et al. 2022). Les étoiles au-dessus des dates indiquent la puissance de la significativité des différences entre les deux modalités tandis que ns indique que les différences ne sont pas significatives.

Ce confort peut être explicité par de nombreux indicateurs tels que la réduction de l'ETP, mais surtout par la réduction du stress hydrique : il est jusqu'à 63% plus élevé en zone témoin notamment lors de l'épisode caniculaire très intense de juillet 2019.

- **Nectarines :**

Sur le site expérimental d'Etoile sur Rhône en nectarine, le statut hydrique minimal des arbres sous agrivoltaïsme était également **plus favorable** que celui des arbres témoins **de l'ordre de 20% malgré les diminutions d'apports en eau.**

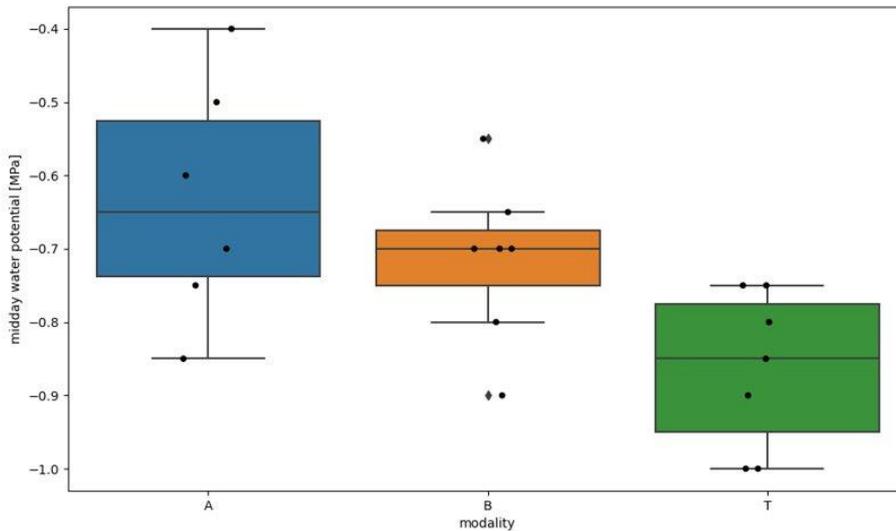


Figure 18: Statut hydrique de tige à midi (MPa) sur l'ensemble des saisons 2019-2021 sous ombrage (A,B) et sur la partie témoin (T) pour le dispositif expérimental d'Etoile-sur-Rhône en nectarines. (source : Sunagri)

- **Cerises :**

Sur le site expérimental de Loriol en cerises, le statut hydrique minimal estival (mesures du 31/08/2022) était également **plus favorable sous agrivoltaïsme** que celui des cerisiers témoins de l'ordre de 30-40% pour les variétés Bigalise et Burlat pour une quantité d'eau apportée similaire.

7.4.4 Augmentation de la réserve en eau disponible

- **Pommiers en ombrage maximal :**

En parallèle d'une réduction des quantités d'eau apportées, on constate une **réduction de la consommation d'eau disponible** sur le dispositif expérimental de la Pugère. Cet effet découle de la régulation du microclimat à l'ombre des panneaux, offrant des conditions hydriques, thermiques et radiatives plus confortables aux plantes. Ainsi on **réduit la transpiration, l'irrigation et la consommation en eau**. Les modalités ombrées montrent également une **réserve en eau supérieure**.

7.5 Tableau récapitulatif

Effet de l'agrivoltaïsme dynamique	Pommiers				Nectarines	Cerises
	2019	2020	2021	2022	2022	2022
Température de l'air	↘	↘	↘	↘	↘	
Humidité relative de l'air	↗	↗	↗	↗		
Apports en eau	↘	↘	↘	ns	↘	
Stress hydrique de la plante	↘	↘	↘		↘	↘

Réserve en eau du sol



Grâce à l'ombrage apporté par la structure agrivoltaïque, le microclimat est plus favorable avec une réduction de l'évapotranspiration et des pertes d'eau de la plante. On observe un statut hydrique plus favorable. La structure agrivoltaïque permet ainsi une économie d'eau d'irrigation.

8 Impact de l'AVD sur la croissance végétative

8.1 Contexte

Dans le cadre des dispositifs agrivoltaïques dynamiques et des conditions particulières d'ombrage alternant, il est important de s'intéresser aux conséquences sur la croissance végétative à l'échelle de la plante. En effet, la plante perçoit son environnement lumineux et **adapte sa croissance végétative et son développement**.

Sous ombrage, deux stratégies complémentaires ont été documentées :

- La première stratégie consiste à **diminuer la croissance totale** dans le cas de réserves carbonées limitantes, avec une réduction de la croissance et du diamètre des pousses (Buisson et Lee 1993 sur papayers) et une diminution de la surface foliaire totale et de la croissance en hauteur des plantes (Israëli et al. 1995 sur bananiers).
- La deuxième stratégie, nommée « **Évitement de l'ombre** » consiste à maximiser l'occupation de l'espace via des réponses morphologiques et phénologiques : élongation des pousses (Givnish, 1988) et une diminution des ramifications (Valladares et Niinemets, 2008) pour se trouver dans des conditions de développement plus favorables (Mupambi et al., 2018). Une deuxième réponse consiste à modifier la morphologie foliaire. Les feuilles ayant poussé en environnement lumineux réduit sont caractérisées par une augmentation de leur surface foliaire spécifique (Gommers et al., 2013). Cette variable est définie comme le ratio entre la surface foliaire et sa masse sèche ($m_2.kg^{-1}$) et son augmentation permet de capter un maximum du rayonnement pour une masse sèche de feuille donnée.

Si ces phénomènes d'évitement de l'ombre et d'adaptation à l'ombrage ont été largement étudiés dans le cas de dispositifs d'ombrage continus comme des filets d'ombrage (Retamales et al., 2008; Torres et al., 2018), les conséquences de l'alternance d'épisodes de rayonnement incident fort et très réduit, ombrage fluctuant typiquement associé à l'agrivoltaïsme, n'ont pas été étudiés à notre connaissance, malgré un développement rapide de ces dispositifs au niveau mondial ces dernières années (Weselek et al., 2019).

8.2 Enjeux de la solution

Les stratégies de pilotage envisagées par Sun'Agri incluent des périodes d'ombrage minimal à certains stades clés de la plante ainsi qu'un ombrage maximal lors des besoins de protection de la plante notamment. Cette alternance d'épisodes de rayonnement incident fort et très réduit pourrait modifier les paramètres architecturaux et morphologiques des feuilles et entraîner des conséquences sur la croissance végétative à l'échelle de la plante. Ces conséquences pourraient correspondre à un effet sur l'acquisition carbonée à l'échelle de la plante, un effet sur les réserves carbonées ou encore sur la répartition du carbone au sein des différents compartiments. Il semble donc nécessaire de comprendre ces effets afin de les prendre en compte lors de la construction des stratégies d'ombrage.

8.3 Protocoles expérimentaux mis en place

Site concerné	Variable observée	Type de mesure
La Pugère	Surface foliaire spécifique	Mesure de la surface et de la masse sèche des feuilles
	Bilan de croissance des pousses en fin de saison	Comptage et mesure de l'ensemble des pousses de l'année

	Surface foliaire totale	Relation entre le nombre de feuilles et la longueur de pousses / mesures de l'ensemble des pousses
	Croissance des troncs annuelle	Mesure de la circonférence des troncs
Étoile-sur-Rhône	Surface foliaire spécifique	Mesure de la surface et de la masse sèche des feuilles
	Croissance des pousses	Mesures de longueur des pousses
	Architecture de la canopée	Hauteur et largeur de la canopée
	Croissance des troncs annuelle	Mesure de la circonférence des troncs
Loriol	Surface foliaire spécifique	Mesure de la surface et de la masse sèche des feuilles

8.4 Résultats

Les résultats disponibles à ce jour et présentés ci-après proviennent des sites expérimentaux de la Pugère (pommes), d'Étoile sur Rhône (nectarines) et Loriol (cerises) pour certains. D'autres résultats de la saison 2022 sont encore en cours d'analyse et seront disponibles au cours de l'année 2023.

8.4.1 Morphologie des feuilles : la surface foliaire spécifique

- **Pommiers :**

Un **changement dans la morphologie foliaire a été observé chaque année (2019-2020-2021)** avec une augmentation de la surface foliaire spécifique (SLA = ratio surface/masse sèche) de 22% en moyenne sous la structure agrivoltaïque pour des feuilles à l'extérieur de la canopée. **Les feuilles sont donc plus grandes et plus fines** sous la structure agrivoltaïque, ce qui peut être associé à des **risques de pertes hydriques et de sensibilité aux ravageurs**.

En 2021, un **ombrage plus léger a été mis en place dès juillet**, sans impacter le **SLA qui est resté stable**, indiquant que les **conditions lumineuses au moment de la mise en place de la canopée sont déterminantes**.

