



HAL
open science

Systèmes de culture en arboriculture fruitière et qualité des fruits

Daniel Plénet, Sylvaine S. Simon, Gilles G. Vercambre, Françoise F.
Lescourret

► **To cite this version:**

Daniel Plénet, Sylvaine S. Simon, Gilles G. Vercambre, Françoise F. Lescourret. Systèmes de culture en arboriculture fruitière et qualité des fruits. *Innovations Agronomiques*, 2010, 9, pp.85-105. 10.17180/rq85-hg98 . hal-02664196

HAL Id: hal-02664196

<https://hal.inrae.fr/hal-02664196>

Submitted on 31 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Systèmes de culture en arboriculture fruitière et qualité des fruits

Plénet D.¹, Simon S.², Vercambre G.¹, Lescourret F.¹

¹ INRA, UR 1115 Plantes et Systèmes de culture Horticoles, Domaine Saint Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9

² INRA, UE695 Recherches Intégrées, Domaine de Gotheron, F-26320 Saint Marcel-lès-valence

Correspondance : daniel.plenet@avignon.inra.fr

Résumé

La qualité organoleptique des fruits est déterminante pour satisfaire les consommateurs. Cependant le contexte économique de ces dernières décennies a privilégié les critères de qualité ayant un fort impact sur la valeur marchande : calibre, aspect visuel et conservation des fruits. Les nouveaux enjeux liés au développement d'une agriculture durable incitent à concevoir des systèmes de culture à hautes performances économique et environnementale, et produisant des fruits de très bonne qualité. Nous montrons l'intérêt d'approches intégratives visant à concevoir des itinéraires techniques cohérents et logiques par rapport aux objectifs multicritères recherchés. Différents cas d'études sont présentés utilisant des démarches de prototypage, de conception assistée par modèles et d'évaluation systèmes multicritères. Sur pêche-nectarine, nous montrons l'intérêt de la gestion hydrique comme un levier d'action important, en lien avec la conduite des arbres et la gestion de la charge en fruits, pour concevoir des scénarios techniques innovants. Sur pommier, une expérimentation système illustre l'évaluation multicritères de différents systèmes conçus pour réduire le recours à l'usage des traitements phytosanitaires. Ces exemples pointent l'importance d'intégrer dès la conception l'ensemble des leviers d'action et de réaliser une évaluation multicritères des systèmes de culture innovants quant à leurs faibles impacts environnementaux et la qualité organoleptique des fruits.

Mots-clés : conception de systèmes, expérimentation système, évaluation multicritères, irrigation, protection des cultures

Abstract: Tree orchard cropping systems and fruit quality

The organoleptic fruit quality is crucial to meet consumer requirements. However the market context of these last decades privileged quality criteria having a strong impact on the market value: fruit size, visual aspect and storage potential of fruits. The new challenges to be faced to develop sustainable agriculture encourage to design cropping systems with economic and environmental high-performances, and to produce high quality fruits. Here, we show the interest of integrative approaches to design consistent and relevant cropping systems with regard to multi-criteria objectives. Different case studies are presented using prototyping design, model-based design and multi-criteria evaluation. On peach -nectarine, we show the potential of water management as an important control lever, in connection with tree training and crop load, to design innovative technical scenarios. On apple tree, a cropping system experiment illustrates the multi-criteria evaluation developed to assess orchard systems designed to reduce the use of pesticides. These examples highlight the importance to integrate from orchard conception onwards all the control levers of action to optimize both agronomic and environmental purposes and to perform multi-criteria evaluation of innovative cropping systems to assess their environmental impacts and fruit quality.

Keywords: system design, cropping system experimentation, multi-criteria evaluation, irrigation, crop protection

Introduction

Les déterminismes et les principaux facteurs impliqués dans l'élaboration de la qualité des fruits en relation avec l'action des techniques culturales sont assez bien documentés dans la littérature. Les études privilégient généralement une démarche analytique décomposant l'action de quelques modalités d'interventions culturales et l'évaluation porte essentiellement sur les performances agronomiques (rendement, calibre,...), sur la composition physicochimique des fruits et sur les principaux processus intervenant dans l'élaboration de la qualité. Cette approche analytique est indispensable pour comprendre les processus impliqués et définir les règles d'utilisation des modalités techniques. Cependant, l'introduction de changements techniques dans la conduite d'une culture impose d'appréhender dans sa globalité ses effets sur le système de culture du fait des interactions avec les autres techniques d'où la notion d'itinéraire technique (ITK), et de leurs actions possibles sur les multiples mécanismes et composantes interagissant au sein d'un peuplement cultivé. De même, les performances visées par les systèmes de culture sont de plus en plus nombreuses : l'objectif d'élaborer des fruits de haute qualité organoleptique s'inscrit obligatoirement au sein d'un profil de performances composé d'enjeux agronomiques, technico-économiques, réglementaires, de commercialisation, de préservation de l'environnement et de sa biodiversité, et de santé humaine.

Notre objectif est de présenter différentes démarches de conception de scénarios techniques pour répondre aux objectifs bien définis de la Production Fruitière Intégrée¹ (PFI) et d'exposer la problématique de l'évaluation multicritères. Nous présentons dans un premier temps l'évolution du contexte des systèmes de production en arboriculture, et la place de la problématique qualité des fruits dans les itinéraires techniques et les filières, ainsi que les méthodologies des approches systèmes. A partir de quelques cas d'études sélectionnés sur deux espèces fruitières (pomme et pêche), nous illustrons des démarches de conception et d'évaluation d'itinéraires techniques qui privilégient plus ou moins fortement l'élaboration de la qualité gustative parmi un ensemble multiple d'objectifs.

1- Positionnement de la problématique qualité en arboriculture fruitière

1-1 Evolution du contexte et des enjeux

Les préoccupations autour de l'élaboration de la qualité des fruits au verger existent depuis très longtemps dans le raisonnement du système technique en arboriculture fruitière. Cependant, l'évolution du contexte de production et de commercialisation ces dernières décennies (allongement des circuits, importance de la GMS, standardisation des normes commerciales, etc.) ont eu tendance à privilégier certaines composantes de la qualité par rapport à d'autres.

Le contexte économique de plus en plus concurrentiel a progressivement orienté les systèmes de culture vers une intensification à toutes les échelles de la filière visant à augmenter la productivité : augmentation des rendements avec les meilleurs calibres possibles, réduction des coûts de production surtout ceux de la main d'œuvre, investissement et regroupement pour améliorer la logistique dans les circuits post-récolte. Au niveau du verger, cette recherche de la productivité a été possible grâce à une protection chimique efficace. Celle-ci a permis de s'affranchir pour partie des contraintes biotiques et de la conjugaison de facteurs pouvant favoriser la sensibilité des vergers aux attaques des bioagresseurs (spécialisation des zones de production, densité de plantation, fertilisation, irrigation, variété à haut potentiel de production mais à faible tolérance aux bioagresseurs, etc.). Il faut noter que cette démarche d'intensification reste assez bien raisonnée (même s'il peut exister quelques excès) puisque de

¹ La PFI est définie comme étant une production économique de fruits de haute qualité donnant la priorité aux méthodes écologiquement plus sûres, minimisant les effets secondaires indésirables et l'utilisation des produits agrochimiques, afin d'améliorer la protection de l'environnement et la santé humaine (selon l'Organisation Internationale Lutte Biologique, OILB, Cross, 2002).

nombreuses exploitations respectent des cahiers des charges construits sur le socle de l'Agriculture Raisonnée. Le recours important à des techniques alternatives pouvant se substituer partiellement à la lutte chimique (par exemple, la confusion sexuelle utilisée contre certains lépidoptères ravageurs) atteste de cette volonté de prendre en compte les questions environnementales et de santé humaine, même si leur adoption à grande échelle est souvent liée à l'apparition d'impasses de la lutte chimique (résistance aux pesticides, retrait de substances actives, contraintes des LMR, etc.).

Comme dans d'autres filières de production, cette évolution progressive vers un système sociotechnique dominant, très cohérent, de plus en plus standardisé, et performant par rapport aux objectifs visés a conduit à un « verrouillage » laissant peu de marges de manœuvre pour le développement de nouveaux itinéraires techniques (Lamine *et al.*, 2010). Excepté pour quelques démarches spécifiques (vente directe, signes officiels de qualité ou Agriculture Biologique), les techniques développées pour améliorer la qualité organoleptique, réduire l'utilisation des pesticides chimiques (« qualité environnementale ») ou diminuer l'utilisation d'intrants comme l'eau d'irrigation, avaient peu de chance d'être adoptées par les producteurs dès lors qu'elles induisaient une réduction de calibre, une augmentation de défauts visuels sur les fruits ou un surcoût non compensé par une augmentation de la valeur marchande des fruits.

Cependant le contexte évolue très rapidement. De nouvelles contraintes sur la protection des cultures ont été introduites par les réglementations européenne et française pour réduire l'impact de l'agriculture sur la santé humaine, les ressources naturelles et la biodiversité. Certaines limites techniques du système actuel prennent aussi de l'ampleur avec notamment l'apparition croissante de populations de bioagresseurs résistantes aux substances actives. Des études récentes (Expertise Pesticides, Aubertot *et al.*, 2005 ; Ecophyto R&D, Butault *et al.*, 2010) montrent la nécessité de faire évoluer en profondeur les systèmes de production pour les rendre moins vulnérables aux bioagresseurs et réduire ainsi leur dépendance à l'usage des pesticides. Parallèlement, les consommateurs qui sont très fortement incités à consommer des fruits et des légumes frais (Programme National Nutrition Santé), sont de plus en plus demandeurs de fruits sains, d'excellente qualité organoleptique et de haute valeur nutritionnelle, provenant de systèmes de production préservant l'environnement (même si cela ne se retrouve pas nécessairement dans leurs actes d'achats). On assiste aussi à une diversification des circuits de distribution avec notamment le redéveloppement de circuits courts.

Ces évolutions récentes renforcent la nécessité de développer des systèmes techniques répondant aux enjeux de la PFI et du développement durable visant à concilier performance économique, haute qualité des fruits et efficacité écologique.

1-2 Quelles qualités dans les systèmes de production de fruits ?

La qualité recouvre de nombreuses composantes (commerciale, organoleptique, sanitaire² et nutritionnelle³) dont la hiérarchisation peut varier selon les opérateurs au sein de la filière et en fonction des utilisateurs finaux (consommation en frais, industrie, etc.).

La qualité commerciale qui est directement prise en compte pour déterminer la valeur marchande, avec une différenciation très importante des prix de vente selon les catégories (aspects et défauts visuels sur les fruits) et les calibres, est actuellement le critère déterminant pour assurer une rentabilité économique

² La qualité sanitaire, notamment l'absence de mycotoxines et de résidus de pesticides est une condition stricte pour accéder au marché, et impose une grande maîtrise dans le choix des substances actives et de leur positionnement temporel pour respecter les normes de limites maximales de résidus (LMR).

