

RAPPORT FINAL

ANALYSE DU FLUX DE SÈVE POUR ÉVALUER LA DYNAMIQUE D'ABSORPTION D'EAU DU POMMIER



Jérémie Vallée, agr. - IRDA

Carl Boivin, agr., M.Sc. - IRDA

Daniel Bergeron, agr., M.Sc. - DRCN du MAPAQ

Décembre 2018

L'IRDA a été constitué en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) et le ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation (MESI).

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement est une corporation de recherche à but non lucratif qui travaille à chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

Notre mission

L'IRDA est un institut de recherche et de développement qui a pour mission de soutenir le développement d'une agriculture durable au Québec en favorisant le recours à l'innovation et aux partenariats.

Notre vision

Au terme du plan stratégique 2017-2020, l'IRDA sera reconnu comme le chef de file en matière de R-D agroenvironnementale au Québec. Une reconnaissance de l'IRDA :

- par les entreprises, pour la valeur ajoutée de son soutien à leurs efforts d'innovation;
- par les partenaires, pour son leadership en matière d'agroenvironnement;
- par le gouvernement, pour son apport à la mise en œuvre des politiques et stratégies gouvernementales.

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

PARTENAIRE



ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable du projet : Carl Boivin, agr., M.Sc. - IRDA
- Chargé de projet : Jérémie Vallée, agr., B.Sc. - IRDA
- Daniel Bergeron, agr., M.Sc. – DRCN du MAPAQ
- Steeve Pépin, Ph.D. - Université Laval
- Antoine Lamontagne, Technicien agricole - IRDA
- François Turcotte - Ferme Avicole Orléans

COLLABORATEURS

- Stéphanie Tellier, agr., M.Sc. - DRCN du MAPAQ
- Serge Mantha, agr., M.Sc. – Club de production pomicole de la région de Québec

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Carl Boivin
IRDA
2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8
418 643-2380, poste 430
carl.boivin@irda.qc.ca

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche est réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme d'appui au développement de l'agriculture et de l'agroalimentaire en région (PADAAR).

Table des matières

1	Mise en contexte	1
2	Objectif	2
3	Matériel et méthode	3
	Site expérimental	3
	Estimation des flux de sève à l'aide des sondes à dissipation thermiques	3
	Ajustements de ΔT_{Max}	4
	Ajustements des flux de sève selon l'épaisseur de l'aubier	5
	Statut hydrique du sol	6
	Conditions météorologiques	6
	Caractérisation des propriétés physiques du sol	7
	Estimation du prélèvement par TDR	8
	Rendement et qualité	8
4	Analyse des résultats	9
	Propriétés physiques du sol et réserve en eau	9
	estimation du flux de sève quotidien	9
	Évapotranspiration	13
	Mesure du statut hydrique du sol	16
	Consommation en eau	19
	Consommation en eau à l'échelle du verger	24
	Rendements et qualité	25
5	CONCLUSION	27
6	Annexe	29
	Courbe de désorption en eau	29
	Arbres mesurés	31
	Consommation en eau	31
7	Bibliographie	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Chronique du flux de sève mesuré (l/h) d'un arbre irrigué, 2017, sonde de 50 mm.....	10
Figure 2. Chronique du flux de sève mesuré (l/h) d'un arbre non irrigué, 2017, sonde de 50 mm.....	10
Figure 3. Chronique du flux de sève mesuré (l/h) d'un arbre non irrigué, 2018, sonde de 30 mm.....	11
Figure 4. Chronique du flux de sève mesuré (l/h) d'un arbre irrigué, 2018, sonde de 50 mm.....	11
Figure 5. Chronique du flux de sève pour 2 journées consécutives (21 et 22 juin 2018), sonde de 30 mm.	12
Figure 6. Chronique du flux de sève du 1 ^{er} juillet 2018, sonde de 30 mm.	12
Figure 7. Relation entre l'évapotranspiration potentielle mesurée (mm/h) et le flux de sève moyen des 4 arbres (l/h), 2017.	14
Figure 8. Relation entre l'évapotranspiration potentielle mesurée (mm/h) et le flux de sève moyen mesuré (sonde 30 mm) sur un arbre irrigué (l/h), 2018.	14
Figure 9. Chronique du potentiel matriciel (kPa) d'un arbre irrigué, de la pluviométrie (mm) et des irrigations, 2017.....	15
Figure 10. Chronique du flux de sève (l/h) mesuré sur un arbre non irrigué et de l'ET _p (mm/h) le 3 et 4 juillet 2018, sonde de 30 mm.....	16
Figure 11. Chronique des sondes TDR 0-30 cm d'un arbre irrigué et non irrigué, de la pluviométrie (mm) et des irrigations, saison 2017.....	17
Figure 12. Chronique des sondes TDR 0-30 cm d'un arbre irrigué et non irrigué, de la pluviométrie (mm) et des irrigations, saison 2018.....	18
Figure 13. Chronique du flux de sève (l/h) selon les conditions environnementales telles que l'ET _p horaire (mm/h), la radiation solaire (kw/m ²) et le déficit de pression de vapeur (kPa).....	19
Figure 14. Flux de sève quotidien (l/j) pour un arbre irrigué en juillet, août et septembre 2017.	21
Figure 15. Flux de sève quotidien (l/j) pour un arbre non irrigué en juillet, août et septembre 2017.	22
Figure 16. Flux de sève quotidien (l/j) pour un arbre irrigué et non irrigué du 15 juin au 10 août 2018.	23
Figure 17. Courbe de désorption en eau du sol à une profondeur de 10-20 cm.....	30
Figure 18. Courbe de désorption en eau du sol à une profondeur de 30-40 cm.....	30
Figure 19. Insertion des sondes à dissipation thermique dans le tronc d'un pommier.....	46
Figure 20. Étanchéisation et isolation thermique des sondes à dissipation thermique.	47
Figure 21. Injection du colorant dans le tronc.	48
Figure 22. Coupe de l'arbre pour l'analyse de la coloration du bois.....	49
Figure 23. Mesure de l'épaisseur de l'aubier coloré.	50
Figure 24. Exemple de coloration des troncs de pommiers.....	51
Figure 25. Installation d'une bâche pour les arbres non irrigués, 2018.....	52

1 MISE EN CONTEXTE

Au Québec, les vergers sont maintenant implantés avec des pommiers nains ou semi-nains. Cette situation favorise l'adoption de l'irrigation et entraîne son lot de questionnement. En effet, la régie de l'irrigation doit être raisonnée afin de s'assurer que les besoins en eau de la culture sont comblés, mais sans plus, afin d'éviter un gaspillage de l'eau et un lessivage des fertilisants. Aussi, le cultivar Honeycrisp est reconnu pour être sensible à la tache amère, qui cause des pertes économiques majeures et qui pourrait être causée par la mauvaise assimilation du calcium. Il est depuis longtemps démontré qu'une bonne régie d'irrigation favorise l'absorption du calcium.

Une des façons efficaces de régir l'irrigation est l'utilisation de tensiomètres afin de mesurer l'état hydrique du sol. À l'atteinte d'une consigne prédéterminée, l'irrigation est déclenchée pour l'application d'une quantité d'eau précise. La difficulté demeure la détermination de la consigne optimale.

Actuellement, aucun résultat de recherche au Québec ne permet d'étayer une consigne optimale. Il est possible de consulter des guides sur le sujet, mais les informations proviennent de l'extérieur du Québec et ne peuvent être appliquées intégralement. La caractérisation des propriétés hydriques du sol peut servir de base, mais ne peut à elle seule permettre de déterminer une consigne, qui doit, entre autres, tenir compte de la culture, du type de sol en présence et des conditions météorologiques locales.

L'analyse du flux de sève est une méthode qui a été développée en France dans les années '80 et qui peut être utilisée très efficacement pour mesurer, au niveau du tronc, le taux de transpiration d'espèces ligneuses comme le pommier. Cette méthode est d'ailleurs utilisée en foresterie au Québec par des chercheurs de l'Université Laval. Il est donc envisageable de vouloir mesurer le flux de sève du pommier et de l'associer aux conditions hydriques du sol et aux conditions météorologiques. Il s'agit d'une première au Québec dans cette culture.

2 OBJECTIF

Évaluer les besoins en eau du pommier et le potentiel de l'analyse du flux de sève comme outil complémentaire afin de déterminer les consignes d'irrigation du pommier en fonction des propriétés physiques du sol et des conditions météorologiques locales.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODE

SITE EXPÉRIMENTAL

Les essais ont eu lieu au verger de la Ferme Avicole Orléans, situé à Sainte-Famille-de-l'Île-d'Orléans, Québec. Les mesures ont été effectuées sur des pommiers de la variété Honeycrisp (porte-greffe B.9, nain) plantés en 2002. Le verger a une orientation nord-sud, un espacement approximatif entre les arbres de 2 m et entre les rangs de 5 m, soit une densité réelle de 961 arbres à l'hectare. Au total, 4 arbres, ayant des diamètres représentatifs du verger (diamètre moyen de 94,6 mm en 2017), ont été sélectionnés. En 2018, 4 arbres ont, à nouveau, été sélectionnés et leur diamètre moyen s'élevait à 85,2 mm (Annexe, Tableau 8). Pour chaque année, deux arbres consécutifs des quatre formaient le traitement non irrigué tandis que les deux autres ont été irrigués au courant de la saison.

ESTIMATION DES FLUX DE SÈVE À L'AIDE DES SONDES À DISSIPATION THERMIQUES

La technique développée originalement par Granier (1985) consiste à insérer radialement dans le bois 2 sondes cylindriques de 2 mm de diamètre et de 20 mm de longueur. Une des sondes est chauffée à puissance constante à l'aide d'un fil en constantan. Un thermocouple est également situé à mi-longueur de la résistance chauffante pour mesurer la température. Le tout est recouvert d'une gaine d'aluminium pour uniformiser la température sur la longueur de la sonde. La deuxième sonde, située à 5 cm sous la sonde chauffante, est identique à la sonde chauffante à l'exception qu'elle ne contient pas de résistance chauffante. Elle fournit donc une température de référence. Le différentiel de température mesuré entre les deux sondes est influencé par la densité du flux de sève (Granier, 1985; Granier et Gross, 1987). En absence de flux de sève, l'écart de température mesuré entre les deux sondes est maximal. À l'inverse, lorsqu'il y a flux de sève dans l'arbre, une partie de la chaleur fournie par l'élément chauffant est absorbée par l'eau et libérée par convection. Plus le flux de sève sera important plus le différentiel de température entre les sondes sera faible. Le flux de sève total sera décrit selon les équations suivantes (Granier, 1985; Granier et Gross, 1987):

$$F = uS_A$$

$$u = 118,99 \times 10^{-6} K^{1,231}$$

$$K = \frac{\Delta T_{Max} - \Delta T}{\Delta T}$$

Où

F : Flux total de sève (m³/s)

S_A : Aire de la section transversale du bois (m²)

u : Vitesse moyenne du flux (m/s)

k : Index de flux (sans dimension qui ne dépend que de u)

ΔT_{Max} : Différentiel de température lorsque le flux est nul (°C)

ΔT : Différentiel de température mesuré par les sondes ($^{\circ}\text{C}$)

Ainsi, la technique développée mesure une densité de flux de sève uniquement dans une partie radiale du tronc ou d'une branche.

Le matériel utilisé dans le cadre de l'essai était des sondes à dissipation thermique de la compagnie Dynamax d'une longueur de 50 mm, 30 mm et de 10 mm et avaient un diamètre respectif de 1,65 mm, 1,2 mm et 1,2 mm (Figure 19). L'installation des sondes dans le tronc a été faite en perçant celui-ci à l'aide d'une mèche à bois d'un diamètre de 1,85 mm pour les sondes de 50 mm et de 1,4 mm pour les sondes de 30 mm et de 10 mm. Les trous ont été percés verticalement (en suivant l'angle de tronc) et espacés de 40 mm puis nettoyés à l'aide d'une solution de peroxyde d'hydrogène. Les sondes de 50 mm ont été installées à 1 m du sol selon la même orientation géographique (nord-est). Les 2 sondes de 30 mm ont été installées à 85 cm du sol dans une orientation nord-ouest tandis que les 2 sondes de 10 mm ont été installées dans une orientation sud-ouest. La sonde chauffante a été insérée dans le trou du haut (Figure 19). Finalement, l'installation a été étanchéifiée de l'eau et isolée de la chaleur à l'aide d'un papier bulle aluminisé (Figure 20).

L'alimentation de la sonde chauffante s'est faite au moyen d'un régulateur de précision (Dynamax, AVR) ajusté à 5,0 V pour une puissance de chauffage de 320 mW pour les sondes de 50 mm. Pour les sondes de 30 mm et de 10 mm, le régulateur a été ajusté respectivement à 3,0 V et à 2,0 V pour une puissance de chauffage de 200 et 80 mW selon la sonde et la calibration. Les valeurs (différentiels de température) ont été mesurées aux 30 secondes puis la valeur médiane a été enregistrée aux 5 minutes par des acquiseurs de données (Campbell Scientific, CR300).

Les sondes de la compagnie Dynamax utilisent la calibration de Granier même si elles ne respectent pas en tout point la conception originelle des sondes (Lu et coll., 2004). Le changement du design sans ajustement de la calibration des sondes pourrait notamment expliquer la sous-estimation des flux mesurés dans plusieurs travaux de recherche (Olivieras et Llorens, 2001; Wilson et coll., 2001; Offenthaler, 2003, cités dans Lu, 2004).

Ajustements de ΔT_{Max}

Initialement, la méthode préconisée pour déterminer la valeur de ΔT_{Max} est de calculer la valeur maximale enregistrée pendant la nuit jusqu'à l'aube. Cette valeur est la valeur différentielle de température maximale lorsque le flux de sève est nul. Or, il a été démontré que certains facteurs pouvaient engendrer des flux de sève nocturnes tels que des mouvements d'eau dans les parties en croissance ou d'un rééquilibrage des réserves internes en eau de l'arbre suite à une période prolongée de stress hydrique ou de perte d'eau de l'arbre causé par un fort déficit en pression de vapeur (différence entre la quantité de vapeur d'eau qui peut être contenue lorsque l'air est saturé d'humidité et la quantité de vapeur d'eau actuelle de l'air) et une vitesse du vent élevée (Lu et coll., 1995; Goldstein et coll., 1998; Snyder et coll., 2003). Une sous-estimation de la vraie valeur ΔT_{Max} engendre directement une sous-estimation du flux de sève.

Pour assurer la qualité des données, les ΔT_{Max} journaliers d'une période de dix jours ont été mis en relation avec le temps. Une régression linéaire entre les points a été réalisée pour permettre d'établir une nouvelle valeur de ΔT_{Max} plus précise (Granier, 1987).

Ajustements des flux de sève selon l'épaisseur de l'aubier

La technique de Granier associée à l'utilisation des sondes Dynamax a permis de mesurer la vitesse du flux de sève le long d'un cylindre entre 11 et 107 mm², selon le type de sonde. Pour obtenir les mesures les plus précises possible, la sonde devrait avoir la même longueur que l'épaisseur de l'aubier (bois vivant où le flux de sève est actif). Ainsi, les sondes à dissipation thermique sous-estiment l'index de flux tel que décrit par Granier (1985), lorsqu'une partie de la sonde est en contact avec du xylème secondaire inactif (Granier et coll. 1994 et Lu, 1997 cités dans Lu et coll., 2004; Clearwater et coll., 1999).

Comme le suggère Dragoni et coll. (2005), le flux de sève des pommiers (variété Royal Gala de 8 ans de maturité ayant des diamètres de 60 à 70 mm) est très actif dans les 5 à 20 premiers mm (distance radiale à partir de l'écorce), par la suite de faibles flux de sève ont pu être mesurés vers le centre de l'arbre (duramen). Phillips et coll. (1996), ont également mesuré le flux de sève sur 40 mm de profondeur pour des arbres (bois à pores diffus) ayant un diamètre moyen de 180 mm. De même, Green et coll. (2003) ont utilisé dans sondes à des profondeurs comprises entre 5 et 35 mm pour des pommiers âgés de 14 ans de la variété Splendour.

En 2018, des essais ont été conduits pour estimer plus précisément l'épaisseur de l'aubier. Différentes techniques de coloration ont été évaluées puisqu'elles avaient déjà démontré leur pertinence pour évaluer l'épaisseur de l'aubier de différentes espèces d'arbres (notamment : Gebauer et coll., 2008).

La technique consiste à injecter une solution colorée dans le tronc des arbres (Figure 21). En se mélangeant à la sève de l'arbre, le colorant permet de mesurer la proportion active du xylème responsable du flux de sève en tachant les parois cellulaires des éléments de vaisseaux et des trachéides. Pour ce faire, une entaille de 7,9 mm de diamètre sur plus de la moitié du diamètre de troncs de pommier de 8 ans a été faite pour pouvoir injecter environ 20 ml de solution de carmin d'indigo à 0,9 % (Andrade et coll., 1998). Un délai de 24 heures a été respecté entre le moment de l'injection du colorant et la coupe des troncs (photo). Les pommiers ont ensuite été coupés¹ et le tronc a été coupé en disques de 1 cm d'épaisseur. Par la suite, la partie colorée a été mesurée à l'aide d'un vernier (Figure 23, Figure 24).

Une autre technique de coloration a été évaluée. À cet effet, une carotte de bois de 4,3 mm a été prélevée avec une sonde de type Pressler (Haglöf, 10-100-1021). La longueur de la carotte correspondait au rayon du tronc de l'arbre. Le bois ainsi recueilli a été coloré avec une solution d'orange de méthyle à 0,1 %. La solution d'orange de méthyle a la propriété de réagir au changement de pH. Pour certaines espèces d'arbres, le changement de pH entre l'aubier et le duramen permet l'utilisation de tel colorant (Kutscha et Sachs, 1962).

