

Digitalisation tridimensionnelle des arbres pour l'analyse de systèmes de vergers de pommier

Anne-Marie POTEI et Ph. MONNEY, Centre des Fougères, CH-1964 Conthey
H. SINOQUET, Gabriela SONOHAT, UMR PIAF INRA-UBP, Site de Crouelle, F-63039 Clermont-Ferrand
P.-E. LAURI, INRA-UMR, Architecture et fonctionnement des espèces fruitières, F-34060 Montpellier

 E-mail: philippe.monney@rac.admin.ch
Tél. (+41) 27 34 53 511.

Résumé

Trois groupes de six pommiers Golden Delicious âgés de treize ans et conduits respectivement en axe vertical, Drilling et Ycare ont été digitalisés en 2004 et 2005 au Centre des Fougères à Conthey. Le principe de mesure développé par l'INRA (Centre de Clermont-Ferrand, France) permet d'obtenir une reproduction tridimensionnelle exacte des arbres. Pour l'analyse de la lumière, le STAR (*Silhouette to Total Area Ratio*) de chaque pousse, obtenu par simulation, permet de caractériser précisément la distribution de la lumière dans l'arbre.

Les résultats mettent en évidence l'importance des conditions annuelles dans l'évolution de la surface foliaire, qui ont généré une alternance de production partielle en 2^e année. En 2004, la distribution de la lumière est tout à fait comparable pour les trois systèmes. En revanche, en 2005, l'émergence d'un grand nombre de pousses végétatives entraîne une augmentation considérable de la surface foliaire menant à des différences entre procédés. La localisation de ces pousses (généralement à l'extérieur et dans le haut des couronnes) a pour corollaires une mauvaise répartition des fruits et un moindre éclairage des pousses génératives, en moyenne 40% de moins pour les trois systèmes.

L'éclairage des points de fructification potentiels devient insuffisant lorsque l'indice de surface foliaire (LAI) dépasse 3, ce qui est le cas pour les trois systèmes en 2005. La valeur atteinte par le Drilling est particulièrement élevée (LAI = 4,3) et l'ombrage provoque une diminution de 53% de l'éclairage des pousses génératives. L'alternance de floraison marquée, concentrant les pousses génératives à l'intérieur des arbres, n'est pas corrélée avec le système de conduite. Ce dernier contribue toutefois à l'explication de ce résultat.

Introduction

La lumière joue un rôle prépondérant dans la physiologie de l'arbre. Au fil des années, l'augmentation du volume des couronnes génère des zones d'ombre dans la canopée (lire l'encadré en page suivante), qui diminuent graduellement la qualité de la récolte par une hétérogénéité croissante du calibre, de la coloration et de la teneur en sucres des fruits. Connaître la distribution de

la lumière dans la canopée est donc essentiel pour déterminer l'éclairage nécessaire à la formation de fruits conformes aux exigences du marché. La mesure systématique de l'éclairage de chaque pousse n'étant pas envisageable concrètement, la recherche a développé le concept d'arbre virtuel. Les mesures s'effectuent ainsi par simulation sur une image tridimensionnelle (3D) obtenue à partir d'individus réels.

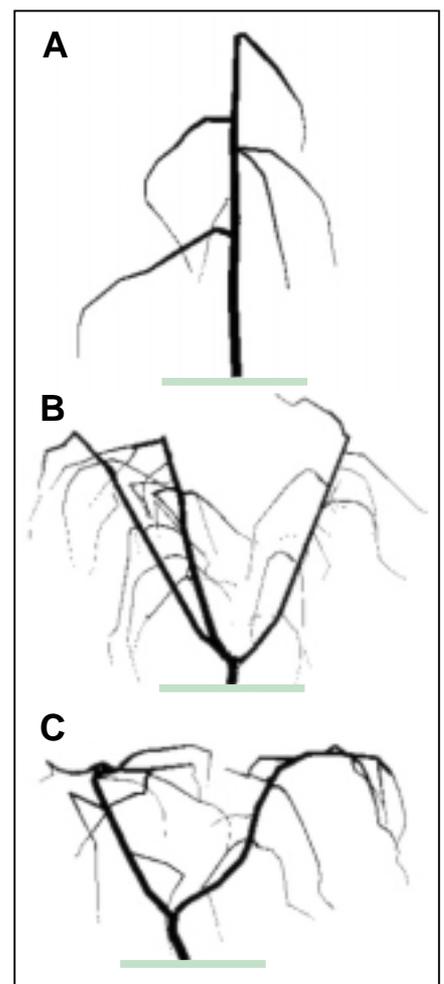


Fig. 1. Forme des arbres des systèmes axe vertical (A), Drilling (B) et Ycare (C).

L'alternance de production constitue une seconde source de difficultés sur les plans quantitatif (rendements irréguliers) et qualitatif. La qualité des récoltes peut s'avérer insuffisante chaque année:

Lexique

STAR (*Silhouette to Total Area Ratio*): mesure servant à calculer la lumière interceptée par une pousse à un moment donné. Le STAR se calcule à partir de la surface foliaire projetée perpendiculairement à la direction du rayonnement incident divisée par la surface foliaire totale. En d'autres termes, le STAR exprime la proportion de la surface foliaire directement éclairée par le rayonnement solaire par rapport à la surface totale.

Pousse: rameau annuel de quelques millimètres à plusieurs dizaines de centimètres de long.

Pousse générative: ensemble issu d'un bourgeon floral et formé d'une bourse et d'un axe feuillé (rameau annuel de longueur variable), communément appelé «pousse de bourse».

Pousse végétative: axe feuillé (rameau annuel de longueur variable) issu d'un bourgeon végétatif.

Canopée: ensemble du feuillage d'un arbre.

Coursonne: ensemble formé de pousses successives. Dans la terminologie courante, la coursonne désigne une ramification latérale de branche fruitière, le plus souvent constituée de bourses et de rameaux courts.

Synchronisme / asynchronisme: la coursonne peut avoir chaque année un fonctionnement florifère ou végétatif. Le fonctionnement est dit asynchrone lorsque les coursonnes sont toutes florifères ou toutes végétatives une même année, ce qui entraîne inévitablement une alternance de production. A l'inverse, le fonctionnement est asynchrone lorsqu'une partie des coursonnes sont à fleur et les autres végétatives.