En 2022, malgré un ombrage minimal pendant la mise en place de la canopée, le SLA est supérieur pour les feuilles sous la structure agrivoltaïque. Ces résultats seront confirmés en 2023, où la même stratégie d'ombrage sera appliquée.

- **Nectarines :**

Une **augmentation significative d'environ 15% des surfaces foliaires spécifiques** a été observée en juillet 2022 sous les modalités agrivoltaïques en comparaison des feuilles témoins. Aucune différence significative n'a été observée entre les 2 stratégies d'ombrage.

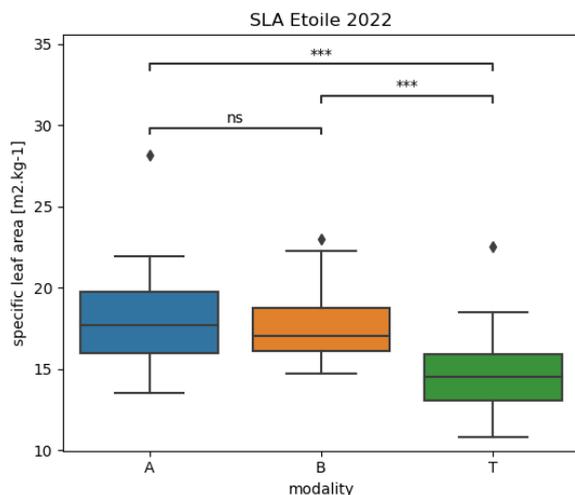


Figure 19: Surface foliaire spécifique mesurée le 18 juillet 2022 pour des feuilles sous dispositif agrivoltaïque (A,B) et témoins (T) pour le dispositif en nectarines d'Etoile-sur-Rhône. ns : $P > 0.05$ / * : $P \leq 0.05$ / ** : $P \leq 0.01$ / *** : $P \leq 0.001$ (Source Sun'Agri)

- **Cerises :**

Les mesures de surface foliaire spécifique en juillet 2022 indiquent des résultats **différents selon la variété considérée** avec aucun effet de la structure agrivoltaïque pour la variété Bigalise et une augmentation significative d'une des deux modalités ombrées par rapport au témoin pour la variété Primulat. La variabilité des mesures était très importante.

8.4.2 Croissance des pousses

- **Pommiers :**

L'ombrage maximal n'a **pas modifié la longueur de pousses totale** à l'échelle de l'arbre en fin de saison 2019, 2020 et 2021. Cependant, chaque année, l'ombrage a impacté le type de longueurs de pousses avec une plus grande proportion de très courtes et très longues pousses sous ombrage.

La distribution des longueurs de pousses et leurs nombres amènent à une **longueur de pousses totale à l'échelle de l'arbre similaire** entre les 2 modalités (Figure 7C) avec en moyenne une croissance cumulée des pousses atteignant une longueur de 80 mètres lors des 3 saisons expérimentales.

La **pesée du bois de taille** n'a **pas révélé de différences significatives** entre les modalités en fin de saison 2019, 2020 et 2021.

- **Nectarines :**

Aucune différence significative n'a été trouvée en termes de croissance du diamètre des rameaux bois en 2022 ou de croissance des rameaux terminaux entre différentes dates en cours de saison entre les modalités sous structure agrivoltaïque et la modalité témoin.

Les mesures de **largeur et de hauteur de la canopée** ont également indiqué **aucun effet significatif** de la structure agrivoltaïque.

8.4.3 Surface foliaire totale à l'échelle de l'arbre

Pommiers : En augmentant la surface foliaire individuelle, l'ombrage maximal des panneaux photovoltaïques a permis d'**augmenter la surface foliaire totale des pommiers** (pas de modification de la relation entre le nombre de feuilles et la longueur de pousse sous ombrage). L'estimation de la

surface foliaire totale pour les 10 arbres expérimentaux a permis d'obtenir des valeurs médianes de 14.2 m², 14.2 m² et 14.4 m² pour les arbres témoins contre 16.6 m², 17 m² et 18.5 m² pour les arbres ombrés en fin de saison 2019, 2020 et 2021 respectivement. Ces résultats suggèrent une **augmentation de la surface foliaire de 14, 16 et 22 % sous ombrage au cours des années**. Ces différences sont significatives en 2021 mais pas en 2019 et 2020 (grande variabilité des mesures). Une augmentation de la surface foliaire totale permet de compenser, au moins en partie, la perte de rayonnement en ce qui concerne l'acquisition carbonée à l'échelle de l'arbre.

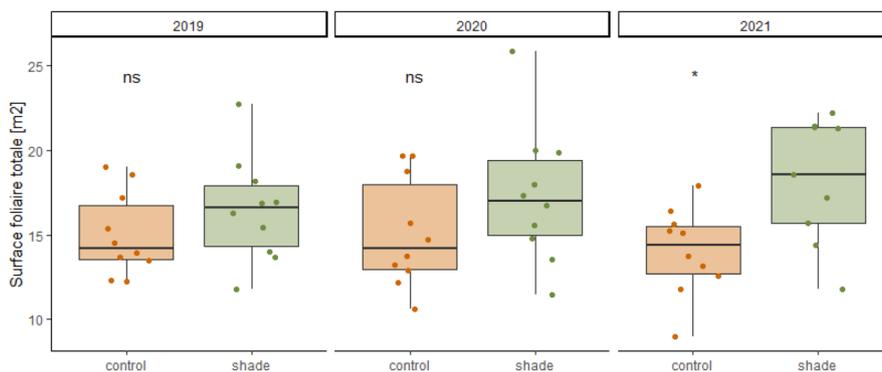


Figure 20: Estimation de la surface foliaire totale [m²] en fin de saison 2019, 2020 et 2021 pour 10 arbres témoins (control) et sous ombrage maximal (shade) sur le dispositif expérimental de pommiers en ombrage maximal à la Pugère

ns : $P > 0.05$ / * : $P \leq 0.05$ / ** : $P \leq 0.01$ / *** : $P \leq 0.001$
 (Source : Thèse Perrine Juillion avec INRAE Avignon PSH)

8.4.4 Croissance des troncs

- **Pommiers :**

Dès l'installation du dispositif d'ombrage avec une stratégie d'ombrage maximal, les arbres ombrés ont présenté une **croissance annuelle des troncs significativement diminuée** (-34 %) : 602 mm² de croissance annuelle moyenne en 2019 contre 916 mm² pour les arbres témoins. La croissance est également significativement diminuée (-42 %) en 2021 avec en moyenne 559 mm² de croissance sous ombrage contre 967 mm² pour le témoin. Seule l'année 2020 est marquée par une croissance similaire entre les modalités, année marquée pour la modalité témoin par une très forte réduction de sa croissance végétative.

Au terme de ces trois années expérimentales en ombrage maximal, le **cumul moyen de croissance de la section du tronc** est de 1544 mm² sous ombrage contre 2200 mm² pour les arbres témoins, soit une **diminution de 30%**. La réduction significative de la vigueur de l'arbre vue au travers de la croissance de la section des troncs interroge sur la pérennité du verger, confirmant que la stratégie de **tracking solaire toute l'année n'est pas viable à long-terme** pour le pommier.

Cependant, cette croissance annuelle du tronc est corrélée négativement à la charge en fruit (Webster et Brown 1980) et une **alternance biennale** est visible chez le pommier avec une année de croissance végétative forte lors des années « off » avec de faibles rendements et des années de croissance végétative faible lorsque les charges en fruits sont importantes. La croissance annuelle présente une alternance marquée avec une croissance forte (2017, 2019 et 2021) et faible (2018 et 2020). Ce phénomène apparaît beaucoup plus marqué pour les arbres témoins. Les **phénomènes d'alternance ont ainsi été atténués avec l'ombrage**, avec une **croissance végétative plus régulière** et un rendement plus stable, mais une diminution moyenne des rendements en fruits.