³ La qualité nutritionnelle est liée à la composition du produit. Ce n'est que récemment que ce critère a pris de l'importance avec ses attributs « valeur santé » qui lui sont souvent associés, en partie liée à la teneur en certains constituants (polyphénols, vitamine C, etc.).

dans ces systèmes de production confrontés à de fortes concurrences commerciales et à des fluctuations conjoncturelles importantes des prix.

La qualité organoleptique est une notion complexe liée à un subtil mélange de sensations. Certaines de ces composantes peuvent être caractérisées par des descripteurs sensoriels (couleur, parfum, goût, saveur, texture,...) grâce à un panel de dégustateurs entraînés. Cette approche étant assez lourde à mettre en œuvre, des critères quantitatifs physico-chimiques, assez simples à mesurer, ont été développés pour caractériser en routine les lots commerciaux (fermeté, teneur en sucres solubles totaux appelée indice réfractométrique, acidité). Des corrélations plus ou moins étroites existent entre les analyses sensorielles et/ou les tests hédoniques (mesure des préférences et de la satisfaction des consommateurs) avec les analyses physico-chimiques. Cependant, dans le contexte technico-économique actuel, la qualité organoleptique a du mal à se positionner sans doute à cause des difficultés pour la maîtriser (rôle de certains déterminants climatiques), de la subjectivité de certains critères dans la perception de la qualité par les consommateurs, et surtout de l'absence d'une valorisation marchande dans la plupart des circuits de distribution. Ceci se fait en dépit des efforts de la recherche et des acteurs techniques pour mettre au point des itinéraires techniques favorisant la qualité (ex. Giaque *et al.*, 1997).

Selon les espèces fruitières, la prise en compte de la qualité ne va pas avoir les mêmes répercussions dans la gestion du fruit au sein des filières. Chez la pomme, de grandes différences de perception de qualité gustative sont introduites par les variétés grâce à des critères portant sur les arômes, la couleur, le croquant, la jutosité, le rapport sucres/acides. Ces profils sensoriels servent de plus en plus de repères aux consommateurs lors de l'acte d'achat. Du fait de cette forte valeur intrinsèque liée aux caractéristiques génétiques de la variété, parfois renforcée par des effets de terroirs, l'itinéraire technique apparaît plus comme devant préserver cette qualité que de vraiment l'élaborer, en se concentrant sur certains attributs de la qualité commerciale comme l'homogénéité des calibres, la coloration des fruits et l'aptitude à la conservation des lots très fortement conditionnée par l'état sanitaire des fruits. L'effet de l'ITK sur la qualité gustative, par l'intermédiaire de son action sur les sucres et les acides, joue donc un rôle souvent plus marginal dans les choix techniques, excepté la maîtrise de la charge.

Pour la pêche-nectarine, l'effet variétal est aussi très important, notamment avec les différentes perceptions introduites par le type de fruits (pêche ou nectarine, chair blanche ou chair jaune) et plus récemment par des groupes variétaux porteurs de profils sensoriels plus distincts (saveur douce, équilibrée ou acidulée, pêches plates, ...). Les enquêtes de satisfaction des consommateurs mettent en évidence le poids très important de paramètres fortement influencés par le degré de maturité du fruit (fermeté, jutosité, arômes) et la teneur en sucres ou le rapport sucres/acides, même si il existe une diversité marquée des préférences des consommateurs (Cottet *et al.*, 2009). La gamme variétale actuelle vise à achalander les rayons de début juin à fin septembre. Selon les groupes de précocité, les problématiques de gestion de l'ITK et de la qualité sont assez différentes. Les variétés précoces (juin) ont des faibles potentiels en calibre et en sucres, l'objectif de la conduite du verger sera focalisé sur ces paramètres auxquels se rajoute le problème des noyaux fendus. Pour les variétés tardives (août et septembre), le calibre et le sucre sont généralement peu limitants vis-à-vis des critères commerciaux et du goût. Par contre, le contrôle des maladies de conservation des fruits est primordial, essentiellement pour les monilioses (*Monilinia spp.*) qui peuvent entraîner des pertes pouvant atteindre 20 à 40% de la récolte selon les conditions climatiques. La protection phytosanitaire n'ayant qu'une efficacité limitée lorsque la pression est forte, la recherche de techniques culturales, souvent aux effets partiels, permettant de réduire la sensibilité du verger aux attaques de ces champignons est un enjeu important. Les variétés de saison (juillet) ont un comportement intermédiaire.

Que ce soit pour la pomme ou la pêche, à l'intérieur de ces grands traits, il existe une grande variabilité de comportement entre variétés nécessitant une adaptation du système de conduite à chaque contexte (verger, situation pédoclimatique, objectifs de production et de qualité visés par le producteur selon le circuit de commercialisation, contraintes spécifiques à chaque exploitation).

1-3 Pratiques culturales affectant l'élaboration de la qualité.

L'élaboration du rendement et de la qualité des fruits dans les vergers est la résultante d'un potentiel génétique conféré par l'association variété - porte-greffe, du milieu et du système technique (Figure 1). En arboriculture, les choix de plantation (variété et systèmes de conduite) et la gestion technique des jeunes vergers sont essentiels car ils engagent sur le long terme la réussite du verger dans ses dimensions technico-économiques, mais aussi dans son futur potentiel qualitatif. Dans les vergers adultes, la plupart des actes techniques agissent indirectement sur l'élaboration du rendement et la qualité des fruits, en jouant sur les processus d'interception et d'utilisation des éléments nutritifs (rayonnement, CO₂, eau, éléments minéraux), tout essayant de préserver l'état de santé de la plante et du fruit. L'ITK doit aussi assurer la pérennité du verger (réserves et mise à fruit).

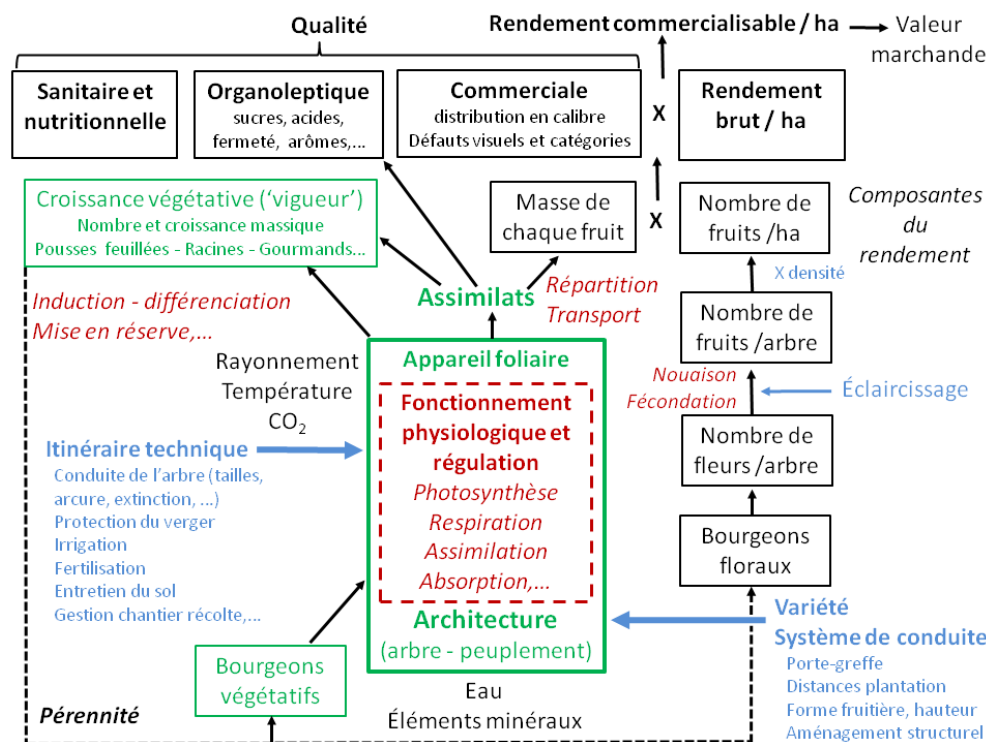


Figure 1 : Schéma simplifié de l'élaboration du rendement et de la qualité en arboriculture fruitière

Il est donc très difficile de quantifier le rôle d'une technique parmi l'ensemble des facteurs et conditions ayant permis d'obtenir le rendement et la qualité des fruits issus du verger. Certaines techniques ont cependant des actions plus directes sur les performances. L'éclaircissage permet d'ajuster la charge en fruits (nombre de fruits par arbre ou par unité de surface) à un potentiel d'assimilats carbonés pour équilibrer les relations sources – puits. La protection de la culture vise à protéger l'état du peuplement ainsi que les fruits des dégâts directs. Elle a aussi un rôle direct sur la qualité sanitaire (LMR, ...). De même, la gestion du chantier de récolte⁴ est essentielle pour préserver la qualité. C'est un lieu de compromis entre l'obtention d'une maturité optimale favorisant l'expression de qualité gustative supérieure et l'aptitude des fruits à la conservation dans les circuits post-récolte. Les évolutions technologiques et logistiques notamment dans la gestion de la chaîne du froid permettent potentiellement d'assurer une bonne préservation de la qualité des fruits dans les stations de conditionnement et de conservation, et lors de l'expédition. Des études plus intégratives semblent cependant nécessaires pour mieux documenter, à grande échelle, les pratiques usuelles et les évolutions réelles des différentes

⁴ Les chantiers de récolte représentent un des principaux coûts de production en pêche et en pomme

composantes de la qualité dans les itinéraires post-récolte, notamment leurs conséquences sur la qualité nutritionnelle (Amiot-Carlin *et al.*, 2007).

Même si l'objectif de l'itinéraire technique est généralement de rechercher une production la plus homogène possible, on observe une très grande variabilité en termes de qualité (dimension des fruits, composition physico-chimique, etc.) à l'échelle de l'arbre et du verger. Une partie de cette variabilité (calibre, coloration des fruits) est gérée par la multiplication des cueillettes et l'agrèage, mais il apparaît plus difficile de contrôler la variabilité gustative au sein des lots.

1-4 L'approche système pour une évaluation multicritères : qualités du fruit et conditions de production

L'approche système consiste à i) élaborer des scénarios techniques ou des systèmes; ii) les évaluer et iii) les modifier en vue de leur amélioration sur la base des résultats acquis (Debaeke *et al.*, 2009). La première étape de conception est basée sur différentes méthodologies (prototypage et conception assistée par modèles) décrites récemment (Réau *et al.*, 2008) dont une des sorties est de transcrire l'ITK ou le système de culture sous forme de jeux de règles de décision cohérents en vue d'un ou de plusieurs objectifs principaux pour le pilotage de la culture (ex. réduire l'utilisation des pesticides, réduire la quantité de main d'œuvre ou encore minimiser les dégâts de bioagresseurs) dans un contexte et pour des contraintes données. L'utilisation d'un seuil d'intervention contre un ravageur constitue par exemple une règle de décision. Dans les différentes étapes de conception et de formalisation des règles de décision, il est essentiel d'intégrer le point de vue et l'expertise de producteurs et d'acteurs du développement technique.