Filiation: enchaînement de pousses matérialisées par les coursonnes. Chaque pousse est désignée par son caractère végétatif ou génératif dans l'ordre chronologique de l'année d'apparition. Les séquences sont utilisées pour caractériser les états successifs de la coursonne en position terminale, végétative (V) puis générative (G) en cas d'alternance ou au contraire uniquement générative en cas de régularité de floraison (séquences G-G-G indiquant des retours à fleur successifs).

LAI (*Leaf Area Index*): indice de surface foliaire caractérisant l'importance de la surface foliaire par unité de surface cultivée soit, en arboriculture, la surface foliaire des arbres divisée par la surface de sol occupé. Si la densité de plantation est de 2500 arbres par hectare et la surface foliaire moyenne par arbre de 10 m², le LAI du verger est de 10/4 = 2,5.

Lois d'allométrie: relation statistique entre la longueur de la pousse mesurée par digitalisation d'une part, la surface foliaire et le nombre de feuilles de la pousse d'autre part.

premièrement en année de forte charge et deuxièmement en cas d'alternance partielle avec une mauvaise répartition des fruits. Pour l'étude de l'alternance, d'autres méthodes que la digitalisation peuvent être utilisées. Toutefois, la localisation précise des points de fructification et l'étude des filiations (succession de l'état génératif ou végétatif des pousses) complétées par les données d'exposition à la lumière apportent des éléments de compréhension particulièrement intéressants.

L'application présentée ici repose sur la mise en valeur d'une partie des données obtenues durant deux années de mesure. Elle se limite à l'analyse des organes feuillés, soit une partie d'une étude plus vaste consacrée à l'influence de la lumière sur la qualité des fruits.

Matériel et méthodes

Matériel végétal et dispositif expérimental

L'étude a été réalisée au Centre des Fourgères d'Agroscope RAC Changins à Conthey (Valais central). La figure 1 présente les trois systèmes de conduite utilisés, précédemment décrits sur le plan agronomique par Monney et Evéquoz (1999):

- L'axe vertical, système de référence, est constitué d'un élément de charpente vertical, autour duquel se distribuent les branches fruitières.
- Le Drilling est constitué de trois charpentes obtenues par taille du scion à la

plantation. Les charpentes, maintenues par une armature, forment entre elles un angle d'environ 35°.

- L'Ycare est constitué de deux charpentes inclinées perpendiculairement à l'axe des rangs selon un angle identique au Drilling. La partie supérieure des charpentes est inclinée horizontalement de manière à obtenir un verger piéton d'une hauteur d'environ 2 m.

Pour chaque système, six arbres de la variété Golden Delicious greffés sur M9 clone Burgmer 981 ont été mesurés individuellement. Le verger était âgé de treize ans lors de la première année de mesure (2004). Les distances de plantation sont de 4 m entre les rangs, 1,25 m sur le rang pour les systèmes axe vertical et Drilling et 1 m pour le système Ycare, soit respectivement 2000 et 2500 arbres par hectare.

Taille et conduite des arbres

Pour les trois systèmes étudiés, la conduite est basée sur le même principe. Les branches et leurs ramifications secondaires ne sont pas raccourcies. Seule la suppression d'éléments entiers (branches ou ramifications surnuméraires mal éclairées) a été pratiquée à partir de l'entrée en production du verger.

Au début de la saison 2004, la dimension importante des coursonnes et la floraison particulièrement abondante ont exigé de compléter la taille d'hiver par une extinction artificielle. Environ 50% des inflorescences ont été supprimées manuellement sur tous les arbres au stade début floraison. Ensuite, les arbres n'ont subi aucune taille d'été ou d'hiver.

Détermination de la charge en fruits

La surface foliaire de chaque système avait été mesurée en 2002, soit en 12^e année de culture, dans une situation comparable à celle de 2004 du point de vue de l'abondance de floraison. La charge est donc déterminée selon un rapport feuille-fruit jugé optimal en fonction de l'expérience des années précédentes sur ce même verger (Monney et Henriot, 2003). Un éclaircissage chimique (ANA + NAD) a été appliqué en 2004 et complété manuellement à la mi-juin selon deux critères:

- charge par arbre de 20 à 25 fruits/m² de feuille;
- dans la mesure du possible, un seul fruit par inflorescence, exceptionnellement deux.

2005 se distingue par une alternance partielle de production. Le même objectif de charge qu'en 2004 a toutefois été appliqué sauf pour le nombre de fruits par inflorescence: la consigne d'éclaircissage prévoyait jusqu'à trois fruits/inflorescence sur les individus présentant un médiocre retour à fleur. Pour une charge équivalente, la répartition des fruits est donc moins bonne en 2005 qu'en 2004.

Digitalisation 3D

Méthode de digitalisation

La digitalisation est une méthode permettant de décrire avec précision l'architecture des plantes, la géométrie et la topologie de tous les organes de l'arbre. On obtient alors un modèle statique de plantes virtuelles, utilisé pour étudier les interactions entre ar-

chitecture, fonctionnement (comme dans l'étude de la photosynthèse chez le pêcher de Génard *et al.*, 2000) et variables environnementales à un instant donné. Pour cela, la reconstruction de la représentation en 3D s'effectue à deux niveaux:

Digitalisation 3D à l'échelle des pousses feuillées

Les coordonnées spatiales (x, y, z) de chaque pousse feuillée sont mesurées à l'aide d'un digitaliseur de type «Fastrack 3Space Pohlenmus» et du logiciel d'acquisition des données POL95 (Adam, 1999) en enregistrant la base et le sommet du segment pour toutes les pousses de l'arbre.

Digitalisation à l'échelle foliaire

La digitalisation de la feuille prend en compte l'angle d'insertion du pétiole autour de la pousse (phyllotaxie) et l'orientation (angle d'élévation et d'inclinaison) du limbe, pour toutes les feuilles d'un échantillon de vingt pousses par type de pousse. En parallèle, les caractéristiques des pousses (dimensions de chaque feuille, longueur, nombre de feuilles et surface foliaire) ont été mesurées à mi-juillet les deux années. Les six échantillons de vingt pousses ont été prélevés équitablement sur les trois formes d'arbre différentes. La surface foliaire a été mesurée à l'aide d'un planimètre (LI-3100, Li-Cor, Inc., Lincoln, NE, USA).

Les types de pousses sont:

- les bourses sans fruit (Ba) ou avec fruits (Bf);
- les pousses de bourse courtes (Pc), de moins de 4 cm, ou longues (Pl);
- les pousses végétatives courtes (Vc), de moins de 4 cm, ou longues (Vl).

Pour la compréhension des résultats, la bourse et la pousse dont elle est issue sont désignées ensemble sous l'abréviation G (pousses génératives), complétée par l'indication de longueur (Gc ou Gl), lorsque nécessaire.