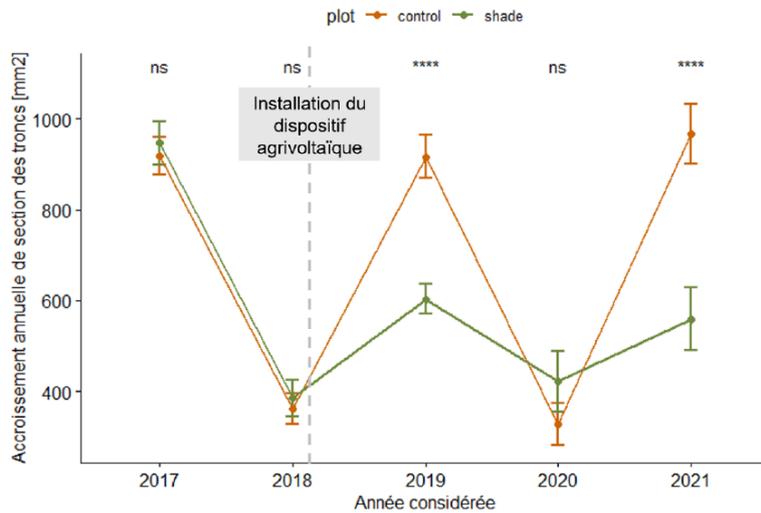


Figure 21: Croissance annuelle moyenne (\pm erreur standard) de la section des troncs [mm²] pour les arbres témoins (control) et sous ombrage permanent (shade) sur le dispositif expérimental de pommiers en ombrage maximal à la Pugère entre 2017 et 2020

ns : $P > 0.05$ / * : $P \leq 0.05$ / ** : $P \leq 0.01$ / *** : $P \leq 0.001$
 (Source : Thèse Perrine Juillion avec INRAE Avignon PSH)

En 2022, le gain moyen de la modalité témoin (21.2mm) est supérieur à celui de la modalité sous agrivoltaïsme (13.4mm). La modalité témoin présentant désormais une circonférence cumulée moyenne de 309 mm contre 300 mm pour l'AVD.

- **Nectarines :**

La croissance des circonférences de tronc 2022 (entre fin février et fin août) est **statistiquement indifférente** entre les modalités agrivoltaïques et le témoin ($P=0.58$). Les mesures ont montré une variabilité importante au sein de chaque modalité.

Croissance des circonférences de troncs 2022

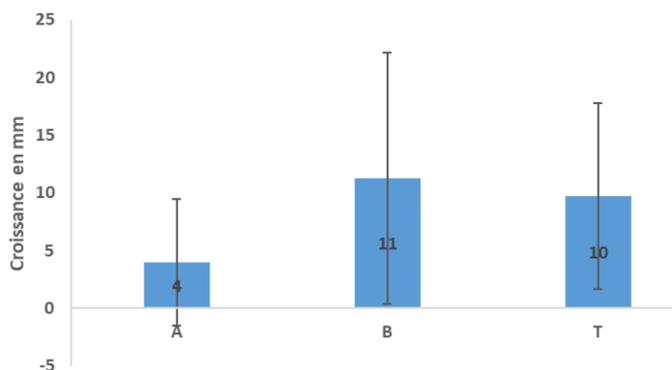


Figure 22: Croissance annuelle moyenne (\pm erreur standard) de la circonférence des troncs [mm] pour les arbres témoins (T) et sous ombrage permanent (A,B) sur le dispositif expérimental de nectarines à Etoile-sur-Rhône entre fin février et fin août 2022

Commenté [SB1]: pour mon info personnelle, qu'est ce que ça implique ?

(Source : SEFRA)

8.4.5 Tableau récapitulatif

Effet de l'agrivoltaïsme dynamique	Pommiers				Nectarines	Cerises
	2019	2020	2021	2022	2022	2022
SLA	↗	↗	↗	↗	↗	Selon variété
Croissance des pousses	ns	ns	ns		ns	
Surface foliaire totale	ns	ns	↗			
Croissance des troncs	↘	ns	↘	↘	ns	

Avec une stratégie d'ombrage maximale, les pommiers sous agrivoltaïsme ont montré une **croissance végétative maintenue** en termes de pousses, et même une augmentation de la surface foliaire totale malgré une diminution de l'acquisition carbonée. La forte diminution de la croissance du tronc reflète cependant que cette stratégie de tracking solaire permanent n'est pas pérenne. Les stratégies d'ombrage utilisées sur nectarines en 2022 ont quant à elle permis de maintenir la croissance des troncs et des pousses.

Sur l'ensemble des dispositifs, on observe également une augmentation de la surface foliaire spécifique : **les feuilles sont donc plus grandes et plus fines** sous la structure agrivoltaïque, ce qui peut être associé à des **risques de pertes hydriques et de sensibilité aux ravageurs**. Cependant, en augmentant la surface foliaire individuelle, l'ombrage maximal des panneaux photovoltaïques a permis d'**augmenter la surface foliaire totale des pommiers en 2021**, compensant au moins en partie la perte de rayonnement en termes d'acquisition carbonée à l'échelle de l'arbre.

9 Impact de l'AVD sur la productivité des cultures

9.1 Contexte

Le changement climatique amène de nouvelles conditions, qui rendent certaines zones peu à peu inexploitable pour l'agriculture. D'après le GIEC, 8 % des terres agricoles actuelles deviendront climatiquement inadaptées d'ici 2100, et jusqu'à 30% selon le scénario le plus pessimiste. La hausse des températures accentue notamment le risque de gel des récoltes, qui peut entraîner des conséquences dramatiques. Les floraisons surviennent en effet de plus en plus tôt, exposant les futurs fruits aux gelées tardives. Le fruit en développement est alors freiné dans sa croissance, voire détruit. Le dernier rapport du GIEC identifie quatre canaux principaux via lesquels le changement climatique affecte la capacité productive des écosystèmes :

- L'augmentation moyenne des températures,
- Les changements de fréquence, d'intensité, d'amplitude spatiale et temporelle des événements météorologiques et climatiques extrêmes,
- La modification des cycles biogéochimiques (augmentation des concentrations en dioxyde de carbone (CO₂) et ozone (O₃)),
- Les pertes dues aux ravageurs, maladies et mauvaises herbes.

D'après une revue publiée dans les Comptes-rendus de l'Académie américaine des sciences (PNAS), les récoltes de fruits et légumes pourraient être diminuées de plus de 30% en moyenne si le réchauffement climatique se poursuit à son rythme actuel.

Si certains arbres fruitiers sont adaptés aux climats chauds et secs (amandier, oliviers par exemple), d'autres espèces fruitières de climat tempéré souffrent déjà des conséquences du changement climatique. En effet, les températures élevées, intensifiées par le changement climatique, peuvent réduire la croissance des fruits en raison d'une activité photosynthétique inhibée. A partir de 35°C, les arbres se retrouvent en situation de stress, leurs stomates se ferment afin de réguler les échanges entre le sol et l'atmosphère. Ce processus permet à l'arbre de moins transpirer, conservant ainsi ses réserves en eau. Cependant, l'arbre va également capter moins de CO₂ atmosphérique, indispensable pour la photosynthèse, ralentissant ainsi la croissance de l'arbre. Par ailleurs, les nuits vont également être plus chaudes. L'ensemble des nuits de juillet et août le seront d'ici 2100, amenant à une dégradation qualitative de la récolte (comme une dépigmentation des fruits). La qualité et la quantité des produits agricoles sont donc impactées par des températures trop élevées.

Dans le contexte actuel de changement climatique, certaines adaptations sont donc nécessaires pour maintenir la production de certains arbres fruitiers dans les zones actuellement productrices.

9.2 Enjeux de la solution

L'enjeu de l'agrovoltisme dynamique est de protéger les fruits des aléas du changement climatique et notamment des stress thermiques, hydriques et radiatifs tout en maintenant un rayonnement suffisant pour que l'arbre produise suffisamment de fruits. Les stratégies de pilotage de Sun'Agri incluent une protection face aux périodes de rayonnements ou de températures excessifs (les panneaux du dispositif AVD s'orientent perpendiculairement aux rayons du soleil au-dessus d'un seuil de rayonnement et/ou de température) et utilisent les données issues des expérimentations pour préserver voire améliorer les rendements. La productivité s'obtient en lissant les effets inter-annuels liés aux aléas climatique mais aussi en optimisant le rendement au pas annuel.

9.3 Protocoles expérimentaux mis en place

Site concerné	Variable observée	Type de mesure
La Pugère	Densité florale	Comptage du nombre de fleurs sur une longueur de pousse
	Floribondité	Note visuelle de la charge florale de chaque arbre
	Chute physiologique	Récupération des organes chutés hebdomadaire
	Masse fraîche des fruits	Pesée à la récolte
	Rendement	Masse totale récoltée rapportée au nombre d'arbres
Étoile-sur-Rhône	Chute physiologique	Comptage des fruits au sol à la récolte rapporté au nombre de fruits récolté
	Masse fraîche des fruits	Pesée à la récolte
	Rendement	Masse totale récoltée rapportée au nombre d'arbres
Loriol	Rendement	Masse totale récoltée rapportée au nombre d'arbres

9.4 Résultats

Les résultats disponibles à ce jour et présentés ci-après proviennent des sites expérimentaux de la Pugère (pommes) et d'Etoile sur Rhône (nectarines) et Loriol (cerises) pour certains. D'autres résultats de la saison 2022 sont encore en cours d'analyse et seront disponibles au cours de l'année 2023.