¹ Ces arbres étaient situés dans le verger RECUPOM et auraient été arrachés à l'automne 2018.

Finalement, les valeurs de différentiel de température mesurées ont été ajustées à l'aide de la formule développée par Clearwater et coll., (1999). :

$$\Delta T_{sw} = \frac{\Delta T - b\Delta T_m}{a}$$

Où

ΔT_{sw} : Différentiel de température de l'aubier (°C)

ΔT : Différentiel de température initialement mesuré (°C)

b : Proportion de la sonde qui se retrouve dans le xylème inactif

a : Proportion de la sonde qui se retrouve dans le xylème actif

STATUT HYDRIQUE DU SOL

Le statut hydrique du sol a été suivi en continu à l'aide de tensiomètres et de sondes TDR. Les tensiomètres (6) (Irrrometer, SR avec RSU-V) ont été installés afin de suivre le statut hydrique à une profondeur de 20 cm dans le sol et ont été reliés à des acquiiseurs de données (Campbell Scientific, CR300). Les sondes TDR (4) (Campbell Scientific, CS625) ont été installées verticalement (0-30 cm) pour mesurer une teneur en eau volumique moyenne du profil du sol. Au terme de chacune des 2 saisons, 3 irrigations ont eu lieu, soit le 18, 26 juillet et le 4 août en 2017 et le 29 juin, 3 et 10 juillet en 2018. De plus, en 2018, une bâche en polyéthylène tissé a été installée sur le rang des arbres non irrigués. Cela a permis de diminuer l'apport en eau par les précipitations et d'accentuer l'assèchement du sol (Figure 25).

CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Une station météorologique (46.903749°, -70.974781°), a permis de mesurer la température et l'humidité relative de l'air (Rotronic, HC2-S3), la radiation solaire (Kipp & Zonen, CMP3-L), la vitesse et la direction du vent (R.M. Young, 05103) ainsi que la pluviométrie (Texas Electronics, TR-525M). La pluviométrie a également été mesurée directement au verger (Texas Electronics, TR-525M). Les données ont été enregistrées avec un acquiiseur de données (Campbell Scientific CR1000) relié à modem cellulaire (Microhard Systems, IPn3Gb). Le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ET_p) a été effectué à l'aide de la formule standardisée de Penman-Montheith (ASCE, 2005).

Le déficit de pression de vapeur (DPV, différence entre la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur actuelle) a également été calculé (Monteith et Unsworth, 1990). La pression de vapeur saturante a été estimée à l'aide de l'équation originale de Tetens (1930) décrite par l'équation exponentielle de Murray (1967). La

pression de vapeur actuelle a été calculée à partir de l'humidité relative telle que décrite par Monteith et Unsworth (1990).

$$DPV = e_s - e$$

$$e_s = 0,61078e^{\frac{17,27*T}{T+237,3}}$$

$$e = HR * e_s/100$$

Où

DPV : Déficit de pression de vapeur (kPa)

e_s : Pression de vapeur saturante (kPa)

e : Pression de vapeur actuelle (kPa)

T : Température moyenne de l'air (° C)

HR : Humidité relative (%)

CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU SOL

La caractérisation du sol du verger a été effectuée sur l'horizon 0 à 20 cm (surface) et 20 à 40 cm (profondeur) en 2017. Les arbres sélectionnés en 2018 se situaient sur le rang voisin et étaient à quelques mètres des arbres de 2017, ce faisant, une seule caractérisation du sol a été menée. Le « 0 » cm débute au sol minéral, ce qui exclut la couche où s'accumule la matière organique. Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (CPVQ, 1988). La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points, suivie d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1968). Le contenu en matière organique totale a été calculé selon le contenu en C_{tot} , déterminé au LECO, avec un facteur de conversion de 1,724.

En ce qui a trait à la courbe de désorption en eau du sol, des échantillons de sols non perturbés ont été prélevés au milieu de l'horizon 0-20 cm et celui 20-40 cm avec des cylindres de polychlorure de vinyle (PVC) qui mesurent 10 cm de diamètre et 10 cm de hauteur. Les échantillons ont ensuite été saturés en eau pendant 24 heures. Immédiatement après la saturation la masse de l'échantillon a été mesurée avec une balance précise au 0,01 g (Shimadzu, Tx4202L) pour déterminer la teneur en eau volumique à saturation. Un tensiomètre (Hortau, Tx-80 petite céramique) a été inséré au centre de l'échantillon (à 5 cm) pour mesurer le potentiel matriciel en continu. À intervalle régulier, c'est-à-dire d'une à trois fois par jour, la masse de l'échantillon a été prise à l'aide de la balance électronique (Shimadzu, Tx4202L). Cette procédure s'est poursuivie jusqu'à ce que le tensiomètre se décharge (environ 80 kPa). Le sol de l'échantillon a ensuite été séché à l'étuve à 105 °C, pendant 48 heures, pour déterminer le poids du sol sec. Finalement, la relation entre la teneur en eau volumique et le potentiel matriciel a été obtenue en associant les mesures réalisées.

ESTIMATION DU PRÉLÈVEMENT PAR TDR

La variation quotidienne de la teneur en eau volumique dans les 30 premiers cm du sol, mesuré avec les sondes TDR, a été rapportée en mm d'eau. La valeur obtenue a pu être utilisée pour évaluer l'évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}). Pour y parvenir, la journée a été divisée en 3 périodes de prélèvement : de 6 h à 10 h, de 10 h à 14 h et de 14 h à 18 h. La valeur mesurée à 10 h (31 mai au 30 août) a été soustraite de la valeur mesurée à 6 h, celle de 14 h à la valeur de 10 h et la valeur de 18 h à celle de 14, et ce, pour chacune des 4 sondes TDR. Les valeurs issues de journées où il y a eu des précipitations et celles au lendemain de ces précipitations ont été éliminées. Par la suite, ces prélèvements (ET_{c-TDR}) ont été mis en relation avec l'évapotranspiration potentielle horaire pour déterminer un coefficient cultural estimé (k_c) tel que décrit par Allen et coll. (1998).

$$k_c = \frac{ET_{c-TDR}}{ET_p}$$

RENDEMENT ET QUALITÉ

Le rendement et la qualité des fruits ont été évalués le 3 octobre 2017 et le 5 octobre 2018, et ce, spécifiquement pour chacun des arbres suivis. Pour ce faire, l'ensemble des pommes ont été cueillies, dénombrées et pesées. Puis, le calibre des pommes a été déterminé sur chacune d'entre elles. Quatre grandes catégories de calibre ont été déterminées : moins de 2 po $\frac{3}{4}$, entre 2 po $\frac{3}{4}$ et 3 po, de 3 po à 3 po $\frac{1}{2}$ et 3 po $\frac{1}{2}$ et plus. Ces catégories reflètent les normes quant au calibre de commercialisation généralement utilisé pour la variété Honeycrisp. L'évaluation de la coloration des fruits récoltés a aussi été réalisée.

Des tests de mesure de la fermeté du fruit ont également été réalisés à l'aide d'un pénétromètre (Effegi, FT 327) muni d'un embout de 11,28 mm de diamètre (1 cm²). Le fruit a été pelé à l'endroit de la mesure puis une pression a été appliquée avec l'embout jusqu'à ce qu'il pénètre dans la chair du fruit jusqu'au premier cran de l'embout. La valeur de pression indiquée sur le cadran a été notée, et ce, pour un sous échantillon de dix pommes par arbre.

L'indice de Brix a aussi fait l'objet de mesure au moyen d'un réfractomètre (Hanna Instruments, Hi 96801). Ainsi, le jus de dix pommes a été recueilli et analysé, individuellement, pour déterminer leur teneur en saccharose.

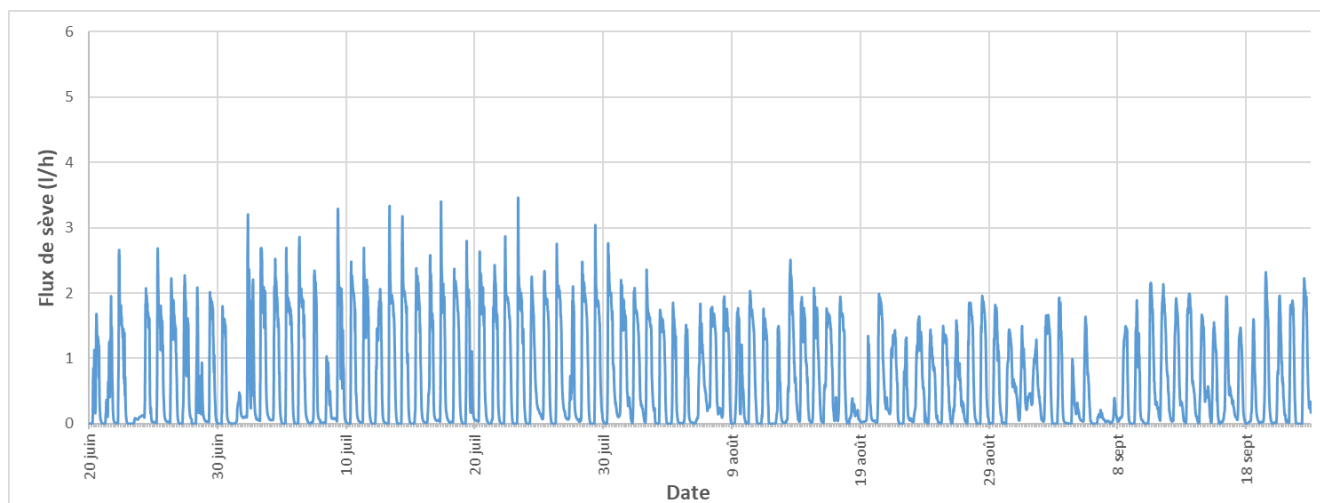


Figure 1. Chronique du flux de sève mesuré (l/h) d'un arbre irrigué, 2017, sonde de 50 mm.

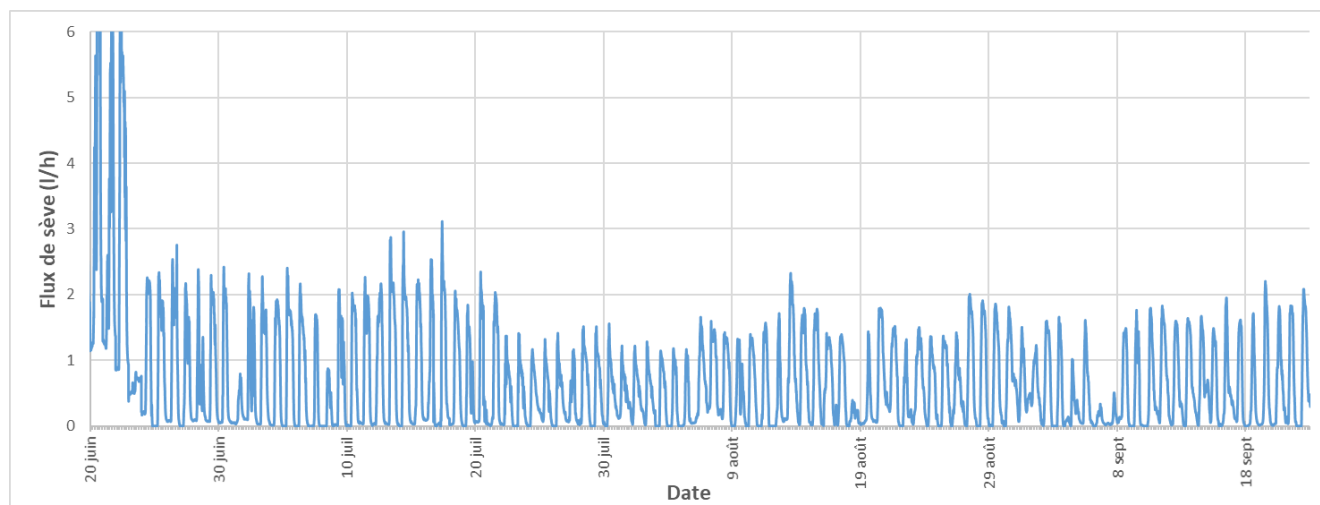


Figure 2. Chronique du flux de sève mesuré (l/h) d'un arbre non irrigué, 2017, sonde de 50 mm.

Pour 2017, les flux de sève mesurés tant pour les arbres irrigués que les arbres non irrigués suivent les mêmes tendances au courant de la saison. La demande en transpiration a été plus forte en juin et juillet et connaît par la suite un ralentissement en août. Il est également intéressant de mentionner que la demande mesurée en septembre a été assez élevée et est comparable à celle mesurée en août.

En 2018, les flux de sève mesurés montrent une tendance similaire à 2017. Une diminution des flux de sève à partir d'août tant pour les arbres irrigués que pour les arbres non irrigués a été observée (Figure 3, Figure 4)

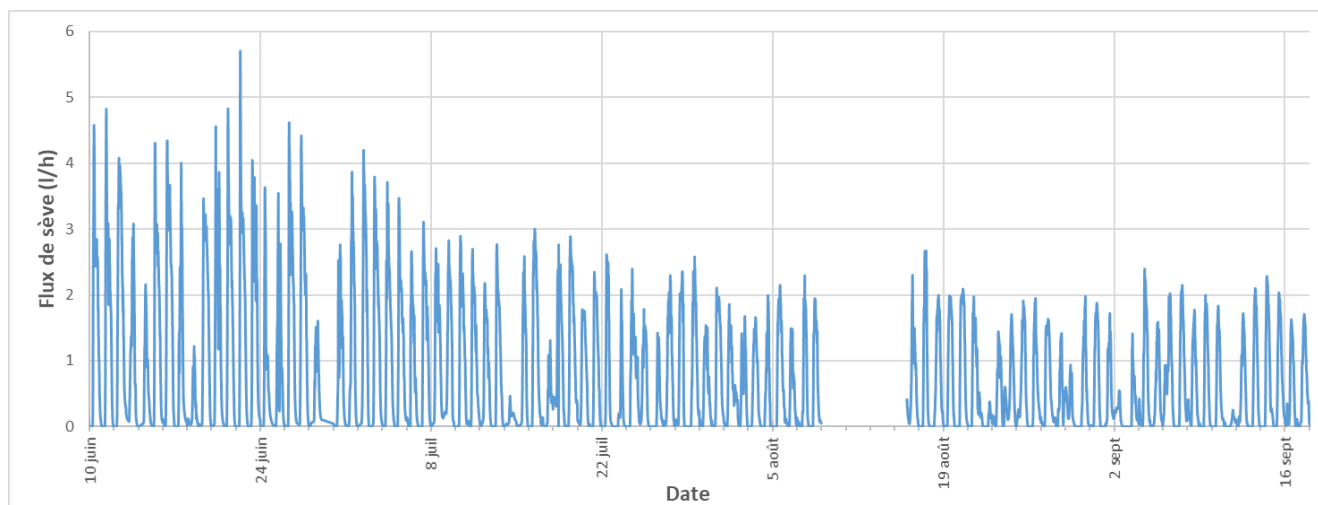


Figure 3. Chronique du flux de sève mesuré (l/h) d'un arbre non irrigué, 2018, sonde de 30 mm.

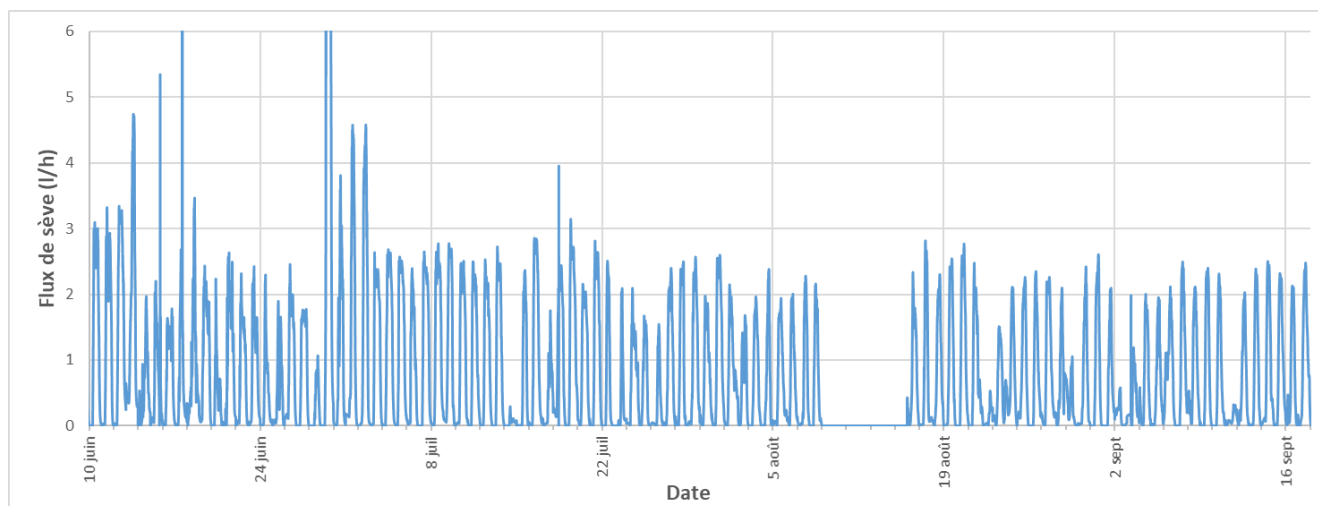


Figure 4. Chronique du flux de sève mesuré (l/h) d'un arbre irrigué, 2018, sonde de 50 mm.