Reconstruction du feuillage

La reconstruction du feuillage, d'après la méthode décrite par Sonhat *et al.* (2006), utilise des lois d'allométrie pour définir le nombre de feuilles et la surface foliaire totale portée par une pousse et pour générer la dimension des feuilles individuelles. La disposition et l'orientation des feuilles sont obtenues à partir des mesures sur le terrain et d'hypothèses supplémentaires (toutes les feuilles d'une même pousse ont la même surface, les feuilles sont réparties de façon uniforme le long de la pousse à distance constante). Selon le type de pousse que l'on veut étudier, un code de couleur est appliqué au feuillage puis utilisé pour le calcul de distribution de la lumière. Le vert caractérise les pousses végétatives, le bleu les pousses de bourses et le rouge les bourses. Les objets (autres pousses, charpente) dont l'éclairage ne doit pas être calculé sont représentés en noir et servent à l'ombrage des pousses étudiées (voir chapitre Calcul de distribution de la lumière).

Filiations

La filiation est l'enchaînement des pousses composant la coursonne. La méthodologie d'étude de ces séquences a été développée par Lauri *et al.* (1996a, 1996b). On distingue trois phénomènes:

- *l'extinction naturelle*: perte de fonctionnalité du bourgeon terminal, se manifestant par l'absence de croissance en 2005 sur la pousse mesurée en 2004. Le cas le plus fréquent est la bourse en position latérale du bois d'un an, lorsque celle-ci n'est pas suivie d'une pousse (fig. 2);
- *la pérennisation des coursonnes par extension du bourgeon terminal*: chaque séquence peut être formée d'une combinaison de bourses (G) indiquant la présence d'une inflorescence avec ou sans fruit et de pousses végétatives (V) caractérisées par une zone ridée en cas de pousse très courte, comme à la figure 3 qui résume l'histoire d'une coursonne au cours de quatre années consécutives. La présence de deux bourses consécutives traduit un retour à fleur dans l'enchaînement 1^{re}-2^e année suivi d'une phase d'alternance en 3^e et 4^e année. L'ensemble se résume par la séquence G-G-V-G (fig. 3);
- *l'apparition de nouvelles pousses*:
 - a. par le passage de la phase de latence à celle de fonctionnement sur du bois de deux ans et plus (L-V ou L-G);
 - b. par le développement des axillaires de bois d'un an, désignés par la seule lettre V dans le cas d'une pousse latérale végétative, ou G dans le cas d'une pousse latérale générative.



Fig. 2. Illustration de deux types de séquence de filiation, en position latérale de bois d'un an (G et V) et en position terminale (G-G ou V-G).



Fig. 3. Exemple d'une séquence illustrant différentes phases de l'histoire d'une coursonne. Succession d'états génératifs (G-G en 1^{re} et 2^e années) et alternance de production consécutive (G-V et V-G).



Fig. 4. Pousses végétatives longues issues de bois d'un an; séquence V en position latérale et G-V en position terminale, cette dernière illustrant un cas typique d'alternance de la coursonne.



Fig. 5. Reprise de croissance de bourgeons latents sur bois de deux ans et plus. Illustration de séquences L-V à partir de vieux bois.



Fig. 6. Fructification du bois d'un an en position latérale. Illustration du phénomène relativement peu fréquent de séquence G. La bourse terminale (séquence G-G ou V-G) ne porte pas de fruit.

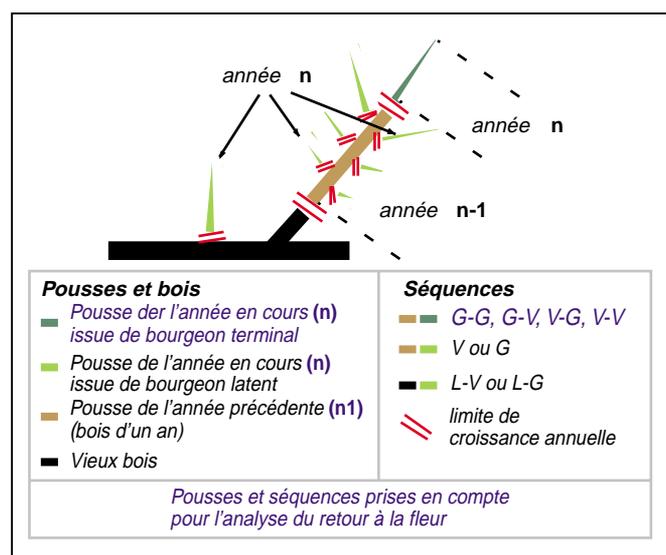


Fig. 7. Schéma résumant les différentes séquences possibles pour l'étude de l'alternance et de l'évolution de la surface foliaire.

Les figures 2, 4 et 5 présentent différents exemples: la figure 5 illustre le cas **a** avec le réveil de bourgeons latents sur vieux bois (L-V) sous forme de pousses courtes qui passent généralement par une phase végétative avant d'être capables de fructifier.

Les figures 2 et 4 illustrent le cas **b** avec le développement d'une ramification latérale respectivement courte (bourse et pousse végétative) et longue, le plus souvent végétative. La figure 6 illustre une situation plus rare, dépendant de la variété, où la fructification s'effectue sur un bourgeon latéral de bois d'un an (G).

Dans cette étude, basée sur deux années de mesure, la filiation se limite soit à une succession de deux lettres à six combinaisons possibles (fig. 7), soit à une séquence d'une lettre dans le cas du développement des axillaires (latéral sur bois d'un an). Quatre des combinaisons à deux lettres servent de base à l'étude quantitative de l'alternance et concernent l'ensemble des séquences caractérisées par le phénomène de pérennisation: G-G déterminant le retour à fleur, G-V et V-G l'alternance de floraison et V-V la succession de pousses végétatives. Les deux autres illustrent la phase de latence-fonctionnement (latence en 2004 et fonctionnement en 2005, soit les séquences L-G ou L-V) sur du bois de deux ans et plus âgé.

Calcul de distribution de la lumière dans la couronne

L'interception de la lumière par le couvert végétal est calculée à partir d'images de synthèse des plantes digitalisées (Sinoquet *et al.*, 1998). Les propriétés de l'interception de la lumière à l'échelle de la pousse sont analysées en mesurant le STAR (*Silhouette to Total Area Ratio*, en m^2/m^2): $STAR = SP/ST$ avec SP correspondant à la surface projetée perpendiculairement à la direction du rayonnement incident et ST à la surface totale.