L'itinéraire technique qui sera généré par la mise en œuvre des règles de décision est ensuite évalué dans sa globalité, sans individualiser l'effet permis par l'une ou l'autre des pratiques. Un ensemble de paramètres liés aux pratiques et aux moyens mobilisés pour produire, ainsi que des descripteurs de l'état du sol, de la plante, de la récolte et de sa qualité, de l'environnement... font classiquement l'objet d'un suivi longitudinal (ou parfois ponctuel). L'évaluation peut concerner la parcelle cultivée *sensu stricto* (ex. rendement, Indice de Fréquence de Traitement - IFT, marge brute...) mais elle peut également englober ce qui se passe en amont et en aval pour l'impact des systèmes étudiés. Par exemple, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) évalue différentes catégories d'impacts environnementaux d'un produit en englobant tous les impacts des ressources et émissions liées aux différentes étapes de la vie de ce produit. Pour les vergers, ceci nécessite de comptabiliser les impacts liés à l'agro-fourmiture et aux machinismes (partie amont) intervenant dans les différentes phases de vie d'un verger ainsi que les impacts de la filière aval (stockage, conditionnement, transport, etc.). L'évaluation multicritères vise à identifier les éventuels compromis pouvant accompagner des changements dans l'itinéraire technique, par exemple lors d'une diminution des intrants conventionnels. La notion de qualité de la production est donc posée de manière différente dans le cadre d'une approche système pour laquelle une lecture conjointe de la production et des conditions de production est proposée. En fonction des résultats acquis au cours de l'évaluation et des nouvelles connaissances, des propositions d'amélioration des scénarios techniques ou une nouvelle étape de conception sont alors proposées : la conception et l'évaluation font donc partie d'une démarche itérative de progrès.

2- La gestion hydrique, composante clé de scénarios techniques innovants en pêche - nectarine

L'alimentation hydrique joue un rôle essentiel dans l'élaboration du rendement et de la qualité des fruits car elle intervient sur de multiples processus du fonctionnement de l'arbre et du fruit. Les vergers de pêcheurs étant majoritairement localisés sous climat méditerranéen et dans des sols 'légers' à faibles réserves utiles, les quantités d'eau apportées par l'irrigation peuvent être très élevés (par exemple en

moyenne 659 ± 173 mm en 2004 sur 85 vergers dans le Sud de la France) tout en étant relativement bien raisonnées par les agriculteurs selon les méthodes actuellement diffusées⁵ (Navarro, 2005). De nombreux travaux ont porté sur l'adaptation des techniques d'irrigation pour essayer d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau et la qualité des fruits, notamment en appliquant des déficits hydriques modérés à certaines périodes du cycle de développement de l'arbre et du fruit ('Regulated Deficit Irrigation', RDI) (Mitchell et Chalmers, 1982). Les restrictions hydriques réalisées durant la phase de croissance rapide de la pulpe dans le mois précédant la maturité augmentent la teneur en sucres solubles de la pulpe, mais réduisent souvent le calibre des fruits (Huguet et Génard, 1998 ; Bussi *et al.*, 1999 ; Besset *et al.*, 2001 ; Girona *et al.*, 2003 ; Mercier *et al.*, 2009). De ce fait, ces méthodes sont peu utilisées par les producteurs.

L'irrigation peut aussi modifier la sensibilité aux maladies. Sur pêcher, les pourritures des fruits, principalement causées par les monilioses (*Monilinia spp.*) sont favorisées par l'irrigation qui augmente les vitesses de croissance des fruits ce qui peut accentuer la formation de fissures cuticulaires, voies d'entrée privilégiées des conidies du champignon (Gibert *et al.*, 2009).

Du fait des nouveaux enjeux exposés précédemment, la gestion hydrique des vergers de pêchers doit donc être ré-évaluée selon des approches multicritères car c'est potentiellement une technique intéressante pour favoriser l'élaboration de fruits de haute qualité, tout en pouvant réduire la sensibilité aux maladies de conservation. La diminution de l'utilisation de la ressource en eau est aussi déterminante dans certaines régions méditerranéennes. Cependant, ces nouveaux scénarios techniques doivent préserver le plus possible les performances économiques. Pour illustrer l'intérêt du changement de point de vue sur le rôle de la gestion hydrique au sein des ITK, nous précisons tout d'abord son effet sur la composition biochimique des fruits. Ensuite, deux démarches de conception de scénarios associant différentes techniques sont présentées (prototypage et conception assistée par modèles) avec comme ambition d'atteindre les objectifs décrits auparavant.

2-1 Effets de l'irrigation sur les performances et la composition de la pêche

L'effet du niveau d'alimentation hydrique sur la composition biochimique est illustré à partir de données⁶ obtenues en 2008 sur une nectarine à chair blanche, arrivant à maturité vers le 10 août (cv. Zéphir). Les arbres sont cultivés dans des conteneurs équipés de goutte-à-goutte. Le dispositif comprend 5 répétitions. Quatre régimes d'irrigation sont appliqués pendant la dernière phase de croissance du fruit (20 juin à la récolte). Le témoin est non limitant en eau, les 3 autres traitements permettent de couvrir une gamme d'alimentation allant d'un déficit faible à modéré (irrigation correspondant à 57 % et 39 % des quantités d'eau apportées sur le témoin) jusqu'à un stress hydrique sévère (17% du témoin). Aucune intervention phytosanitaire contre les monilioses n'est pratiquée pour pouvoir évaluer l'effet de l'irrigation sur le développement de cette maladie.

Durant la maturation la concentration en sucres totaux dans la pulpe augmente alors que la teneur en acides diminue (Figure 2). Le saccharose (sucrose) contribue le plus à l'augmentation de la teneur en sucres, alors que le sorbitol présente une courbe en cloche caractéristique avec des concentrations faibles à la récolte. La plupart des acides diminuent au cours de cette dernière phase de croissance du fruit entraînant une diminution progressive de l'acidité titrable. Ces évolutions de composition biochimique sont similaires à celles observées par ailleurs (Wu *et al.*, 2002 ; Génard *et al.*, 2003).

Sous l'effet d'une restriction hydrique, la proportion de glucose et de fructose augmente alors que la contribution du saccharose diminue. Les différents niveaux de déficit hydrique provoquent un retard

⁵ Les écarts par rapport à un bilan hydrique sont de -12 ± 175 mm (bilan hydrique = Irrigation – Kc ETP, avec Kc, coefficient cultural du pêcher et ETP, évapotranspiration potentielle).

⁶ Dans le cadre d'un programme Européen IRRIVAL (2007-2009).

dans la diminution des teneurs en sorbitol, en relation avec le retard de maturité observé sous fort stress (Mahhou *et al.*, 2006). L'influence des niveaux d'irrigation sur le profil des différents acides est moins marquée, exceptée pour le stress hydrique sévère qui provoque un décalage dans le temps de l'évolution des concentrations en acide citrique, toujours en lien relation avec le décalage de maturité.

Des mesures de l'activité photosynthétique et de la composition biochimique des feuilles réalisées en parallèle montrent une diminution significative de la concentration en amidon dans les feuilles sur le traitement à fort stress hydrique, en lien avec la réduction de la photosynthèse pouvant atteindre 70% par rapport au témoin bien irrigué (données non présentées). A l'inverse, on observe une plus haute concentration du sorbitol dans les feuilles en situation de stress hydrique, le sorbitol étant la forme de sucre circulant au sein de l'arbre chez le pêcher et étant également impliqué dans les phénomènes d'osmorégulation. Sous stress hydrique sévère, la stratégie de l'arbre est donc de favoriser la croissance des fruits en réduisant le stockage des composés carbonés. Selon la durée et l'intensité du stress, ces modifications dans la répartition du carbone vont impacter de nombreux processus intervenant dans le fonctionnement des parties aériennes (Génard *et al.*, 2008) et racinaires de l'arbre (Becel, 2010), avec des conséquences possibles sur la production des années suivantes (Naor, 2006).

Les restrictions hydriques affectent plus ou moins fortement les performances agronomiques (rendement brut, poids moyen des fruits et calibres) des arbres, avec un très fort impact du traitement Irrig. 17% (Tableau 1). A l'opposé, les déficits hydriques faible à modéré réduisent très significativement le pourcentage de fruits malades, tout en améliorant l'efficacité d'utilisation de l'eau par rapport au témoin. D'un point de vue agronomique et économique, une restriction hydrique faible voire modérée est hautement bénéfique quand aucune protection fongicide n'est réalisée contre les monilioses.

Sur le plan de la qualité des fruits, la diminution de la concentration en saccharose observée sur les traitements avec déficits hydriques est en partie compensée par l'augmentation des autres sucres (le fructose ayant un pouvoir sucrant supérieur) et une plus faible teneur en eau de la pulpe. Le calcul d'un indice du caractère sucré (somme des sucres en fonction de leur pouvoir sucrant) montre une légère augmentation avec les déficits hydriques (données non présentées). Cette tendance est confirmée par la mesure de l'indice réfractométrique des jus extraits de la pulpe. Pour des déficits hydriques faible et modéré, la composition de la pulpe fraîche n'est pas significativement modifiée par rapport au témoin. Pour le stress hydrique sévère, les indices réfractométrique et du caractère sucré sont augmentés, mais le ratio sucres / acides est réduit, du fait d'une teneur en acides plus élevée dans la pulpe liée à une maturité légèrement retardée. Ces résultats confortent des observations similaires (Mercier *et al.*, 2009) mais en précisant l'impact de l'irrigation sur la composition biochimique de la pulpe.

Chez le pêcher, la modération des irrigations permet de modifier la composition biochimique de la pulpe et de réduire la sensibilité aux maladies. En associant de manière cohérente l'irrigation à d'autres techniques, ne serait-il pas possible de répondre aux objectifs de la Production Fruitière Intégrée ?