Les flux de sève mesurés quotidiennement montrent souvent une hausse des prélèvements en début de journée suivie d'une chute marquée (Figure 5). Par la suite, une stagnation est souvent observée en milieu de journée avant de diminuer en fin de journée. À l'inverse, durant certaines journées, le prélèvement s'accélère à un rythme plus faible et ne faiblit pas (Figure 6). Ces phénomènes sont généralement observés lorsque la demande en ET_p est plus faible. Durant ces périodes, l'arbre semble être en mesure de « fournir à la demande ».

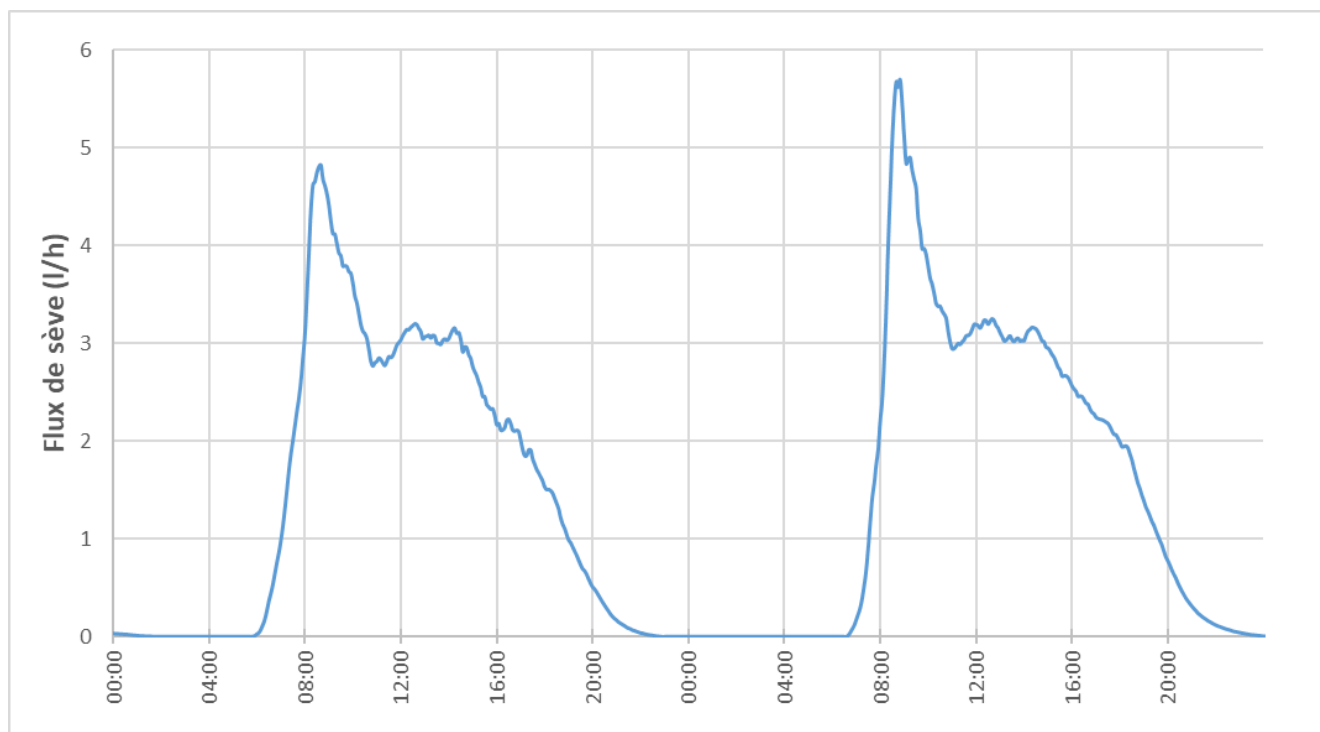


Figure 5. Chronique du flux de sève pour 2 journées consécutives (21 et 22 juin 2018), sonde de 30 mm.

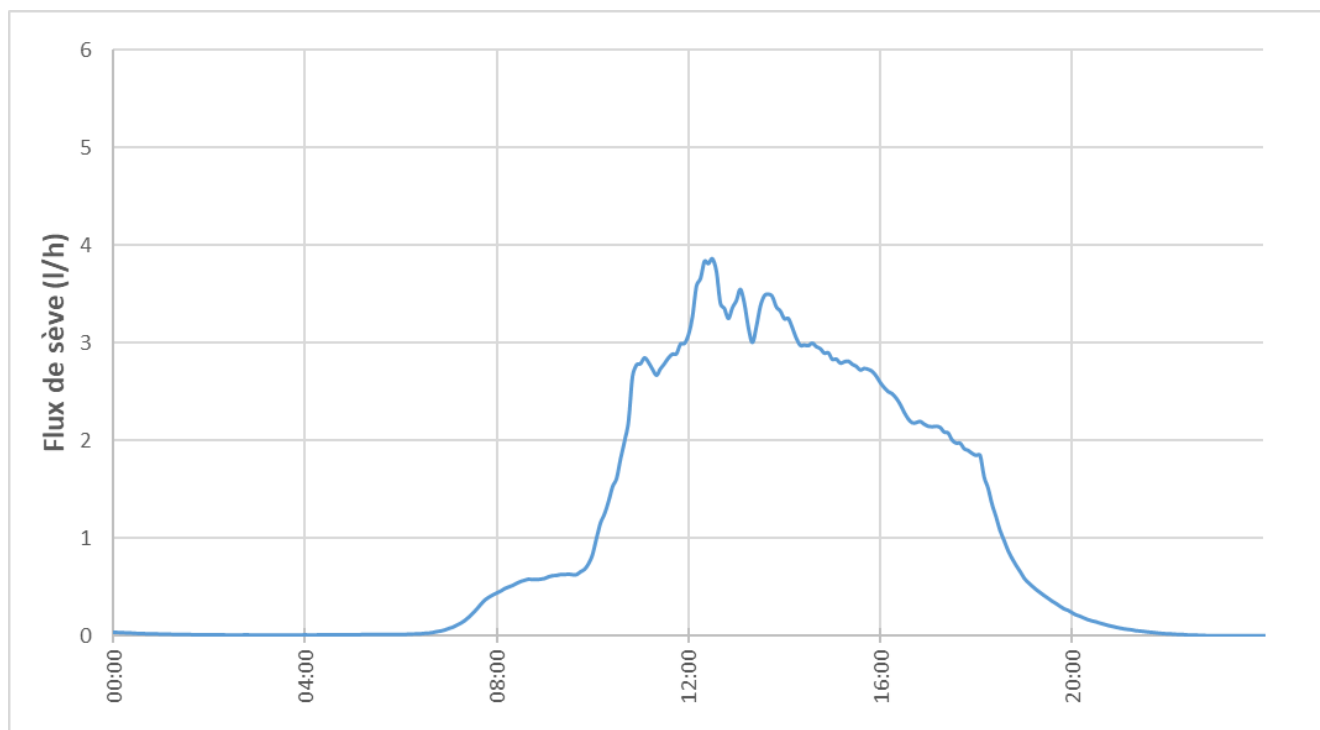


Figure 6. Chronique du flux de sève du 1^{er} juillet 2018, sonde de 30 mm.

Évapotranspiration

Le flux de sève mesuré a été fortement en lien avec l'ET_p mesurée au courant de la saison (Figure 7, Figure 8). Il a été impossible d'établir un lien aussi fort avec le potentiel matriciel du sol (0 à 85 kPa) ni avec les teneurs en eau volumique. Le flux de sève n'a pas suivi la tendance du statut hydrique de sol, et ce, pour les quatre arbres, peu importe le moment de la saison et l'année (un exemple est présenté à la Figure 9). La relation entre l'ET_p mesurée et le flux de sève moyen ne s'explique probablement pas par une fonction polynomiale, mais il existe une forte corrélation avec cette fonction (Tableau 2, Tableau 3). En 2017, les coefficients de détermination (R²) des sondes de 50 mm ont varié entre 0,78 et 0,85 tandis que les coefficients des sondes de 50 mm ont été plus faibles en 2018. Ce coefficient mesure l'ordre de grandeur de la relation entre deux variables. Ce dernier peut être exprimé en pourcentage en y extrayant la racine carrée. Plus ce coefficient est élevé, plus la variation d'un facteur explique la variation d'un second facteur, dans ce cas-ci l'ET_p et le flux de sève. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le tronc des arbres suivis en 2018 était plus petit que celui des arbres suivis en 2017 de manière qu'une plus grande partie de la sonde était située dans le xylème secondaire inactif. Cette tendance a également été observée en 2018. De manière générale, les sondes plus courtes (10 mm et 30 mm) ont permis d'obtenir de meilleurs coefficients de détermination que les sondes plus longues (50 mm).

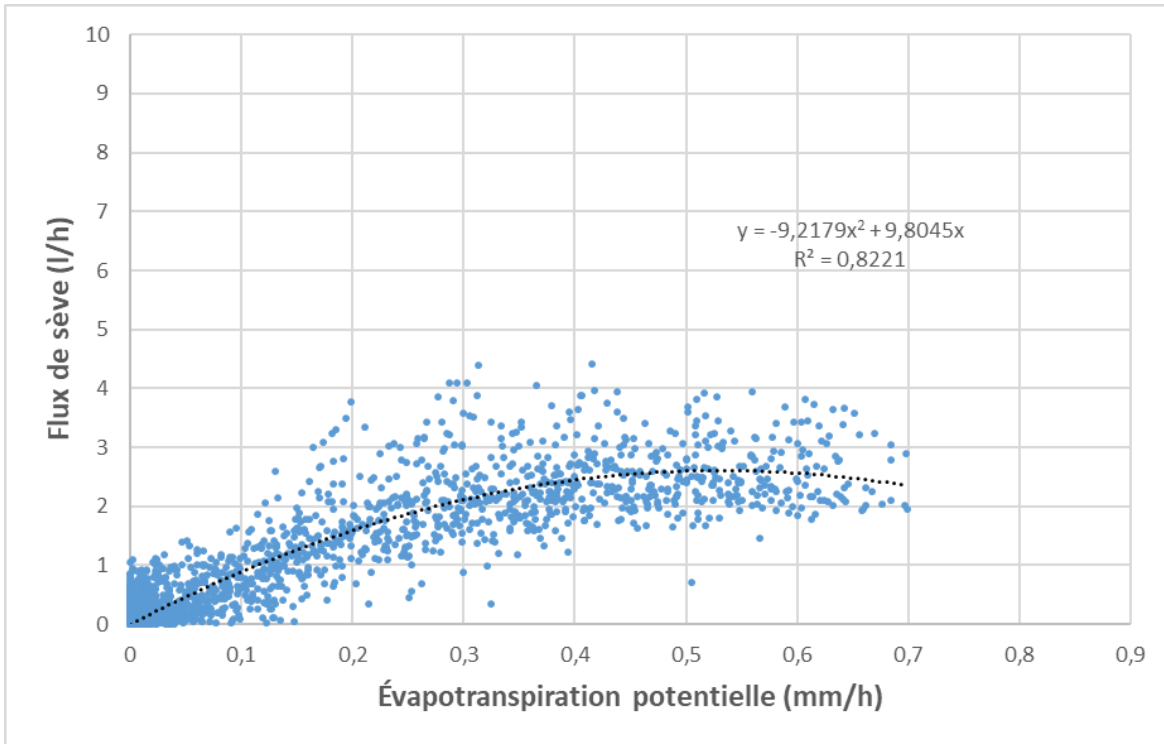


Figure 7. Relation entre l'évapotranspiration potentielle mesurée (mm/h) et le flux de sève moyen des 4 arbres (l/h), 2017.

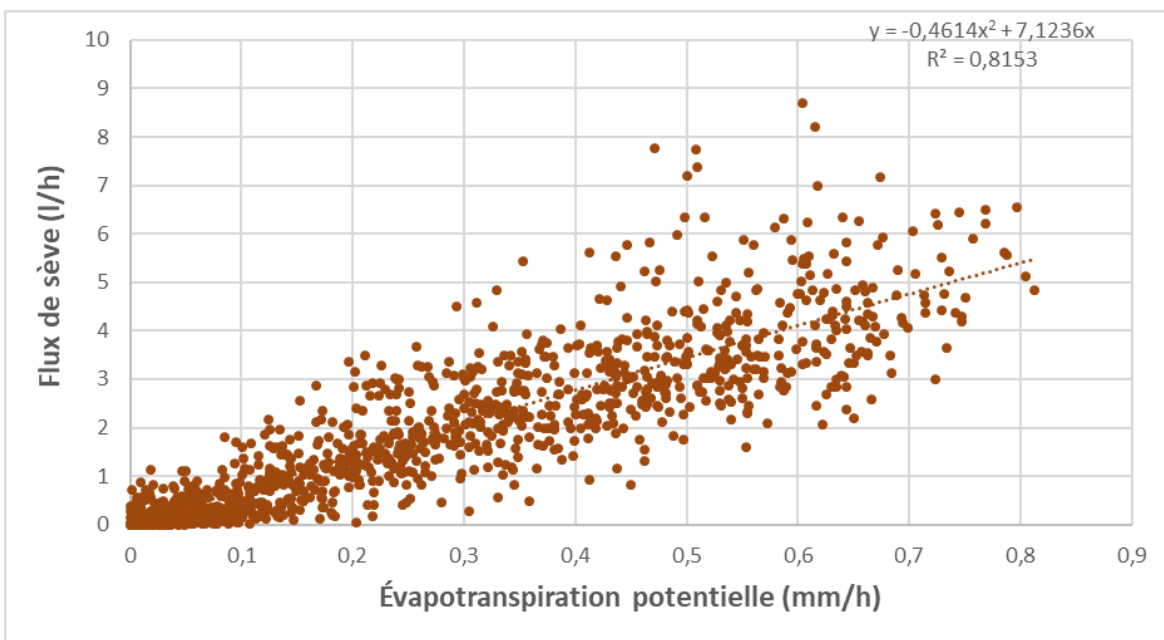


Figure 8. Relation entre l'évapotranspiration potentielle mesurée (mm/h) et le flux de sève moyen mesuré (sonde 30 mm) sur un arbre irrigué (l/h), 2018.

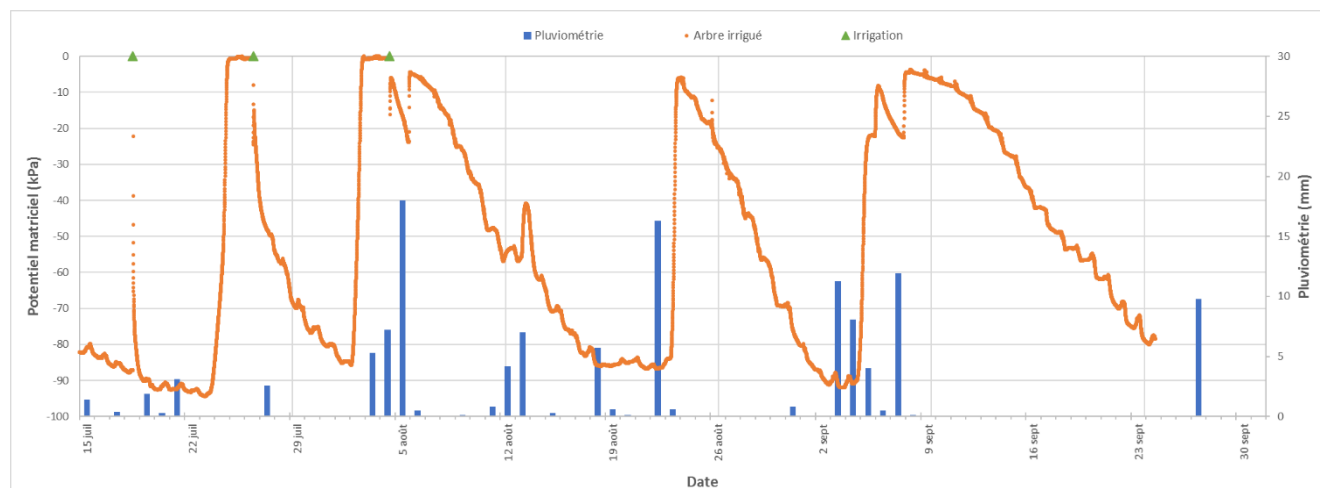


Figure 9. Chronique du potentiel matriciel (kPa) d'un arbre irrigué, de la pluviométrie (mm) et des irrigations, 2017.

Tableau 2. Coefficient de détermination entre l'évapotranspiration potentielle mesurée et le flux de sève

mes
uré,
sais
on
201
7.

Coefficient de détermination (R^2)*

Arbre 1, Non irrigué	Arbre 2, Non irrigué	Arbre 3, Irrigué	Arbre 4, Irrigué
0,7804	0,7785	0,8459	0,8013

*Établi selon une fonction polynomiale de degré 2, $n > 2000$ par arbre.

Note : Déterminés du 24 juin au 23 septembre 2017.

Tableau 3. Coefficient de détermination entre l'évapotranspiration potentielle mesurée et le flux de sève mesuré, saison 2018.

Coefficient de détermination (R^2)*

Irrigué				Non irrigué			
Arbre 1	Arbre 2			Arbre 3	Arbre 4		
50 mm	10 mm	30 mm	50 mm	50 mm	10 mm	30 mm	50 mm
0,5274	0,8065	0,8153	0,6895	n.d.	0,8457	0,6494	0,51

*Établi selon une fonction polynomiale de degré 2, $n > 1500$ par arbre.

Note : Déterminés du 30 mai au 30 août 2018.

Les flux de sève mesurés tant pour 2017 et 2018 tendent à stagner lorsque la demande en ET_p est forte. Les analyses suggèrent que le flux de sève est maximal lorsque l' ET_p atteint une valeur horaire d' ET_p de 0,4 à 0,5 mm/h (Figure 10). Durant les 3 et 4 juillet 2018, l' ET_p , semble bien expliquer l'évolution et la tendance du flux observé. Cependant, certaines tendances ne peuvent être expliquées uniquement par l' ET_p . L'exemple du 3 juillet le démontre bien. En début de journée, le flux de sève augmente pour atteindre son maximum vers 9 h.

