

# Influence de l'irrigation déficitaire sur le rendement, la qualité de pommes 'Gala' et l'économie en eau

Azzeddine CHENAFI<sup>1</sup>, Philippe MONNEY<sup>2</sup>, Maria CEYMANN<sup>2</sup>, Eva ARRIGONI<sup>2</sup>, Abderrahmane BOUDOUKHA<sup>3</sup> et Christoph CARLEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Bejaia, Algérie – <sup>2</sup>Agroscope, 1964 Conthey – <sup>3</sup>Université de Batna, Algérie

Renseignements: Philippe Monney, e-mail: philippe.monney@agroscope.admin.ch, tél. +41 27 345 35 45, www.agroscope.ch



Parcelle d'essai complètement couverte d'une bâche de plastique, environ trois semaines après la pleine floraison, afin d'exclure l'influence des précipitations. La bâche est elle-même recouverte d'un textile vert pour la protéger de la circulation des machines et éviter une modification trop importante du microclimat lumineux.

## Introduction

A l'échelle mondiale, l'évolution démographique fait croître la demande en produits alimentaires. Dans bien des régions, l'eau constitue un facteur limitant pour la productivité de l'agriculture. Pour utiliser les ressources en eau avec la meilleure efficacité possible, l'irrigation doit être gérée de façon plus économe. Au cours des dernières décennies, la fiabilité des équipements d'irri-

gation a considérablement progressé. Inconcevable avec des techniques moins évoluées comme l'aspersion, la distribution homogène de l'eau sur toute la culture devient possible avec l'irrigation localisée, en particulier avec le goutte-à-goutte et les goutteurs à faible débit actuels, ainsi qu'avec les appareils d'irrigation à déclenchement programmé (Monney 2011).

De nouvelles économies sont ainsi envisageables à moyen terme pour la pratique. Une des approches, re-

commandée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), est l'irrigation déficitaire contrôlée (RDI) (Goodwin et Boland 2002), qui cible les trois phases de développement du fruit: la première (P1) correspond à la division cellulaire, durant 30 à 40 jours depuis la pleine floraison (Ferree et Warrington 2003), suivie de la phase du début du grossissement cellulaire (P2), variable selon l'époque de maturité de la variété, et d'une troisième phase (P3) couvrant la fin du développement du fruit durant quatre à cinq semaines avant la récolte. Il est généralement admis qu'aucune restriction dans l'alimentation hydrique ne devrait être appliquée durant P1, mais la consigne varie selon les espèces pour les deux phases suivantes. Pour le pommier, Naor (2006) juge ces frontières arbitraires, le grossissement continu des fruits durant la plus grande partie de leur développement empêchant toute distinction sur la base de critères physiologiques. Les termes de «déficit précoce» pour la RDI appliquée en P2 et de «déficit tardif» pour la RDI en P3 utilisés par de nombreux auteurs ne recouvrent en effet pas toujours les mêmes périodes et, surtout, divergent dans leurs résultats. En l'absence de données décisives sur l'époque la plus appropriée pour appliquer la RDI, le déficit précoce a été adopté dans ce projet, selon la stratégie recommandée pour le poirier et le pêcher. Cette option a été renforcée par les résultats positifs obtenus avec ce modèle au Tyrol du Sud par Thalheimer et Paoli (2004), dans des conditions pédo-climatiques proches de celles du Valais. La valeur seuil pour la gestion de l'irrigation déficitaire contrôlée (RDI) a été fixée à  $-1,2$  MPa, d'après quelques expérimentations réalisées à ce jour sur le pommier (Naor *et al.* 2006).

Le but de ce projet était de comparer différentes variantes d'irrigation (une irrigation de confort, la RDI, l'absence d'irrigation pendant la période P2 comparée à un témoin non irrigué), pour évaluer leur impact sur le rendement, le poids, la qualité gustative et nutritionnelle et l'aptitude à la conservation des fruits. Les résultats de deux années d'essais sont présentés et discutés.

## Matériel et méthodes

### Site, irrigation et matériel végétal

L'expérimentation a été conduite au Centre de recherche de Conthey d'Agroscope, dans le canton du Valais (alt. 480 m). Le climat régional est de type continental, marqué par des précipitations annuelles faibles (630 mm) et une température annuelle moyenne de  $9,9^{\circ}\text{C}$  (1978–2007). Le déficit pluviométrique calculé pour la période de végétation de la variété de référence Golden est d'environ 300 mm (275 mm pour Gala).

**Résumé** ■ Pour évaluer l'effet de l'irrigation déficitaire sur le rendement et la qualité commerciale, gustative et nutritionnelle des fruits, quatre variantes ont été testées en 2010 et 2011 sur des pommiers de la variété Gala. Différentes quantités d'eau ont été appliquées selon la phase de développement du fruit: division cellulaire (P1), une première phase de grossissement cellulaire (P2) et une seconde (P3). Les variantes étaient: un témoin non irrigué (V1), l'irrigation de confort durant les trois phases (V2), l'absence d'irrigation durant la P2 (V3) et une restriction induisant un stress modéré durant la P2 (V4) avec un seuil de potentiel de tronc fixé à  $-1,2$  MPa. Le régime d'irrigation n'a eu aucun impact mesurable sur le rendement et l'augmentation de la section des troncs. Par contre, par rapport à une irrigation de confort (V2), l'absence d'irrigation (V1 et V2) a induit une diminution de la qualité commerciale de la récolte (calibre des fruits, % de 1<sup>er</sup> choix). En revanche, pour ces deux variantes, l'augmentation du stress a engendré une légère amélioration de la teneur en sucres totaux (de l'ordre de 0,5 % Brix) et de la fermeté (0,3–0,5 kg/cm<sup>2</sup>). Les teneurs en vitamine C, en polyphénols et l'activité antioxydante (TEAC et FRAP) ont elles aussi été favorisées par le stress hydrique. Dans les conditions de cet essai (réduction des irrigations dès 60 jours après la pleine floraison jusqu'à quatre semaines avant la récolte et seuil de potentiel de tronc fixé à  $-1,2$  MPa), l'irrigation déficitaire a permis de réaliser une économie d'eau de 47 % par rapport à l'irrigation de confort, sans nuire au rendement et à la qualité commerciale, gustative et nutritionnelle des fruits.