Les calculs de STAR sont effectués à l'aide du programme VegeStar (Adam *et al.*, 2002). Ce programme permet de calculer l'interception lumineuse par le couvert foliaire dans 46 directions simulant le rayonnement de la voûte céleste. L'éclairement de chaque type de pousse peut donc être calculé. Les données sont traitées selon différentes options suivant le type de pousse étudié, à l'aide des codes de couleurs.

Une première option permet d'effectuer l'analyse du STAR global sur chaque type de pousse (Gc, Gl, Vc, Vl). Une deuxième calcule le STAR individuel des pousses génératives en fonction de leur position dans l'arbre. Une troisième option permet de réaliser la même opération pour chaque fruit.

Ces différentes options sont appliquées une à une à chaque individu de l'essai (arbre cible) placé au centre de 22 arbres représentant l'ensemble du verger. Ces derniers servent à simuler le report d'ombre engendré par leur structure et leur feuillage sur l'arbre cible (fig. 8). Cela permet de reproduire au mieux l'environnement lumineux réel du verger.

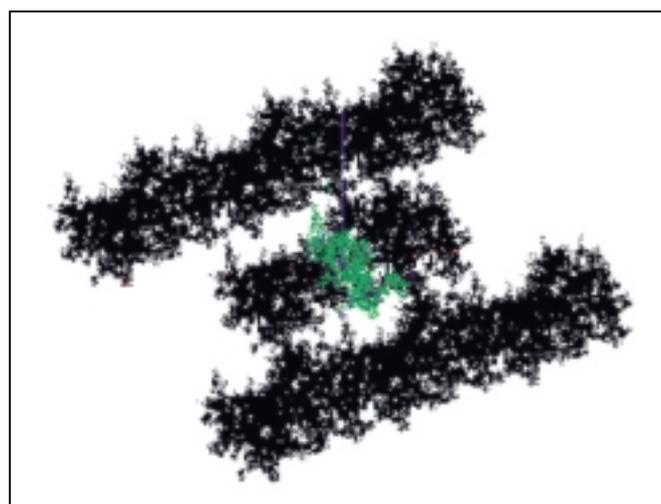


Fig. 8. Image informatique de 23 arbres utilisée pour l'analyse du rayonnement lumineux par le logiciel VegeStar. L'analyse s'effectue à l'échelle du verger en prenant en compte l'ombrage des 22 arbres entourant l'individu cible (en vert).

Mesures effectuées

Les mesures de digitalisation sur le terrain ont été effectuées de mi-juin à fin août 2004 et 2005 au moment où les organes végétatifs ont atteint leur complet développement. En 2005, la digitalisation des pousses a été complétée par l'enregistrement de leur filiation.

Résultats et discussion

Surface foliaire des arbres

En 2004, les surfaces foliaires sont relativement équivalentes à celles obtenues par Monney et Henriot (2003) en 2002. Les écarts sont respectivement de +2%, -15% et -12% pour l'axe vertical, le Drilling et l'Ycare. Dans les deux cas, le verger présentait une abondante floraison suivie d'une forte production. Pour les deux derniers systèmes, le LAI (*Leaf Area Index*) jugé légèrement excessif en 2002 s'approche en 2004 des valeurs définies comme optimales pour une bonne distribution de la lumière (tabl.1).

Entre 2004 et 2005, la surface foliaire évolue considérablement pour les trois systèmes. La différence entre les deux années est visible sur la figure 9 avec une augmentation supérieure à 60% en 2005 sur la moyenne des trois systèmes. Le tableau 2 montre que les écarts proviennent entre autres de l'augmentation de la surface foliaire moyenne des pousses, en particulier génératives. Ce phénomène est toutefois très limité comparé à l'augmentation du nombre de pousses végétatives, de 206 à 2707% selon les cas (fig. 9). Ces dernières sont particulièrement visibles dans la partie haute des couronnes.

La figure 10 montre l'importance relative des trois phénomènes décrits plus haut. L'extinction naturelle a été déterminée en soustrayant le nombre de pousses pérennisées (de 2004 et 2005) au total des pousses calculé d'après les effectifs de pousses de 2004. L'extinction concerne en moyenne 31% avec une faible variation entre les trois systèmes. Le nombre de pousses issu du phénomène de pérennisation a été calculé d'après le nombre de pousses issues en 2005 d'un bourgeon terminal