9.4.1 Impacts sur la floraison

*Pour évaluer l'impact de l'ombrage sur le retour à fleurs des arbres fruitiers, une **étude pluriannuelle est nécessaire** puisque le devenir des bourgeons est déterminé en année n-1 pour l'année n, lors de l'**induction florale**. Cette induction florale a lieu au printemps, et dépend non seulement de l'espèce, de son cycle, des conditions climatiques mais aussi de la photopériode, de la présence ou de l'absence de certaines hormones et des conditions de nutrition.*

Les résultats 2023 de la floraison pour les dispositifs d'Etoile-sur-Rhône et Loriol seront donc déterminants après une première année sous agrivoltaïsme dynamique.

- **Pommiers :**

Sur le site expérimental de La Pugère, où un ombrage maximal a été appliqué pendant presque trois saisons (2019-2021) pour observer les réponses limites de l'arbre, une **diminution du nombre de fleurs par mètre de bois** de 35 % en 2019, 26 % en 2020 et 33 % en 2021 a été observée sous ombrage en comparaison de la modalité témoin pour un arbre moyen.

Cette composante du rendement est déterminante et dirige en partie les résultats observés sur le rendement final.

En fin de saison 2021, un **retour à la lumière** a été mis en place afin de favoriser le retour à fleurs lors de la floraison 2022. En 2022, le ratio de fleurs entre bois de 1 an et bois de 2 ans indique que seules

8% de fleurs sont issues du bois de 1 an sous ombrage agrivoltaïque contre 16% pour la modalité témoin. Cette différence n'est toutefois pas significative statistiquement. La comparaison de 2021 et 2022 semble indiquer une plus grande homogénéité d'émission en fleurs et en corymbes sur la modalité témoin, là où la **modalité sous ombrage semble varier pour la première fois** depuis l'installation des panneaux. Cette observation réalisée à charge égale entre les modalités semble confirmer la tendance observée à l'échelle de la parcelle, où **41% des arbres présentent une charge nulle (20% en 2021)** contre seulement 16% sur la modalité témoin. Cependant, un **retour d'une proportion plus importante d'arbres chargés à très chargés** a également été observée sous ombrage (19% des arbres contre 14% en 2021 et 8% en 2020), contrairement aux années précédentes en ombrage maximal. La **modification du pilotage** des panneaux pourrait expliquer la **variation d'induction florale** sous ombrage.

9.4.2 Impacts sur la chute physiologique

- **Pommiers :**

Sur le dispositif expérimental de la Pugère en ombrage maximal, la **chute des fleurs de pommiers a été plus faible sous ombrage** en 2020 (48% sous structure agrivoltaïque vs 66% sur la partie témoin) et en 2021 (57% sous structure agrivoltaïque vs 85% sur la partie témoin). Si en 2020 cela été dû à une **charge florale initiale plus faible sous ombrage**, en 2021 cela est majoritairement dû à l'épisode de gel du 7-8 avril qui a fortement fait chuter les fleurs témoins, les fleurs sous la structure agrivoltaïque ayant été **protégées du gel** (cf *mémo protection contre le gel*).

Plus tard dans la saison, l'ombrage semble **augmenter la chute des jeunes fruits** avec 25% de chute des fruits sous ombrage en 2020 contre 10% sur la modalité témoin et 9% de chute des fruits sous ombrage en 2021 contre 2% sur la modalité témoin. Cette chute limitée des fruits en 2021 peut être associée à la forte chute des fleurs cette année-là. L'augmentation de la chute des fruits pour les arbres ombragés pourrait être due à une **disponibilité limitée du carbone** et à une éventuelle **concurrence pour les ressources en carbone entre les organes**.

Un ombrage à certaines périodes clés de l'induction florale et du développement précoce du fruit pourrait permettre de **s'émanciper des interventions d'éclaircissage** très chronophages et/ou consommatrices de produits chimiques.

En 2022, un **ombrage minimal a été appliqué pendant la période de chute physiologique** : les taux de chute sur arbre entier ont été plus importants dans la modalité témoin, quel que soit le stade phénologique, avec 35% d'écart entre les deux modalités. C'est au **stade fleur** qu'on observe un **pic de chute pour les 2 modalités** quel que soit l'année, avec une chute significativement plus importante de 42% sur la modalité témoin par rapport à la modalité ombrée en 2022. A l'inverse des années précédentes, les chutes sur fleurs sont moins importantes qu'à l'accoutumée en 2022. L'étalement de la chute physiologique habituellement observée jusqu'au stade T pour la modalité sous ombrage semble également moins prononcé, et la chute est d'avantage regroupée durant la formation des petits fruits, à l'instar de la modalité témoin. Le **retour à la lumière** des arbres sous AVD de juillet 2021 à mi-juin 2022 semble permettre de **garantir l'accroche des organes fructifères**.

- **Nectarines :**

A la récolte 2022, un comptage des fruits chutés a permis d'obtenir un **pourcentage de chute similaire** (autour de 13%) pour les modalités sous agrivoltaïsme et la modalité témoin.

9.4.3 Impacts sur la masse fraîche des fruits

- **Pommiers :**

Pour la campagne 2019, comme la campagne 2020, les pommes ont été récoltées à la même date quelle que soit la modalité d'ombrage. A la récolte, l'ombrage maximal du dispositif expérimental de la Pugère a **très peu affecté la masse fraîche des pommes** avec une diminution de 17% en 2019 mais un maintien en 2020 et en 2021 à charge en fruits équivalente. Ce maintien de la masse fraîche sous ombrage a été possible grâce à une proportion en eau dans le fruit plus élevée sous agrivoltaïsme

puisqu'en moyenne, une diminution de la masse sèche de 35% a été observée sous ombrage (diminution de l'acquisition carbonée sous ombrage).

- **Nectarines :**

Les résultats de la récolte 2022 sur le dispositif d'Etoile-sur-Rhône indiquent **une diminution significative de la masse fraîche des nectarines** (entre -9 et -14%) sous la structure agrivoltaïque avec en moyenne 158 et 167 g pour les modalités agrivoltaïques contre 184g pour la modalité témoin. Les deux stratégies d'ombrage indiquent également une différence significative avec des poids significativement plus importants pour la stratégie d'ombrage ciblant des stades clés en comparaison de la stratégie d'ombrage constant, relevant **l'importance des moments d'ombrage** pour un même pourcentage d'ombrage sur la saison.

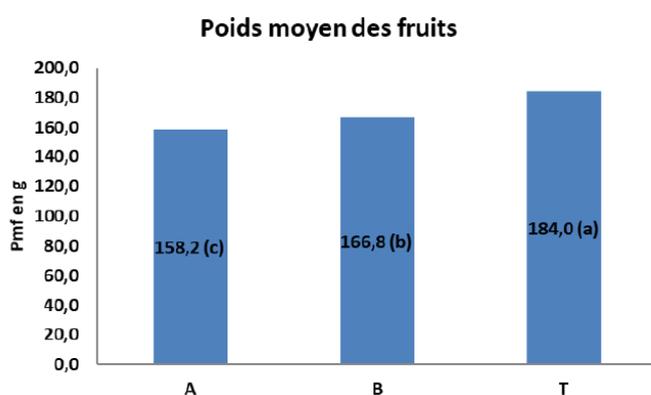


Figure 23: Poids moyen frais à la récolte 2022 pour des nectarines sous la structure agrivoltaïque (A,B) et témoins (T) sur le dispositif agrivoltaïque d'Etoile sur Rhône (Source : SEFRA)

9.4.4 Impacts sur le rendement

- **Pommiers :**

Pour le dispositif expérimental en pommiers, soumis à l'ombrage le plus sévère entre 2019 et 2021, **l'ombrage a diminué le rendement parcellaire** de 32% en 2019 et 27% en 2020. En 2021, un épisode de gel survenu le 7-8 avril a considérablement affecté le rendement témoin avec 10 t/ha à la récolte 2021 (contre 43 et 51 t/ha aux récoltes 2019 et 2020 respectivement). La **protection gel** sous la structure agrivoltaïque a permis un rendement supérieur au témoin avec 19 t/ha, soit + **90%**. En 2022, au niveau de la parcelle, la récolte confirme les tendances observées au niveau des charges florales des arbres (41% de charge nulle sous ombrage contre 16% sur la modalité témoin). La modalité **témoin renoue avec son rendement moyen avec une production de 53.75 t/ha**. La modalité **ombrée reste quant à elle stable** avec un rendement parcellaire de **24.88 t/ha**.

- **Nectarine :**

Les productions commercialisables sont statistiquement différentes en 2022. Avec 67.1 t/ha, le **témoin présente la production la plus élevée** contre 52.5 t/ha et 52.7 t/ha pour les modalités sous agrivoltaïsme dynamique (diminution de 21%).

- **Cerises :**

Aucune différence n'a été observée entre les modalités sous ombrage agrivoltaïque et le témoin en termes de production 2022.

9.4.5 Une diminution des effets d'alternance

Une **alternance biannuelle** est classiquement observée dans les vergers de pommiers, avec une succession d'années à forte production et d'années à faible production, en fonction de la difficulté à maîtriser la vigueur de l'arbre.