Pour éviter l'influence des précipitations, la parcelle est couverte de bâches à la mi-mai, ce qui porte le déficit pluviométrique à environ 400 mm entre la pleine floraison et la récolte de Gala.

Le système d'irrigation consiste en deux tubes à goutteurs intégrés (Netafim Ltd, Tel-Aviv, Israël) disposés à 50 cm de part et d'autre de chaque rang d'arbres et à une profondeur de 25 cm (fig.1 et 2). L'intervalle entre les goutteurs est de 30 cm et leur débit de 1,6 l/h. ➤

Les goutteurs, de type CNL, s'enclenchent à une pression > 0,2 bar, ce qui évite la vidange des tubes entre les irrigations et garantit une répartition homogène de l'eau. Grâce à ce dispositif, les quantités journalières ont pu être réparties en 2–4 apports de trois à douze minutes selon la saison et la variante d'irrigation.

Le sol est de texture limoneuse avec une teneur en argile de 24% et une profondeur limitée par une couche d'alluvions grossières située entre 1,0 m et 1,6 m de profondeur. L'essentiel du système racinaire est concentré entre 20 et 70 cm avec des racelles explorant au moins jusqu'à 1,4 m, là où la profondeur utile est la plus importante.



**Figure 1** | Irrigation au goutte-à-goutte enterré: un moyen efficace pour assurer la distribution homogène de l'eau d'irrigation.



**Figure 2** | Disposition des sondes Watermark (en blanc) dans la parcelle expérimentale.

Le verger, planté en automne 2002, est constitué de pommiers Gala sur porte-greffe M9 clone FL56 (vigueur –20% par rapport à EMLA). La moitié des arbres sont formés en Drilling (trois axes en V ouverts à environ 40°), l'autre moitié en haie fruitière étroite (structure primaire à deux axes orientés dans le sens du rang), et plantés à une densité de 1800 arbres/ha (4,0x1,4 m).

### Procédés et dispositif expérimental

Chaque parcelle élémentaire est constituée de deux portions de rang de neuf arbres par mode de conduite. Chacun des trois blocs comprend quatre parcelles élémentaires pour les procédés d'irrigation V1-V4 (tabl.1), elles-mêmes divisées en deux sous-parcelles pour les deux systèmes de conduite.

### Mesures en cours de saison

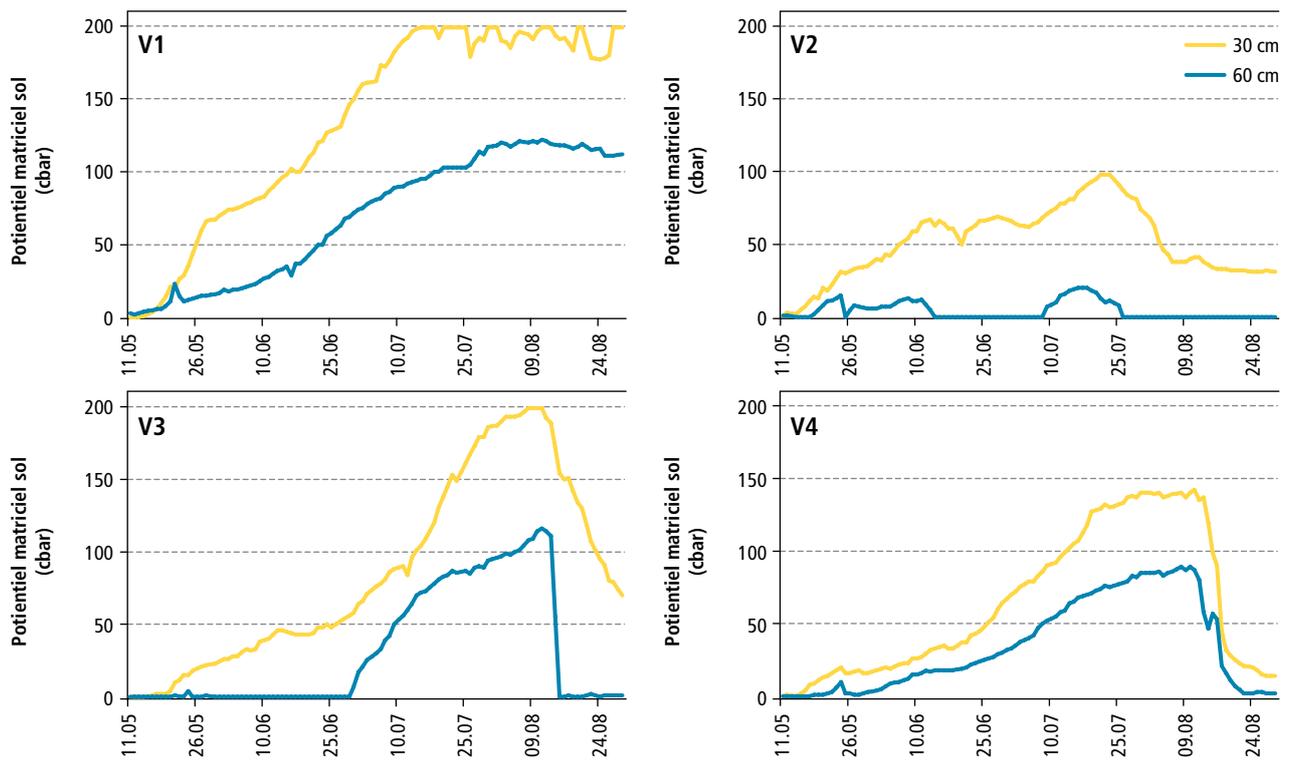
Les mesures d'humidité du sol proviennent de sondes de type Watermark® installées par paires (trois groupes avec une sonde à 30 cm et une sonde à 60 cm de profondeur) dans le bloc central uniquement, à proximité des deux arbres marqués. La valeur déterminante pour la gestion de l'irrigation est la médiane des trois sondes de chaque profondeur (fig. 3 et 4).