Tableau 1. Performances agronomiques et économiques selon les niveaux d'alimentation hydriques pour la variété Zéphir cultivé en conteneur en 2008 (Inra PSH).

| Critères | Témoin | Irrig. 57% | Irrig. 39% | Irrig. 17% | P ¹ |
|---|---------------------|------------|------------|------------|----------------|
| Rendement brut (kg arbre ⁻¹) | 33.4 a ² | 27.0 b | 25.0 b | 18.1 c | <0.001 |
| % de fruits malades | 35.5 a | 13.4 b | 16.5 b | 6.3 b | <0.001 |
| Poids moyen d'un fruit (g) | 222.6 a | 182.0 b | 178.8 b | 131.7 c | <0.001 |
| % de fruits avec un calibre ≥ 67mm | 97.1 a | 88.0 a | 81.4 a | 31.7 b | 0.001 |
| Rendement commercial (kg arbre ⁻¹) | 21.5 ab | 23.4 a | 20.8 ab | 16.8 b | 0.026 |
| Revenu marchand (€ arbre ⁻¹) | 18.3 a | 18.3 a | 15.9 a | 8.1 b | 0.001 |
| Indice réfractométrique (% Brix) | 14.7 b | 15.1 b | 14.9 b | 17.1 a | <0.001 |
| Efficacité utilisation de l'eau (kg fruit m ⁻³) | 14.6 c | 20.8 bc | 28.0 b | 46.1 a | <0.001 |

¹ P, probabilité du test ANOVA,

² sur une même ligne les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes (seuil de 5%)

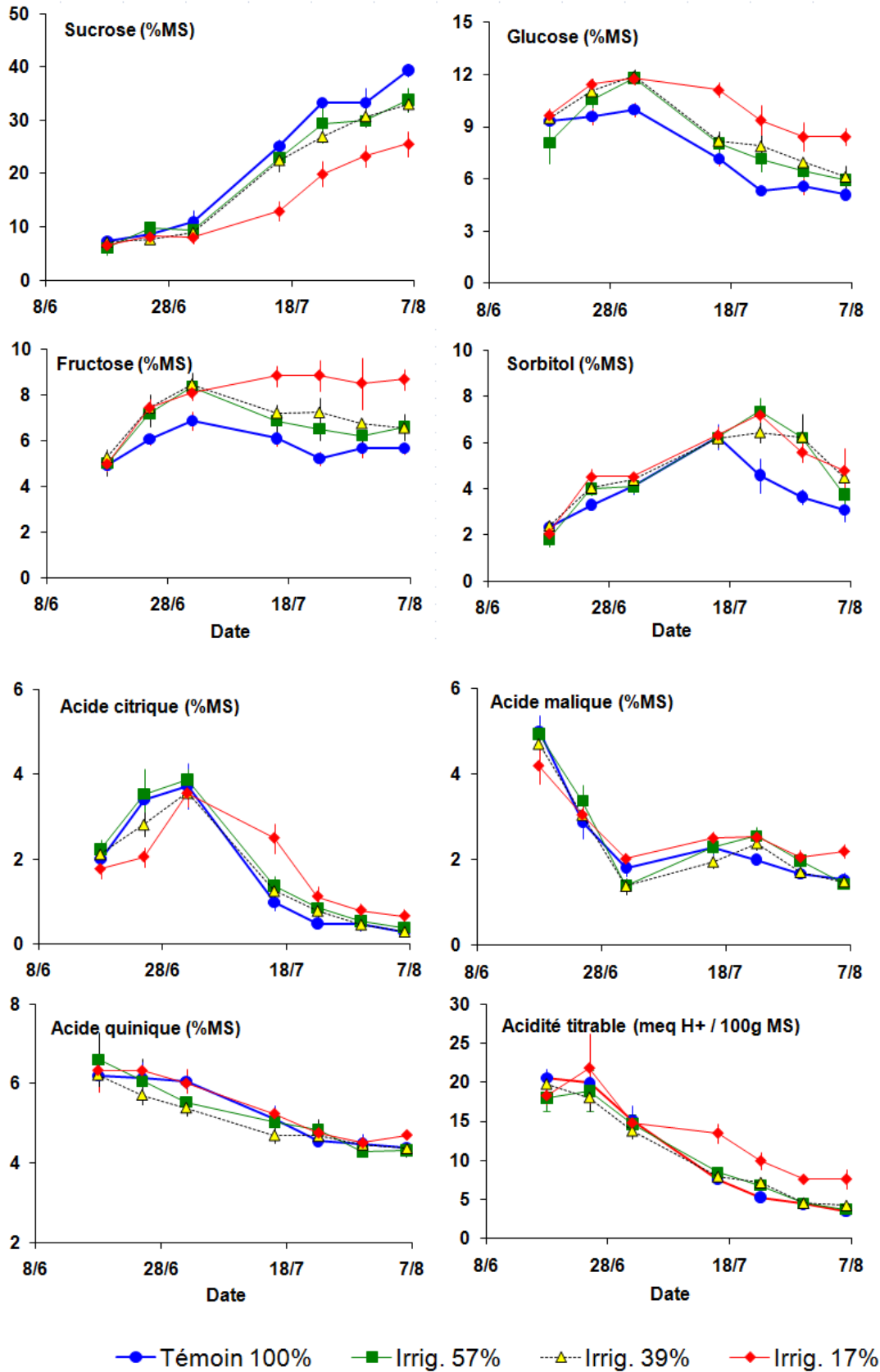


Figure 2 : Influence de 4 niveaux d'irrigation sur la composition de la pulpe en sucres et acides (en % de la matière sèche) chez la nectarine Zéphir en 2008. Données Inra PSH.

2-2. Combinaison de règles techniques : irrigation et conduite des arbres

En arboriculture fruitière, un ensemble de techniques sont utilisées pour manipuler l'architecture de l'arbre, en fonction des choix décidés lors de la plantation (système de conduite défini par la vigueur conférée par le porte-greffe, les distances de plantation, la forme et la hauteur souhaitée du verger, etc.). Ces manipulations associent des techniques comme la taille d'hiver et d'été, la suppression manuelle de bourgeons (extinction sur le pommier, effleurage sur le pêcher), l'arcure, etc. Ces opérations visent à orienter le développement et la croissance des arbres vers des objectifs adaptés à une exploitation commerciale (faciliter les opérations culturales, les travaux manuels, ...) mais aussi à augmenter l'efficacité d'utilisation de la lumière et sa répartition au sein de la canopée. Ces techniques recherchent l'obtention d'un équilibre entre la croissance végétative et le fruit, en interaction avec le comportement naturel de l'arbre induit par sa composante génétique. Cet équilibre joue aussi un rôle important sur les processus d'initiation florale, donc sur la régularité et la pérennité de la production.

En pomme, une nouvelle méthode de conduite des arbres, la conduite centrifuge, basée sur l'installation de branches fruitières longues et complexes, l'extinction manuelle de certains points de fructification et la création d'un puits de lumière autour de l'axe central (Lauri, 2002) permet de mieux contrôler l'équilibre vigueur – fructification et d'améliorer la production (répartition des calibres) tout en diminuant les temps de travaux. L'effet sur l'amélioration de la qualité des fruits est en grande partie due à une meilleure répartition de la lumière au sein de la frondaison (Willaume *et al.*, 2004). Les manipulations de l'architecture en modifiant l'éclairement et le microclimat, ainsi que les distances entre les organes, peuvent aussi influencer le développement des bioagresseurs, même si les effets ne sont pas univoques (Simon *et al.*, 2006).

Sur ces bases et en relation avec des techniciens du développement, un prototype d'itinéraire technique pour le pêcher (OptiPêche) a été proposé. Il associe les règles de gestion de :

- une nouvelle méthode de conduite en branches fruitières (Plénet *et al.*, 2006) qui améliore la distribution de la lumière au sein de l'arbre grâce à des manipulations inspirées de la conduite centrifuge du pommier avec notamment la création d'un puits de lumière autour des charpentières grâce une intervention très précoce visant à éliminer manuellement les jeunes pousses insérées sur les charpentières et à la base des branches fruitières (Navarro et Plénet, 2002),
- un pilotage de l'irrigation reposant sur les principes d'application de déficits hydriques modérés (RDI) pendant les dernières phases de croissance du fruit et en post-récolte. Le raisonnement des doses d'irrigation repose sur un indicateur du statut hydrique des arbres grâce à l'enregistrement en continu des fluctuations micrométriques des branches (Huguet *et al.*, 1992 ; Goldhamer *et al.*, 2001).

Ce jeu de règles de décision (OptiPêche) a été évalué selon la méthodologie des expérimentations « système » (Debaeke *et al.*, 2009) en le comparant aux pratiques conventionnelles (Témoin) utilisées par les producteurs dans sept vergers localisés au Sud d'Avignon et pendant deux années (2003-2004). Les variétés cultivées permettent de couvrir la gamme de précocité du pêcher (deux précoces, quatre variétés de saison et une variété tardive) en pêche et en nectarine. Sur chacun des sites, les ITK Témoin et OptiPêche ont été appliqués sur la même parcelle divisée en deux blocs, avec huit répétitions pour l'ensemble des variables mesurées. Le contrôle des bioagresseurs est réalisé selon le guide régional de protection, avec des interventions fongicides contre les monilioses. En complément, une expérimentation factorielle croisant irrigation et conduite a été réalisée à l'Inra de Gothenon pour étudier leur incidence sur le développement des monilioses et leurs dégâts en l'absence de protection fongicide (Mercier *et al.*, 2008).

L'application des règles de décision OptiPêche a provoqué une légère réduction des performances agronomiques et économiques en 2003, surtout sur les variétés précoces parce que les déficits hydriques ont été trop sévères durant un mois de juin particulièrement chaud et sec (Figure 3). Par contre en 2004, les manipulations de l'architecture selon les règles de la conduite en branches fruitières,

couplées avec les règles de gestion hydrique utilisant les fluctuations micrométriques des branches ont provoqué une augmentation significative des performances agronomiques et économiques par rapport au témoin. Les deux années, OptiPêche a amélioré significativement la qualité des rameaux (rameaux légèrement plus courts mais plus trapus et surtout ayant une plus grande floribondité) et leur distribution dans l'arbre (données non présentées). OptiPêche a aussi augmenté significativement la qualité des fruits, mesurée par l'indice réfractométrique (augmentation d'environ 1 point), ainsi que l'efficacité d'utilisation de l'eau (exprimée en kg fruits m⁻³). De même, la réduction d'eau d'irrigation (-100 à -120 mm en moyenne) est loin d'être négligeable à l'échelle d'un bassin de production (Plénet *et al.*, 2010).

