

Entreposage des pommes en atmosphère contrôlée dynamique

Séverine GABIOUD REBEAUD¹, Thomas EPPLER², Werner NAUNHEIM², Ernst HÖHN² et Franz GASSER²

¹Agroscope, 1964 Conthey

²Agroscope, 8820 Wädenswil

Renseignements: Séverine Gabioud Rebeaud, e-mail: severine.gabioud@agroscope.admin.ch, tél. +41 58 481 34 11, www.agroscope.ch



Microcellules expérimentales pour le stockage en atmosphère contrôlée dynamique.

Introduction

L'entreposage conventionnel des pommes en atmosphère contrôlée consiste à maintenir constants les paramètres de température, d'humidité relative et de composition atmosphérique (CO_2 , O_2). Des essais sont menés durant plusieurs années selon le principe «*trial and*

error» pour déterminer les conditions d'entreposage optimales pour chaque nouvelle variété. Les conditions d'entreposage recommandées sont établies de manière à garantir une certaine marge de sécurité vis-à-vis des changements de conditions climatiques et à éviter des situations provoquant des dégâts sur les fruits. L'entreposage en atmosphère contrôlée dynamique réduit

progressivement la teneur en oxygène dans la chambre d'entreposage jusqu'à atteindre la plus faible concentration possible sans endommager les pommes. Ce concept se base sur le principe qu'une faible concentration en oxygène réduit la perte de qualité durant l'entreposage (fig. 1). Si cette teneur descend au-dessous du seuil critique, appelé point d'inversion anaérobie, les pommes commencent à fermenter, ce qui altère la qualité et peut conduire à des pertes. L'entreposage en AC dynamique n'est possible que si des méthodes fiables permettent de détecter la concentration critique lors de la réduction de la teneur en oxygène. Des méthodes non destructives, la mesure du coefficient respiratoire (CR) et celle de la fluorescence de la chlorophylle F_{-a} , peuvent être utilisées à cette fin: lorsque la teneur en oxygène est trop basse, les pommes réagissent à ce stress en augmentant leur quotient respiratoire et en émettant plus de fluorescence F_{-a} . L'augmentation du CR reflète le passage du stade aérobie à anaérobie dans le métabolisme des fruits. L'augmentation de la fluorescence de la chlorophylle F_{-a} (correspondant à F_0) repose sur la réduction du pH dans les chloroplastes en conditions anaérobies (Prange *et al.* 2005). Ainsi, la mesure de ces deux paramètres convient pour contrôler et réguler l'AC dynamique. Dans cette étude, la détermination de la fluorescence de la chlorophylle a été testée et comparée avec la mesure du CR définie comme méthode de référence.

Matériel et méthodes

Simulation de l'AC dynamique

Les différents essais en AC dynamique ont été menés durant toute la saison d'entreposage (environ 200 jours) dans une installation pilote avec 10–11 kg de pommes par variante d'essai (variétés testées: Idared, Maigold, Elstar, Braeburn, Golden Delicious, provenance Agro-

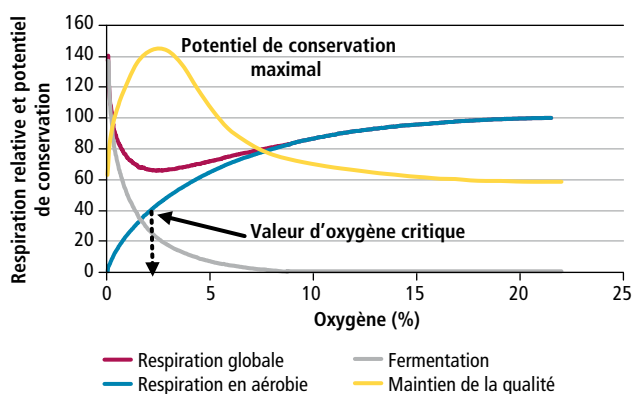


Figure 1 | Principe de l'entreposage sous atmosphère contrôlée dynamique.