Sur deux arbres par parcelle élémentaire, le calibre de trois fruits par arbre (18 par combinaison et 36 par procédé d'irrigation) a été mesuré chaque semaine. Les mesures de  $\Psi_{\text{tronc}}$  ont été réalisées conformément à la procédure décrite par Naor *et al.* (2008) sur une feuille par arbre marqué (six par combinaison et douze par procédé d'irrigation), ce qui représente à la fois un échantillon minimum pour caractériser le statut hydrique d'un ensemble d'arbres et le nombre maximum de mesures réalisables en 90 minutes autour du midi

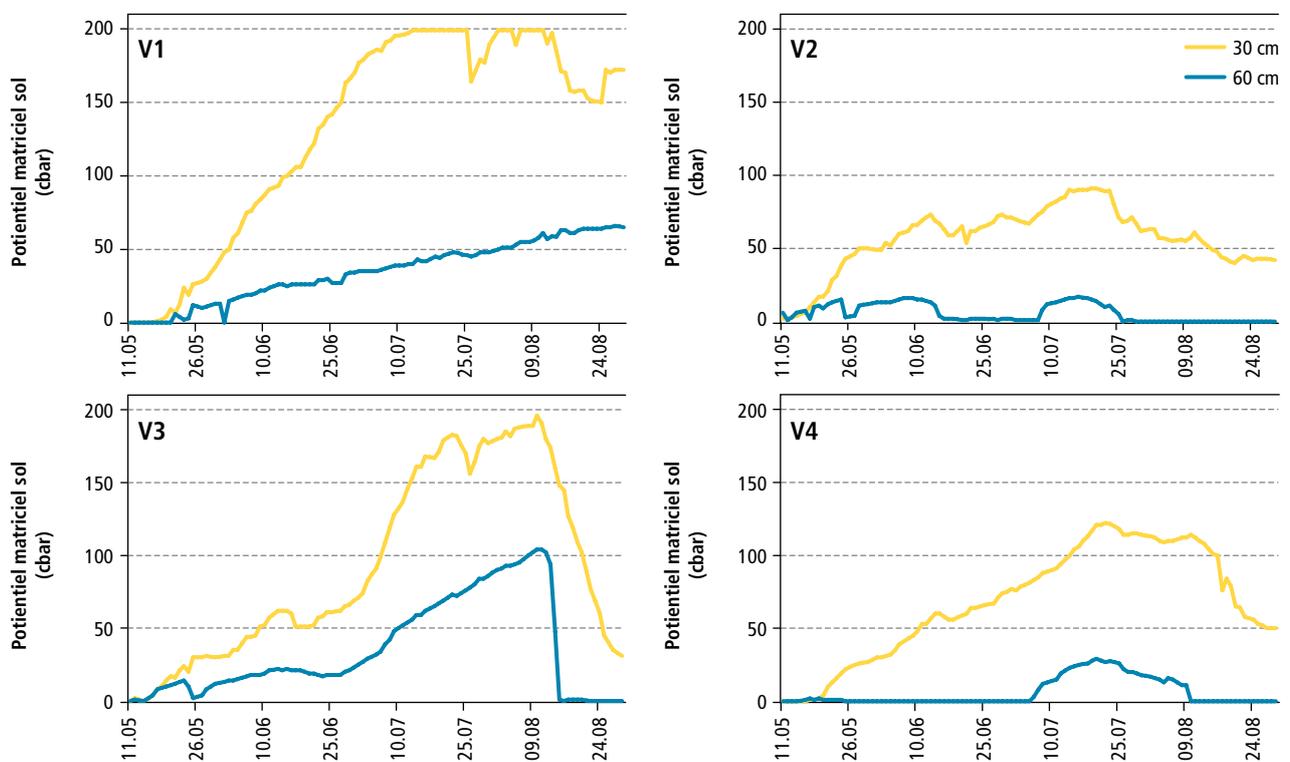
**Tableau 1** | Différentes stratégies d'irrigation pour les trois périodes de croissance du fruit chez le pommier cv. Gala

Traitement d'irrigation	Périodes de croissance du fruit		
	P1	P2	P3
	division cellulaire	croissance des cellules	croissance des cellules et maturation
	1–64 JAPF	65–105 JAPF	106–128 JAPF
V1	non irrigué	non irrigué	non irrigué
V2	30 cbar	30 cbar	30 cbar
V3	30 cbar	non irrigué	30 cbar
V4	30 cbar	–1,2 MPa	30 cbar

Les périodes de croissance du fruit sont indiquées en nombre de jours après la pleine floraison (JAPF). Les consignes sont basées sur le potentiel matriciel du sol (seuil max. indiqué en cbar) lorsqu'une irrigation non restrictive est appliquée et sur le statut hydrique (seuil min. indiqué en MPa) pour l'irrigation déficitaire contrôlée (RDI).



**Figure 3 |** Evolution du potentiel matriciel du sol, mesuré avec des sondes Watermark® en 2010 à deux profondeurs (30 et 60 cm) pour la forme Drilling et les quatre variantes d'irrigation: V1 témoin non irrigué, V2 irrigation standard, V3 absence d'irrigation durant la période 2 et RDI, V4 irrigation réduite durant la période 2.



**Figure 4 |** Evolution du potentiel matriciel du sol, mesuré avec des sondes Watermark® en 2010 à deux profondeurs (30 et 60 cm) pour la forme haie fruitière et les quatre variantes d'irrigation: V1 témoin non irrigué, V2 irrigation standard, V3 absence d'irrigation durant la période 2 et RDI, V4 irrigation réduite durant la période 2.

solaire. Durant cette période, l'ordre des mesures n'a eu aucune influence détectable dans les conditions météorologiques optimales (ciel totalement dégagé, faibles écarts de température, vent faible et régulier). Les mesures de  $\Psi_{\text{tronc}}$  ont été exécutées depuis la fin de la P1 jusqu'à deux à trois jours de la récolte, à une fréquence de deux fois par semaine en 2010, puis une seule en 2011 en raison de l'évolution relativement lente des tendances.

### Analyses post-récolte

Les fruits ont été analysés séparément pour chaque arbre marqué en ce qui concerne la qualité commerciale sur une calibreuse automatique (Greefa, 4196 Tricht, NL) et regroupés en neuf catégories de calibre (50 mm à 90 mm) et quatre catégories de couleur. Les critères jugés déterminants pour la qualité commerciale sont le poids moyen, le % de fruits de 1<sup>er</sup> choix selon les normes en vigueur en Suisse, la production totale par arbre et la production de 1<sup>er</sup> choix par arbre.