- **Pommiers :**

A l'échelle de la parcelle, une **diminution des phénomènes d'alternance** a été observée à la floraison des pommiers sous ombrage maximal de la Pugère : une forte alternance a été observée sur la parcelle témoin avec un nombre élevé d'arbres à forte charge florale en 2020 et de nombreux arbres sans fleurs en 2021 tandis qu'au contraire, la floribondité de la modalité agrivoltaïque a été plus stable entre 2020 et 2021. La structure agrivoltaïque, en limitant le nombre de fleurs par arbre et donc les charges en fruits très fortes, permet de réguler la charge en fruits des arbres et de lisser les rendements entre les années à l'échelle de la parcelle. Les années d'aléas climatique important de type gel tardif, la structure AVD permet au contraire de limiter les pertes de rendement.

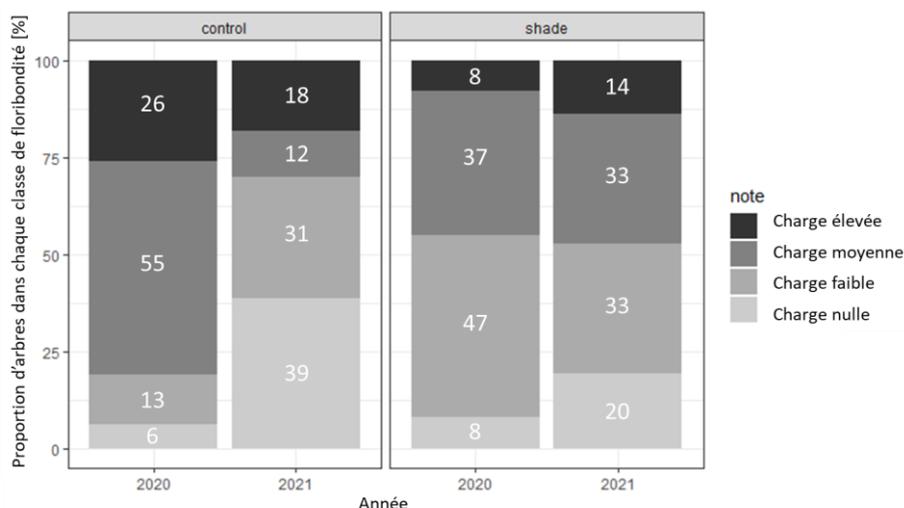


Figure 24: Proportion d'arbres dans chaque classe de floribondité (nulle, faible, moyenne et élevée) dans les modalités sous agrivoltaïsme (Shade) et témoin (control) en 2020 et 2021. Les nombres dans l'histogramme représentent proportion d'arbres dans chaque classe de floribondité pour la modalité et l'année considérée.

(Source : Juillion et al. 2022)

Avec un **retour à l'ensoleillement** de cette zone depuis la fin d'été 2021 (soit 270 jours en date de ce comptage), la charge florale observée à la floraison 2022 semble **fortement modifiée** en faveur des charges nulles. Sur les 147 arbres couverts par le dispositif photovoltaïque, 41% des effectifs présentent une charge nulle, 57% ont une charge faible à forte et 3% ont une charge classée très forte, classe non présente les années précédentes. Sur les 264 arbres composant la modalité témoin, 16% présentent une charge nulle, 30% ont une charge modérée à forte et 55% présentent une charge classée très forte. En comparaison avec 2021, la **modalité témoin** voit la proportion de ses charges extrêmes s'inverser, typique du **phénomène d'alternance**, tandis que les charges intermédiaires semblent se maintenir. Pour la zone ombrée, le comportement entre les 2021 et 2022 est très différent. En effet, la part de charges nulles a été multipliée par 2 mais la proportion d'arbres chargés a très chargés a également augmentée.

Les comptages de 2023 confirmeront ou infirmeront un **retour au caractère alternant** de la zone sous système agrivoltaïque dû à un retour à la lumière en fin de saison 2021.

Cette alternance biennale est également visible dans les mesures de croissance des troncs avec une année de croissance végétative forte lors des années avec de faibles rendements et des années de croissance végétative faible lorsque les charges en fruits sont importantes. Les phénomènes d'alternance ont été atténué avec l'ombrage, avec une **croissance des troncs plus régulière entre les années**.

9.4.6 Tableau récapitulatif

Effet de l'agrivoltaïsme dynamique	Pommiers				Nectarines	Cerises
	2019	2020	2021	2022	2022	2022
Floraison	↘	↘	↘	↘		
Chute physiologique fleurs	↘	↘	↘	↘		
Chute physiologique fruits	↗	↗	↗	↘	ns	
Masse fraîche des fruits	↘	ns	ns		↘	
Rendement (t/ha)	↘	↘	↗	↘	↘	ns
Alternance		↘		Retour de l'alternance ?		

Un taux d'ombrage trop important va limiter les rendements en fruits par manque d'acquisition carbonée (Récoltes 2019 et 2021 sur la Pugère). Une stratégie d'ombrage adaptée peut limiter les pertes de production (Etoile sur Rhône 2022), voire maintenir le rendement (Loriol 2022). Lors des **années de fort aléas climatique**, la structure agrivoltaïque peut permettre une augmentation du rendement par rapport à une parcelle sans protection agrivoltaïque, comme cela a été le cas à la Pugère avec l'épisode de gel d'avril 2022. De plus, la structure agrivoltaïque permet à terme de **lisser les rendements entre les années**. Ces résultats seront d'autant plus vrais dans un contexte de changement climatique où les épisodes de sécheresse et de gel tardif seront de plus en plus fréquents.

10 Impact de l'AVD sur la qualité des fruits

10.1 Contexte



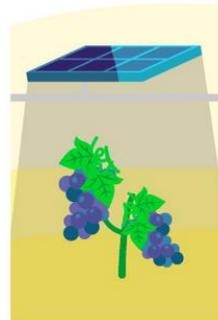
Le changement climatique, en avançant la date de floraison et en augmentant les températures pendant la période de croissance et de maturation des fruits, peut altérer la qualité des fruits avec une diminution des concentrations en acide, une diminution de la fermeté des pommes (Sugiura et al., 2013) et une perte de coloration des variétés bicolores de poires (Steyn et al., 2004). Un rayonnement solaire excessif peut également entraîner des dommages physiques sur les fruits, appelés coups de soleil (*cf photo, source dailyscience*), qui représentent une perte économique importante et croissante pour les producteurs avec le changement climatique (Schrader et al., 2009). La qualité de la

production est donc directement impactée par le changement climatique, ce qui s'exprime ensuite sur le rendement commercialisable avec une part de fruits non commercialisable de plus en plus élevée. Ces cultures nécessitent donc une adaptation des pratiques culturales afin de limiter les risques liés au changement climatique : l'agrivoltaïsme dynamique permet une barrière physique face aux rayonnements et aux températures excessifs. Ces dernières années, de nombreux projets agrivoltaïques ont été développés dans le monde entier (Weselek et al., 2019) mais l'effet des systèmes agrivoltaïques sur la qualité des fruits a été très peu étudiée. En effet, de nombreux paramètres de qualité sont influencés par le rayonnement solaire, notamment la couleur des fruits (Solomakhin et Blanke, 2010), la teneur en sucre soluble (Klein et al., 2001), la teneur en amidon, l'acidité et la teneur en eau du fruit (Ryugo et Intreieri 1972 ; Arez et Flore 1986 ; Proctor et Lougheed 1976). Dans le cas d'études sur l'effet d'un ombrage continu sur les cultures, des résultats contradictoires sont rapportés, notamment en ce qui concerne la concentration en sucres solubles (Do Amarante et al. 2011 ; Widmer, 2008). Ces réponses contradictoires à l'ombrage pourraient être associées aux diverses conditions environnementales (intensité de l'ombrage, climat) et aux pratiques culturales (variété, irrigation, éclaircissage) (Campbell et al. 1992 ; Stampar et al. 2001).



10.2 Enjeux de la solution

Connaître et comprendre les effets de l'ombrage sur la qualité des fruits semble essentiel avant le développement commercial de stratégies agrivoltaïques dynamiques pour diverses cultures. L'enjeu de l'agrivoltaïsme dynamique est de protéger les fruits de ces différents stress thermiques, hydriques et radiatifs tout en maintenant tous les autres critères de qualité des fruits : fermeté, couleur, ratio sucres/acide, teneur en amidon. Les stratégies de pilotage envisagées par Sun'Agri incluent une protection face aux périodes de rayonnements ou de températures excessifs : les panneaux du dispositif AVD s'orientent perpendiculairement aux rayons du soleil au-dessus d'un seuil de rayonnement et/ou de température afin de protéger les fruits notamment.