Résumé L'atmosphère contrôlée dynamique (AC dynamique) consiste à diminuer progressivement la teneur en oxygène dans l'atmosphère d'entreposage jusqu'à la teneur la plus basse permettant de garantir la qualité des fruits durant le stockage. La concentration en oxygène ne doit cependant pas descendre en dessous du seuil critique pour éviter des dégâts d'asphyxie aux fruits. Deux méthodes ont été testées pour déterminer la concentration en oxygène critique lors de l'entreposage en AC dynamique de différentes variétés de pommes: la mesure du coefficient respiratoire et la fluorescence de la chlorophylle. Les deux techniques ont donné des résultats similaires. Les seuils critiques détectés se situaient entre 0,2 et 0,4 %, indépendamment de la variété de pomme testée. Une fois la valeur critique atteinte, la concentration en oxygène a été augmentée de 0,2 à 0,3 % au-dessus de ce seuil afin de sécuriser l'entreposage. Ainsi, les fruits ont pu être conservés durant près de 200 jours à un taux d'oxygène de 0,3 à 0,6 % sans subir de dégâts physiologiques. La fermeté des pommes entreposées en AC dynamique était également significativement supérieure à celle des fruits témoins en atmosphère contrôlée.

scope Wädenswil). La diminution de la teneur en oxygène a été contrôlée quotidiennement en déterminant le quotient respiratoire CR (calculé sur la production en CO₂ et la consommation en O₂ des pommes) et en mesurant chaque heure la fluorescence de la chlorophylle (F_{-a}) à l'aide du système «Harvest Watch» de l'entreprise Satlantic Inc. (Halifax, N.S., Canada). Les pommes ont été maintenues dans l'obscurité durant l'entreposage. La fermeté, la matière sèche soluble et l'acidité ont été déterminées sur des échantillons de 20 fruits après un entreposage de 3,5 et de 7 mois, et également après maturation de sept jours à température ambiante. La respiration des fruits a été mesurée quotidiennement avec un chromatographe en phase gazeuse Chrompack CP2002 (Gasser *et al.* 2003).

Durant la saison d'entreposage 2005–2006, quatre variétés de pommes récoltées au stade optimal de maturité ont été entreposées à 3 °C. Chaque variété a été stockée dans une microcellule avec une teneur en oxygène basse et constante (LO, low oxygen, concentrations

en CO_2/O_2 : pour Idared 1,5/1,0 %, pour Maigold 3,0/2,0 %, pour Elstar 3,0/2,0 % et pour Braeburn 1,0/1,5 %). Chaque variété a également été entreposée dans une microcellule pour les essais en atmosphère AC dynamique avec réduction progressive de la concentration en oxygène. Les pommes entreposées en AC dynamique ont été stockées dans un premier temps une semaine en conditions de froid normal, puis une semaine selon les conditions LO décrites ci-dessus, avant de diminuer progressivement l'oxygène de 0,2 % par semaine.

Résultats et discussion

Influence de la variété de pomme

La teneur en oxygène critique était de 0,2 à 0,3 % pour les variétés Idared, Maigold et Elstar, et de 0,4 % pour la variété Braeburn. Une fois les concentrations critiques atteintes, les teneurs en oxygène ont été aug-

mentées de 0,2 à 0,3 % au-dessus de la valeur critique pour toutes les variétés, afin de garantir un entreposage sûr. Comme illustré avec la variété Braeburn (fig. 2), les deux paramètres mesurés CR et $F-\alpha$ ont réagi exactement de la même manière à la diminution de l'oxygène. La figure 3 montre que l'évolution de la production de CO_2 , du CR et de $F-\alpha$ dépend de la concentration en oxygène dans les microcellules. La teneur en oxygène critique peut ainsi être identifiée en se basant sur la production minimale de CO_2 ou sur l'augmentation du CR ou de $F-\alpha$.