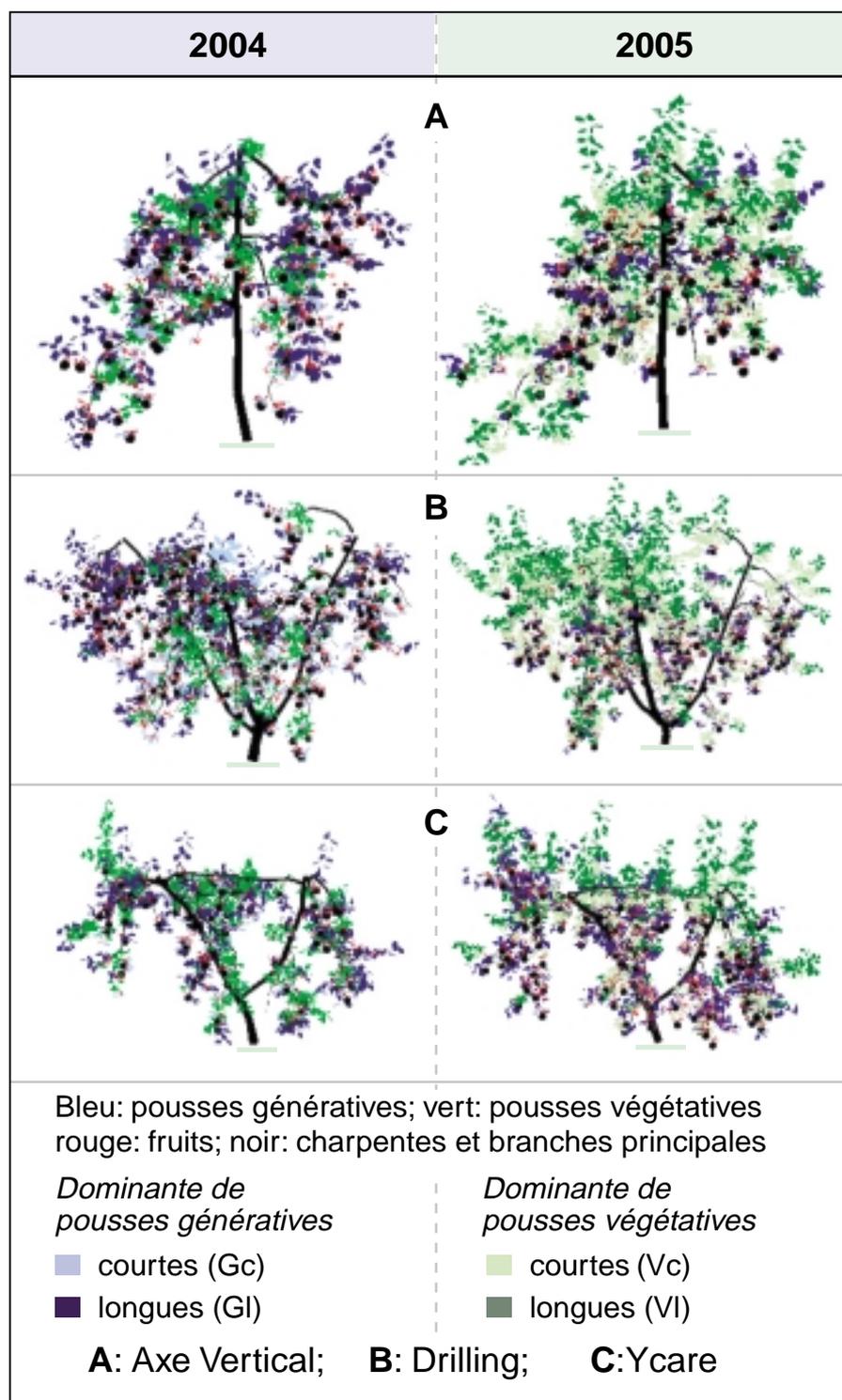


Fig. 9. Représentation d'arbres virtuels pour les trois systèmes étudiés. La disposition parallèle des deux années de mesure permet de comparer l'évolution de la surface foliaire, du nombre et de la répartition des différents types de pousses.

Tableau 1. Surface foliaire totale par arbre (m²), LAI et nombre de pousses par arbre pour les trois systèmes de conduite.

Forme	2004			2005		
	Surface foliaire (m ²)	LAI	Nombre de pousses	Surface foliaire (m ²)	LAI	Nombre de pousses
Axe vertical	8,9 (± 1,3)	1,8 (± 0,26)	450 (± 63)	15,3 (± 3,1)	3,1 (± 0,63)	1117 (± 199)
Drilling	13,6 (± 2,9)	2,7 (± 0,58)	661 (± 162)	21,5 (± 3,5)	4,3 (± 0,70)	1456 (± 270)
Ycare	9,0 (± 1,4)	2,3 (± 0,35)	417 (± 69)	14,4 (± 3,5)	3,6 (± 0,88)	1044 (± 257)

Moyennes obtenues sur six répétitions par système de conduite (écarts-type).

Tableau 2. Surface foliaire par pousse (cm²), nombre des différents types de pousses par arbre et évolution entre 2004 et 2005 pour les trois systèmes de conduite.

Forme	Surface foliaire par pousse (cm ²)							
	2004				2005			
	Gc	Gl	Vc	VI	Gc	Gl	Vc	VI
Axe vertical	128 (± 9,8)	269 (± 11,5)	96 (± 3,1)	306 (± 59,8)	165 (± 38,8)	300 (± 41,9)	105 (± 3,3)	256 (± 7,9)
Drilling	133 (± 3,9)	270 (± 8,5)	97 (± 2,2)	271 (± 35,1)	175 (± 46,0)	304 (± 123,4)	107 (± 2,5)	270 (± 6,2)
Ycare	171 (± 28,9)	278 (± 14,7)	101 (± 1,7)	309 (± 43,0)	195 (± 92,6)	389 (± 209,7)	102 (± 5,5)	292 (± 16,7)
Forme	Nombre total par type de pousses par arbre							
	2004				2005			
	Gc	Gl	Vc	VI	Gc	Gl	Vc	VI
Axe vertical	132 (± 45)	150 (± 37)	147 (± 29)	20 (± 10)	195 (± 49)	53 (± 17)	664 (± 112)	205 (± 62)
Drilling	255 (± 89)	207 (± 32)	188 (± 62)	12 (± 2)	227 (± 87)	63 (± 33)	831 (± 148)	337 (± 65)
Ycare	65 (± 18)	125 (± 29)	188 (± 43)	39 (± 9)	263 (± 123)	58 (± 26)	575 (± 213)	155 (± 75)

Moyennes obtenues sur six répétitions par système de conduite (écarts-type).
Gc = génératif court; Gl = génératif long; Vc = végétatif court; VI = végétatif long.