10.3 Protocoles expérimentaux mis en place

Site concerné	Variable observée	Type de mesure
La Pugère	Date de récolte	Mesures de fermeté, degrés Brix et couleur en fonction des seuils de commercialisation
	Couleur des fruits	Colorimètre
	Rugosité des fruits à la récolte	Analyses de photographies
	Sucres dans les fruits	Indice réfractométrique, analyse des teneurs et des concentrations en sucres
	Acide malique dans les fruits	Analyse des teneurs et des concentrations en acide malique
	Teneur en matière sèche des fruits	Masse sèche et fraîche des fruits
	Dégâts sur fruits	Caractérisation du type de dégâts menant au déclassement du fruit à la récolte
Étoile-sur-Rhône	Dates de récolte	Mesures de fermeté
	Coloration des fruits à la récolte	Mesure visuelle du pourcentage de coloration des fruits
	Qualité gustative à la récolte	Indice réfractométrique (°Brix), acidité (g/l), jutosité (%)
	Conservation des fruits	Notation de fruits avec monilia en local à 21°C
Loriol	Dates de récolte	Mesures de calibres
	Couleur des fruits	Mesures visuelles avec étalon
	Sucres des fruits	Indice réfractométrique

10.4 Résultats

Les résultats disponibles à ce jour et présentés ci-après proviennent des sites expérimentaux de la Pugère (pommes), d'Étoile sur Rhône (nectarines) et Loriol (cerises) pour certains. D'autres résultats de la saison 2022 sont encore en cours d'analyse et seront disponibles au cours de l'année 2023.

10.4.1 Déclenchement de la date de récolte commerciale

- **Pommiers :**

La date de récolte commerciale du dispositif expérimental de la Pugère sur pommiers a été basée sur le suivi des indicateurs de fermeté, de degrés Brix et de chute de l'amidon pour un échantillon de fruits de chaque modalité. Les **dates de récolte n'ont pas été modifiées** pour une stratégie d'ombrage maximale, avec une récolte autour du 15 septembre chaque année (2019-2021), ni avec la stratégie d'ombrage basée sur les stades phénologiques de 2022, avec une récolte le 12/09/2022.

- **Nectarines :**

En 2022, pour le dispositif expérimental d'Etoile-sur-Rhône en nectarines, la date de récolte était basée sur la fermeté : la première récolte a eu lieu **une semaine plus tard** sous la structure agrivoltaïque, indiquant un **retard de maturité sous ombrage**.

- **Cerises :**

Un retard dans la récolte commerciale a également été observé sur le dispositif expérimental de Loriol en cerises en 2022 où le critère de déclenchement de la récolte était le calibre.

10.4.2 Une coloration sous contrôle

- **Pommiers :**

Pour le dispositif expérimental de la Pugère, où les panneaux solaires ont été en tracking solaire tout au long de la saison, la **coloration des fruits a été réduite** sous ombrage lors des 3 saisons expérimentales (2019-2022) tout en restant **au-dessus du seuil de commercialisation** de la variété 'Golden Delicious' (cf photo, source Sun'Agri). En 2022, l'ombrage réduit semble avoir atténué le manque de coloration observé durant les campagnes de plein ombrage mais les fruits récoltés sous ombrage présentent tout de même un point de teinte de moins que ceux de la modalité témoin.



- **Nectarines :**

En ce qui concerne le dispositif expérimental d'Etoile-sur-Rhône, le pourcentage de coloration des nectarines sous agrivoltaïsme n'était **pas significativement différent** de celui des fruits témoins aux récoltes 2022.

- **Cerises :**

Pour le dispositif expérimental de Loriol sur cerises en 2022, les **cerises étaient moins foncées** sous la structure agrivoltaïque. Cette diminution de la coloration n'est pas un problème, puisqu'il existe un **marché qui préfère les cerises rouges**.

10.4.3 Un meilleur aspect externe des fruits

- **Pommiers :**

Sur le dispositif expérimental de la Pugère, une **diminution de la rugosité des fruits** a été observée à la récolte en comparaison des fruits témoins lors des trois années en ombrage maximal (2019-2021). En 2022, une analyse plus poussée de l'aspect externe des fruits a été faite pour justifier leur déclassement ou leur élimination. Pour la modalité témoin, 30% des fruits ont été déclassés pour l'industrie (19%) ou éliminés (11%). Pour la modalité agrivoltaïque, 21% des fruits ont été déclassés pour l'industrie (14%) ou éliminés (7%). **Davantage de fruits ont donc été déclassés ou éliminés sur la modalité témoin que sous ombrage (+9%)**.

L'origine du déclassé ou du retrait de fruit varie selon la modalité considérée comme l'indique le tableau ci-dessous. Pour la modalité témoin, le **premier facteur de déclassé** d'un fruit s'avère être le **coup de soleil avec 43% des fruits déclassés (+35% par rapport à la modalité sous agrivoltaïsme)**, viennent ensuite les **chenilles foreuses avec 29% des fruits déclassés (+20% par rapport à la modalité sous agrivoltaïsme)** et les traces de doigts (-20% par rapport à l'AVD). Pour la modalité sous ombrage, le premier facteur de déclassé s'avère être les **traces de doigts**, puis le Bitter Pit (+11% par rapport à la Référence). A noter que les dégâts d'oiseaux et de punaises ne sont pas observés sur la modalité témoin.

Pour la rugosité, il apparaît que seuls 6% des fruits de la modalité témoin présentent moins de 5% de surface touchée contre 40% sur la modalité ombrée. Ainsi, **seulement 40% des effectifs sous ombrage présentent plus de 5% de rugosité** sur fruits, contre **94% pour la modalité témoin**.

Ainsi, il apparaît que **l'ombrage peut réduire l'intensité des brûlures sur fruits**, ou des **dégâts de chenilles foreuses** grâce à un **écran lumineux et thermique** favorable aux fruits, voire de **réduire l'intensité des rugosités sur fruits** en parcelle (mais pas sa fréquence). Au contraire, l'ombrage modulé semble accentuer l'apparition de bitter pit (effet charge), ainsi que les dégâts de punaises (ombrage à priori bénéfique pour cet insecte), tout comme les dégâts d'oiseaux et les traces de doigts (fruits plus gorgés d'eau). Ces résultats ne sont issus que d'une seule année de récolte et seront à confirmer en 2023.

Tableau 2 : Type de dégâts (%) ayant entraîné le déclassement des fruits à la récolte 2022 pour la modalité témoin et sous ombrage modulé (Source : adapté du rapport annuel 2022 de la Pugère)

Type de dégât	Illustration	Témoin	Sous ombrage
Rugosité		2%	9%
Coup de soleil		43%	8%
Oiseaux		0%	8%
Doigts		21%	43%
Eclatements pédonculaires		1%	0%
Bitter pit		4%	15%
Chenilles foreuses		29%	9%
Punaise		1%	8%

- **Nectarines :**

Sur le dispositif expérimental d'Etoile-sur-Rhône, à la récolte 2022, le pourcentage de fruits ayant des dégâts de punaise est de 2.5% sur la modalité témoin, contre 1.5% pour les modalités agrivoltaïques. Cependant, ces différences ne sont pas statistiquement significatives.

10.4.4 Un maintien de la fermeté des fruits

- **Pommiers :**

Sur le dispositif expérimental en pommiers, un **maintien de la fermeté** a été observé aux différentes récoltes (2019-2021) sous les structures agrivoltaïques à date équivalente. A la récolte 2022, la modalité agrivoltaïque présente 0.1 point de fermeté en moins vis-à-vis de la Référence, et gagne dans le même temps 4.5 points de jutosité.

10.4.5 Un effet dilution qui affecte la concentration en sucres

- **Pommiers :**

En ce qui concerne la qualité gustative des fruits sur le dispositif expérimental de la Pugère, ces expériences constituent un « témoin négatif » de l'agrivoltaïsme dynamique pour mesurer les effets d'un ombrage extrême. Les résultats suivants étaient donc attendus. Les pommes observées sous panneaux montrent **entre 1 et 3 degrés Brix inférieur** à celles en plein soleil lors des trois années expérimentales. En 2022, avec l'ombrage modulé selon les stades phénologiques, une **diminution de 1.5 degrés Brix** a été observé en comparaison de la modalité témoin.

Année	Modalité	Indice réfractométrique (°Brix)
2019	Témoin	10.9 a
	AVD	9.8 b
2020	Témoin	12.4 a
	AVD	9.5 b
2021	Témoin	12.5 a
	AVD	10.3 b
2022	Témoin	11.4
	AVD	9.9

Tableau : Indice réfractométrique moyen (exprimée en °Brix) aux récoltes 2019-2020 et 2021 sur le dispositif expérimental de la Pugère.

Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les modalités

(Source : Thèse Perrine Juillion avec INRAE PSH Avignon entre 2019-2021 et rapport annuel de la Pugère pour 2022)

Les mêmes tendances sont observées avec les **concentrations en sucres, diminuées en moyenne de 20%** sous ombrage lors des récoltes 2019-2020 et 2021. Ces résultats sont dus à une dilution des sucres sous ombrage, où la **teneur en matière sèche dans le fruit est plus faible** que pour les fruits témoins (diminution de 12% en 2019, 23% en 2020 et 20% en 2021).