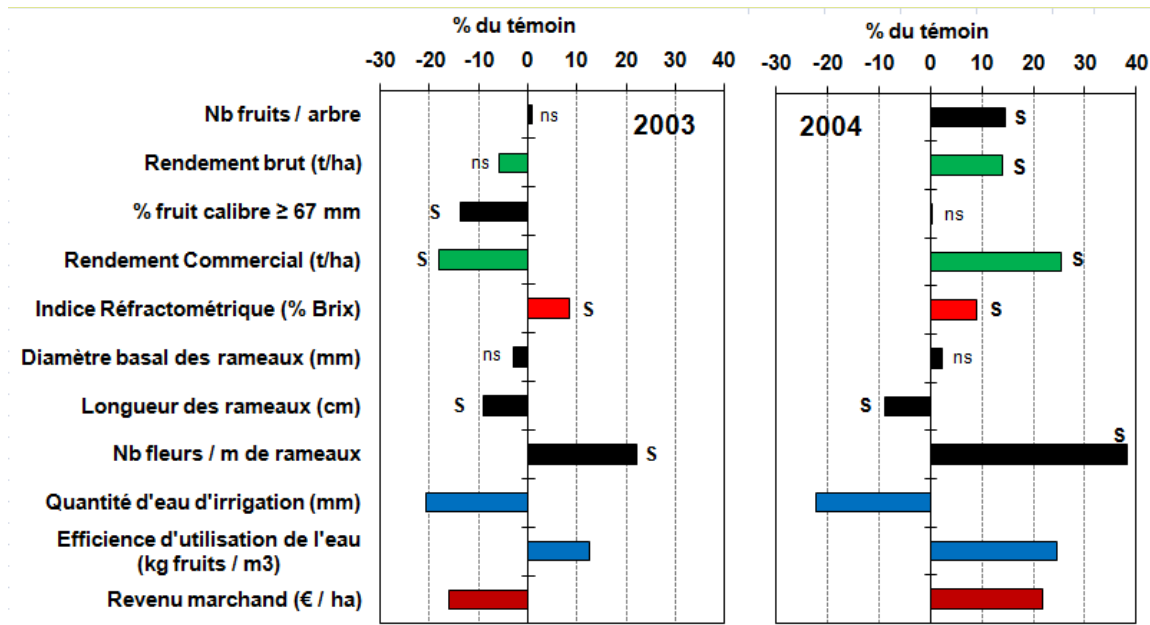


Figure 3. Principaux résultats de OptiPêche pour différents critères de performances en 2003 et 2004 (calculés à partir des 7 sites expérimentaux et exprimés en % du témoin). Les lettres indiquent si les différences entre OptiPêche et le témoin sont significatives (S) ou non (ns) lorsque des tests statistiques sont possibles.

L'expérimentation factorielle réalisée à l'Inra Gothéron met en évidence une synergie intéressante entre la conduite des arbres et la gestion de l'irrigation. Le pourcentage de fruits infectés par les monilioses à la récolte (moyenne calculée sur 2003 à 2005) passe de 12,9% sur le témoin (conduite traditionnelle de l'arbre et irrigation selon le bilan hydrique) à 3,8% sur le traitement OptiPêche. Les traitements expérimentaux qui ne modifient, par rapport au témoin, que la gestion hydrique ou que la conduite de l'arbre, donnent des pourcentages de fruits infectés intermédiaires au témoin et à OptiPêche (voir Mercier *et al.*, 2008).

L'association de règles de conduite des arbres et d'une gestion hydrique pilotée par les fluctuations micrométriques des branches peut donc améliorer la teneur en sucres des fruits, l'efficacité d'utilisation de l'eau et les performances économiques, tout en réduisant la sensibilité du verger aux maladies. Cependant, ce prototype d'ITK est confronté à quelques problèmes nécessitant des améliorations. La conduite en branches fruitières sur pêcher augmente l'occupation de l'espace : les formes fruitières actuelles, très ouvertes et assez basses, ne sont donc pas vraiment adaptées à ce type de manipulations. En améliorant aussi la floribondité, la conduite en branches fruitières augmente le temps nécessaires aux opérations d'éclaircissage qui sont réalisées manuellement sur cette espèce. Enfin, le pilotage de l'irrigation par les fluctuations micrométriques des branches nécessite le recours à l'expertise d'un conseil technique (mise en place des capteurs, interprétation des signaux, etc.). Les marges dégagées actuellement par cette production sont encore un frein pour l'adoption de ce prototype, mais certains paramètres peuvent être améliorés pour être intégrés à de futurs scénarios.

2-3. Utilisation de modèles pour concevoir de nouveaux scénarios techniques dans le cadre du pathosystème pêcher - monilioses

La multiplicité de combinaison des techniques dans les systèmes de culture ne permet pas d'explorer expérimentalement un grand nombre de scénarios. Les démarches de prototypage, intégrant les connaissances actuelles et à dire d'experts, ne peuvent élaborer que quelques scénarios susceptibles de répondre aux objectifs recherchés. Les progrès réalisés ces dernières années dans la modélisation rendent possibles des approches de « conception assistée par modèles » de scénarios techniques. Les connaissances scientifiques sur les principaux processus du fonctionnement d'un peuplement cultivé sont intégrées progressivement à des sous-modèles, puis leur assemblage permet de développer des modèles de culture qui peuvent interagir avec les actes techniques formalisés sous forme de règles de décision. L'intérêt de cette approche est de pouvoir explorer quantitativement l'effet de nombreuses combinaisons de modalités techniques sous des conditions climatiques très variées. Les meilleurs scénarios candidats, sélectionnés par des méthodes mathématiques et par expertise, sont alors expérimentés au champ (voir par exemple Jeuffroy *et al.*, 2008).

Lescourret et Génard (2005) ont proposé un modèle de fruit virtuel simulant les transformations de la qualité des fruits au cours de leur croissance en fonction des conditions du milieu et sous l'influence de certaines techniques. Ce modèle a été complété récemment pour décrire différents processus mis en jeu dans le pathosystème pêcher – monilioses (Thèse C. Gibert, 2007), notamment ceux jouant sur la vitesse de croissance des fruits (alimentation hydrique et charge en fruits de l'arbre), et par ce biais sur la génération des fissures cuticulaires.

Nous présentons seulement les résultats relatifs à la qualité des fruits issus des travaux expérimentaux réalisés sur la nectarine Zéphir pour paramétrer les équations et les grandes tendances qui se dégagent des simulations réalisées pour tester *in silico* des scénarios techniques. Sur un traitement non limitant en eau ou sur des arbres à faible charge en fruits, de 10 à 12,5% de la surface du fruit peut être recouverte par des fissures. Cette proportion tombe à 4,5% lorsque l'alimentation hydrique est restreinte (Gibert *et al.*, 2007). La probabilité d'infection par les monilioses augmente en fonction de la densité de conidies présentes dans l'environnement du fruit et de la proportion de surface de l'épiderme recouverte de fissures cuticulaires (Gibert *et al.*, 2009). Le modèle permet de décrire correctement l'influence des techniques culturales comme l'éclaircissage et l'irrigation sur la composition des sucres dans la pulpe et les probabilités d'infection par les monilioses. A titre d'exemple, la figure 4 montre les simulations de la concentration des 4 principaux sucres dans la pulpe de la nectarine Zéphir par comparaison avec les données observées dans plusieurs expérimentations faisant varier la charge en fruits et l'irrigation (Gibert, 2007). Malgré une simulation perfectible de la teneur en glucose et dans certains cas du sorbitol, le modèle reproduit assez bien les tendances observées dans les cinétiques du saccharose, du fructose et l'indice du caractère sucré.

Ce modèle, qui bénéficie d'amélioration progressive en fonction de l'avancée des connaissances, a été utilisé pour évaluer l'effet de scénarios techniques variés sur différents critères de performances (Gibert, 2007). Les multiples scénarios techniques résultent d'une combinaison de techniques incluant la gestion de l'irrigation, les dates et l'intensité de l'éclaircissage des fruits, la densité de conidies dans le milieu et la protection phytosanitaire. Les critères de performance pris en compte sont la qualité des fruits (masse de fruit, calibre, composition en sucres et caractère sucré), la proportion de fruits malades, le rendement commercial et la valeur marchande ainsi que la réduction des traitements fongicides.

Les résultats issus de ces simulations sont en accord avec les tendances présentées dans les paragraphes précédents. Ils mettent en évidence le rôle clé de la gestion hydrique et de la dimension des fruits sélectionnés lors de l'éclaircissage. Ce modèle est donc utilisable pour explorer et tester virtuellement un grand nombre de scénarios innovants ayant pour objectif de réduire l'usage des intrants (eau et produits phytosanitaires) tout en améliorant le profil de qualité organoleptique de la récolte.

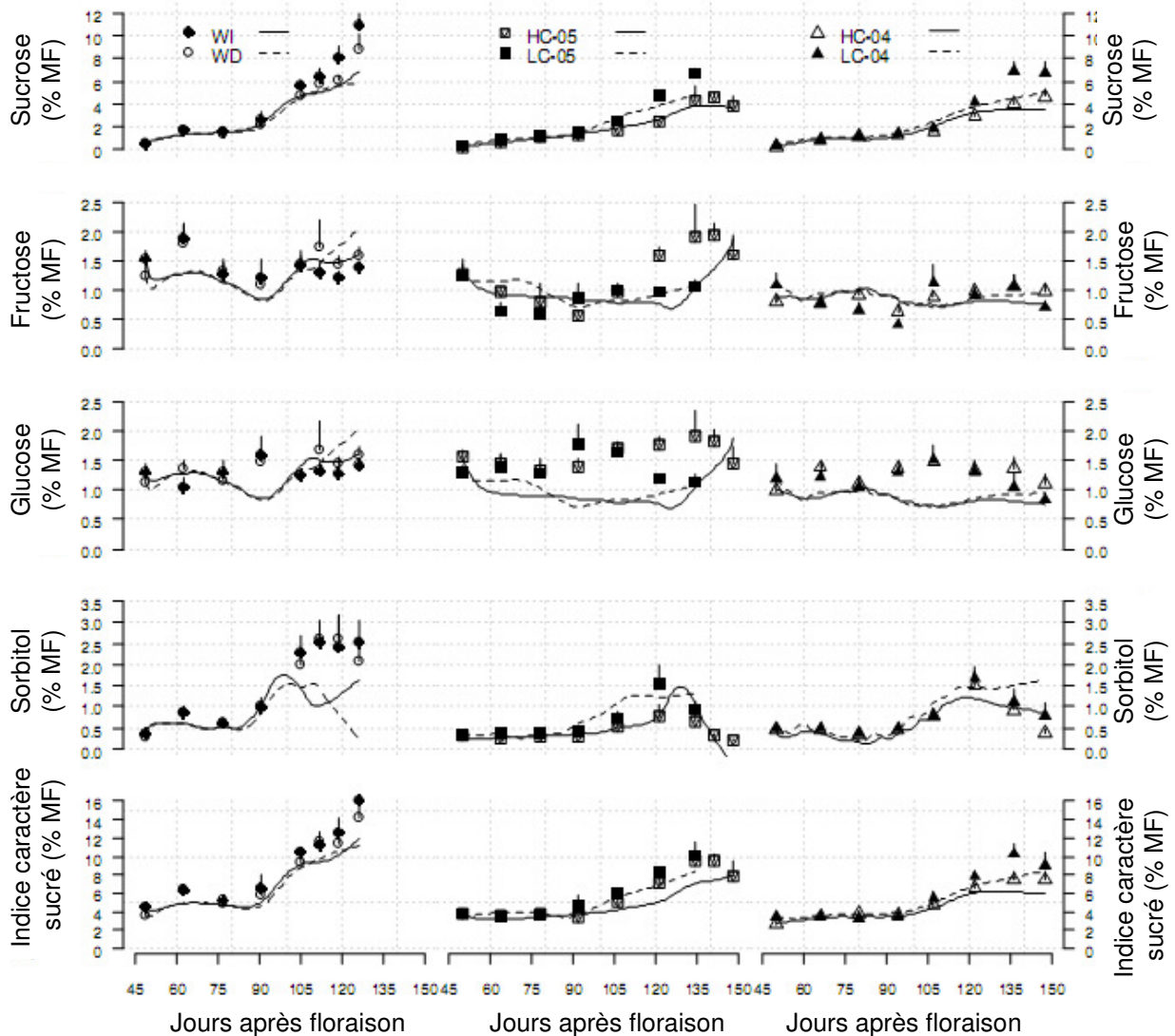


Figure 4. Évolutions de la concentration en sucres dans la pulpe de la nectarine Zéphir en fonction de différentes techniques culturales : HC, haute charge en fruits ; LC : faible charge pour les années 2004 et 2005 ; WI : Irrigation non limitante ; WD : déficit d'irrigation. Les concentrations sont exprimées en % de la masse de pulpe fraîche. Les points correspondent aux données observées \pm intervalles de confiance à 95% ; les lignes sont les simulations réalisées par le modèle (C. Gibert, 2007, Inra PSH).