En 2010, 25 fruits par lot ont été prélevés après triage pour l'analyse des sucres totaux, de la fermeté et de l'acidité totale (Robot Pimprenelle, Setop-Giraud Technologie 84300 Cavaillon, France) et un échantillon d'une centaine de fruits par procédé a été réservé à l'entreposage en atmosphère contrôlée AC (0,5 °C, 2 % O<sub>2</sub>, 3 % CO<sub>2</sub>) et à l'analyse nutritionnelle.

### Qualité nutritionnelle

Une appréciation globale de la qualité nutritionnelle a été obtenue par l'analyse des composés phénoliques totaux selon l'indice de Folin-Ciocalteu et le potentiel antioxydant par le test TEAC (*Trolox Equivalent Antioxidant Capacity*) et le test FRAP (*Ferric Reducing Antioxidant Power*) (Ceymann *et al.* 2012). Les polyphénols individuels ont été analysés par UHPLC-MS et

quantifiés avec des références externes (Ceymann *et al.* 2011). L'analyse a été réalisée pour chaque arbre individuellement sur un échantillon d'une vingtaine de fruits prélevés quelques jours après la récolte. L'opération a été reproduite sur les fruits après environ 160 jours d'entreposage en AC. Une relation entre la qualité nutritionnelle et le statut hydrique peut ainsi être obtenue individuellement.

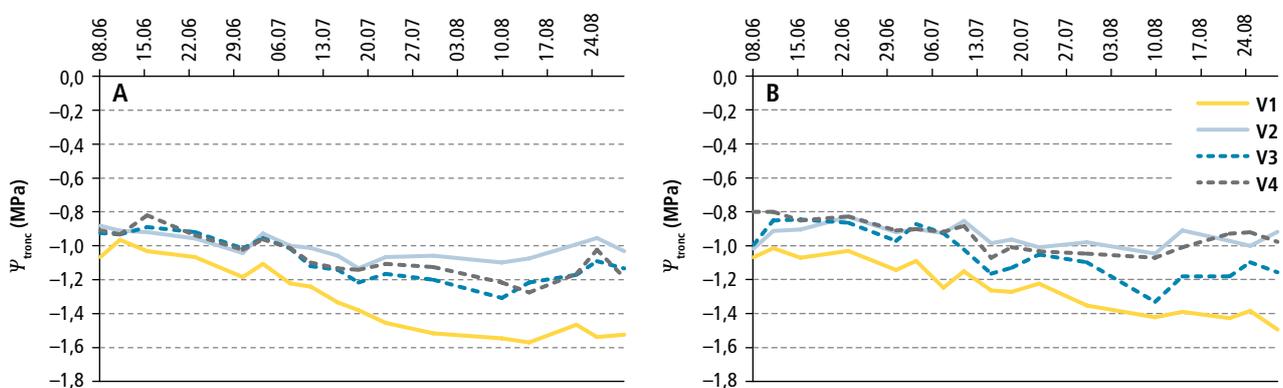
La vitamine C a été analysée sur un seul échantillon pour les deux arbres de chaque parcelle élémentaire par HPLC-UV (d'après une méthode de Odriozola-Serrano *et al.* 2007) et quantifiée avec une référence externe.

## Résultats et discussion

### Quantités d'eau appliquées et statut hydrique des arbres

En raison de la profondeur similaire des tubes à goutteurs et des sondes de surface, ces dernières se sont montrées peu réactives aux changements de régime. Il a donc été tenu compte à la fois des valeurs mesurées à 30 cm et à 60 cm pour l'ajustement des doses journalières avec un seuil fixé à 30–40 cbar sur la moyenne des deux profondeurs pour les modalités V2, V3 et V4 en P1 et P3 et durant toute la saison sur la V2 (fig. 3 et 4). Pour maintenir une irrigation de confort, des quantités de 1 à 2 mm/jour ont suffi, soit un total d'environ 140 mm/saison pour la V2. La stratégie appliquée dans la V4 a permis d'économiser environ 47 %, grâce aux apports d'environ 0,5 mm/jour appliqués en P2 pour maintenir le  $\Psi_{\text{tronc}}$  autour de -1,2 MPa.

À la fin de 2011, la surface foliaire était significativement plus élevée de 20 % chez les arbres conduits en Drilling (résultats non présentés). Dans ce système, l'éclaircissement de l'ensemble de la couronne a aussi



**Figure 5** | Evolution du potentiel de tronc ( $\Psi_{\text{tronc}}$ ) au cours de la saison 2010, pour le Drilling (A) et la haie fruitière (B) et les quatre variantes d'irrigation: V1 témoin non irrigué, V2 irrigation standard, V3 absence d'irrigation durant la période 2 et RDI, V4 irrigation réduite durant la période 2.

**Tableau 2 | Quantités d'eau appliquées par variante durant la période de restriction (P2) et sur le total de la saison pour deux années d'observation**

Variante	Phase	2010 (mm)	2011 (mm)	Moyenne (mm)	% de V2 <sup>1</sup>
V1	P2	0	0	0	0
	Total	0	0	0	0
V2	P2	70	93	81	100
	Total	149	135	142	100
V3	P2	0	0	0	0
	Total	72	42	57	40
V4	P2	15	27	21	26
	Total	82	69	76	53

<sup>1</sup>Calculé sur la moyenne des deux années.

abaissé les valeurs de  $\Psi_{\text{tronc}}$  et mieux contrasté les procédés d'irrigation (fig. 5). Même avec les très faibles écarts relevés dans la conduite en haie fruitière, les différences significatives sont à une exception près les mêmes pour les deux systèmes (tabl. 3). Avec le Drilling, les procédés V1 et V3 dépassent assez nettement le seuil de confort pour la valeur la plus basse enregistrée durant la saison alors que, pour la haie fruitière, c'est uniquement le cas pour la V1. Pour les deux systèmes, la RDI n'a pas eu d'impact important sur le statut hydrique des arbres, puisque les valeurs de  $\Psi_{\text{tronc}}$  ne diffèrent pas significativement, en moyenne comme en valeurs minimales.