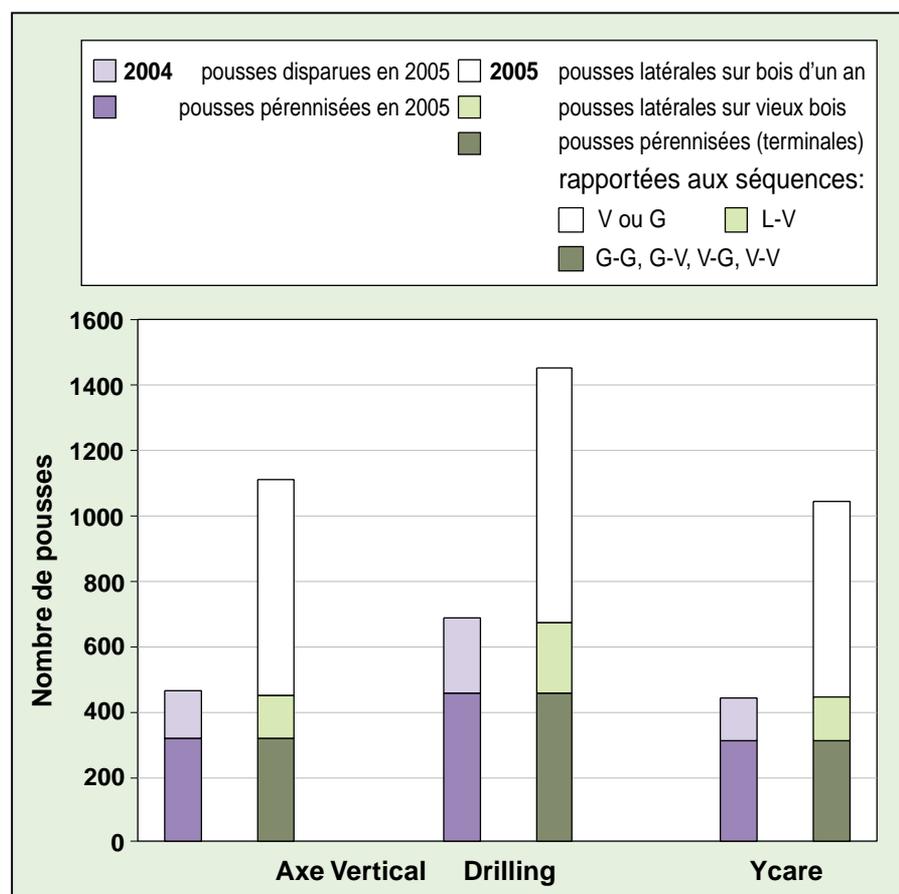


Fig. 10. Comparaison des effectifs des pousses mesurées en 2004 et 2005 pour les trois systèmes. La répartition en différents types illustre l'extinction (disparition d'une partie des pousses de l'effectif 2004), la pérennisation (effectif commun aux deux années) et l'émergence de nouvelles pousses, soit sur vieux bois, soit sur axillaires sur bois d'un an.

de 2004. Le pourcentage de pérennisation est presque identique pour les trois systèmes, avec respectivement 28%, 31% et 30%. L'apparition de nouvelles pousses (issues des bourgeons latents et des bourgeons axillaires sur bois d'un an) atteint quant à elle la proportion considérable de 70% en moyenne.

Alternance

Le tableau 3 présente l'effectif des pousses concernées par le phénomène de pérennisation en position terminale d'un organe fonctionnel. Les systèmes axe et Ycare se distinguent par de faibles écarts-type indiquant un fon-

Tableau 3. Nombre de pousses exprimé en % du nombre total par arbre et évolution en % entre 2004 et 2005 pour les trois systèmes de conduite (G: pousse générative; V: pousse végétative).

Forme	Nombre de pousses (%) du total par arbre			
	2004		2005	
	G	V	G	V
Axe vertical	62,8	37,2	22,2	77,8
Drilling	69,8	30,2	19,1	80,1
Ycare	45,5	54,5	31,6	69,5

Moyennes obtenues sur six répétitions par système de conduite.

ctionnement relativement homogène des six individus. La régularité est un peu moins bonne pour le Drilling.

L'essentiel du retour à fleur est assuré par les séquences G-G qui représentent environ 37 à 44% au niveau de l'arbre entier (tabl. 4); le plus faible pourcentage est à nouveau obtenu par le Drilling. Dans le cas de l'Ycare, il est intéressant de noter la proportion similaire de séquences G-V et V-G qui assure un nombre constant d'inflorescences d'une année à l'autre. L'asynchronisme d'environ 25% des coursonnes représente dans ce cas un facteur de régularité (Lauri et Lespinasse, 1996b).

Pour l'axe vertical, les séquences V-G constituent un supplément d'inflorescences non négligeable, alors que chez le Drilling, visiblement plus alternant, ce supplément ne représente que 4% des inflorescences en 2005.

La localisation du retour à fleur est illustrée par la figure 9. Dans le cas du Drilling qui présente des situations très contrastées entre les deux années, on observe en 2005 une concentration des points de fructification dans les rares

Tableau 4. Nombre total de séquences par arbre et proportion de l'évolution des pousses de 2004 vers une pousse générative (G) ou végétative (V) en 2005 pour les trois systèmes de conduite.

Forme	Nombre total de séquences par arbre	Types de séquences (% du nombre total de l'arbre)			
		G-G	G-V	V-G	V-V
Axe	317 (± 78)	41,7	44,2	11,1	3,0
Drilling	457 (± 139)	37,7	56,5	3,8	2,0
Ycare	315 (± 81)	44,0	24,0	26,4	5,6

G-G exprime la régularité de fructification au niveau de la séquence (retour à fleur sur pousse de bourse), G-V ou V-G exprime l'alternance, V-V la succession de deux pousses végétatives. Moyennes obtenues sur six répétitions par système de conduite (écarts-type).

zones de l'arbre où les pousses V étaient présentes en 2004. L'optimum de 25 fruits/m² de feuilles ayant été dépassé pour quelques individus, on note une relation inverse entre la charge et le pourcentage de séquences G-G, indicateur le plus sensible de l'alternance. La figure 11A illustre une tendance relativement modeste ($r^2 = 0,24$) sur l'ensemble des six arbres. La corrélation de la figure 11B est nettement meilleure ($r^2 = 0,66$) si l'on excepte le seul individu dont l'alternance en 2005 n'est pas le résultat direct d'une surcharge en 2004, puisque cet arbre est en effet globalement plus faible (surface foliaire et nombre de pousses réduits en 2004 par rapport aux autres répétitions).

Eclaircissement

L'analyse au moyen du STAR permet d'obtenir la distribution des éclaircissements pour une catégorie de pousses donnée. A titre d'exemple, le STAR des pousses génératives (G) en 2004 pour les trois systèmes est présenté à la figure 12. Dans les trois cas, on obtient sensiblement la même répartition: 65% des G ont un STAR inférieur à 0,4. La majorité des G sont faiblement éclair-

rées, car situées à l'intérieur de l'arbre ou ombrées par d'autres pousses.

La figure 13 présente une synthèse des résultats pour les deux années et les trois systèmes de conduite, exprimée par la moyenne du STAR pour chaque type de pousse.

En 2004, le système Ycare obtient des valeurs de STAR légèrement plus élevées que les deux autres pour les trois types de pousses représentées. L'éclaircissement nettement plus faible des pousses végétatives longues chez le Drilling constitue la principale différence entre les systèmes, sans grande incidence agronomique, car ce type est peu fréquent. Globalement, la forte proportion de pousses courtes détermine une surface foliaire relativement modérée par arbre. Cela explique les faibles écarts entre les systèmes et l'éclaircissement satisfaisant des organes génératifs portant les fruits.

En 2005, le déplacement du feuillage d'origine végétative vers l'extérieur des canopées entraîne une nette diminution de l'éclaircissement des pousses génératives, plus ou moins confinées à l'intérieur. L'analyse de leur STAR confirme des écarts nets entre les deux années (-44% en moyenne des trois systèmes) surtout pour le Drilling (-53%).