3- Approche système en verger de pommiers : enseignements des premières années d'expérimentation

La production quantitative et qualitative de fruits est le résultat d'itinéraires techniques qui reposent – entre autres- sur des stratégies plus ou moins consommatrices d'intrants. L'approche 'système' qui se développe actuellement en arboriculture correspond à une vision élargie de la notion de qualité dans la mesure où i) l'ensemble des pratiques mises en œuvre dans le verger est considéré et ii) le suivi longitudinal et les évaluations multicritères permettent de caractériser les performances agronomiques des systèmes expérimentés mais également les conditions de production concourant à cette qualité, leur contraintes, leurs limites et leurs impacts, par exemple leur 'coût' environnemental.

Nous proposons ici quelques pistes pour discuter une notion élargie de la qualité du fruit, sur la base de l'expérience de conduite de vergers en AB depuis 1994 et de résultats obtenus dans le cadre d'un essai système en verger de pommiers localisé sur l'unité expérimentale INRA de Gotheron (Drôme). Implanté en 2005 sur 3,5 ha, ce dispositif vise à évaluer le niveau d'utilisation des pesticides et les performances agronomiques (incluant la qualité des fruits), technico-économiques et environnementales de 3 systèmes de protection :

- Conventionnel, sans prise de risques pour la gestion des bioagresseurs, donc principalement avec mise en œuvre de lutte chimique.
- Econome en intrants (ou bas-intrants), qui vise une réduction importante de l'utilisation des pesticides tout en préservant la qualité des fruits selon les préconisations de l'OILB. Ce système donne la préférence aux méthodes alternatives à la lutte chimique (lutte par confusion sexuelle contre le carpocapse, désherbage mécanique, etc.) et à la prophylaxie (enlèvement ou enfouissement des feuilles qui conservent l'inoculum de tavelure en hiver). Il repose également sur l'utilisation de diverses méthodes de prédiction du risque d'apparition de dégâts sur fruits à l'échelle de la parcelle (modèles de prédiction du risque pour le carpocapse et la tavelure, observations en verger) et sur l'utilisation de seuils d'intervention pour la gestion de chaque bioagresseur.
- Agriculture Biologique (AB), qui vise également une réduction de l'utilisation des pesticides autorisés en AB, avec respect des réglementations européenne et française.

Trois variétés de sensibilité différente à la tavelure (et à certains autres bioagresseurs) ont été implantées dans chacun de ces 3 systèmes permettant la création et l'évaluation de 9 systèmes de production (voir Brun *et al.*, 2007) : une variété de type 'Golden Delicious' (Smoothie®, INFEL® 2832), 'Ariane' résistante à la tavelure par le gène *Vf* (INFEL® 6407) et 'Melrose' (INFEL® 2643) peu à moyennement sensible à la tavelure et à l'oïdium. Le dispositif ne comporte pas de répétitions et ce sont donc des tendances ou des trajectoires de systèmes au fil du temps qui sont analysées.

Par ailleurs, en raison de l'âge du dispositif (5^e feuille en 2009), il est difficile de fournir des informations sur plusieurs années de production pour certains des critères utilisés pour évaluer les systèmes dans leur globalité. La plupart des données ne sont présentées qu'à titre indicatif pour l'étape « entrée en production du verger » et ne constituent en aucun cas les conclusions générales de l'expérimentation, notamment les résultats relatifs à la qualité des fruits et aux performances agronomiques ou environnementales des systèmes.

Les systèmes présentés (Figure 5) sont ceux pouvant être considérés comme des références (variété de type 'Golden Delicious' en Conventionnel) ou ceux permettant la plus forte réduction de l'utilisation des pesticides dans les systèmes AB et d'économie en intrants, avec une réduction moyenne de l'ordre de 50% sur la période 2006-2009 (-40 à -55%). L'Indice de Fréquence des Traitements (IFT) moyen (herbicides inclus) est de 35 pour le système Conventionnel planté avec la variété de type 'Golden Delicious' sensible à la tavelure.

Pour une variété donnée, le niveau de rendement est équivalent entre systèmes Conventionnel et Bas-intrants, avec toutefois un aléa climatique (gel) en 2008. Le système AB est plus lent à entrer en production (ex. Melrose AB) et apparaît moins productif (Figure 6).

Les critères usuels d'analyse de qualité des fruits sont présentés pour 2009, 1^{ère} année de forte production (Tableau 2). L'indice réfractométrique et l'acidité sont équivalents entre systèmes pour chacune des variétés à la récolte ou juste avant (mesure à la même date pour les 3 systèmes), avec une tendance à des valeurs en sucres légèrement supérieures en AB.

Au cours de la période 2006-2009, les dégâts sur fruits dus aux bioagresseurs sont très faibles en Conventionnel (total des dégâts tous bioagresseurs confondus variant de 0,4% à 2,3% en fonction des années et des variétés). En revanche, les dégâts dus aux bioagresseurs sont élevés en AB, en rapport avec des attaques de puceron cendré parfois très importantes (ex. 15 à 20% de fruits 'pygmées' en 2009).

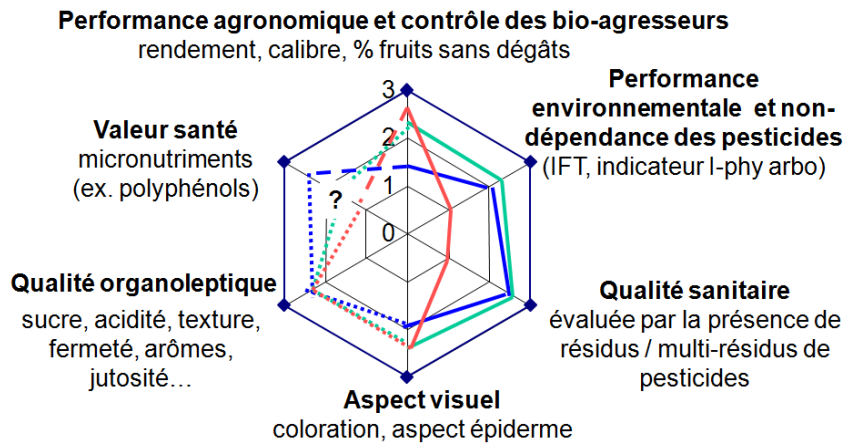


Figure 5. Représentation qualitative de quelques systèmes expérimentés à l'Inra Gotheron pour les différents critères relatifs aux fruits et à leur qualité. Les notes de 1 à 3 correspondent aux catégories (relatives) 'peu élevé', 'intermédiaire' et 'élevé' pour les paramètres indiqués sur les axes correspondants (données provisoires).

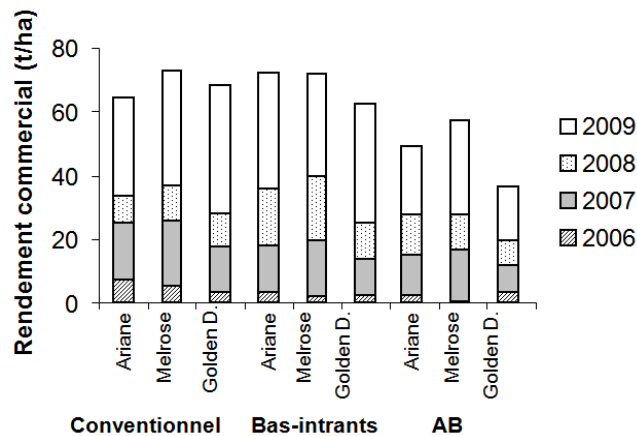
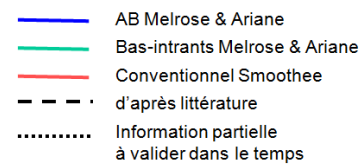


Figure 6. Rendement commercial cumulé de pommes pour la période 2006-2009 d'entrée en production (plantation 2005) pour les 9 systèmes expérimentés (Inra Gotheron)

Tableau 2. Qualité des fruits récolte 2009 (IR, Indice réfractométrique en %Brix ; Acidité en g d'acide malique/L de jus ; %1^{er} choix, % de fruit dans la catégorie 1^{er} choix, calibre dominant, plage des diamètres des fruits en mm ; ces données illustrent les résultats observés en 2009, mais ne permettent pas d'évaluer l'effet des systèmes dans leur globalité qui doit intégrer plusieurs années ; données Inra Gotheron)

| Mode de protection | Conventiennel | | | Econome en intrants | | | Agriculture Biologique | | |
|------------------------|---------------|---------|-----------|---------------------|---------|-----------|------------------------|---------|-----------|
| | Ariane | Melrose | Golden D. | Ariane | Melrose | Golden D. | Ariane | Melrose | Golden D. |
| IR récolte | 16.2 | 11.7 | 12.6 | 16.1 | 12.2 | 12.5 | 16.4 | 12.4 | 13.8 |
| Acidité | 12.9 | 8.1 | 7.0 | 13.0 | 8.5 | 7.8 | 12.6 | 8.9 | 7.9 |
| %1 ^{er} choix | 96.4% | 97.4% | 95.4% | 91.0% | 89.3% | 97.5% | 61.5% | 89.4% | 84.8% |
| Calibre dominant | 75-80 | 80-85 | >85 | 75-80 | >85 | >85 | 70-75 | 80-85 | >85 |

Le calibre des fruits peut également être plus faible, principalement en rapport avec des attaques précoces de puceron cendré qu'il n'est pas possible de maîtriser en AB dans le respect de la réglementation française. Les dégâts dus à la tavelure, principale maladie, sont faibles pour la variété peu sensible (Melrose) dans les systèmes de protection AB et Econome en intrants (< 1,3%, à l'exception de Melrose AB 2008 avec 4%). Les dégâts dus aux Tortricidae (carpocapse et autres tordeuses) sont proches pour ces deux systèmes de protection basés sur l'utilisation de la confusion sexuelle sans protection systématique des pics de vol (utilisation de seuil d'intervention) ; ils varient sans augmentation au fil des années (maximum 3%), et les dégâts de tordeuses prédominent.