Ensuite, une légère diminution est observée, suivie d'une petite chute vers 12 h. Pendant ce temps, la demande en ET_p n'a cessé d'augmenter.

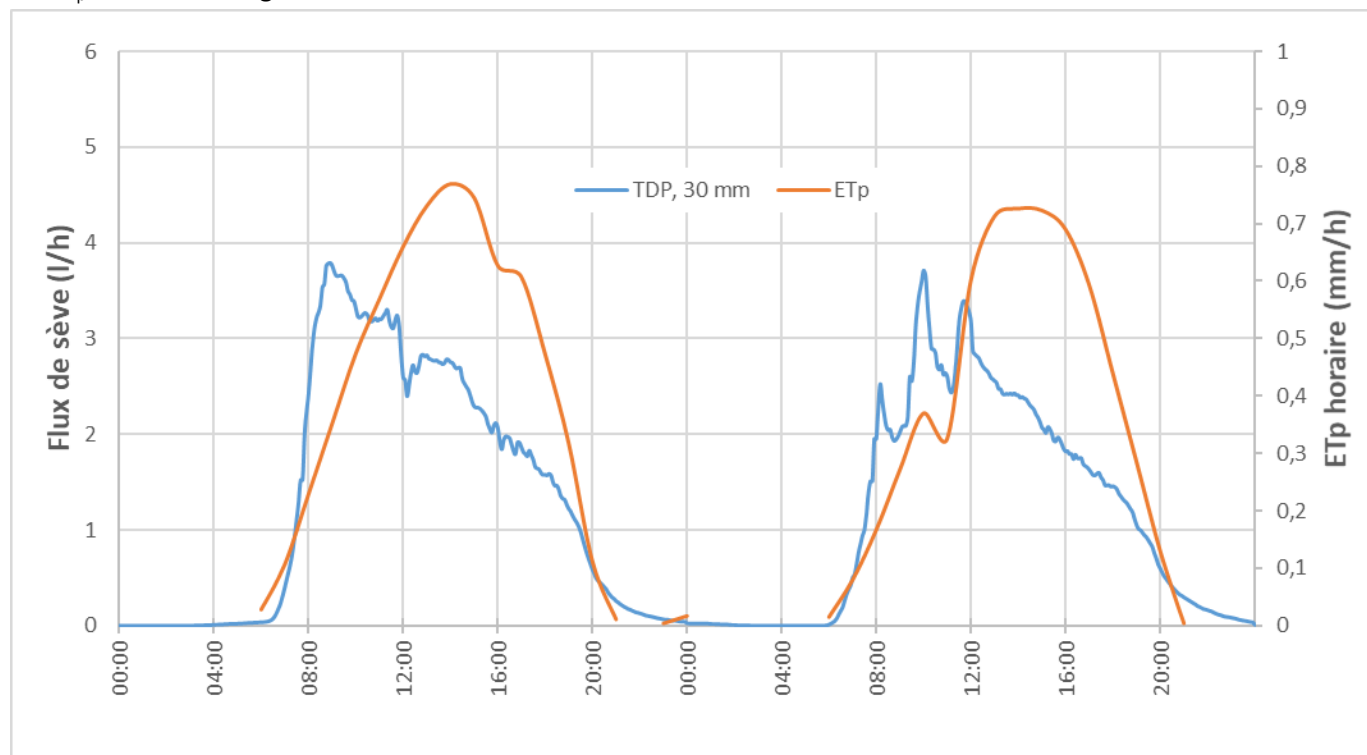


Figure 10. Chronique du flux de sève (l/h) mesuré sur un arbre non irrigué et de l' ET_p (mm/h) le 3 et 4 juillet 2018, sonde de 30 mm.

Mesure du statut hydrique du sol

Le statut hydrique du sol a été suivi au courant de la saison avec des sondes TDR ainsi que des tensiomètres (Figure 9, Figure 11 et Figure 12). Tel que mentionné précédemment, le lien entre le potentiel matriciel (tensiomètre) ou la teneur en eau volumique (TDR) du sol n'a pu être fait. Autrement dit, sur l'ensemble de la saison, une augmentation du potentiel matriciel du sol ou une diminution de la teneur en eau du sol mesurée n'expliquait pas nécessairement une diminution du flux mesuré, et ce, même pour les arbres non irrigués dont le sol était recouvert d'une bâche. L'établissement de ce lien cause à effet aurait permis de déterminer une consigne d'irrigation basée sur la mesure des flux de sève. Toutefois, le suivi du prélèvement estimé par les sondes TDR permettrait de corroborer la diminution du flux de sève observé lorsque la demande en ET_p est forte. Pour ce faire, trois périodes d'analyse ont été identifiées : de 6h à 10 h, de 10 h à 14 h et de 14h à 18h. En séparant le prélèvement estimé par TDR, cela permet d'évaluer un K_c par période. Les valeurs sont présentées par périodes au Tableau 4. Les valeurs de K_c issus de l'estimation par TDR indiquent des valeurs plus élevées en début de journée (6 h à 10 h) et diminuent par la suite. La diminution du K_c indique que le prélèvement estimé ne suit pas la même cadence qu'en début de journée. Autrement dit, les prélèvements dans l'horizon de sol 0-30 cm ralentissent et ne suivent pas la demande en ET_p de la même manière selon les périodes. Ces mesures demeurent en phase avec les observations du flux de sève mesuré par l'ensemble des sondes. Ces indications poussent donc à croire qu'un stress hydrique survient lorsque la demande en ET_p est élevée.

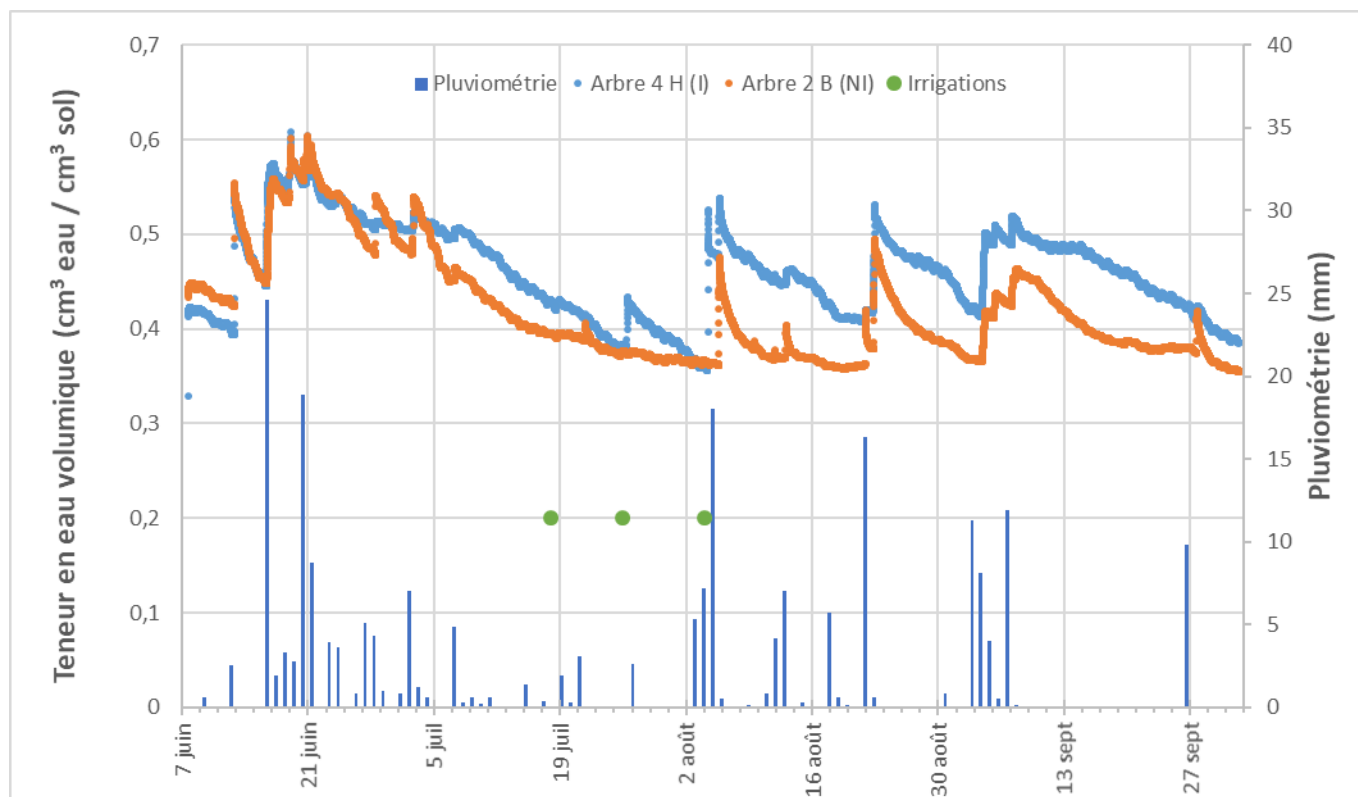


Figure 11. Chronique des sondes TDR 0-30 cm d'un arbre irrigué et non irrigué, de la pluviométrie (mm) et des irrigations, saison 2017.

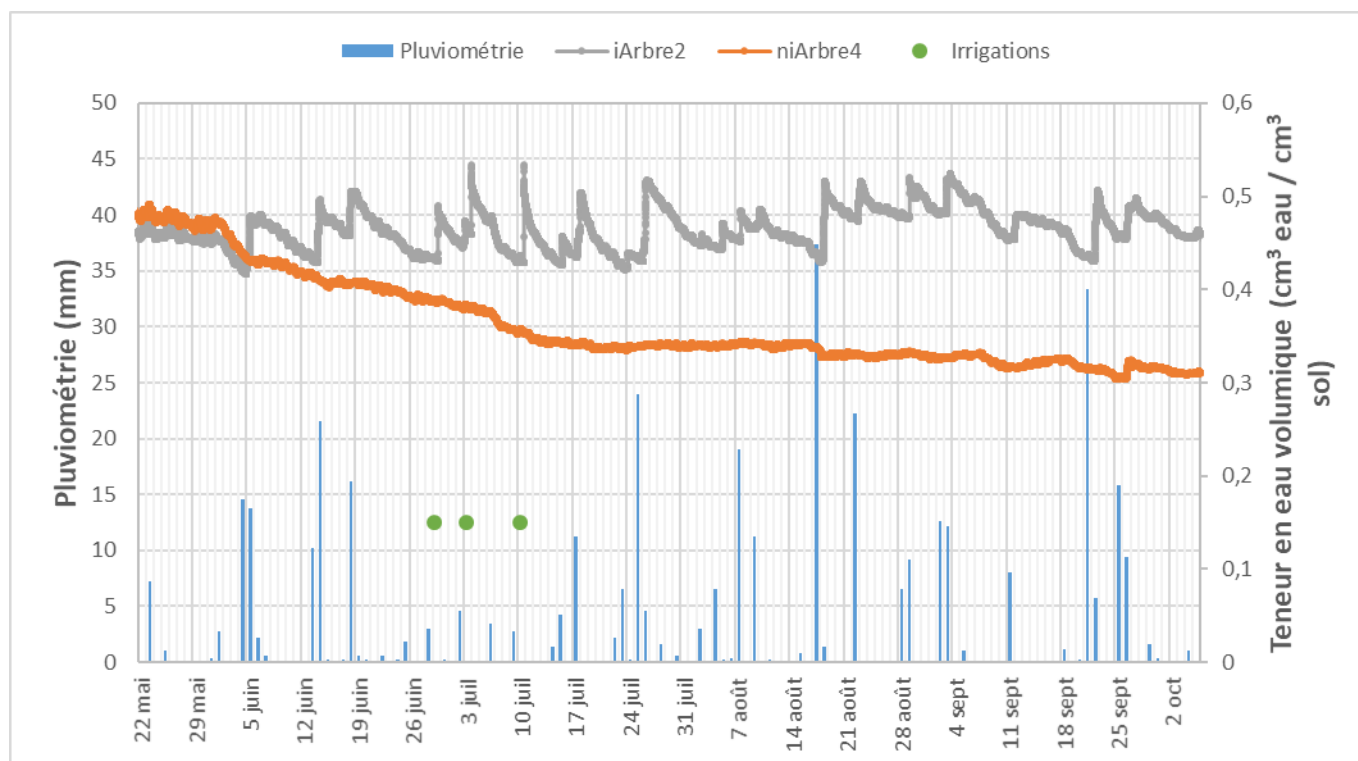


Figure 12. Chronique des sondes TDR 0-30 cm d'un arbre irrigué et non irrigué, de la pluviométrie (mm) et des irrigations, saison 2018.

Tableau 4. Coefficient cultural estimé par TDR pour chaque arbre selon la période de la journée (3).

Périodes de la journée	Coefficient cultural (k_c) estimé par TDR			
	Irigué		Non irrigué	
	Arbre 1	Arbre 2	Arbre 3	Arbre 4
6 h à 10 h	0,66 (43)	0,73 (46)	0,51 (40)	0,48 (40)
10 h à 14 h	0,32 (39)	0,26 (22)	0,17 (23)	0,15 (31)
14 h à 18 h	0,26 (30)	0,21 (7)	0,12 (12)	0,06 (2)

Note : le nombre exprimé entre parenthèses représente le nombre de valeurs avec lequel le coefficient a été calculé.

DÉFICIT DE PRESSION DE VAPEUR

À mesure que le sol s'assèche, la réponse physiologique des plantes est de diminuer simultanément la photosynthèse, la transpiration et la conductance stomatique de la feuille (Farquhar et Sharkey, 1982). Par définition la conductance stomatique est la réciproque de la résistance stomatique qui donne une idée du degré d'ouverture des pores stomatiques (exprime la facilité au transfert par diffusion). Le flux du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'eau est proportionnel au produit de la conductance stomatique et de la différence de concentration en CO_2 et/ou l'eau entre l'intérieur de la feuille et l'air environnant. La conductance stomatique est en lien avec le coefficient de diffusion du gaz exprimé sur une distance donnée. La conductance stomatique, ainsi que le taux

d'assimilation du CO₂ pour les espèces à fruits C₃, comme le pommier, répondent aux variations des conditions (cités dans Massonnet et coll., 2007) telles que : la radiation solaire (Marini et Sowers, 1990; Francesconi et coll., 1997), la température de la feuille (Seeley et Kammereck, 1977; Berry et Bjorkman, 1980), le déficit de pression de vapeur (Watson et coll., 1978; Fanjul et Jones, 1982), l'état hydrique du sol et de la plante (Schulze, 1986) et la fertilisation. Selon Lakso (1994), la diminution de l'activité photosynthétique au cours de l'après-midi, chez le pommier, est imputée à la fermeture progressive des stomates qui pourrait résulter d'une augmentation de la température et surtout de l'augmentation du déficit de pression de vapeur ou encore à une augmentation de la production d'acide abscissique en réponse à un assèchement du sol (cité dans Massonnet, 2004).

Dans le cadre des essais, il est difficile de faire le lien entre le potentiel matriciel de la parcelle et la diminution du flux de sève parfois observé en milieu de journée ou en avant-midi. Ces éléments n'ont pu être corrélés lors des deux années de l'essai. Au cours de la saison, des fluctuations sur les flux des arbres ont été mesurées, mais ce sont les fluctuations quotidiennes qui ont été les plus marquées. Toutefois, il est difficile d'attribuer les chutes de flux observées à un paramètre en particulier (Figure 13). Il en résulte d'une combinaison de facteurs qui dépasse les paramètres mesurés dans le cadre de cette étude.

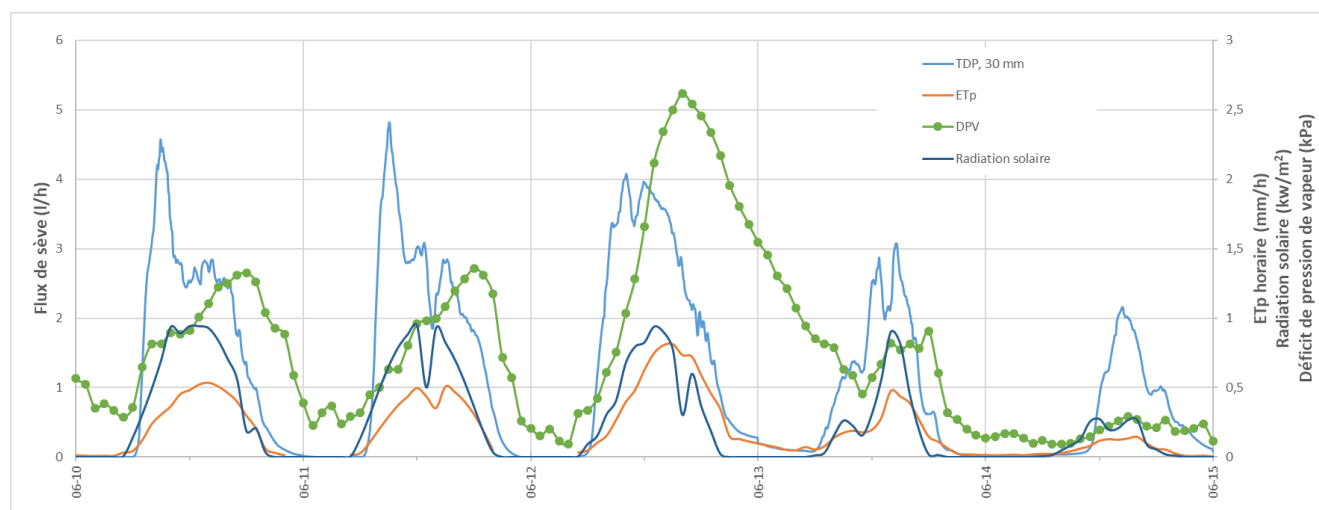


Figure 13. Chronique du flux de sève (l/h) selon les conditions environnementales telles que l'ET_p horaire (mm/h), la radiation solaire (kw/m²) et le déficit de pression de vapeur (kPa).