#### Rendement et qualité commerciale des fruits

L'effet de l'irrigation sur le rendement brut des arbres en moyenne de 2010 et 2011 n'est pas significatif (tabl. 4). Les différences qui auraient dû se manifester

**Tableau 3 | Influence des deux conduites et des quatre variantes d'irrigation sur le statut hydrique ( $\Psi_{\text{tronc}}$ ) moyen<sup>1</sup> et minimum<sup>2</sup>, le développement végétatif et la charge en fruits**

Conduite	Variante d'irrigation	$\Psi_{\text{tronc}}^1$ (MPa) <sup>1</sup>	$\Psi_{\text{tronc}}^2$ (MPa)	Section du tronc <sup>3</sup> (cm <sup>2</sup> )	Accroissement du tronc 2010–2011 (cm <sup>2</sup> )	Charge (fruits/cm <sup>2</sup> ) <sup>3</sup>
Drilling	V1	-1,33 c	-1,56 c	27,6	4,90	6,50
	V2	-1,04 a	-1,17 a	29,3	5,88	6,65
	V3	-1,13 b	-1,33 b	29,4	6,09	5,51
	V4	-1,09 b	-1,25 ab	28,9	4,28	7,73
Mur fruitier	V1	-1,24 c	-1,43 c	21,2	4,04	6,74
	V2	-0,95 a	-1,08 a	20,3	5,57	5,57
	V3	-1,06 b	-1,33 b	22,3	3,77	4,74
	V4	-0,98 a	-1,14 a	26,2	6,00	5,18

<sup>1</sup>Valeurs moyennes durant la période de restriction (P2) pour 2010.

<sup>2</sup>Valeurs minimales atteintes durant la saison (année 2010).

<sup>3</sup>Valeurs mesurées en 2010.

Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre traitements d'irrigation (Tukey,  $P < 0,05$ ).

**Tableau 4 | Influence des deux conduites et des quatre variantes d'irrigation sur le rendement par arbre, le nombre de fruits, le poids par fruit et la proportion de coloration**

Conduite	Variante d'irrigation	Rendement par arbre (kg)	Nombre de fruits par arbre	Poids moyen par fruit (g)	Taux de fruits de 1 <sup>er</sup> choix (%)	Coloration > 50% (%)
Drilling	V1	27,9	217	129 c	69 b	61
	V2	37,6	248	151 a	88 a	68
	V3	32,5	229	139 b	80 ab	55
	V4	32,9	232	143 ab	85 a	64
Mur fruitier	V1	23,5	179	126	73 b	62
	V2	22,1	158	135	81 ab	54
	V3	22,3	165	132	76 b	56
	V4	26,3	190	139	94 a	55

Les valeurs correspondent à la moyenne de trois répétitions pour 2010 et 2011.

Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre traitements d'irrigation (Tukey,  $P < 0,05$ ).

plus nettement avec l'influence significative de l'irrigation sur le calibre des fruits sont atténuées par des écarts de charge non négligeables. Ceux-ci s'expliquent notamment par la part d'arbres partiellement alternés qui pénalisent particulièrement la V2 en haie fruitière. En revanche, avec le Drilling où les charges en fruits sont mieux équilibrées et les écarts de  $\Psi_{\text{tronc}}$  plus importants, l'abaissement du  $\Psi_{\text{tronc}}$  s'accompagne d'une diminution logique de la qualité commerciale pour tous les critères (poids moyen des fruits, % de 1<sup>er</sup> choix, coloration). Ces résultats confirment les résultats de Naor *et al.* (2008) selon lesquels, dès  $-1,3$  à  $-1,4$  MPa, le calibre des fruits à la récolte diminue. La qualité commerciale de la variante V4 (RDI) a été très proche de la variante V2 avec irrigation de confort.

Le potentiel de tronc ( $\Psi_{\text{tronc}}$ ) est donc un indicateur fiable du stress hydrique du pommier pour la gestion de l'irrigation déficitaire (Goldhamer et Fereres 2001), comme le précisent plusieurs études sur des espèces fruitières de la zone méditerranéenne et tempérée, qu'il s'agisse d'agrumes (Ortuño *et al.* 2006), du pêcher (Garnier et Berger 1985), de l'amandier (Shackel *et al.* 1997), du pommier (Naor *et al.* 1995), du prunier (Lampinen *et al.* 2004) ou du cerisier (Livellara *et al.* 2011). Pour le pommier, la valeur seuil pour la gestion de l'irrigation déficitaire contrôlée (RDI) peut être fixée à  $-1,2$  MPa.

### Qualité gustative des fruits

L'irrigation n'a eu qu'une faible incidence sur la qualité gustative des fruits (tabl. 5). Des différences non significatives apparaissent dans les deux variantes extrêmes (V1 et V3), vraisemblablement dues au moindre calibre

des fruits. Les sucres totaux (% Brix) et la fermeté en particulier conservent, malgré de petits écarts, une relation cohérente avec le  $\Psi_{\text{tronc}}$ . La variante en RDI (V4) ne s'est pas démarquée de l'irrigation de confort (V2) tandis que les V1 et V3, qui obtiennent de meilleurs résultats à la récolte, maintiennent cet avantage après plus de cinq mois de conservation en AC. L'amélioration significative de la qualité des fruits par le RDI, mentionnée dans certaines études, a parfois été obtenue malgré une perte de calibre relativement faible, comme dans l'exemple de Pink Lady (Wan Zaliha et Singh 2010), où la diminution n'est que de 3 à 8 %. Ce résultat pourrait s'expliquer par une restriction relativement sévère à une période plus tardive (RDI en P3). Dans notre cas, l'apparition d'un stress de  $-1,3$  à  $-1,4$  MPa assez tôt en saison a fait diminuer le calibre de 8 à 14 %. Avec la variété Gala qui produit des fruits d'un calibre inférieur à la moyenne, cette diminution représente une perte économique d'environ 15 % de fruits classés 1<sup>er</sup> choix, qui n'est pas supportable pour le producteur.

### Qualité nutritionnelle

Grâce à la vitamine C, aux sucres, fibres et métabolites secondaires qu'elle contient, la pomme est souvent citée parmi les aliments particulièrement bénéfiques. Ces substances sont reconnues pour contribuer à la prévention des maladies cardio-vasculaires, du diabète et de certaines formes de cancer (Gerhauser, 2008).