En revanche, le système de protection conventionnel qui permet le plus haut niveau de performance pour le contrôle des bioagresseurs et qui produit des fruits de calibre élevé satisfaisant les standards commerciaux usuels est également celui qui est le plus dépendant des pesticides (IFT moyen = 35 pour Smoothee) et pour lequel les résidus de pesticides sont certes inférieurs aux LMR mais sont souvent multiples et toujours détectés quelle que soit l'année (analyses en 2008 et 2009, non présentées). Globalement, par rapport au système Conventionnel de référence, les systèmes économes en intrants plantés avec les variétés Melrose ou Ariane sont ceux présentant le meilleur compromis entre réduction importante de l'utilisation des pesticides (de l'ordre de -50% en moyenne sur 4 ans), rendement et dégâts sur fruits dus aux bioagresseurs.

En AB, l'existence de certains verrous techniques en production de pommes accentue l'existence d'un « transfert » de niveau de performances entre non-utilisation des pesticides conventionnels et contrôle des bioagresseurs : si la réduction de l'utilisation des pesticides est réelle dans les systèmes AB plantés avec des variétés peu/non sensibles à la tavelure et en utilisant la confusion sexuelle, une augmentation des dégâts sur fruits (dont ceux dus au puceron cendré) est généralement constatée pour ce mode de production. En revanche, la teneur en polyphénols totaux des fruits produits en AB est souvent supérieure à celle des fruits issus de systèmes conventionnels et/ou plus intensifs (Carbonaro et Mattera, 2001 ; Fauriel *et al.*, 2007 ; Lamperi *et al.*, 2008) pour un bénéfice santé potentiellement accru lors de la consommation de fruits AB. Cependant, la bibliographie fait état de données contradictoires (Valavanidis *et al.*, 2009) ou souligne l'importance des fluctuations temporelles souvent supérieures aux effets des méthodes de production (Strake *et al.*, 2009). Des études bibliographiques récentes (AFSSA, 2003 ; Amiot-Carlin *et al.*, 2007) montrent qu'il est parfois difficile de conclure sur l'impact des systèmes de culture sur certains attributs de la qualité nutritionnelle, mais s'accordent généralement sur une amélioration de la teneur en micronutriments ayant des propriétés anti-oxydantes dans les systèmes de production en agriculture biologique (Lairon, 2010). A noter aussi que les résultats parfois contradictoires peuvent s'expliquer par la diversité des pratiques relevant d'un même mode de production et par la faible quantité de données disponibles. Ceci confirme l'intérêt de dispositifs permettant des analyses précises des effets des systèmes de culture sur la qualité des fruits.

En conclusion provisoire, il ressort que malgré des 'points forts' différents et des limites pointées dans le cadre de cette expérimentation, certains des systèmes Economes en intrants et AB testés semblent des candidats pertinents pour satisfaire des critères de qualité organoleptique, de santé et de coût environnemental. Ce sont notamment ceux qui intègrent un ensemble de méthodes alternatives à la lutte chimique et implantés avec des variétés résistantes ou peu à moyennement sensibles aux bioagresseurs.

Conclusion

Face aux défis que doit relever l'arboriculture pour concilier performance économique, haute qualité des fruits et réduction des impacts environnementaux, nous avons cherché à illustrer l'intérêt supplémentaire d'intégrer ces objectifs dès les premières étapes de conception des scénarios techniques ou des systèmes de culture et de les évaluer dans leur ensemble par des analyses multicritères. Ceci ouvre plusieurs pistes de réflexion.

L'arboriculture se caractérise par la pérennité de ces systèmes de production. Les choix techniques réalisés lors de la plantation vont influencer très fortement certains critères de performances sur le long terme. Le choix variétal est un élément déterminant par le poids des déterminismes génétiques sur le profil sensoriel du fruit, son potentiel de production et son aptitude à résister ou tolérer les attaques des bioagresseurs. C'est donc à partir du choix variétal qu'il faut concevoir les systèmes de culture répondant aux objectifs de la PFI, ce qu'illustrent parfaitement les premiers résultats de l'expérimentation système de l'Inra Gotheron. Cependant, les variétés adaptées à ces objectifs multiples sont malheureusement très peu nombreuses ou elles ont un attrait commercial limité dans les circuits standards de commercialisation. L'absence de prise en compte des critères de qualité organoleptique, de qualité sanitaire (résidus) et de santé (micronutriments) par rapport aux critères commerciaux usuels, parfois sans vraiment d'intérêt qualitatif (aspect visuel), biaise aussi inutilement l'évaluation des variétés ou des systèmes. A titre d'exemple, une pomme comme Melrose est souvent jugée insuffisamment colorée par rapport aux bicolores actuelles, et le fait de la produire avec deux fois moins de traitements n'a actuellement aucune valeur commerciale en dehors de circuits de vente directe ou de proximité.

Des recherches sont en cours pour lever ce verrou variétal (Durel *et al.*, 2007 ; Costes *et al.*, 2009). Mais le pas de temps long de l'innovation variétale incite à imaginer et tester dès maintenant des itinéraires techniques associant judicieusement des méthodes à effets partiels permettant de diminuer la vulnérabilité du système aux bioagresseurs, même avec le matériel végétal 'sensible' actuellement disponible. Ces recherches peuvent mettre en évidence des interactions positives comme illustrées par le cas du pathosystème pêcher – monilioses qui permettent une diminution de la sensibilité des fruits au champignon et l'augmentation de la qualité des fruits grâce à une gestion raisonnée de l'irrigation, en relation avec d'autres techniques (charge en fruits, manipulations de l'architecture, etc.).

L'intérêt d'une évaluation multicritères est de ne pas préjuger d'une méthode ou d'un système de production sur la base de quelques critères jugés *a priori* 'négatifs' (voire réhivitoires) dans le contexte actuel, mais d'envisager leur intérêt et leur performance pour répondre à des enjeux bien définis, dans des contextes de production ou de commercialisation différents de ceux prévalant actuellement. Le cas de l'amélioration de la qualité des fruits grâce à l'application de restrictions hydriques sur le pêcher est typique. Ces techniques n'ont jusqu'à présent pas été adoptées à cause des risques de réduction des calibres à la récolte, les autres critères n'étant pas comptabilisés dans l'évaluation de la technique (qualité gustative et nutritionnelle, économie d'eau, possibilité de réduire les fongicides, etc.).

L'évaluation des systèmes de culture pérenne doit forcément être réalisée sur des pas de temps longs (au moins une dizaine d'années) pour intégrer la période d'installation du verger et au minimum 5 à 6 années de pleine production. Cette durée est aussi le seul moyen de prendre en compte la variabilité due aux années climatiques et certains processus cumulatifs comme l'évolution de la fertilité du sol ou des populations de ravageurs et d'auxiliaires présents dans le verger. Il s'agit de vérifier si certaines performances 'positives' des systèmes évalués ne peuvent pas devenir des points critiques au cours du temps comme par exemple le contournement d'une résistance variétale. Il existe par exemple peu de références sur la qualité des fruits issus de systèmes très économes en intrants, la majorité des références sur le sujet étant ciblée sur l'analyse comparative des systèmes AB vs conventionnels.

La conception de ces systèmes innovants questionne fortement la recherche et l'expérimentation. Les références pour piloter ces nouveaux systèmes doivent souvent être réajustées : quels seuils de potentiels hydriques pour déclencher l'irrigation dans un système basé sur des déficits modérés pour trouver le meilleur compromis entre la qualité des fruits et les autres critères de performances ? Quels seuils d'intervention pour gérer chaque bioagresseur avec une prise de risques modérée sans compromettre l'intégrité du verger sur le long terme ? Plus largement, la conception et l'évaluation de stratégies intégrées nécessitent l'utilisation de méthodologies adaptées (prototypage, utilisation des modèles, évaluation multicritère, etc.) qui sont souvent des ruptures fortes avec les méthodes expérimentales classiques. Il est aussi utile de repenser les dispositifs à mettre en place pour évaluer

les systèmes de culture innovants et pour accompagner leur apprentissage par les producteurs : les initiatives prises dans d'autres filières (Réau *et al.*, 2010) devront être adaptées à l'organisation du réseau recherche – développement de la filière fruits et à l'évolution de la posture du conseil agricole dans ces filières.

L'appropriation de ces nouveaux enjeux par tous les acteurs de la filière fruits, notamment par les producteurs qui sont les premiers acteurs du changement, invite aussi à réexaminer la valorisation économique des fruits issus de systèmes de production plus durables. L'effort demandé aux producteurs pour relever ces défis doit être rémunéré à sa juste valeur : les marges actuelles laissées à la production sont un frein pour la mise en place de démarches laissant aux acteurs une part d'initiative importante dans la mise en œuvre du changement technique. Actuellement, l'instauration de relations entre producteurs et consommateurs (ex. AMAP), permettant une prise de risques assumée collectivement et non plus individuellement, est un des rares contre-exemples. Pour la majorité des exploitations, la quasi-absence d'alternatives aux systèmes de production et de commercialisation actuels conditionne et « verrouille » les choix de conception et de conduite du verger. Une mobilisation coordonnée de l'ensemble des acteurs de la filière (producteurs, distribution, consommateurs, développement agricole et chercheurs) est donc nécessaire pour définir les conditions notamment économiques permettant d'accompagner ces changements et pour reconstruire des systèmes de production durable, économiquement viable, et produisant des fruits de haute qualité.

Remerciements

Les résultats présentés dans cet article sont issus de travaux de recherches collectifs de l'Inra Gotheron et de PSH. Nous remercions A. Alaphilippe, D. Bancel, L. Brun, C. Bussi, F. De Bruyne, H. Gautier, M. Génard, C. Gibert, L. Gomez, J. Hostalery, V. Mercier, P. Rouet, S. Sérino, V. Serra, ainsi que les collègues des Unités Expérimentales de Gotheron et St Paul. Nous remercions aussi vivement Ph. Blanc, P. Guinet, C. Hilaire et E. Navarro. Certaines de ces recherches ont bénéficié de l'aide financière de la région PACA, du Ministère MEEDDM, de l'Europe (programme Irriqual) et de l'Agence Nationale de la Recherche (programme ADD - Géduplic).