CONSOMMATION EN EAU

La consommation en eau quotidienne a été variable selon la période de mesure, l'arbre et la sonde employée (voir annexe Tableau 9 et Tableau 10). Bien que les sondes aient été corrigées en fonction d'une épaisseur précise de l'aubier, il existe toujours un biais entre les différentes longueurs de sondes utilisées. Dans la plupart des cas, la correction a permis d'augmenter les flux mesurés. La situation idéale est obtenue lorsque la longueur

de la sonde est équivalente à l'épaisseur de l'aubier. Ainsi, la sonde de 30 mm était la sonde la plus près de l'épaisseur de l'aubier. Ce faisant, il est plausible d'émettre comme hypothèse que la sonde de 30 mm est la sonde qui aurait permis la meilleure évaluation des flux de sève. Il est également à noter que la consommation en eau est également variable selon le diamètre de l'arbre.

En 2017, les flux de sève mesurés quotidiennement ont été comparés avec l' ET_p quotidienne (Figure 14). Pour chaque mois analysé, la consommation en eau suit la tendance de l' ET_p . La comparaison des flux de sève avec l' ET_p de manière quotidienne indique qu'il n'y aurait pas eu de stress hydrique au courant de la saison. Le même constat peut s'appliquer avec un arbre non irrigué (Figure 15).

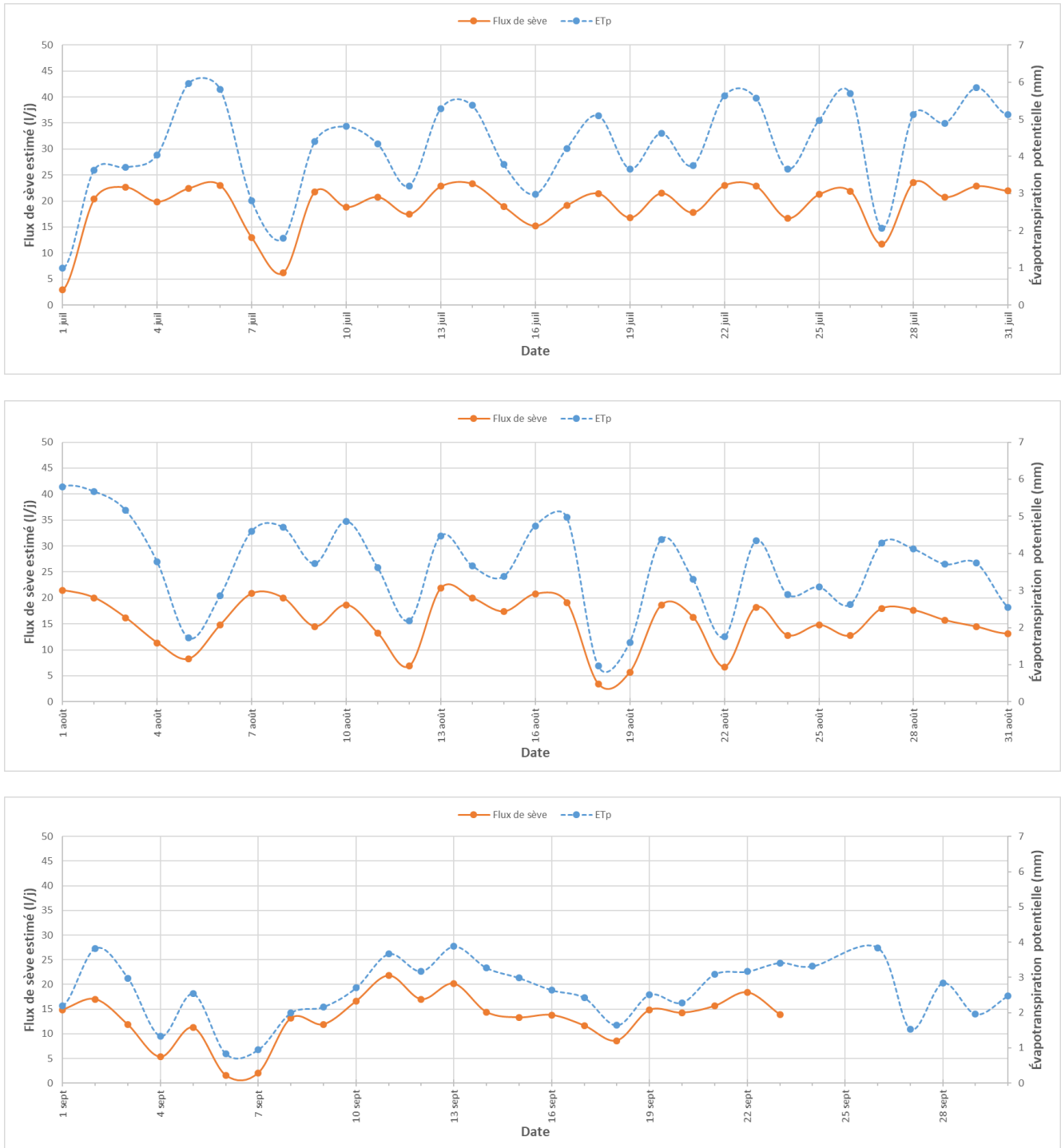


Figure 14. Flux de sève quotidien (l/j) pour un arbre irrigué en juillet, août et septembre 2017.

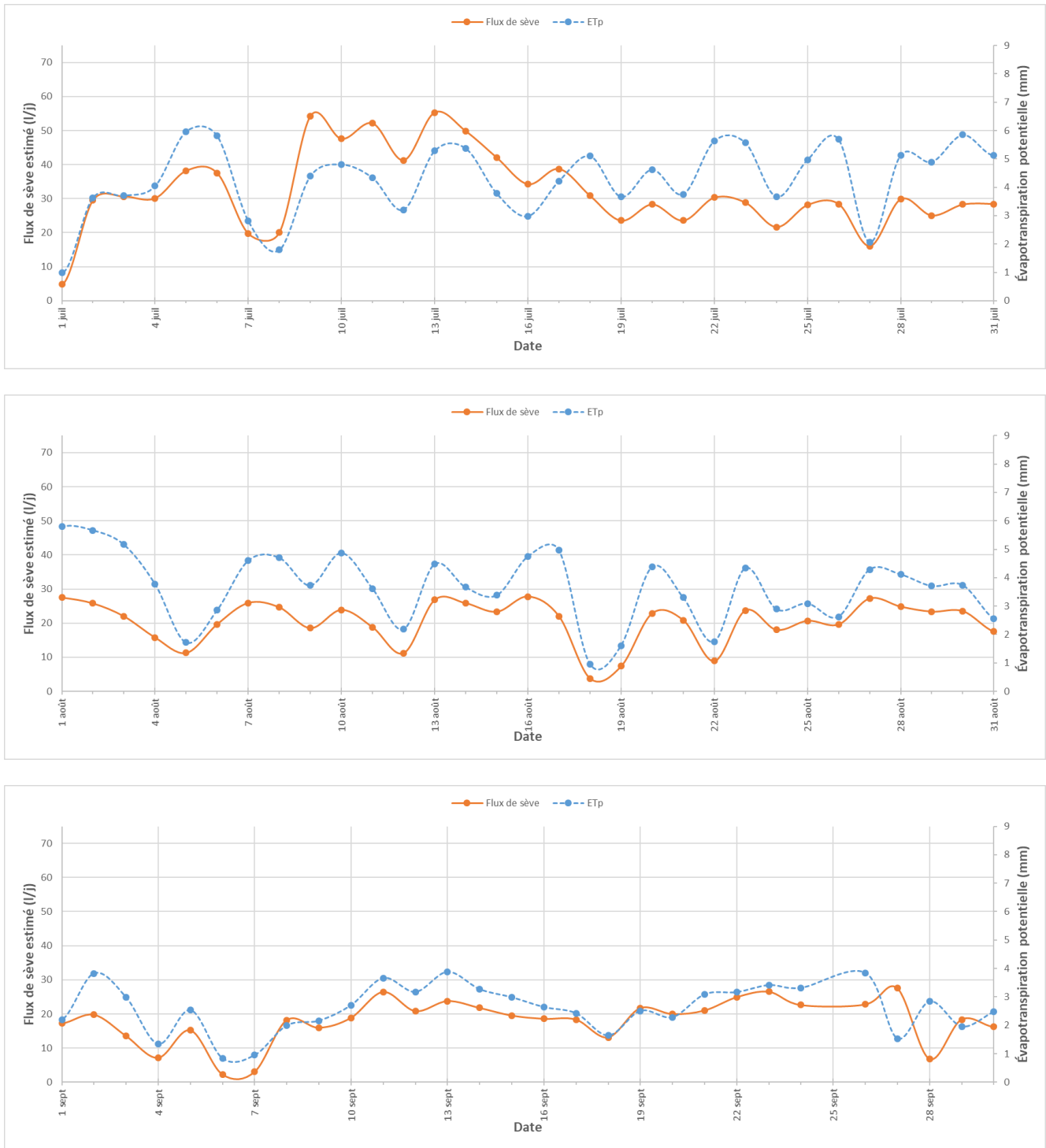


Figure 15. Flux de sève quotidien (l/j) pour un arbre non irrigué en juillet, août et septembre 2017.

En 2018, la même tendance s'est poursuivie avec des flux de sève estimés qui suivent l' ET_p (Figure 16). Durant la presque totalité des jours mesurés, le flux de sève des arbres suit la même tendance que l' ET_p . Il existe quelques exceptions comme le 5 ou le 10 juillet où le flux de sève mesuré suit une tendance inverse à l' ET_p . Toutefois, durant ces dates, les arbres irrigués et non irrigués ont suivi la même tendance. Il ne s'agit donc pas d'une différence entre les traitements. Puisque la mesure de l' ET_p ne se faisait pas directement au verger, il est possible que la valeur calculée n'ait pas reflété la réalité du site d'essai pour ces journées. Ainsi, il n'existe pas de différence entre les flux estimés de l'arbre irrigué et de l'arbre non irrigué dans la période où les trois irrigations se sont succédé (du 29 juin au 10 juillet) de même que pour le reste de la saison.

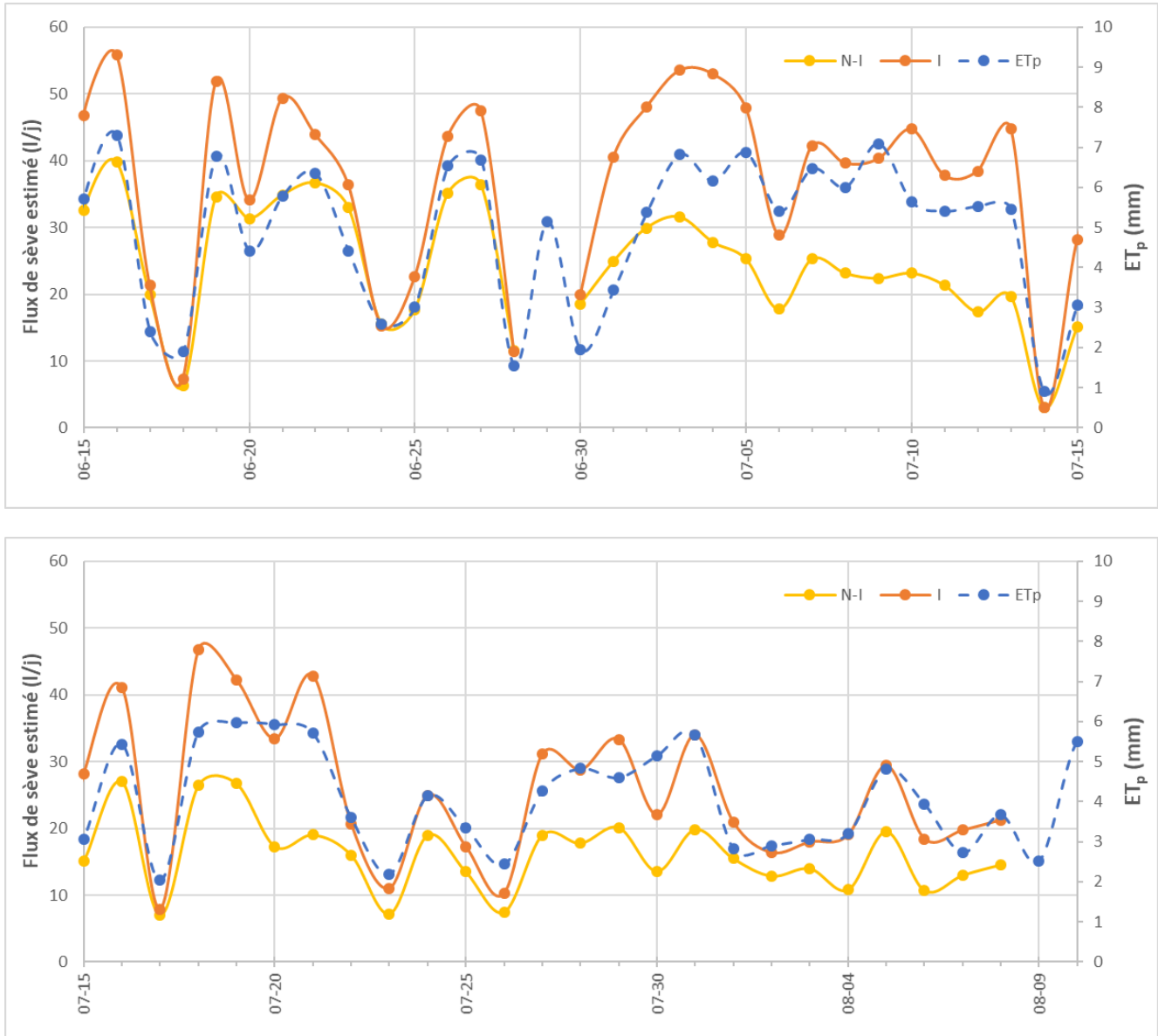


Figure 16. Flux de sève quotidien (l/j) pour un arbre irrigué et non irrigué du 15 juin au 10 août 2018.

Le flux de sève des arbres mesuré a varié d'une année à l'autre et d'une sonde à l'autre. D'un flux quotidien moyen entre 13,9 à 25,2 l en 2017, le flux quotidien moyen a varié de 4,8 à 27,3 l en 2018. Les flux de sève quotidiens maximaux mesurés en 2017 et 2018 ont légèrement dépassé le seuil de 50 l. À titre d'exemple, les essais menés par Dragoni et coll., (2005) sur des pommiers de la variété Royal Gala de 8 ans de maturité ayant des diamètres de 60 à 70 mm et situés dans un verger de l'État de New York aux États-Unis ont mesurés des flux de sève qui pouvaient s'élever jusqu'à 40 l par jour par arbre.

À certaines dates, le flux de sève quotidien a été très faible en comparaison aux autres journées (Tableau 5). Dans tous les cas, les journées où le flux de sève mesuré a été faible étaient accompagnées d'une faible demande en évapotranspiration potentielle et de précipitations.

Tableau 5. Flux de sève minimal (l/h) enregistré et conditions météorologiques selon la journée, saison 2017.

Journée	Flux de sève moyen mesuré (l/j)	ET _p (mm)	Pluviométrie (mm)
23 juin	7,5	0,81	3,9
1 ^{er} juillet	5,5	0,99	0,8
18 août	4,8	0,96	5,7
6 septembre	3,3	0,83	0,5
7 septembre	3,7	0,95	11,9

Consommation en eau à l'échelle du verger

Les sondes à dissipation thermique sont utilisées depuis de nombreuses années pour estimer la consommation en eau des arbres. L'extrapolation d'une mesure du flux d'un arbre à l'ensemble d'un verger est certes possible à faire, mais il faut toutefois être conscient des limitations que cela impose. Pour permettre une extrapolation juste et précise, les mesures de flux estimées sur les quelques arbres doivent être les plus précises possible.

Au cours des dernières décennies, de nombreuses études ont tenté de quantifier la précision des sondes à dissipation thermique, utilisant les formules de calibration de Granier, à évaluer le flux des arbres mesuré par des méthodes de références. La littérature sur le sujet stipule de manière assez catégorique et unanime que l'utilisation des sondes à dissipation thermique sous-estime le flux de sève réel des arbres entre 6 et 90 % (études portant sur plusieurs espèces d'arbres dont certains ayant un bois à pores diffus (citées dans Fuchs et coll., 2017) (de Oliveira Reis et coll., 2006; Taneda et Sperry, 2008; Bush et coll., 2010; Hultine et coll., 2010; Steppe et coll., 2010; Renninger et Schäfer, 2012; Sun et coll., 2011; Fuchs et coll., 2017, Peters et coll., 2018). Il existe de nombreuses raisons qui pourraient expliquer ces erreurs telles qu'un écart dans la conception des sondes TDP commerciales et le design d'origine de Granier (Lu et coll., 2004), des propriétés du bois spécifiques à l'espèce (Lu et coll., 2004, Vandegehuchte et Steppe, 2013, cité dans Fuchs et coll., 2017, Peters et coll., 2018), une différence non négligeable du flux radial de l'aubier (Clearwater, et coll., 1999; Lu et coll., 2004; Bush et coll., 2010), des blessures potentielles (Wullschleger et coll., 2011 cité dans Fuchs et coll., 2017), un mauvais alignement des sondes (Ren et coll., 2017) ou une mauvaise estimation du flux minimal (ΔT_{\max}) (Peters et coll., 2018).