L'influence du génotype sur la teneur en polyphénols des pommes est bien connue. La teneur en composés phénoliques totaux peut varier d'un facteur 1 à 7 (sur 104 variétés analysées par Ceymann *et al.* 2012). En comparaison, les facteurs écophysologiques (alimen-

**Tableau 5 | Influence des deux conduites et des quatre modes d'irrigation en 2010 sur la teneur en sucre et en acidité et la fermeté à la récolte et après la conservation en mars**

Conduite	Traitement d'irrigation	Teneur en sucre (% Brix)		Teneur en acidité (g/l)		Fermeté (kg/cm <sup>2</sup> )	
		A la récolte	Conservation	A la récolte	Conservation	A la récolte	Conservation
Drilling	V1	12,5	13,9	4,5	4,1	9,2	8,1
	V2	12,0	12,5	4,3	3,5	8,7	7,6
	V3	12,3	13,4	4,6	3,8	9,5	8,0
	V4	12,2	13,0	4,3	3,7	9,0	7,8
Mur fruitier	V1	12,6	14,1	4,8	3,9	9,7	8,2
	V2	12,1	13,2	4,9	4,1	9,4	7,8
	V3	12,4	13,8	4,9	4,1	9,6	8,2
	V4	11,8	13,2	4,7	4,0	9,3	7,8

Les valeurs correspondent à la moyenne de trois répétitions.

Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre traitement d'irrigation (Tukey,  $P < 0,05$ ).

tation hydrique, lumière, nutrition azotée) sont moins importants mais néanmoins significatifs. Drogoudi et Pantelidis (2001) signalent des différences de 40 % chez la variété Fuji en fonction de l'éclaircissement et Stefanelli *et al.* (2010) de 14 % pour l'influence de l'irrigation sur la variété Gala.

Dans cet essai, les écarts analysés dans les polyphénols totaux sont plutôt faibles entre les quatre variantes d'irrigation (tabl.6). Même si la relation avec le  $\Psi_{\text{tronc}}$  n'est pas toujours systématique, la V1 qui a subi la plus forte contrainte hydrique présente toujours les teneurs les plus élevées, parfois significativement différentes des autres variantes. De plus, l'effet de la charge est nettement perceptible, réduisant considérablement

celui du stress sur la teneur en composés phénoliques. C'est ainsi que, pour les arbres surchargés (> 7 fruits/cm<sup>2</sup> de section de tronc) comme pour ceux qui ont une charge insuffisante (< 4,5 fruits/cm<sup>2</sup> de section de tronc), la relation entre le  $\Psi_{\text{tronc}}$  et l'indice de Folin-Ciocalteu est pratiquement négligeable. En revanche, pour des individus normalement chargés (4,5–7 fruits/cm<sup>2</sup> de section de tronc) et entre –0,9 et –1,4 MPa de  $\Psi_{\text{tronc}}$ , l'augmentation moyenne est de 27 %, résultat comparable à celui d'autres études (Stefanelli *et al.* 2010). Le tableau 7 montre les mêmes tendances pour la plupart des composés phénoliques et la vitamine C. Les valeurs les plus élevées se trouvent dans la V1 dans plus de la moitié des cas. >

**Tableau 6 | Influence des deux conduites et des quatre variantes d'irrigation sur la teneur en polyphénols et l'activité antioxydante des pommes Gala (100 g poids frais) à la récolte et après cinq mois de conservation pour la récolte 2010**

Conduite	Traitement d'irrigation	Composés phénoliques totaux mg CE <sup>1</sup> /100 g		TEAC (activité antioxydante) mg TE <sup>2</sup> /100 g		FRAP (activité antioxydante) mg CE <sup>1</sup> /100 g	
		A la récolte	Conservation	A la récolte	Conservation	A la récolte	Conservation
Drilling	V1	105	130 a	324	334 a	115	130
	V2	97	125 ab	299	313 ab	106	122
	V3	102	112 b	304	289 b	111	117
	V4	104	122 ab	299	304 ab	113	124
Mur fruitier	V1	93 a	122 a	310 a	305 a	115 a	121 a
	V2	87 ab	104 b	280 ab	259 b	102 b	102 b
	V3	80 b	109 ab	279 ab	265 b	102 b	104 b
	V4	80 b	114 ab	261 b	290 ab	96 b	115 ab

Les valeurs correspondent à la moyenne de trois répétitions.

Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre traitements d'irrigation (Tukey, P < 0,05)

<sup>1</sup>CE = équivalent de catéchine. <sup>2</sup>TE = équivalent de Trolox.

**Tableau 7 | Influence de deux conduites des arbres et quatre variantes d'irrigation en 2010 sur la teneur en vitamine C et divers polyphénols des pommes Gala à la récolte**

Conduite	Variante d'irrigation	Vitamine C	Catéchine	Epicatechine	Procy-anidine B1	Procy-anidine B2	Acide chlorogénique	Acide p-coumaroylquinique	Phloridzine	Phlorétinexyloglucoside	Quercétine-galactoside-glucoside	Quercétine-rhamnoside
Drilling	V1	4,3	0,89 a	5,64 a	2,06	5,43 a	14,91 a	1,19 a	0,72	2,21 b	1,22 b	0,96
	V2	4,0	0,75 c	4,81 b	1,84	4,96 b	12,53 c	0,99 b	0,67	2,26 ab	1,45 a	1,02
	V3	4,5	0,80 b	5,40 a	1,93	5,16 ab	13,81 b	1,08 ab	0,67	2,29 ab	1,36 ab	1,02
	V4	4,1	0,80 b	5,04 b	2,01	5,33 ab	13,74 b	1,10 ab	0,71	2,36 a	1,25 ab	0,96
Mur fruitier	V1	5,0	0,77 a	4,88 a	1,94 a	5,17 a	13,84 a	1,05	0,68	2,34	1,33 a	1,02 a
	V2	4,3	0,77 a	5,15 ab	1,77 ab	4,82 ab	13,34 ab	1,04	0,69	2,23	1,15 ab	0,94 ab
	V3	5,2	0,77 a	4,97 ab	1,91 a	4,96 ab	13,06 ab	1,01	0,67	2,37	1,06 b	0,91 ab
	V4	4,3	0,69 b	4,34 b	1,65 b	4,49 b	11,74 b	0,94	0,62	2,25	0,99 b	0,83 b

Les valeurs en mg/100g poids frais correspondent à la moyenne de trois répétitions.

Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre traitements d'irrigation (Tukey, P < 0,05).

## Conclusions

L'étude de l'influence de l'irrigation sur la qualité de la pomme cv. Gala, avec quatre variantes sur deux systèmes de conduite, permet de tirer les conclusions suivantes:

- L'irrigation déficitaire (RDI), selon les critères définis pour cette expérimentation (réduction des irrigations dès 60 jours après la pleine floraison jusqu'à quatre semaines avant la récolte et seuil de potentiel de tronc à  $-1,2$  MPa), a permis d'économiser 47 % d'eau par rapport à une irrigation de confort appliquée durant toute la saison.
- L'irrigation déficitaire (RDI) n'a eu aucun impact sur le rendement et la qualité des fruits de deux récoltes consécutives par rapport à une irrigation de confort. Aucune influence significative n'a été observée sur le calibre, la coloration, la teneur en sucres totaux, l'acidité totale, la fermeté ainsi que sur les teneurs en vitamine C et en polyphénols des fruits.
- Dans les conditions de l'essai, la variété Gala s'est montrée sensible au stress hydrique, avec des réactions mesurables sur la qualité de la récolte à partir d'un potentiel de tronc de  $-1,3$  à  $-1,4$  MPa observé principalement dans la variante sans irrigation.
- Les teneurs en composés phénoliques totaux et en vitamine C augmentent de 20–30 % à partir d'un niveau de stress hydrique de  $-1,4$  MPa, non compatible avec une production de qualité commerciale standard (15–20 % de moins de production de 1<sup>er</sup> choix).
- Une irrigation déficitaire appliquée tardivement (par exemple de 100 jours après la pleine floraison jusqu'à la récolte) pourrait être testée avec un seuil inférieur de potentiel de tronc, pour améliorer davantage la qualité gustative et nutritionnelle sans réduire significativement le calibre des fruits. ■

### Remerciements

Les auteurs remercient M. Martin Heiri pour les analyses de vitamine C, les collaborateurs du groupe productions fruitières en région alpine, en particulier Pierre-Yves Cotter pour les analyses Pimprenelle, Jean-Pierre Siegrist pour la conservation des fruits, Emmanuel Chassot et Pierre Jeltsch pour la récolte et le triage des lots, ainsi que Jonathan El Assad pour les mesures de potentiel hydrique en 2011.

### Bibliographie

- Ceymann M., Arrigoni E., Schäfer H., Baumgartner D., Bozzi Nising A. & Hurrell R., 2011. Rapid high performance screening method using UHPLC-MS to quantify 12 polyphenol compounds in fresh apples. *Anal. Methods* **3**, 1774–1778.
- Ceymann M., Arrigoni E., Schäfer H., Bozzi Nising A. & Hurrell R. F., 2012. Identification of apples rich in health-promoting flavan-3-ols and phenolic acids by measuring the polyphenol profile. *J. Food Compos. Anal.* **26**, 128–135.
- Drogoudi P. D. & Pantelidis G., 2011. Effects of position on canopy and harvest time on fruit physico-chemical and antioxidant properties in different apple cultivars. *Sci. Hort.* **129**, 752–760.
- Ferree D. C. & Warrington I. J., 2003. Apples: botany, production and uses. CAB publishing, CAB international, UK, 672 p.
- Garnier E. & Berger A., 1985. Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress. *J. Hortic. Sci.* **60**, 47–56.
- Gerhauser C., 2008. Cancer Chemopreventive Potential of Apples, Apple Juice and Apple Components. *Planta Med.* **74**, 1608–1624.
- Goodwin I. & Boland A.-M. 2002. Deficit irrigation practices Water reports - 22, 109 p. Accès: <http://www.fao.org/DOCREP/004/Y3655E/y3655e10.htm> [17 janvier 2013]
- Lampinen B. D., Shackel K. A., Southwick S. M., Olson W. H. & Dejong T. M., 2004. Leaf and canopy level photosynthetic responses of French prune (*Prunus domestica* L. 'French') to stem water potential based deficit irrigation. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* **79**, 638–644.
- Livellara N., Saavedra F. & Salgado E., 2011. Plant based indicators for irrigation scheduling in young cherry trees. *Agricultural Water Management* **98** (4), 684–690.
- Monney P., 2011. Fiche technique: Pratique de l'irrigation des vergers. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **43** (2), 98–102.
- Naor A., Klein I. & Doron L., 1995. Stem water potential and apple size. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **120**, 577–582.
- Naor A., 2006. Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards. *Horticultural Reviews* **32**, 111–165.
- Naor A., Gal Y. & Peres M., 2006. The inherent variability of water stress indicators in apple, nectarine and pear orchards, and the variability of a leaf-selection procedure for water potential measurements. *Irrig. Sci.* **24**, 129–135.
- Naor A., Naschitz S., Peres M. & Gal Y. 2008. Responses of apple fruit size to tree water status and crop load. *Tree Physiol.* **28** (8), 1255–1261.
- Odriozola-Serrano I., Hernandez-Jover T. & Martin-Belloso O., 2007. Comparative evaluation of UV-HPLC methods and reducing agents to determine vitamin C in fruits. *Food Chem.* **105**, 1151–1158.
- Ortuño M. F., Garcia-Orellana Y., Conejero W., Ruiz-Sanchez M. C., Alarcon J. J. & Torrecillas A., 2006. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees* **20**, 1–8.
- Shackel K. A., Ahmadi H., Biasi W., Buchner R., Goldhamer D., Gurusinge S., Hasey J., Kester D., Krueger B., Lampinen B., McGourty G., Micke W., Mitcham E., Olson B., Pelletrau K., Philips H., Ramos D., Schwankl L., Sibbett L., Snyder R., Southwick S., Stevenson M., Thorpe M., Weinbaum S. & Yeager J., 1997. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology* **7** 1997, 23–29.
- Stefanelli D., Goodwin I. & Jones R., 2010. Minimal nitrogen and water use in horticulture: Effects on quality and content of selected nutrients. *Food Research International* **43**, 1833–1843.
- Thalheimer M. & Paoli N., 2004. Zur Bewässerung in Obstbau. *Obstbau Weinbau* **5**, 162–165.
- Wan Zaliha W. S. & Singh Z., 2010. Impact of regulated deficit irrigation on fruit quality and postharvest storage performance of 'Cripps Pink' apple. *Acta Hort.* (ISHS) 877,155–162. Accès: [http://www.actahort.org/books/877/877\\_13.htm](http://www.actahort.org/books/877/877_13.htm) [17 janvier 2013].