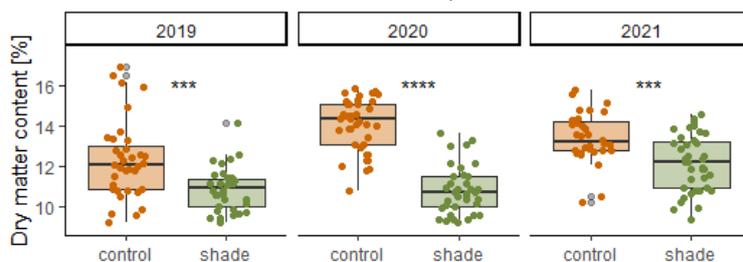


Figure 25: Teneur en matière sèche des fruits sur le dispositif expérimental de la Pugère aux récoltes 2019-2020 et 2021 Source : Juillion et al., 2022

En effet, les analyses en termes de **teneur en sucres par g de matière sèche dans les fruits montrent très peu de différences** entre les modalités (seule différence significative en 2020 avec -6% sous ombrage). Une meilleure gestion des flux en eau entrants dans le fruit sous agrivoltaïsme, via l'irrigation notamment, permettrait donc d'améliorer ces résultats.

Néanmoins, les fruits sous agrivoltaïsme **restent commercialisables**, même sous ombrage maximal.

- **Nectarines :**

En ce qui concerne le dispositif expérimental d'Etoile-sur-Rhône, les **nectarines** sous les dispositifs agrivoltaïques présentent également un **degré Brix légèrement inférieur** au témoin à la récolte 2022 mais une **jutosité similaire** à fermeté équivalente.

10.4.6 Concentration en acide malique

- **Pommiers :**

Une **augmentation** de 12% de la **teneur en acide malique** a été observée sous ombrage à la récolte 2019, de 8% à la récolte 2020 et de 15% à la récolte 2021. Cependant, **l'augmentation de la proportion en eau dans les fruits ombrés** a permis de **maintenir des concentrations en acide malique** similaires au témoin aux récoltes 2019 et 2021 et diminuée de 13% en 2020.

En 2022, l'analyse de l'acidité à la récolte a indiqué une diminution de 20% de la concentration en acide malique sous agrivoltaïsme, en comparaison de la modalité témoin.

- **Nectarines :**

En ce qui concerne le dispositif expérimental d'Etoile-sur-Rhône, les **nectarines** sous les dispositifs agrivoltaïques présentent une **acidité similaire** aux fruits témoins également.

10.4.7 Une meilleure conservation des fruits

- **Nectarines :**

Pour le dispositif expérimental en nectarines, post récolte 2022, le **développement de la monilia** a été observé. Très répandues, ces maladies fongiques peuvent causer un préjudice considérable aux fruits à noyaux avant la récolte et sont favorisées par des piqûres d'insectes ou d'oiseaux, des averses de pluie ou de grêle.

Les modalités sous agrivoltaïsme ont eu une **meilleure conservation** avec un intervalle de temps pour arriver à 50% de fruits avec monilia en conservation post-récolte environ quatre jours plus tard que les fruits témoins. Trois facteurs peuvent expliquer cette différence : la protection des panneaux face aux intempéries, la précocité de la modalité témoin qui a pu être plus impactée par les grosses précipitations survenues mi-août et les calibres plus importants de la modalité témoin qui ont pu engendrer des microfissures.

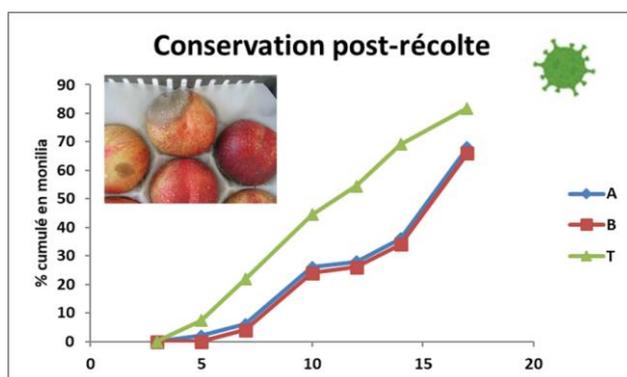


Figure 26: Pourcentage cumulé en monilia post récolte sur le dispositif expérimental d'Etoile sur Rhône à la récolte 2022 (Source : SEFRA)

10.5 Tableau récapitulatif

	Pommiers	Nectarines	Cerises
--	----------	------------	---------

Effet de l'agrivoltaïsme dynamique	2019	2020	2021	2022	2022	2022
Date de récolte	ns	ns	ns	ns	↗	↗
Fermeté	ns	ns	ns	↘		
Degrés Brix	↘	↘	↘	↘	↘	
Teneur en matière sèche	↘	↘	↘			
Couleur des fruits	↘	↘	↘	↘	ns	↘
Concentrations en sucres solubles	↘	↘	↘	↘		
Teneur en sucres solubles	ns	↘	ns			
Concentration en acide	ns	↘	ns	↘	ns	
Teneur en acide malique	↗	↗	↗			
Conservation					↗	

La stratégie de **d'ombrage maximale pendant 3 années** a permis d'observer les **réponses maximales du pommier** à l'ombrage en termes de qualité des fruits avec une **diminution de la concentration en sucres et en coloration** notamment mais **peu d'impact en termes de concentration en acide et en fermeté des fruits**. Cependant, les pommes 'Golden Delicious' sont **restées commercialisables** avec cette stratégie d'ombrage limite (commercialisation des Golden basée sur la couleur et le degré Brix). En 2022, **l'ombrage réduit** semble atténuer le manque de coloration observé durant les campagnes de plein ombrage. Dans le même temps, **la qualité des fruits bien qu'améliorée** par rapport à l'ombrage reste **inférieure** aux fruits témoins.

Le pourcentage de **fruits déclassés est diminué de près de 10%** par rapport aux fruits témoins : l'écran lumineux et thermique a **diminué les brûlures sur fruits**, les **dégâts de chenilles foreuses** et **l'intensité de la rugosité** sur fruits. A l'inverse, les dégâts de bitter, de punaises et ceux dû aux traces de doigts lors de la récolte sont à surveiller car favorisés sous agrivoltaïsme.

Le site d'**Etoile sur Rhône**, avec des taux d'ombrage inférieurs, a présenté un **impact sur la concentration en sucres mais pas d'impacts sur la coloration des fruits et la concentration en acides**. Ce site a également montré une **meilleure conservation** des nectarines post-récolte face à la monilia. Le site de Lorient a quant à lui montré des **cerises moins colorées**, sans impact sur leur commercialisation puisqu'un **marché existe pour les cerises rouges**.

Références :

Agreste Infos rapides. (2021, novembre). Le recul de la production de pommes en 2021 se confirme (No 2021 154). AgresteConjoncture.

Allan, R. P., Hawkins, E., Bellouin, N., & Collins, B. (2021). IPCC, 2021: summary for Policymakers.

Arez, A., and Flore, J.A. (1986). The quantitative effect of solar radiation on Redhaven peach fruit skin color. *HortScience* 21, 1424–1426.

Björkman, O. (1981). Responses to Different Quantum Flux Densities. In *Physiological Plant Ecology I*, O.L. Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond, and H. Ziegler, eds. (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg), pp. 57–107.

Buisson, D., and Lee, D.W. (1993). The developmental responses of papaya leaves to simulated canopy shade. *American Journal of Botany* 80, 947–952.

Campbell, R.J., Marini, R.P., and Birch, J.B. (1992). Canopy Position Affects Light Response Curves for Gas Exchange Characteristics of Apple Spur Leaves. *Jashs* 117, 467–472. <https://doi.org/10.21273/JASHS.117.3.467>.

Cannell, M.G.R., and Smith, R.I. (1986). Climatic Warming, Spring Budburst and Forest Damage on Trees. *The Journal of Applied Ecology* 23, 177. <https://doi.org/10.2307/2403090>.

Chen, R., Wang, J., Li, Y., Song, Y., Huang, M., Feng, P., ... & Liu, L. (2023). Quantifying the impact of frost damage during flowering on apple yield in Shaanxi province, China. *European Journal of Agronomy*, 142, 126642.

Crews, C. E., Williams, S. L., & Vines, H. M. (1975). Characteristics of photosynthesis in peach leaves. *Planta*, 126(2), 97-104.

CTIFL (1998). Gel de printemps. Protection des vergers.

do Amarante, C. V. T., Steffens, C. A., & Argenta, L. C. (2011). Yield and fruit quality of 'Gala' and 'Fuji' apple trees protected by white anti-hail net. *Scientia Horticulturae*, 129(1), 79-85.