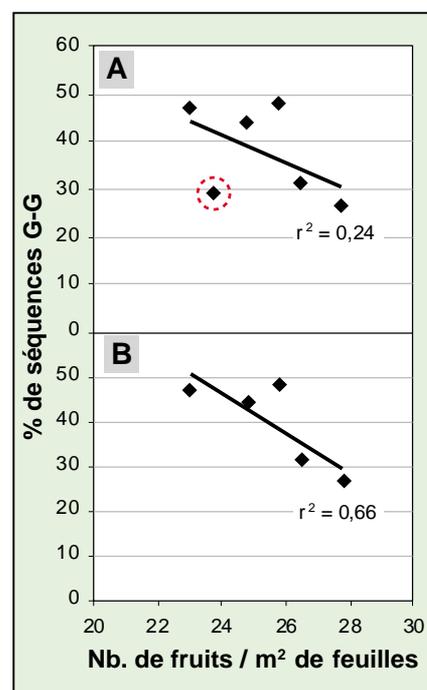


Fig. 11. Relation entre le pourcentage de séquences G-G et la charge en fruits pour le système Drilling. L'augmentation de la charge entraîne une diminution du retour à fleur (A: corrélation pour les six individus mesurés, B: corrélation pour cinq individus).

Par contraste, les pousses végétatives sont mieux éclairées grâce à leur localisation périphérique, en particulier dans la partie haute des arbres formés en Drilling et en Ycare (fig. 9). Pour le Drilling, l'alternance partielle de floraison provoquant une forte apparition de VL et la conception ouverte (forme en V) du système se conjuguent pour empêcher une bonne distribution de la lumière. Dans le cas de l'Ycare, l'absence d'alternance a limité la réaction végétative et ses conséquences sur l'éclaircissement des pousses génératives.

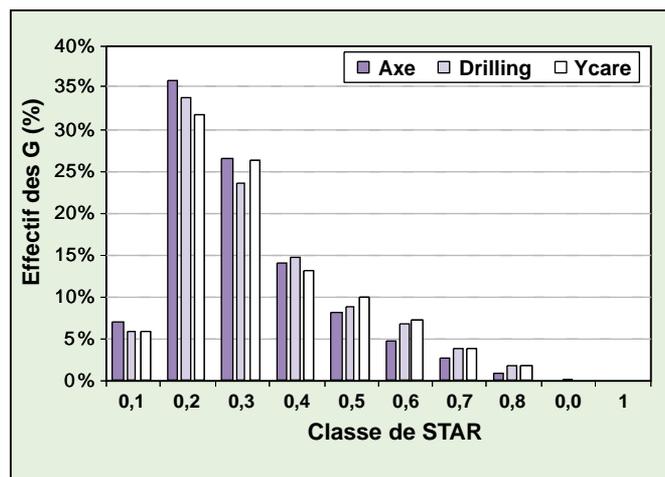


Fig. 12. Distribution des effectifs de pousses génératives en 2004 en fonction du STAR (*Silhouette to Total Area Ratio*) pour les trois systèmes.

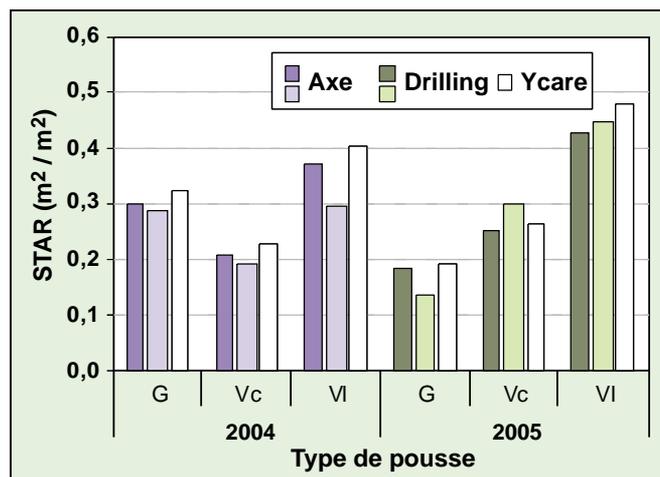


Fig. 13. Evolution inter-annuelle du STAR global des trois types de pousses influençant le plus la répartition de la lumière pour les trois systèmes.

Conclusions

- La digitalisation tridimensionnelle d'un pommier permet, entre autres, de calculer l'interception de la lumière dans certaines zones de l'arbre (profils) et de la mettre en relation avec la qualité des fruits selon leur localisation.
- Les mesures de l'éclaircissement effectuées en 2004 et 2005 apportent plusieurs enseignements sur la conduite des arbres, en particulier pour les deux systèmes ouverts:
 - Adapter les distances de plantation au potentiel de développement des arbres. Des distances minimales de 4,5 m entre les rangs et de 1,5-1,7 m et 1,2-1,5 m sur le rang, respectivement pour le Drilling et l'Ycare, maintiendraient le LAI dans les limites acceptables (2,5 à 3).
 - Limiter le nombre et le développement des branches situées à l'intérieur de la charpente de manière à éviter l'ombrage de la partie centrale des arbres.
 - Pratiquer un ébourgeonnement, une extinction artificielle et une taille en vert.

Bibliographie

- Adam B., 1999. Pol95 – software to drive a Polhemus Fastrak 3 SPACE 3D digitiser. Version 1.0. UMR PIAF INRA-UBP, Clermont-Ferrand.
- Adam B., Donès N. & Sinoquet H., 2002. VegeSTAR – software to compute light interception and canopy photosynthesis from images of 3D digitised plants. Version 3.0. UMR PIAF INRA-UBP, Clermont-Ferrand.

- Génard M., Baret F. & Simon D., 2000. A 3D peach canopy model used to evaluate the effect of tree architecture and density on photosynthesis at a range of scales. *Ecological Modelling* **128**, 197-209.
- Lauri P. E., Lespinasse J. M., Delort F., Térrouanne E. & Rodriguez R., 1996a. Pommier – Analyse des branches fruitières et régularité de fructification. *Fruits et Légumes* **146**, 23-27.
- Lauri P. E., Lespinasse J. M., Delort F., Térrouanne E. & Rodriguez R., 1996b. Pommier – Régulation de la ramification et de la fructification. *Fruits et Légumes* **147**, 26-28.
- Monney Ph. & Evéquois N., 1999. Etude de nouveaux systèmes de verger pour le pommier. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **31** (3), 153-158.
- Monney Ph. & Henriot C., 2003. Mesure de l'indice de surface foliaire et incidence agronomique sur le pommier. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **35** (4), 223-231.
- Sinoquet H., Thanisawanyangkura S., Mabrouk H. & Kasemsap P., 1998. Characterisation of light interception in canopies using 3D digitising and image processing. *Annals of Botany* **82**, 203-212.
- Sonohat G., Sinoquet H., Kulandaivelu V., Combes D. & Lescourret F., 2006. Three-dimensional reconstruction of partially 3D digitised peach tree canopies. *Tree Physiology*, sous presse.