La consommation en eau à l'échelle d'un verger est présentée au Tableau 11. En utilisant les valeurs moyennes des sondes (4) en 2017 et la valeur moyenne des sondes de 30 mm en 2018, le volume d'eau calculé a été rapporté sur une surface d'un hectare de verger pour y être converti en hauteur d'eau. La superficie du verger considère les rangs, ainsi que les entre-rangs enherbés. Les estimations de consommation en eau réfèrent à la partie transpiration seulement. Ainsi, des valeurs de consommation en eau quotidienne en 2017 et 2018 ont atteint respectivement des hauteurs d'eau entre 0,3 et 3,9 mm (moyenne à 2,1 mm) et entre 0,03 à 4,6 mm (moyenne de 2,2 mm).

RENDEMENTS ET QUALITÉ

Le rendement a été mesuré pour chaque arbre (Tableau 6). Le rendement total en fruits a varié entre 29,7 et 42,2 kg par arbre en 2017 et entre 22,8 et 33,7 kg en 2018. En 2017, il faut mentionner que le rendement de l'arbre 1 semble inférieur à celui des autres. Ceci s'explique assurément du fait que les fruits d'une de ses branches ont été récoltés par erreur par l'équipe de cueilleurs de la ferme avant que les rendements soient mesurés. Bien qu'aucune analyse statistique n'ait été réalisée sur les mesures obtenues, il apparaît peu probable qu'il y ait un effet du traitement sur le rendement en fruits. De plus amples mesures devront être réalisées pour évaluer l'effet de l'irrigation sur le rendement en fruits des pommiers.

Tableau 6. Nombre total, poids total, poids moyen des fruits, ainsi que les catégories de poids commercialisables selon l'année, l'arbre et le traitement.

Année	Parcelle	Traitement	Nombre <i>Total</i>	Poids <i>Total</i> (kg)	Poids moyen (g)	Catégories Poids (kg)				
						moins de 2 ³ / ₄ po	2 ³ / ₄ po à 3 po	3 po à 3 ¹ / ₂ po	3 ¹ / ₂ po et plus	Tombées
2017	Arbre 1	N-I	113	29,7	262,8	0,9	0,9	15,0	11,5	0,4
	Arbre 2	N-I	169	42,2	249,7	0,5	3,1	27,8	9,2	0
	Arbre 3	I	143	37,3	260,8	0,5	1,9	22,8	10,7	0
	Arbre 4	I	143	38,5	269,2	0,5	1,6	22,1	14,8	0
2018	Arbre 1	N-I	93	25,9	278,6	0,1	1,3	9,7	13,5	1,29
	Arbre 2	N-I	73	22,8	312,3	0,0	0,2	2,9	18,7	1,12
	Arbre 3	I	122	33,7	275,8	0,6	0,7	11,7	19,0	1,70
	Arbre 4	I	107	24,0	223,9	1,4	2,5	14,4	4,5	1,25

En ce qui a trait à la qualité de la récolte, la fermeté, le degré Brix et la coloration ont été mesurés (Tableau 7). La fermeté a été très stable d'une pomme à l'autre. Seul l'arbre 3 a obtenu une valeur moyenne plus faible que les autres en 2017 seulement (6,8 en comparaison à plus de 7,3 kg/cm²). Le taux de sucre a aussi été très stable entre les traitements et les arbres avec des valeurs oscillants entre 13,6 et 14,8 °B en 2017 et entre 11,6 et 12,3 °B en 2018. Finalement, pour la coloration, il existe la même tendance au sein des traitements. C'est-à-dire qu'un arbre avait une plus grande proportion de fruits colorés sur 50 % et plus de sa surface et l'autre se situait dans la situation inverse.

Tableau 7. Fermeté moyenne, Brix moyen et la coloration des pommes selon l'année, l'arbre et le traitement.

Année	Parcelle	Traitement	Fermeté moyenne (kg/cm ²)*	Brix moyen (°B)	Coloration Poids (kg)	
					0 à 50 %	50 % et plus
2017	Arbre 1	N-I	7,5	13,9	7,8	21,5
	Arbre 2	N-I	7,4	14,8	21,9	19,4
	Arbre 3	I	6,8	14,2	14,5	20,9
	Arbre 4	I	7,3	13,6	23,8	14,2
2018	Arbre 1	N-I	6,7	12,3	4,7	18,3
	Arbre 2	N-I	6,5	11,9	6,7	25,4
	Arbre 3	I	6,6	11,6	8,2	13,4
	Arbre 4	I	6,7	11,9	4,7	19,2

*Facteur de conversion pour exprimer la fermeté en lbs/cm² : 2,20462

5 CONCLUSION

En comparant les flux de sève estimés, la consommation moyenne d'un arbre de 85 à 95 mm de diamètre a été mesurée et se situerait entre 21 et 23 l par jour avec des pointes quotidiennes d'un peu plus de 50 l.

Grâce à l'observation de l'évolution du flux de sève de manière horaire, il a été possible de constater que le flux de sève n'est pas toujours en phase avec l'évapotranspiration en cours. En fin d'avant-midi ou en après-midi, le flux de sève stagne ou diminue tandis qu'il devrait continuer à s'élever tel que l'indique la demande en évapotranspiration. Un tel comportement indique une réponse physiologique de l'arbre aux conditions ambiantes. Dans le cadre des essais, il a été impossible de relier ce phénomène à un potentiel matriciel à l'échelle parcellaire. Toutefois, ceci n'exclut pas la possibilité que la diminution du flux observé provienne d'une réponse physiologique liée à l'assèchement du sol à proximité des racines ou à une augmentation de la résistance au transport d'eau causée par le porte-greffe. Une analyse plus poussée de la conductivité hydraulique non saturée du sol permettrait peut-être de mieux comprendre le possible phénomène d'assèchement. Comme elle a été rapidement abordée, la conductance stomatique permet de quantifier la régulation de l'ouverture et de la fermeture des stomates qui est responsable en grande partie des transferts d'eau de l'arbre à l'atmosphère. Il est connu que le déficit de pression de vapeur est un paramètre important influençant la conductance stomatique. Malgré l'analyse du déficit de pression de vapeur régionale, il a été impossible de relier ce paramètre à la diminution du flux observée. En mesurant le déficit de pression de vapeur sur le site même, le constat aurait pu être différent. Toutefois, une excellente correspondance entre le flux de sève quotidien et l'évapotranspiration quotidienne a été obtenue.

La mesure des flux de sève d'un arbre n'intègre pas seulement l'environnement d'une feuille, mais plutôt une architecture végétale complexe. Plusieurs paramètres comme l'effet de la lumière (photoinhibition), l'effet de la température ou du stade phénologique (présence des fruits ou non) des arbres sont également des aspects qui devraient être analysés et suivis.

La détermination d'une consigne d'irrigation se base sur plusieurs facteurs issus du développement durable. Le suivi à l'aide de sondes à dissipation thermique visait à déterminer les périodes de stress potentielles des pommiers et de relier ces périodes aux conditions météorologiques ou hydriques du sol. Dans le cadre de l'étude, l'analyse du flux de sève comparative sur deux ans n'a pas permis de déterminer une période de stress hydrique. De manière agronomique, il n'y avait aucun avantage à irriguer les parcelles. Certains facteurs tels que la capacité de rétention en eau du sol et le développement racinaire des pommiers sont des facteurs qui ont probablement aidé à diminuer le risque qu'un stress hydrique survienne. De plus, les pommiers ont une demande en eau qui est plutôt modérée, ce qui leur procure une bonne autonomie entre les apports de pluie. Finalement, il est important de mentionner que l'essai s'est effectué sur 4 arbres seulement.

L'analyse du flux de sève des pommiers demeure une méthode d'instrumentation très intéressante pour suivre et comprendre le mouvement de l'eau à l'échelle de l'arbre. Cette technique permet d'estimer les flux de sève quotidiens des arbres et éventuellement de quantifier la consommation en eau d'un verger. L'incertitude dans l'évaluation des flux de sève par TDP, indique que la consommation en eau moyenne mesurée pourrait être nettement sous-estimée. Pour améliorer la précision de l'évaluation, des essais plus poussés incluant

notamment la calibration de la formule de Granier et l'estimation précise de l'épaisseur de l'aubier des arbres (Honeycrisp) devront être réalisés.

6 ANNEXE

COURBE DE DÉSORPTION EN EAU

La courbe de désorption en eau exprime la relation entre la teneur en eau d'un sol (θ) et le potentiel matriciel (ψ). La quantité d'eau disponible dans un sol est directement en lien avec le potentiel matriciel puisque celui-ci est la force à laquelle l'eau est retenue par les particules de sol. Les courbes de désorption réalisées sont présentées aux Figure 17 et Figure 18.

Pour déterminer la réserve en eau facilement utilisable par la plante graphiquement, il suffit de calculer l'eau disponible entre la capacité au champ « in situ » et le plateau de la courbe de désorption en eau. La capacité au champ (CC) correspond à la teneur en eau retenue dans un sol de 24 à 72 heures après un épisode de saturation. Le délai entre l'événement de saturation et la capacité au champ dépendra du temps nécessaire au drainage de l'eau libre du sol. Le plateau de la courbe de désorption correspond à la zone de la courbe située entre la CC « in situ » et le point de flétrissement temporaire (point théorique à 100 kPa), caractérisé par une pente presque nulle.

La capacité au champ in situ n'a pu être mesurée de manière précise. Toutefois, les observations préliminaires au champ indiqueraient une capacité au champ entre 5-6 kPa. Les points de plateau des courbes ne sont pas clairement définis. Ceci est généralement observé dans le sol à texture plus lourde. Donc, il y a toujours une certaine quantité d'eau disponible aux plantes même lorsque le potentiel matriciel du sol augmente.

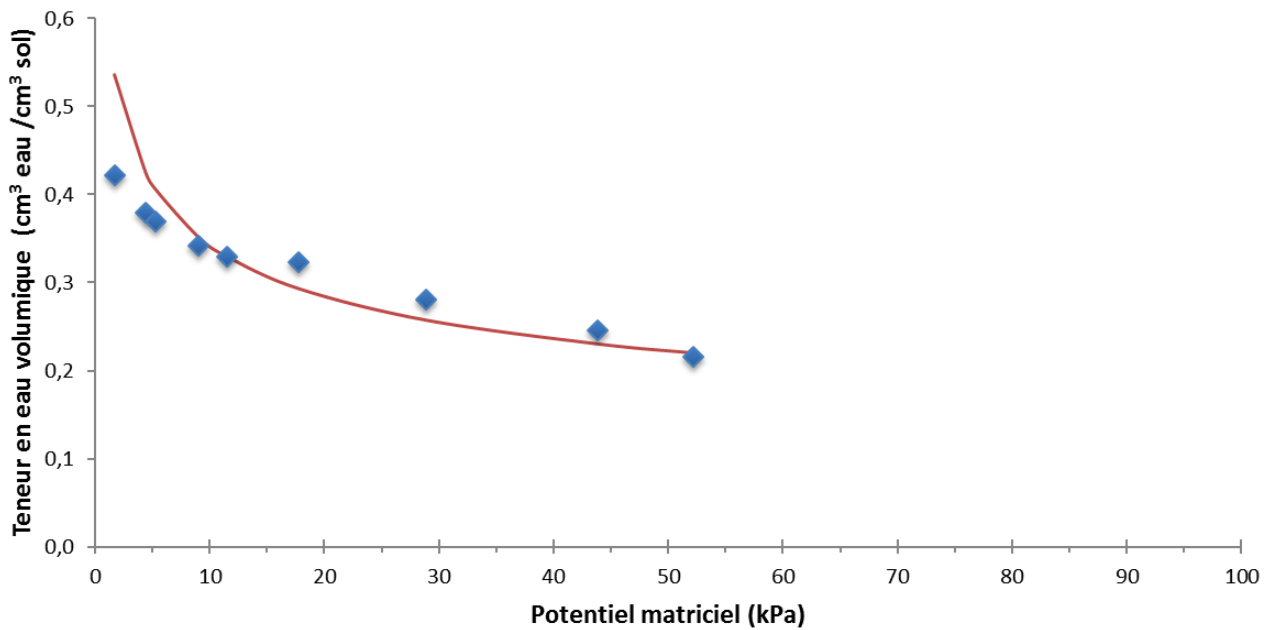


Figure 17. Courbe de désorption en eau du sol à une profondeur de 10-20 cm.

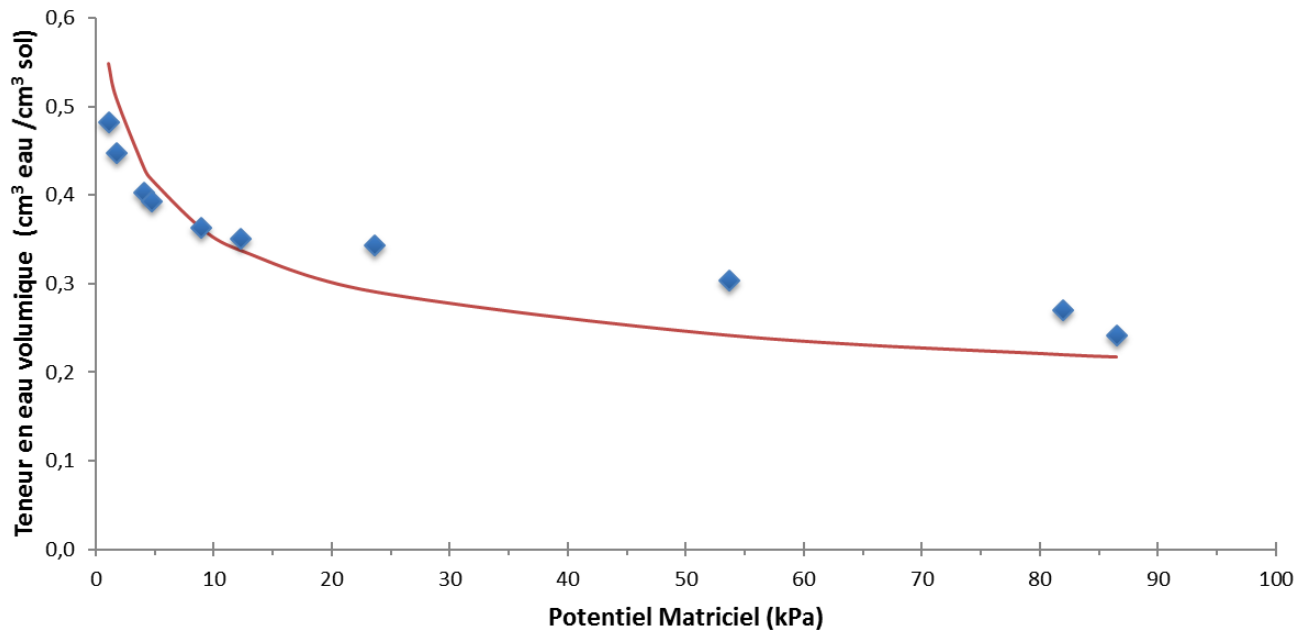


Figure 18. Courbe de désorption en eau du sol à une profondeur de 30-40 cm.

ARBRES MESURÉS

Tableau 8. Diamètre mesuré des troncs (mm) selon l'arbre* et l'année.

Arbre	Diamètre considéré (mm)	
	2017	2018
1	98,4	82,1
2	95,8	98,0
3	84,4	74,7
4	99,7	86,7

*Arbre différent d'une année à l'autre.

CONSOMMATION EN EAU

Tableau 9. Flux de sève quotidien mesuré (l) pour l'ensemble des arbres, 2017.