Références bibliographiques

- AFSSA, 2003. Evaluation nutritionnelle et sanitaire des aliments issus de l'agriculture biologique. Rapport AFSSA, 233 p.
- Amiot-Carlin M.-J., Caillavet F., Causse M., Combris P., Dallongeville J., Padilla M., Renard C., Soler G. L. (Eds.), 2007. Les fruits et légumes dans l'alimentation. Enjeux et déterminants de la consommation, Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA, France, 80 p.
- Aubertot N.J., Barbier M.J., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I., Voltz M., 2005. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Paris, France.
- Becel C. 2010. Croissance racinaire en verger de pêchers. Influence de la distribution de l'eau dans le sol et de la disponibilité en assimilats carbonés, Thèse Docteur en Sciences Agronomiques, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, INRA PSH Avignon. pp. 143.
- Besset J., Génard M., Girard T., Serra V., Bussi C., 2001. Effect of water stress applied during the final stage of rapid growth on peach trees (cv. Big-Top). *Scientia Hort.* 91, 289-303.
- Brun L., Didelot F., Parisi L., 2007. Stratégies de protection innovantes contre la tavelure du pommier: conception, évaluation et intégration en verger. *Innovations Agronomiques* 1, 33-45.
- Bussi C., Huguet J.G., Besset J., Girard T., 1999. Irrigation scheduling of an early maturing peach cultivar using tensiometers and diurnal changes in stem diameter. *Fruits* 54, 57-66.
- Butault J.P., Dedryver C.A., Gary C., Guichard L., Jacquet F., Meynard J.M., Nicot P., Pitrat M., Reau R., Sauphanor B., Savini I., Volay T., 2010. Ecophyto R&D. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? Synthèse du rapport d'étude, INRA Editeur, Paris, France, 90 p.

- Carbonaro M., Mattera M. 2001. Polyphenoloxidase activity and polyphenol levels in organically and conventionally grown peach (*Prunus persica* L., cv. Regina bianca) and pear (*Pyrus communis* L., cv. Williams). *Food Chemistry* 72, 419-424.
- Costes E., Lauri P.E., Laurens F., Durel C.E., Parisi L., 2009. Construire un idéotype de variétés de pommier pour des vergers agronomiquement performants et à faibles intrants. *Innovations Agronomiques* 7, 49-64.
- Cottet V., Seni G., Hilaire C., 2009. Pour connaître les attentes des consommateurs : la cartographie externe des préférences. Application à la pêche dans le cadre du projet ISAFRUIT. *Infos-CTIFL* 253, 19-23.
- Cross J., 2002. Guidelines for Integrated Production of Pome Fruits in Europe - Technical guideline III, IOBC/WPRS Bull. 25(8), 1-45.
- Debaeke Ph., Munier-Jolain N., Bertrand M., Guichard L., Nolot J.M., Faloya V., Saulas P., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. *A review. Agron. Sustain. Dev.* 29, 73-86.
- Durel C.E., Laurens F., Caffier V., LeCam B., Sapoukhina N., 2007. Les apports de l'innovation varétale : recherches menées pour améliorer la résistance du pommier à la tavelure. *Innovations Agronomiques* 1, 47-61.
- Fauriel J., Bellon S., Plénet D., Amiot M.J., 2007. On-farm influence of production patterns on total polyphenol content in peach. In: Niggli U., Leifert C., Alfoldi T., Luck L., Willer H. (Eds) *Improving sustainability in organic and low input food production systems. Proceedings of the 3rd International Congress of the European Integrated Project Quality Low Input Food (QLIF)*, University of Hohenheim, Germany, 20-23 March 2007, pp. 122-125.
- Génard M., Dauzat J., Frank N., Lescourret F., Moitrier N., Vaast Ph., Vercambre G. 2008. Carbon allocation in fruit trees: from theory to modelling. *Trees* 22, 269-282.
- Génard M., Lescourret F., Gomez L., Habib R., 2003. Changes in fruit sugar concentrations in response to assimilate supply, metabolism and dilution: a modeling approach applied to peach fruit (*Prunus persica*). *Tree Physiol.* 23, 373-385.
- Giauque P., Moras P., Moreau-Rio A.M., Scandella D., Kraeutler E., 1997. *La pêche : Consommation et itinéraire qualité*. Ctifl - SEFRA, Paris.
- Gibert C., 2007. Génération de fissures cuticulaires sur la pêche (*Prunus persica* (L.) Batsch) en réponse à des opérations culturales. Conséquences pour la qualité et la contamination par les monilioses. Thèse Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, INRA Avignon, France p. 149.
- Gibert C., Chadeuf J., Vercambre G., Génard M., Lescourret F., 2007. Cuticular Cracking on Nectarine Fruit Surface: Spatial Distribution and Development in Relation to Irrigation and Thinning. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 132, 583-591.
- Gibert C., Chadeuf J., Nicot P., Vercambre G., Génard M., Lescourret F., 2009. Modelling the effect of cuticular crack surface area and inoculum density on the probability of nectarine fruit infection by *Monilinia laxa*. *Plant Pathology* 58, 1021-1031.
- Girona J., Mata M., Arbonès A., Alegre S., Rufat J., Marsal J., 2003. Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 128, 432-440.
- Goldhamer A.D., Fereres E., 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrig. Sci.* 20, 115-125.
- Huguet G.J., Li S.H., Pelloux G., Lorendeau Y.J., 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. *J. Hort. Sci.* 67, 631-640.
- Huguet J.G., Génard M., 1998. Irrigation et qualité des fruits. In: Tiercelin, R.J. (Ed.), *Traité d'irrigation*. Lavoisier, Technique et Documentation, Paris, pp. 276-288.
- Jeuffroy M.H., Bergez J.E., David C., Flénet F., Gate P., Loyce C., Maupas F., Meynard J.M., Reau R., Surleau-Chambenoit C., 2008. Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale : bilan et perspectives. In: Reau, R., Doré, T. (Eds.), *Systèmes de culture innovants et durables. Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri éditions, Dijon France, pp. 109-128.

- Lairon D. 2010. Nutritional quality and safety of organic food. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 33-41.
- Lamine C., Meynard J.M., Bui S., Messéan A., 2010. Réductions d'intrants : des changements techniques, et après ? Effets de verrouillage et voies d'évolution à l'échelle du système agri-alimentaire. *Innovations Agronomiques* 8, 121-134.
- Lamperi L., Chiuminatto U., Cincinelli A., Galvan P., Giordani E., Lepri L., Del Bubba M. 2008. Polyphenol Levels and Free Radical Scavenging Activities of Four Apple Cultivars from Integrated and Organic Farming in Different Italian Areas. *J. Agric. Food Chem.* 56, 6536–6546.
- Lauri P.E., 2002. From tree architecture to tree training - An overview of recent concepts developed in Apple in France. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 43, 782-788.
- Lescourret F., Génard M., 2005. A virtual peach fruit model simulating changes in fruit quality during the final stage of fruit growth. *Tree Physiol.* 25, 1303-1315.
- Mahhou A., DeJong M.T., Shackel S.K., Cao T., 2006. Water stress and crop load effects on vegetative and fruit growth of 'Elegant Lady' peach (*Prunus persica* (L.) Batch) trees. *Fruits* 61, 407-418.
- Mercier V., Bussi C., Lescourret F., Génard M., 2009. Effects of different irrigation regimes applied during the final stage of rapid growth on an early maturing peach cultivar. *Irrig. Sci.* 27, 297-306.
- Mercier V., Bussi C., Plénet D., Lescourret F., 2008. Effects of limiting irrigation and manual pruning on brown rot incidence in peach. *Crop Protection* 27, 678-688.
- Mitchell D.P., Chalmers J.D., 1982. The effect of reduced water supply on peach tree growth and yield. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 107, 853-856.
- Naor A. 2006 Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards. *Horticultural Reviews* 32, 11-165.
- Navarro E., 2005. Contribution à l'amélioration des performances agronomiques en verger de pêcher. Mémoire Ingénieur DPE, AgroM, Montpellier, p. 84 p. + annexes.
- Navarro E., Plénet D., 2002. Taille en vert du pêcher : L'arrachage manuel précoce des pousses végétatives est-il une technique alternative ? *Réussir Fruits & Légumes* 209, 38-41.
- Plénet D., Navarro E., Besset J., Blanc P., Clauzel G., De Bruyne F., Fauriel J., Hillaire C., Mathieu V., Mercier V., 2006. Pêcher : Une alternative pour la Production Fruitière Intégrée. in MAFCOT : Connaître l'arbre pour mieux le conduire. *Réussir Fruits & Légumes Supplément au N° 247*, 24-25.
- Plénet D., Navarro E., De Bruyne F., Guinet P., Blanc P., Mercier V., Bussi C., Lescourret F. 2010. OptiPeach, a prototype of cropping system for Integrated Fruit Production in peach (*Prunus persica* L.) orchards: association of decision rules of a new fruiting branch training system and regulated deficit irrigation by micrometric trunk fluctuations, in: Wery et al. (Eds.), *Proceedings of Agro2010 the XIth ESA Congress*, 29 August - 3 September 2010, Montpellier, Agropolis International Editions, France, 1049 p. pp. 823-824.
- Réau R., Doré T. (Eds.), 2008. Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Educagri éditions, Dijon, France, 175 p.
- Réau R., Mischler P., Petit M.S., 2010. Evaluation au champ des performances de systèmes innovants en cultures arables et apprentissage de la protection intégrée en fermes pilotes. *Innovations Agronomiques* 8, 83-103.
- Simon S., Lauri P.E., Brun L., Defrance H., Sauphanor B., 2006. Does manipulation of fruit-tree architecture affect the development of pests and pathogens? A case study in an organic apple orchards. *J. Hort. Sci.* 81, 765-773.
- Stracke B.A., Rüfer C.E., Weibel F.P., Bub A., Watzl B. 2009. Three-Year Comparison of the Polyphenol Contents and Antioxidant Capacities in Organically and Conventionally Produced Apples (*Malus domestica* Bork. Cultivar 'Golden Delicious'). *J. Agric. Food Chem.* 57, 4598–4605.
- Valavanidis A., Vlachogianni T., Psomas A., Zovoili A., Siatis V. 2009 Polyphenolic profile and antioxidant activity of five apple cultivars grown under organic and conventional agricultural practices. *International Journal of Food Science & Technology* 44, 1167–1175.
- Willaume M., Lauri P.E., Sinoquet H., 2004. Light interception in apple trees influenced by canopy architecture manipulation. *Trees* 18, 705-713.

Wu Ben-Hong, Génard M., Lescourret F., Gomez L., Li Shao-Hua, 2002. Influence of assimilate and water supply on seasonal variation of acids in peach (cv Suncrest). *J. Sci. Food Agric.* 82, 1829-1836.