Remerciements

Nos remerciements s'adressent en particulier à M^{lle} Claire Froment pour sa participation aux mesures de digitalisation et pour les photos illustrant l'article, à M. Nicolas Dones pour le soutien informatique et technique, à M^{lles} Beatriz Perez et Vanessa Kawecky, MM. Steve Gillioz et Noël Evéquois pour leur contribution aux mesures réalisées sur le terrain, ainsi qu'à M. Vivian Zufferey pour ses conseils et la lecture du manuscrit.

Summary

Three-dimensional tree-digitalization for system analysis of apple orchards

Three groups of six 13-years-old individual Golden Delicious trained in Vertical Axis, Drilling and Ycare were digitalised in 2004 and 2005 at the Centre des Fougères (VS, Switzerland) of Agroscope RAC Changins. Through a method of measurement developed by the INRA (Centre of Clermont-Ferrand, France) it is possible to obtain an exact three-dimensional reproduction of the trees. Light is analysed with the STAR (Silhouette to Total Area Ratio) of each shoot, obtained by simulation, that characterises precisely the distribution of the light in the tree.

The results highlight the importance of the annual conditions in the evolution of the leaf area, characterised by partial biennial bearing in the second year. In 2004, light distribution was comparable in the three systems, while in 2005 the considerable increase of the leaf area due to the emergence of a great number of vegetative shoots caused differences between treatments. The localisation of these shoots (generally at the margins and at the top of the crowns) resulted in a bad distribution of the fruits along with an average reduction of 40% in the illumination of the generative shoots for the three systems.

The illumination of the potential fructification points becomes insufficient when the leaf area index (LAI) exceeds 3, which was the case for all three systems in 2005. The value reached by the Drilling system was particularly high (LAI = 4,3) and the consequences of shading were particularly perceptible with a reduction of 53% of the generative shoots illumination. The particularly marked biennial bearing marked by a concentration of the generative shoots inside the trees is not directly linked to the training system. This one, however, helps to explain the result.

Key words: 3D digitizing, light distribution, leaf area, biennial bearing, apple, orchard system.

Zusammenfassung

Dreidimensionale Baumdigitalisierung zur Systemanalyse von Apfelanlagen

Im 2004 und 2005 wurden drei Gruppen zu je sechs 13jährigen Golden Delicious Einzelpflanzen, welche als Spindel, Drilling beziehungsweise Ycare gezogen wurden, am Forschungszentrum Fougères in Conthey digitalisiert. Das an der INRA (Centre de Clermont-Ferrand, Frankreich) entwickelte Messprinzip erlaubt eine genaue dreidimensionale Darstellung der Bäume. Für die Lichtanalyse erlaubt der für jeden Trieb durch Simulation erhaltene STAR-Wert (*Silhouette to Total Area Ratio*) die Verteilung des Lichtes im Baum genau zu beschreiben.

Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung des Jahreseinflusses auf die Entwicklung der Blattfläche, welche durch eine Teilalternanz im zweiten Jahr gekennzeichnet ist. Das Jahr 2004 wies in allen drei Systemen eine ähnliche Lichtverteilung auf. Das Jahr 2005 hingegen wies in Folge eines starken vegetativen Triebwachstums grosse Unterschiede zwischen den Verfahren auf. Die Position dieser Triebe (im allgemeinen im äusseren und oberen Bereich der Krone) hat eine schlechte Verteilung der Früchte zur Folge. Damit verbunden ist eine für die drei Systeme durchschnittliche 40% Verringerung der Beleuchtung der generativen Triebe.

Wenn der Blattflächenindex (LAI) den Wert 3 überschreitet ist die Beleuchtung der potentiell fruchtbildenden Stellen in allen drei Systemen stark ungenügend. Dieser Wert war im Jahr 2005 für das Drilling-System (LAI = 4.3) speziell gross und die Beschattung hat eine Abnahme der Beleuchtung der generativen Triebe um 53% zur Folge. Die stark ausgeprägte Blütenalternanz, welche zu einer Konzentration der generativen Triebe im Bauminnern führt, ist nicht dem Systemkonzept zuzuschreiben, hilft aber die Versuchsergebnisse zu erklären.

RIASSUNTO

Digitalizzazione tridimensionale degli alberi per l'analisi di sistemi di frutteti per il melo

Tre gruppi di 6 meli ciascuno di Golden Delicious dall'età di 13 anni e allevati rispettivamente ad asse verticale, Drilling e Ycare sono stati digitalizzati nel 2004 e 2005 presso il Centro delle Fougères a Conthey. Il principio della misurazione è stato sviluppato dall'INRA (Centro di Clermont-Ferrand, Francia) e permette di ottenere una riproduzione tridimensionale esatta degli alberi. Per l'analisi della luce, lo STAR (Silhouette to Total Area Ratio) di ogni ramo, ottenuto per simulazione, permette di caratterizzare precisamente la distribuzione della luce nell'albero.

I risultati evidenziano l'importanza delle condizioni annuali sull'evoluzione della superficie fogliare, le quali hanno generato un'alternanza parziale al secondo anno. Nel 2004, la distribuzione della luce è totalmente comparabile per i 3 sistemi. Al contrario, nel 2005, l'apparizione di un gran numero di rami vegetativi porta ad un considerevole aumento della superficie fogliare con differenze tra le tesi. La localizzazione di questi rami (generalmente all'esterno e nella parte alta delle corone) ha come conseguenza una cattiva ripartizione dei frutti accompagnata da una ridotta illuminazione dei rami generativi, minore in media del 40% per i 3 sistemi.

L'illuminazione dei potenziali punti di fruttificazione diventa insufficiente allorché l'indice di superficie fogliare (LAI) supera 3, ciò che è il caso per i 3 sistemi nel 2005. Il valore raggiunto nel 2005 dal Drilling è particolarmente elevato (LAI = 4,3) e l'ombreggiamento provoca una diminuzione del 53% dell'illuminazione dei rami generativi. La marcata alternanza di fioritura, concernente i rami generativi all'interno degli alberi, non è correlata con il sistema di potatura. Quest'ultimo contribuisce tuttavia alla spiegazione di questo risultato.