El Yaacoubi, A., Malagi, G., Oukabli, A., Hafidi, M., & Legave, J. M. (2014). Global warming impact on floral phenology of fruit trees species in Mediterranean region. *Scientia Horticulturae*, 180, 243-253.

Esmail, A.A.M., Refaie, K.M., Mohamed, A.A.A., and Hashem, F.A. (2017). Water Budget Economy of Navel Orange under Screen Net. *International Journal of Pure Agricultural Advances* 1, 10–23. <https://doi.org/10.20448/813.11.10.23>.

Evans, J.R., and Poorter, H. (2001). Photosynthetic acclimation of plants to growth irradiance: the relative importance of specific leaf area and nitrogen partitioning in maximizing carbon gain. *Plant Cell Environ* 24, 755–767. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00724.x>.

Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E., & Goodess, C. M. (2009). Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 C global warming. *Global and Planetary Change*, 68(3), 209-224.

Girona, J., Behboudian, M.H., Mata, M., Del Campo, J., and Marsal, J. (2012). Effect of hail nets on the microclimate, irrigation requirements, tree growth, and fruit yield of peach orchards in Catalonia

(Spain). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 87, 545–550. <https://doi.org/10.1080/14620316.2012.11512909>.

Givnish, T. (1988). Adaptation to Sun and Shade: a Whole-Plant Perspective. *Functional Plant Biol.* 15, 63. <https://doi.org/10.1071/PP9880063>.

Gommers, C.M.M., Visser, E.J.W., Onge, K.R.S., Voesenek, L.A.C.J., and Pierik, R. (2013). Shade tolerance: when growing tall is not an option. *Trends in Plant Science* 18, 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.09.008>.

Guo, Y.-P., Guo, D.-P., Zhou, H.-F., Hu, M.-J., and Shen, Y.-G. (2006). Photoinhibition and xanthophyll cycle activity in bayberry (*Myrica rubra*) leaves induced by high irradiance. *Photosynthetica* 44, 439–446. <https://doi.org/10.1007/s11099-006-0048-z>.

Hirschy, M., Badier, M., Bernos, L., Delanoue, G., Dufourcq, T., Fabian, T., ... & Gautier, J. (2020). Gel et grêle en viticulture et arboriculture-Etat des lieux des dispositifs de protection contre les aléas climatiques (Doctoral dissertation, ACTA-Association de Coordination Technique Agricole).

Israeli, Y., Plaut, Z., and Schwartz, A. (1995). Effect of shade on banana morphology, growth and production. *Scientia Horticulturae* 62, 45–56. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(95\)00763-J](https://doi.org/10.1016/0304-4238(95)00763-J).

Joel, G., Bernard, S., Marie, L., and Rossello, P. (2015). Provence-Alpes-Côte d'Azur, une région face au changement climatique.

Klein, J.D., Dong, L., Zhou, H.W., and Lurie, S. (2001). Ripeness of shaded and sun-exposed apples (*Malus domestica*). *Acta Hort.* 95–98. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.553.13>.

Li, S. H., Génard, M., Bussi, C., Huguet, J. G., Habib, R., Besset, J., & Laurent, J. (2001). Fruit quality and leaf photosynthesis in response to microenvironment modification around individual fruit by covering the fruit with plastic in nectarine and peach trees. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 76(1), 61-69.

Lopez, G., Boini, A., Manfrini, L., Torres-Ruiz, J.M., Pierpaoli, E., Zibordi, M., Losciale, P., Morandi, B., and Corelli-Grappadelli, L. (2018). Effect of shading and water stress on light interception, physiology and yield of apple trees. *Agricultural Water Management* 210, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.015>.

Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., and Dupraz, C. (2013a). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy* 44, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>.

McCaskill, M.R., McClymont, L., Goodwin, I., Green, S., and Partington, D.L. (2016). How hail netting reduces apple fruit surface temperature: A microclimate and modelling study. *Agricultural and Forest Meteorology* 226–227, 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.017>.

Miller, H., C., T., and T. (2015). Shade effects on growth, flowering and fruit of apple. *Journal of Applied Horticulture* 17, 101–105.

Mupambi, G., Anthony, B.M., Layne, D.R., Musacchi, S., Serra, S., Schmidt, T., and Kalcsits, L.A. (2018). The influence of protective netting on tree physiology and fruit quality of apple: A review. *Scientia Horticulturae* 236, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.014>.

Pfleiderer, P., Menke, I., & Schleussner, C. F. (2019). Increasing risks of apple tree frost damage under climate change. *Climatic Change*, 157(3), 515-525.

Proctor, J.T.A., and Lougheed, E.C. (1976). The effect of covering apples during development [Anthocyanin, chlorophyll, soluble solids]. *HortScience*.

Reig, G., Donahue, D.J., and Jentsch, P. (2020). The Efficacy of Four Sunburn Mitigation Strategies and Their Effects on Yield, Fruit Quality, and Economic Performance of Honeycrisp Cv. Apples under Eastern New York (USA) Climatic Conditions. *International Journal of Fruit Science* 20, 541–561. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1605558>.

Retamales, J.B., Montecino, J.M., Lobos, G.A., and Rojas, L.A. (2008). Colored Shading Nets Increase Yields and Profitability of Highbush Blueberries. *Acta Horticulturae* 193–197. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.770.22>.

Romo-Chacón, A., Orozco-Avitia, J.A., Gardea, A.A., Guerrero-Prieto, V., and Soto-Parra, J.M. (2007). Hail Net Effect on Photosynthetic Rate and Fruit Color Development of “Starkrimson” Apple Trees. *Journal of the American Pomological Society* 174-178.

Ryugo, K., and Intreieri, C. (1972). Effect of light on growth of sweet cherry (*Prunus avium* L.) fruits. *Amer Soc Hort Sci J*.

Schrader, L.E., Kahn, C.B., and Elfving, D.C. (2009). Sunburn browning decreases at-harvest internal fruit quality of apples (*Malus domestica* Borkh.) *International Journal of Fruit Science* 9, 425–437.

Shahak, Y., Gussakovsky, E.E., Gal, E., and Ganelevin, R. (2004). Colornets: Crop Protection and Light-Quality Manipulation in one Technology. *Acta Hortic.* 143–151. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.659.17>.

Šircelj, H., Tausz, M., Grill, D., and Batič, F. (2007). Detecting different levels of drought stress in apple trees (*Malus domestica* Borkh.) with selected biochemical and physiological parameters. *Scientia Horticulturae* 113, 362–369. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.04.012>.

Solomakhin, A., and Blanke, M.M. (2008). Coloured hailnets alter light transmission, spectra and phytochrome, as well as vegetative growth, leaf chlorophyll and photosynthesis and reduce flower induction of apple. *Plant Growth Regulation* 56, 211–218. <https://doi.org/10.1007/s10725-008-9302-7>.

Solomakhin, A., and Blanke, M.M. (2010a). Can coloured hailnets improve taste (sugar, sugar: acid ratio), consumer appeal (colouration) and nutritional value (anthocyanin, vitamin C) of apple fruit? *LWT - Food Science and Technology* 43, 1277–1284. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.02.020>.

Stampar, F., Hudina, M., Usenik, V., Sturm, K., and Zadavec, P. (2001). Influence of black and white nets on photosynthesis, yield and fruit quality of apple (*Malus domestica* Borkh.). *Acta Horticulturae*.

Steyn, W.J., Holcroft, D.M., Wand, S.J.E., and Jacobs, G. (2004). Anthocyanin degradation in detached pome fruit with reference to preharvest red color loss and pigmentation patterns of blushed and fully red pears. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 129, 13–19.

Sugiura, T., Ogawa, H., Fukuda, N., and Moriguchi, T. (2013). Changes in the taste and textural attributes of apples in response to climate change. *Sci Rep* 3, 2418. <https://doi.org/10.1038/srep02418>.

Torres, C.D., Magnin, A., Varela, S.A., Stecconi, M., Grosfeld, J.E., and Puntieri, J.G. (2018). Morphophysiological responses of *Nothofagus obliqua* to light intensity and water status, with focus on primary growth dynamics. *Trees* 32, 1301–1314. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1712-1>.

Valladares, F., and Niinemets, Ü. (2008). Shade Tolerance, a Key Plant Feature of Complex Nature and Consequences. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 3, 237–257.

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., and Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 39, 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>.

Widmer, A., Kockerols, K., Schwan, S., Stadler, W., and Bertschinger, L. (2008). Towards Grower-friendly Apple Crop Thinning by Tree Shading. 5.

Wünsche, J.N., Greer, D.H., Palmer, J.W., Lang, A., and McGhie, T. (2001). Sunburn – The Cost of a High Light Environment. *Acta Horticulturae* 349–356. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.557.46>.

Xue, X., Duan, Y., Wang, J., Ma, F., and Li, P. (2021). Night-time Temperatures and Sunlight Intensities Interact to Influence Anthocyanin Biosynthesis and Photooxidative Sunburn in “Fuji” Apple. *Frontiers in Plant Science* 1423.