Date	Flux de sève quotidien (l)			
	Non irrigué		Irrigué	
	Arbre 1	Arbre 2	Arbre 3	Arbre 4
	50 mm			
8 juin	50,4	17,7	56,2	40,1
9 juin	41,5	18,2	48,0	43,6
10 juin	39,5	15,1	48,4	51,3
11 juin	44,8	15,2	51,8	n.d.
12 juin	24,5	15,7	33,3	53,3
13 juin	36,2	10,7	24,8	n.d.
14 juin	29,6	7,1	10,7	11,8
15 juin	26,2	11,8	29,5	17,3
16 juin	0,7	2,4	7,8	14,7
17 juin	37,0	2,7	45,6	47,4
18 juin	24,7	13,5	16,8	22,1
19 juin	26,6	11,6	12,3	27,5
20 juin	23,9	13,8	14,2	49,6
21 juin	21,6	19,5	12,0	31,5
22 juin	39,1	15,4	23,5	51,2
23 juin	2,8	17,2	1,1	6,2
24 juin	39,1	15,8	19,7	42,8
25 juin	41,1	14,9	24,3	40,3
26 juin	36,4	14,3	22,7	25,6

27 juin	24,2	13,6	18,5	13,0
28 juin	17,9	9,9	11,1	14,3
29 juin	29,9	15,2	19,2	23,5
30 juin	21,5	15,2	14,4	15,8
1 juil	4,8	16,2	3,5	5,3
2 juil	29,5	18,9	24,4	27,3
3 juil	30,6	21,5	27,2	37,5
4 juil	30,1	18,2	23,8	34,2
5 juil	38,2	17,4	26,9	40,2
6 juil	37,5	21,7	27,6	33,6
7 juil	19,7	6,6	15,5	12,4
8 juil	20,1	16,3	7,4	10,2
9 juil	54,3	14,6	26,1	30,7
10 juil	47,5	14,5	22,6	29,5
11 juil	52,1	15,0	24,9	33,0
12 juil	41,3	0,8	20,9	25,5
13 juil	55,3	n.d.	27,4	28,9
14 juil	49,8	n.d.	27,9	30,1
15 juil	42,0	n.d.	22,6	25,4
16 juil	34,3	n.d.	18,2	21,6
17 juil	38,7	n.d.	23,0	26,3
18 juil	30,8	n.d.	25,7	29,4
19 juil	23,6	n.d.	20,1	24,7
20 juil	28,3	n.d.	25,8	29,9
21 juil	23,6	n.d.	21,3	24,6
22 juil	30,3	n.d.	27,6	31,6
23 juil	28,8	n.d.	27,4	30,8
24 juil	21,7	n.d.	20,0	25,2
25 juil	28,2	n.d.	25,5	28,7
26 juil	28,4	n.d.	26,2	20,3
27 juil	16,1	n.d.	14,0	12,6
28 juil	29,9	n.d.	28,2	31,1
29 juil	25,1	n.d.	24,9	28,0
30 juil	28,3	n.d.	27,4	30,2
31 juil	28,4	n.d.	26,3	26,5
1 août	27,5	n.d.	25,7	27,5
2 août	25,8	n.d.	24,0	26,8
3 août	22,0	n.d.	19,4	21,0
4 août	15,8	n.d.	13,6	16,0
5 août	11,3	n.d.	9,9	14,2
6 août	19,7	n.d.	17,7	25,7

7 août	25,9	n.d.	25,0	27,5
8 août	24,6	n.d.	24,0	25,8
9 août	18,5	n.d.	17,4	19,5
10 août	23,9	n.d.	22,4	23,8
11 août	18,8	n.d.	15,8	17,1
12 août	11,2	n.d.	8,2	11,3
13 août	26,8	n.d.	26,2	28,6
14 août	25,8	n.d.	24,0	27,5
15 août	23,3	n.d.	20,8	24,5
16 août	27,8	n.d.	24,9	29,3
17 août	22,0	n.d.	22,9	24,6
18 août	3,8	n.d.	4,0	5,5
19 août	7,4	n.d.	6,8	10,0
20 août	22,9	n.d.	22,4	24,4
21 août	20,9	n.d.	19,6	22,4
22 août	8,9	n.d.	8,1	9,9
23 août	23,8	n.d.	21,8	24,7
24 août	18,0	n.d.	15,3	19,3
25 août	20,7	n.d.	17,7	20,4
26 août	19,6	n.d.	15,3	19,3
27 août	27,2	n.d.	21,6	26,9
28 août	24,8	n.d.	21,1	24,7
29 août	23,4	n.d.	18,8	24,1
30 août	23,5	n.d.	17,3	25,7
31 août	17,5	n.d.	15,7	20,9
1 sept	17,2	n.d.	17,9	20,1
2 sept	19,8	n.d.	20,4	19,3
3 sept	13,6	n.d.	14,2	14,1
4 sept	7,2	n.d.	6,4	10,7
5 sept	15,2	n.d.	13,5	22,5
6 sept	2,3	n.d.	1,9	5,1
7 sept	3,0	n.d.	2,5	4,8
8 sept	18,2	n.d.	15,8	24,5
9 sept	16,0	n.d.	14,3	21,7
10 sept	18,9	n.d.	19,9	25,7
11 sept	26,5	n.d.	26,1	37,3
12 sept	20,9	n.d.	20,4	29,0
13 sept	23,8	n.d.	24,1	32,1
14 sept	21,8	n.d.	17,3	28,7
15 sept	19,5	n.d.	15,9	25,5
16 sept	18,6	n.d.	16,5	30,5

17 sept	18,4	n.d.	14,0	26,4
18 sept	13,1	n.d.	10,3	17,6
19 sept	21,7	n.d.	17,7	26,9
20 sept	20,0	n.d.	17,1	25,5
21 sept	21,0	n.d.	18,7	25,5
22 sept	24,9	n.d.	22,0	30,2
23 sept	26,5	n.d.	16,6	25,7
24 sept	22,6	n.d.	n.d.	n.d.
26 sept	22,8	n.d.	n.d.	n.d.
27 sept	27,5	n.d.	n.d.	n.d.
28 sept	6,8	n.d.	n.d.	n.d.
29 sept	18,4	n.d.	n.d.	n.d.
30 sept	16,2	n.d.	n.d.	n.d.
1 oct	16,4	n.d.	n.d.	n.d.
2 oct	17,9	n.d.	n.d.	n.d.
3 oct	0,8	n.d.	n.d.	n.d.
Nombre de jours mesurés	117,0	35,0	108,0	106,0
Moyenne quotidienne (l)	24,5	13,9	20,4	25,2

Tableau 10. Flux de sève quotidien mesuré (l) pour l'ensemble des arbres, 2018.

Date	Flux de sève quotidien (l)							
	Irrigué				Non irrigué			
	Arbre 1		Arbre 2		Arbre 3		Arbre 4	
	50 mm	10 mm	30 mm	50 mm	50 mm	10 mm	30 mm	50 mm
9 mai	5,6	n.d.	n.d.	2,7	0,3	n.d.	n.d.	1,5
10 mai	10,4	n.d.	n.d.	4,7	0,5	n.d.	n.d.	1,8
11 mai	2,5	n.d.	n.d.	3,9	0,0	n.d.	n.d.	1,3
12 mai	7,1	n.d.	n.d.	2,6	0,2	n.d.	n.d.	1,1
13 mai	9,6	n.d.	n.d.	3,7	0,0	n.d.	n.d.	1,4
14 mai	15,9	n.d.	n.d.	3,5	n.d.	n.d.	n.d.	1,2
15 mai	14,5	n.d.	n.d.	1,6	n.d.	n.d.	n.d.	0,2
16 mai	7,9	n.d.	n.d.	3,5	0,0	n.d.	n.d.	1,5
17 mai	3,9	n.d.	n.d.	3,1	n.d.	n.d.	n.d.	1,3
18 mai	7,2	n.d.	n.d.	3,7	0,0	n.d.	n.d.	2,5
19 mai	10,7	n.d.	n.d.	3,1	0,1	n.d.	n.d.	2,4
20 mai	12,4	n.d.	n.d.	2,6	0,1	n.d.	n.d.	1,6
21 mai	13,2	n.d.	n.d.	8,0	0,9	n.d.	n.d.	4,5
22 mai	13,9	n.d.	n.d.	13,8	2,5	n.d.	n.d.	7,0
23 mai	5,5	n.d.	n.d.	2,4	n.d.	n.d.	n.d.	1,7
24 mai	10,8	n.d.	n.d.	10,0	1,7	n.d.	n.d.	5,0
25 mai	7,7	n.d.	n.d.	20,6	4,1	n.d.	n.d.	8,7
26 mai	11,7	n.d.	n.d.	13,7	2,7	n.d.	n.d.	6,3
27 mai	8,1	n.d.	n.d.	19,9	4,0	n.d.	n.d.	8,9
28 mai	7,8	n.d.	n.d.	12,1	1,1	n.d.	n.d.	6,1
29 mai	7,0	n.d.	n.d.	29,3	7,1	n.d.	n.d.	11,2
30 mai	9,0	n.d.	n.d.	33,3	9,1	n.d.	n.d.	13,5
31 mai	12,1	n.d.	n.d.	39,8	14,6	n.d.	n.d.	15,4
1 juin	4,8	n.d.	n.d.	15,6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2 juin	7,8	n.d.	n.d.	23,9	10,4	n.d.	n.d.	9,9
3 juin	6,5	n.d.	n.d.	23,6	9,1	n.d.	n.d.	10,2
4 juin	5,0	n.d.	n.d.	4,3	0,4	n.d.	n.d.	7,1
5 juin	8,5	n.d.	n.d.	8,1	3,2	n.d.	n.d.	0,6
6 juin	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
7 juin	7,9	4,1	16,5	15,2	7,4	4,6	20,1	1,0
8 juin	14,2	6,4	26,7	29,9	15,3	6,9	27,6	1,0
9 juin	14,5	7,2	35,3	33,0	12,8	8,0	35,5	n.d.
10 juin	14,5	6,5	43,3	30,6	13,6	7,5	32,9	n.d.
11 juin	15,5	6,7	47,0	30,1	15,9	7,5	33,7	n.d.
12 juin	19,8	7,4	46,1	36,4	19,5	8,8	39,4	5,3

13 juin	9,2	5,5	29,3	40,1	9,6	5,7	19,9	9,2
14 juin	17,6	3,6	11,9	13,7	48,8	3,9	12,5	6,8
15 juin	7,3	7,2	46,8	16,1	46,9	8,1	32,5	10,7
16 juin	15,5	8,6	55,8	18,9	59,5	9,4	39,8	9,0
17 juin	6,5	4,7	21,4	20,3	18,0	4,9	19,9	5,4
18 juin	4,6	2,8	7,3	22,9	5,9	2,8	6,3	6,7
19 juin	6,2	8,5	51,9	25,7	24,0	9,1	34,6	13,4
20 juin	7,4	6,8	34,1	9,7	25,4	7,4	31,3	13,2
21 juin	10,3	8,2	49,3	25,2	18,6	8,7	34,8	13,8
22 juin	11,0	8,3	43,9	19,4	18,4	8,7	36,7	10,5
23 juin	8,7	7,5	36,3	19,5	18,4	8,0	33,0	9,3
24 juin	4,4	4,9	15,3	11,7	10,3	4,5	15,5	4,7
25 juin	6,1	6,0	22,6	12,3	11,1	5,5	17,7	4,7
26 juin	8,3	8,4	43,7	22,3	8,7	8,7	35,1	9,8
27 juin	10,1	9,1	47,5	20,8	17,0	9,1	36,4	9,5
28 juin	2,6	3,5	11,4	6,1	8,6	3,5	11,5	2,4
29 juin	9,8	9,1	n.d.	n.d.	13,6	8,8	n.d.	7,8
30 juin	5,6	7,0	19,9	24,2	10,4	5,9	18,5	3,1
1 juil	6,7	8,7	40,5	32,9	8,7	7,3	24,9	6,1
2 juil	7,6	9,6	48,1	35,2	10,1	8,2	29,9	6,9
3 juil	9,2	10,7	53,6	27,5	13,5	10,2	31,6	8,3
4 juil	10,3	11,8	53,0	29,1	12,5	10,3	27,8	9,1
5 juil	10,2	11,6	47,9	28,8	14,8	10,1	25,3	8,8
6 juil	5,9	8,7	28,8	19,1	18,8	7,7	17,8	5,2
7 juil	11,4	11,5	42,3	28,1	21,7	9,6	25,3	8,9
8 juil	10,8	10,3	39,6	29,7	19,6	8,5	23,1	8,4
9 juil	9,7	10,6	40,3	25,7	17,2	9,0	22,4	6,9
10 juil	9,5	11,4	44,7	25,9	18,2	9,9	23,1	6,8
11 juil	8,9	11,1	37,8	23,8	19,6	9,3	21,3	6,5
12 juil	27,4	9,9	38,5	23,9	17,8	7,9	17,3	6,0
13 juil	n.d.	10,8	44,7	24,4	n.d.	8,6	19,6	6,3
14 juil	35,3	1,2	3,0	1,3	n.d.	0,8	3,0	0,3
15 juil	n.d.	7,2	28,1	15,7	n.d.	5,8	15,1	4,6
16 juil	n.d.	10,6	41,0	29,4	n.d.	8,7	27,0	8,0
17 juil	n.d.	3,8	7,9	9,9	n.d.	3,2	7,0	1,3
18 juil	n.d.	10,6	46,7	26,8	n.d.	9,3	26,4	3,9
19 juil	n.d.	11,5	42,2	31,0	n.d.	8,7	26,7	3,7
20 juil	n.d.	8,2	33,4	22,4	n.d.	6,9	17,3	2,7
21 juil	n.d.	10,6	42,8	27,0	n.d.	8,8	19,0	3,3
22 juil	n.d.	6,5	20,6	14,9	n.d.	6,2	16,0	2,3
23 juil	37,1	3,5	11,0	7,9	n.d.	3,3	7,2	3,5

24 juil	16,6	9,6	25,0	18,5	34,6	8,4	19,0	1,5
25 juil	6,3	7,1	17,3	12,8	n.d.	6,0	13,5	1,6
26 juil	8,5	4,3	10,3	8,2	17,9	3,5	7,5	1,3
27 juil	14,4	9,5	31,1	21,8	20,3	8,2	19,0	3,5
28 juil	8,0	8,1	28,7	19,8	21,7	7,0	17,8	3,5
29 juil	11,7	9,6	33,3	23,3	34,9	7,9	20,1	3,8
30 juil	8,8	7,5	22,0	19,3	n.d.	6,3	13,6	3,2
31 juil	13,7	9,7	34,0	26,7	n.d.	8,0	19,9	4,6
1 août	4,2	8,3	20,9	20,2	n.d.	7,0	15,5	4,2
2 août	4,9	7,3	16,4	14,8	n.d.	6,3	12,9	2,6
3 août	6,3	7,6	18,0	16,6	n.d.	6,4	14,0	3,2
4 août	4,7	6,2	19,0	13,7	n.d.	5,2	10,8	2,6
5 août	10,3	10,1	29,4	17,4	n.d.	8,2	19,5	2,7
6 août	6,1	6,8	18,4	16,5	n.d.	5,9	10,7	2,8
7 août	6,1	6,7	19,7	14,8	n.d.	5,7	13,0	3,2
8 août	5,7	6,8	21,3	15,7	n.d.	5,9	14,6	3,1
9 août	n.d.	3,0	n.d.	n.d.	n.d.	2,7	n.d.	n.d.
10 août	n.d.	8,5	n.d.	n.d.	n.d.	7,5	n.d.	n.d.
11 août	n.d.	9,5	n.d.	n.d.	n.d.	8,4	n.d.	n.d.
12 août	n.d.	10,8	n.d.	n.d.	n.d.	8,4	n.d.	n.d.
13 août	n.d.	10,0	n.d.	n.d.	n.d.	8,1	n.d.	n.d.
14 août	n.d.	9,0	n.d.	n.d.	n.d.	7,6	n.d.	n.d.
15 août	n.d.	6,0	n.d.	n.d.	n.d.	5,1	n.d.	n.d.
16 août	n.d.	8,2	21,8	18,2	n.d.	6,5	15,4	3,4
17 août	n.d.	7,3	22,5	17,6	n.d.	5,4	17,0	4,1
18 août	n.d.	9,5	31,0	19,8	n.d.	7,2	17,7	2,3
19 août	n.d.	9,2	31,6	21,1	n.d.	7,3	16,9	4,5
20 août	n.d.	10,2	34,6	24,0	n.d.	8,7	19,5	3,5
21 août	n.d.	9,1	25,3	20,9	n.d.	8,5	16,3	4,0
22 août	n.d.	1,9	3,1	3,7	n.d.	1,9	2,4	0,0
23 août	n.d.	6,2	19,2	13,3	n.d.	5,1	10,7	2,0
24 août	n.d.	8,0	24,2	19,3	n.d.	6,5	14,2	2,4
25 août	n.d.	8,8	27,0	19,7	n.d.	7,1	16,1	2,8
26 août	n.d.	8,2	20,3	17,3	n.d.	5,8	13,5	2,5
27 août	n.d.	10,2	26,7	23,0	n.d.	8,1	15,9	3,9
28 août	n.d.	7,2	15,3	15,1	n.d.	5,8	9,4	2,4
29 août	n.d.	4,8	9,0	7,6	n.d.	3,7	6,9	0,9
30 août	n.d.	7,3	20,7	16,1	n.d.	5,6	11,9	3,5
31 août	n.d.	8,5	29,7	19,4	n.d.	6,6	14,9	4,6
1 sept	n.d.	5,7	13,9	13,3	n.d.	5,1	10,4	3,2
2 sept	n.d.	3,1	4,8	4,0	n.d.	2,7	4,1	0,2

3 sept	n.d.	4,8	9,6	9,5	n.d.	3,6	6,9	1,8
4 sept	n.d.	9,7	31,0	16,1	n.d.	7,4	17,2	0,2
5 sept	n.d.	6,7	18,4	15,0	n.d.	5,2	11,8	0,2
6 sept	n.d.	11,6	34,7	21,3	n.d.	8,7	18,5	n.d.
7 sept	n.d.	9,7	29,0	20,7	n.d.	7,1	17,1	n.d.
8 sept	n.d.	8,2	25,1	19,3	n.d.	6,1	14,1	n.d.
9 sept	n.d.	8,3	28,9	18,2	n.d.	5,7	13,5	n.d.
10 sept	n.d.	7,5	19,5	16,8	n.d.	5,4	12,7	n.d.
11 sept	n.d.	1,7	2,1	2,7	n.d.	1,0	1,4	n.d.
12 sept	n.d.	8,4	25,5	16,1	n.d.	6,5	12,7	n.d.
13 sept	n.d.	9,6	27,0	17,8	n.d.	6,9	15,2	n.d.
14 sept	n.d.	10,9	29,4	20,7	n.d.	7,6	16,7	n.d.
15 sept	n.d.	9,9	26,6	20,7	n.d.	7,9	16,4	n.d.
16 sept	n.d.	7,8	26,9	16,2	n.d.	5,7	11,9	n.d.
17 sept	n.d.	10,8	27,1	23,6	n.d.	8,1	15,0	n.d.
18 sept	n.d.	1,3	1,8	1,1	n.d.	1,0	1,3	n.d.
19 sept	n.d.	4,0	7,9	10,5	n.d.	2,7	4,6	n.d.
20 sept	n.d.	4,4	9,4	11,2	n.d.	3,1	6,3	n.d.
21 sept	n.d.	0,2	0,6	2,6	n.d.	0,0	0,1	n.d.
22 sept	n.d.	9,6	19,2	12,0	n.d.	7,3	11,6	n.d.
23 sept	n.d.	n.d.	7,9	7,1	n.d.	3,7	n.d.	n.d.
Nombre de jours mesurés	82	108	101	129	64	109	100	108
moyenne quotidienne (l)	10,0	7,7	27,3	17,3	13,3	6,6	18,0	4,8

Tableau 11. Extrapolation de la consommation en eau de verger (mm)