## Summary

### Influence of regulated deficit irrigation for apple trees cv. 'Gala' on yield, fruit quality and water use

The project aimed to analyse the influence of the regulated deficit irrigation for apple trees cv. Gala on the yield and the commercial, sensory and nutritional quality of the fruits, as well as the water use. Four irrigation treatments were tested in 2010 and 2011 based on the fruit development (first period P1 from full bloom to end of fruit cell division, second period P2 during fruit cell growth, third period P3 during fruit cell growth and maturation, about four weeks before harvest): T1: non-irrigated, T2: comfort irrigation from P1 to P3, T3: no irrigation during P2, T4: regulated deficit irrigation during P2 with a threshold at  $-1.2\text{MPa}$  for the midday stem water potential (MSWP). The irrigation treatments had no impact on the fruit yield and the increase of the trunk diameter. However, compared to comfort irrigation (T2), the absence of irrigation (T1, T3) increased the MSWP over  $-1.2\text{MPa}$  during P2 and influenced negatively the commercial quality of the fruits (fruit size and coloration). In contrast, for these two irrigation treatments, the increase in water stress was related with a slight increase in sugar content and firmness of the apples, as well as in their contents in vitamin C and polyphenols and in their antioxidant activity. The regulated deficit irrigation (RDI, threshold for irrigation at  $-1.2\text{MPa}$  for the MSWP from 60 days after full bloom till four weeks before harvest) allowed to reduce water use of 47 % without loss in fruit yield and commercial, sensory and nutritional quality of the fruits.

**Key words:** apple, midday stem water potential, RDI, soil matrix potential, sub-drip-irrigation.

## Zusammenfassung

### Einfluss der regulierten Defizitbewässerung in Apfelkulturen cv. 'Gala' auf den Ertrag, die Fruchtqualität und die Wassereinsparung

Das Ziel dieses Projektes war den Einfluss der regulierten Defizitbewässerung (RDI) bei Apfelkulturen cv. 'Gala' auf den Ertrag und die äussere und innere Qualität der Früchte zu untersuchen. Vier Bewässerungsverfahren basierend auf der Fruchtentwicklung (Periode P1 von voller Blüte bis Ende Zellteilung, Periode P2 während dem Zellwachstum und Periode P3 während dem Zellwachstum und Reife, rund vier Wochen vor der Ernte) wurden im 2010 und 2011 verglichen: V1: nicht bewässert, V2: Komfort-Bewässerung von P1 bis P3, T3: keine Bewässerung während P2, T4: regulierte Defizit-Bewässerung während P2 mit einem Schwellenwert für die Bewässerung ab  $-1,2\text{MPa}$  Blattwasserpotential. Die Bewässerungsverfahren hatten keinen Einfluss auf den Fruchtertrag und die Zunahme des Stammdurchmessers. Dagegen, verglichen mit der Komfortbewässerung (V2), wurden in den Verfahren ohne Bewässerung (V1, V3) die Blattwasserpotentiale auf mehr als  $-1,2\text{MPa}$  während P2 erhöht, was die äussere Qualität (Fruchtgrösse und Farbanteil) negativ beeinflusste. Dagegen wiesen die Äpfel dieser beiden Verfahren mit erhöhtem Wasserstress leicht höhere Gehalte an Zucker, Vitamin C und Polyphenolen, sowie eine leicht höheres antioxydatives Potential und eine etwas höhere Festigkeit auf. Die regulierte Defizitbewässerung (RDI, Schwellenwert für die Bewässerung bei  $-1,2\text{MPa}$  Blattwasserpotential ab 60 Tagen nach voller Blüte bis vier Wochen vor der Ernte) hat eine Reduktion des Wasserverbrauchs von 47 % erlaubt, ohne den Ertrag und die äussere und innere Qualität der Früchte negativ zu beeinflussen.

## Riassunto

### Influenza di un'irrigazione deficitaria sulla resa, la qualità delle mele 'Gala' e il risparmio idrico

Per valutare l'effetto di un'irrigazione deficitaria sulla resa e la qualità commerciale, gustativa e nutrizionale dei frutti nel 2010 e nel 2011 sono state testate quattro varianti sulla varietà Gala. A dipendenza della fase di sviluppo del frutto: divisione cellulare (P1), una prima fase di ingrossamento cellulare (P2) e una seconda (P3), si sono applicate diverse quantità di acqua. Le varianti erano: un testimone non irrigato (V1), l'irrigazione di sostegno durante le 3 fasi (V2), l'assenza di irrigazione durante la P2 (V3) e una restrizione che induce uno stress moderato durante la P2 (V4) con una soglia del potenziale del tronco fissata a  $-1,2\text{MPa}$ . Il regime d'irrigazione non ha avuto alcun impatto misurabile sulla resa e l'aumento della sezione dei tronchi. Per contro, in rapporto ad un'irrigazione di sostegno (V2), l'assenza d'irrigazione (V1 e V2) ha indotto una diminuzione della qualità commerciale della raccolta (calibro dei frutti, % di prima scelta). D'altronde, per queste due varianti, l'aumento dello stress ha causato un leggero miglioramento del tenore zuccherino totale (dell'ordine di 0,5 % Brix) e della fermezza ( $0,3-0,5\text{kg/cm}^2$ ). Anche i tenori in vitamina C, in polifenoli e l'attività antiossidante (TEAC e FRAP) sono stati favoriti dallo stress idrico. Alle condizioni di questa prova (riduzione dell'irrigazione a partire dal sessantesimo giorno dopo la piena fioritura fino a 4 settimane prima della raccolta e soglia del potenziale del tronco fissata a  $-1,2\text{MPa}$ ), l'irrigazione deficitaria ha permesso di realizzare un risparmio idrico del 47 % in rapporto all'irrigazione di sostegno senza nuocere la resa e la qualità commerciale, gustativa e nutrizionale dei frutti.