Date	Consommation en eau (mm)	
	2017	2018
08-juin	3,9	2,6
09-juin	3,6	3,4
10-juin	3,7	3,7
11-juin	3,6	3,9
12-juin	3,0	4,1
13-juin	2,3	2,4
14-juin	1,4	1,2

15-juin	2,0	3,8
16-juin	0,6	4,6
17-juin	3,2	2,0
18-juin	1,9	0,7
19-juin	1,9	4,2
20-juin	2,4	3,1
21-juin	2,0	4,0
22-juin	3,1	3,9
23-juin	0,7	3,3
24-juin	2,8	1,5
25-juin	2,9	1,9
26-juin	2,4	3,8
27-juin	1,7	4,0
28-juin	1,3	1,1
29-juin	2,1	n.d.
30-juin	1,6	1,8
01-juil	0,7	3,1
02-juil	2,4	3,7
03-juil	2,8	4,1
04-juil	2,6	3,9
05-juil	2,9	3,5
06-juil	2,9	2,2
07-juil	1,3	3,2
08-juil	1,3	3,0
09-juil	3,0	3,0
10-juil	2,7	3,3
11-juil	3,0	2,8
12-juil	2,1	2,7
13-juil	3,6	3,1
14-juil	3,5	0,3
15-juil	2,9	2,1
16-juil	2,4	3,3
17-juil	2,8	0,7
18-juil	2,8	3,5
19-juil	2,2	3,3
20-juil	2,7	2,4
21-juil	2,2	3,0
22-juil	2,9	1,8
23-juil	2,8	0,9
24-juil	2,1	2,1
25-juil	2,6	1,5
26-juil	2,4	0,9

27-juil	1,4	2,4
28-juil	2,9	2,2
29-juil	2,5	2,6
30-juil	2,8	1,7
31-juil	2,6	2,6
01-août	2,6	1,7
02-août	2,5	1,4
03-août	2,0	1,5
04-août	1,5	1,4
05-août	1,1	2,3
06-août	2,0	1,4
07-août	2,5	1,6
08-août	2,4	1,7
09-août	1,8	n.d.
10-août	2,2	n.d.
11-août	1,7	n.d.
12-août	1,0	n.d.
13-août	2,6	n.d.
14-août	2,5	n.d.
15-août	2,2	n.d.
16-août	2,6	1,8
17-août	2,2	1,9
18-août	0,4	2,3
19-août	0,8	2,3
20-août	2,2	2,6
21-août	2,0	2,0
22-août	0,9	0,3
23-août	2,3	1,4
24-août	1,7	1,8
25-août	1,9	2,1
26-août	1,7	1,6
27-août	2,4	2,0
28-août	2,3	1,2
29-août	2,1	0,8
30-août	2,1	1,6
31-août	1,7	2,1
01-sept	1,8	1,2
02-sept	1,9	0,4
03-sept	1,3	0,8
04-sept	0,8	2,3
05-sept	1,6	1,5
06-sept	0,3	2,6

07-sept	0,3	2,2
08-sept	1,9	1,9
09-sept	1,7	2,0
10-sept	2,1	1,5
11-sept	2,9	0,2
12-sept	2,3	1,8
13-sept	2,6	2,0
14-sept	2,2	2,2
15-sept	2,0	2,1
16-sept	2,1	1,9
17-sept	1,9	2,0
18-sept	1,3	0,1
19-sept	2,1	0,6
20-sept	2,0	0,8
21-sept	2,1	0,0
22-sept	2,5	1,5
23-sept	2,2	0,8
24-sept	2,2	n.d.
26-sept	2,2	n.d.
27-sept	2,6	n.d.
28-sept	0,7	n.d.
29-sept	1,8	n.d.
30-sept	1,6	n.d.
01-oct	1,6	n.d.
02-oct	1,7	n.d.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Allen R. G., Peireira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and drainage paper 56, Food and agric. Organization of the United Nations, Rome, Italy, 333 pp.
- Andrade, J.L., F.C. Meinzer, G. Goldstein, N.M. Holbrook, J. Cavelier, P. Jackson et K. Silvera, 1998. Regulation of water flux through trunks, branches, and leaves in trees of a lowland tropical forest. *Oecologia*, 115, p. 463–471.
- ASCE (American Society of Civil Engineering), 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Report of ASCE Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee, American Society of Civil Engineering, 59 p.
- Berry J et O. Bjorkman, 1980. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 31, p. 491–543.
- Bush, S.E., K.R. Hultine, J.S. Sperry et J.R.Ehleringer, 2010. Calibration of thermal dissipation sap flow probes for ring- and diffuse-porous trees. *Tree Physiol.*, 30, p. 1545-1554.
- Clearwater, M.J., F.C. Meinzer, J.L. Andrade, G. Goldstein et N.M. Holbrook, 1999. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology*, 19, p. 681-687.
- CPVQ (Conseil des productions végétales du Québec), 1988. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. CPVQ, Québec, Agdex 533, méthode SS-1.
- de Oliveira Reis, F., E. Campostrini, E.F. de Sousa et M.G. e Silva, 2006. Sap flow in papaya plants: laboratory calibrations and relationships with gas exchanges under field conditions. *Sci. Hortic.* 110, p. 254-259.
- Dragoni, D., A.N. Lakso et R.M. Piccioni, 2005. Transpiration of apple trees in a humid climate using heat pulse sap flow gauge calibrated with whole-canopy gas exchange chambers. *Agricultural and Forest Meteorology*, volume 130, p. 85-94.
- Fanjul, L et H.G. Jones, 1982. Rapid stomatal responses to humidity. *Planta*, 154, 2, p. 135-8.
- Farquhar, G.D. et T.D. Sharkey, 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Reviews of Plant Physiology.*, vol. 33, p. 317-345.
- Francesconi, A.H.D., A.N. Lakso et S.S. Denning, 1997. Light and temperature effects on whole-canopy net carbon dioxide exchange rates of apple trees. *Acta Horticulturae*, 451, p. 287–294.
- Fuchs, S., C. Leuschner, R. Link, H. Coners et B. Schuldt, 2017. Calibration and comparison of thermal dissipation, heat ratio and heat field deformation sap flow probes for diffuse-porous trees, *Agricultural and Forest Meteorology*, 244–245, p. 151-161
- Gebauer, T., V. Horna et C. Leuschner, 2009. Variability in radial sap flux density patterns and sapwood area among seven co-occurring temperate broad-leaved tree species. *Tree physiology*, 28, p. 1821-1830.
- Gee, G.W. et J.W. Bauder, 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In A. Klute (ed) *Methods of soil analysis*, Part 1. ASA, Monograph No 9, 2nd edition, Madison, WI.

- Granier, A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des sciences forestières*, INRA/EDP Sciences, 42 (2), p. 193-200.
- Granier, A., et P. Gross, 1987. Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Annales des sciences forestières*, INRA/EDP Sciences, 44 (1), p. 1-14.
- Granier A., T. Anfodillo, M. Sabatti, H. Cochard, E. Dreyer, M. Tomasi, R. Valentini et N. Breda, 1994. Axial and radial water-flow in the trunks of oak trees — a quantitative and qualitative analysis. *Tree Physiology*, 14, p. 1383-1396.
- Green, S.R., I. Vogeler, B.E. Clothier, T.M Mills et C. van den Dijssel, 2003. Modelling water uptake by a mature apple tree. *Australian Journal of Soil Research*, 41 (3), p. 365-380.
- Goldstein G. G., J.L. Andrade, F.C. Meinzer, N.M. Holbrook, J. Cavelier, P. Jackson et A. Celis, 1998. Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant, Cell & Environment*, 21, p. 397-406.
- Hultine, K.R., P.L. Nagler et K. Morino, 2010. Sap flux-scaled transpiration by tamarisk (*Tamarix spp.*) before, during and after episodic defoliation by the saltcedar leaf beetle (*Diorhabda carinulata*). *Agric. For. Meteorol.* 150, p. 1467-1475.
- Kutscha, N.P. et I.B. Sachs, 1962. Color tests for differentiating heartwood and sapwood in certain softwood tree species. U.S. Forestry Products Laboratory Report No. 2246, Madison, WI, 16 p.
- Lakso, A.N., 1994. Handbook of environmental physiology of fruit crops, apple, édité par B. Schaffer et P.C. Andersen, Boca Raton, Floride, University of Florida/CRC Press, p. 3–35.
- Lu P., P. Biron, N. Breda et A. Granier, 1995. Water relations of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) under soil drought in the Vosges mountains: water potential, stomatal conductance and transpiration. *Annales des sciences forestières*, 52, p. 117-129.
- Lu P., 1997. A direct method for estimating the average sap flux density using a modified Granier measuring system. *Australian Journal of Plant Physiology*, 24, p. 701-705.
- Lu P., L. Urban et Z. Ping, 2004, Granier's Thermal Dissipation Probe (TDP) Method for Measuring Sap Flow in Trees: Theory and Practice. *Acta Botanica Sinica*, 46, p. 631-646.
- Marini, R.P. et D.L. Sowers, 1990. Net photosynthesis, specific leaf weight, and flowering of peach as influenced by shade. *HortScience*, 25, p. 331–334.
- Massonnet, C., 2004. Variabilité architecturale et fonctionnelle du système aérien chez le pommier (*Malus domestica* Borkh.): comparaison de quatre cultivars par une approche de modélisation structure-fonction. *Biologie végétale*. École nationale supérieure agronomique de Montpellier, 282 p.
- Massonnet, C., E. Costes, S. Rambal, E. Dreyer et J.L. Regnard, 2007. Stomatal Regulation of Photosynthesis in Apple Leaves: Evidence for Different Water-use Strategies between Two Cultivars. *Annals of Botany*, 100 (6), p. 1347-1356.

Monteith, J.L. et M.H. Unsworth, 1990, Principles of Environmental Physics, 2nd Edition., Edward Arnold, New York, 401 p.

Murray, F. W., 1967: On the computation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 6, pp. 203-204.

Oliveras I. et, P. Llorens, 2001. Medium-term sap flux monitoring in a Scots pine stand: analysis of the operability of the heat dissipation method for hydrological purposes. *Tree Physiology*, 21, p. 473-480.

Offenthaler I., 2003. Water Status of Norway Spruce as affected by climate, stand characteristic and pathogens. Ph D Dissertation, University of Agricultural Sciences, Vienna.

Peters, R., P. Fonti, D.C. Frank, R. Poyatos, C. Pappas, A. Kakmen, V. Carraro, A.L. Prendin, L. Schneider, J.L. Baltzer, G.A. Gafford, L. Dietrich, I. Heinrich, R.L. Minor, O. Sonnentag, A.M. Matheny, M.G. Wightman et K. Steppe, 2018. Quantification of uncertainties in conifer sap flow measured with the thermal dissipation method, *New Phytologist*, 219, p. 1283–1299.

Phillips, N., R. Oren et R. Zimmermann, 1996. Radial patterns of xylem sap flow in non-porous, diffuse-porous and ring-porous tree species. *Plant, Cell & Environment*, 19, p. 983-990.

Ren, R., G. Liu, M. Wen, R. Horton, B. Li et B. Si, 2017, The effects of probe misalignment on sap flux density measurements and in situ probe spacing correction methods, *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, p.176-185

Renninger, H.J. et K.V. Schäfer, 2012. Comparison of tissue heat balance- and thermal dissipation-derived sap flow measurements in ring-porous oaks and a pine. *Front.Plant Sci.*, 3, p. 1-9.

Schulze, E.D., 1986. Carbon dioxide and water vapor exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Annual Review of Plant Physiology*, vol. 37, p. 247–274.

Seeley, E.J. et R. Kammereck, 1977. Carbon flux in apple trees: the effects of temperature and light intensity on photosynthetic rates. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 102, p. 731–733.

Snyder K.A., J.H. Richards et L.A. Donovan, 2003. Night-time conductance in C3 and C4 species: do plants lose water at night? *Journal of Experimental Botany*, 54, p. 861-865.

Steppe, K., D.J. De Pauw, T.M. Doody et R.O. Teskey, 2010. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods, *Agric. For. Meteorol.* 150, p. 1046-1056.

Sun, H., D.P. Aubrey et R.O. Teskey, 2011. A simple calibration improved the accuracy of the thermal dissipation technique for sap flow measurements in juvenile trees of six species. *Trees – Struct. Funct.*, 26, p. 631-640.

Taneda, H. et J.S. Sperry, 2008. A case–study of water transport in co-occurring ringversus diffuse-porous trees: contrasts in water-status, conducting capacity, cavitation and vessel refilling. *Tree Physiol.*, 28, p. 1641-1651.

Tetens, O., 1930. Uber elnige meteorologische Begriffe, *Z. Geophys.*, 6, p. 297-309.

Vandegheuchte, M.W. et K. Steppe, 2013. Sap-flux density measurement methods: working principles and applicability. *Funct. Plant Biol.*, 40, p. 213-223.

Watson R.L, J.J. Landsberg et M.R. Thorpe, 1978. Photosynthetic characteristics of the leaves of Golden delicious apple trees. *Plant, Cell and Environment*, vol. 1, p. 51–58.

Wilson K. B., P.J. Hanson, P.J. Mulholland, D.D. Baldocchi et S.D. Wullschleger, 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, p. 153-168.

Wullschleger, S.D., K.W. Childs, A.W. King et P.J. Hanson, 2011. A model of heat transfer in sapwood and implications for sap flux density measurements using thermal dissipation probes. *Tree Physiol.*, 31, p. 669-679.



Figure 19. Insertion des sondes à dissipation thermique dans le tronc d'un pommier.



Figure 20. Étanchéisation et isolation thermique des sondes à dissipation thermique.



Figure 21. Injection du colorant dans le tronc.



Figure 22. Coupe de l'arbre pour l'analyse de la coloration du bois.



Figure 23. Mesure de l'épaisseur de l'aubier coloré.

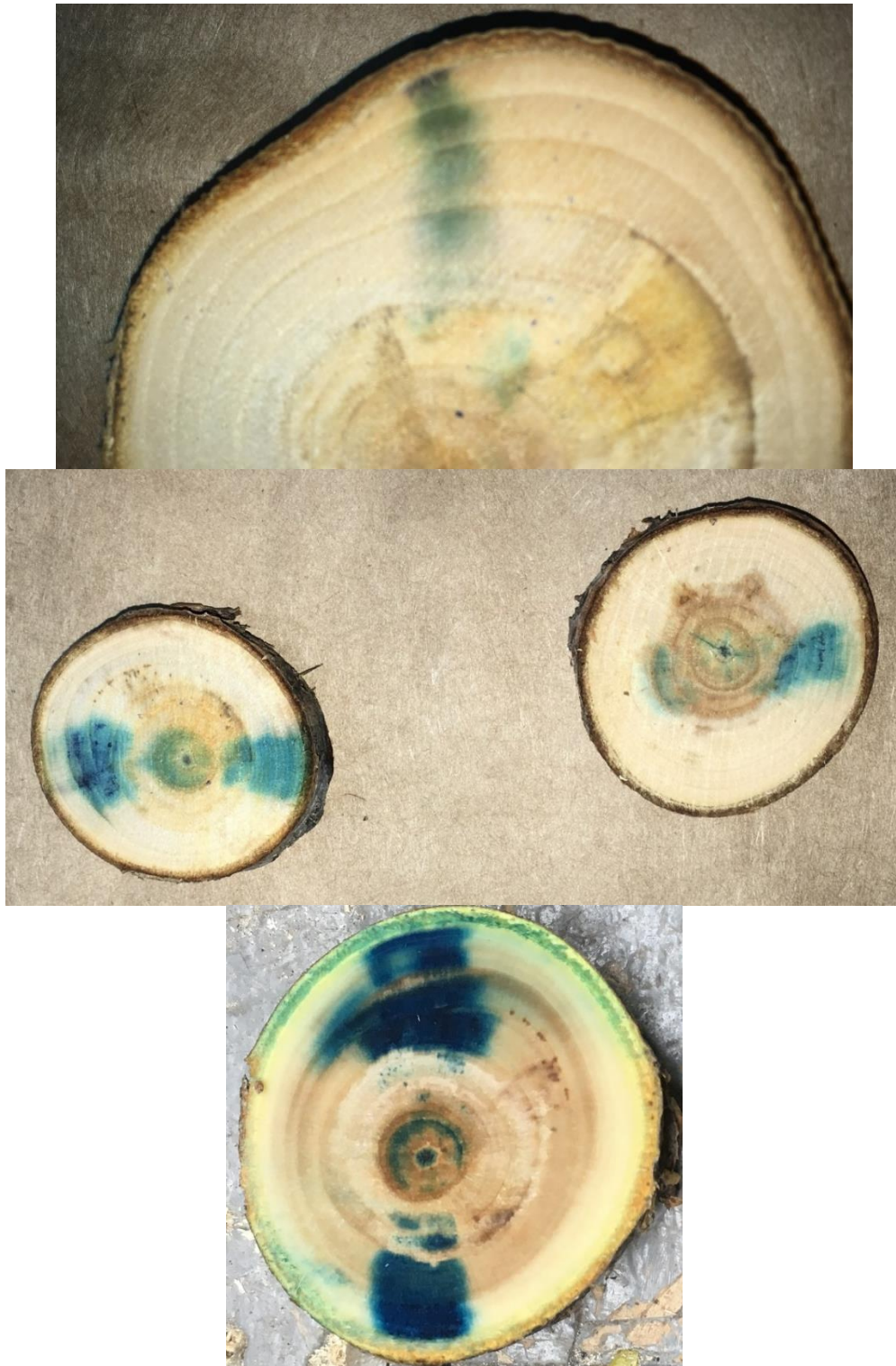


Figure 24. Exemple de coloration des troncs de pommiers.



Figure 25. Installation d'une bâche pour les arbres non irrigués, 2018.