La fermeté des pommes entreposées en AC dynamique dépassait en général significativement celle des fruits témoins entreposés en conditions LO, sauf pour la variété Elstar. En outre, les pommes Maigold entreposées en conditions LO (variante témoin) ont toutes manifesté des dégâts d'échaudure cette année-là, contrairement à celles qui étaient conservées en AC

Figure 2 | Evolution du coefficient respiratoire (CR) et de la fluorescence de la chlorophylle ($F-\alpha$) durant l'entreposage en AC dynamique (ACD) et LO de pommes Braeburn (2002–2003).

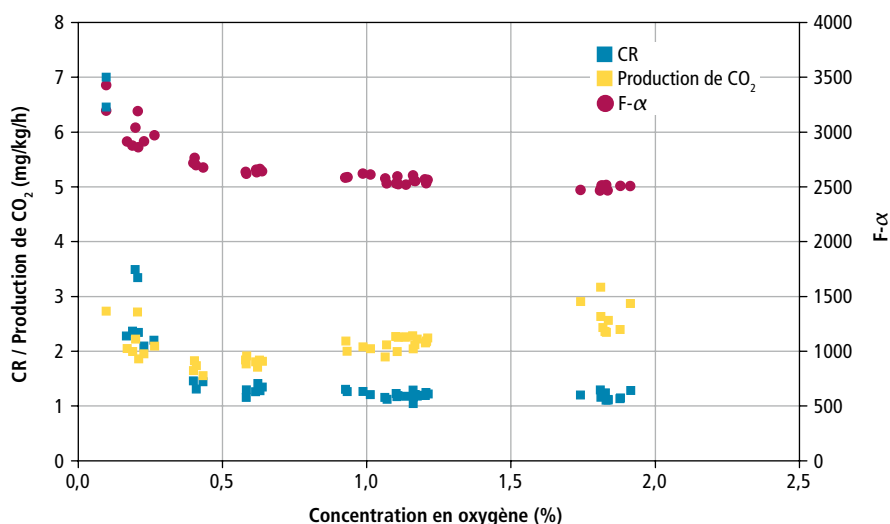
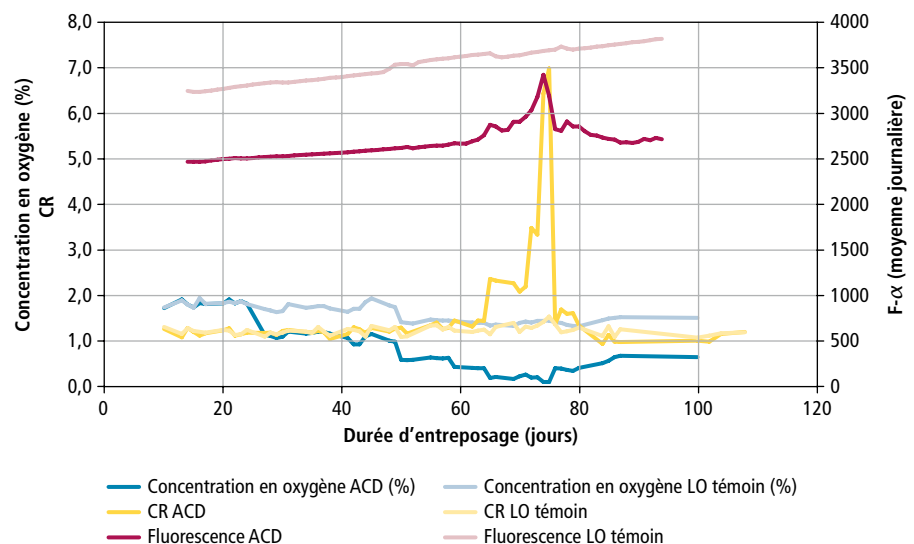


Figure 3 | Relation entre la concentration en oxygène dans l'atmosphère d'entreposage et le CR, la production de CO_2 et la $F-\alpha$ des pommes Braeburn (2002–2003).

dynamique – ce qui est significatif pour les entrepositaires –, et cela malgré l'humidité de l'air élevée qui règne dans les microcellules et accentue en général le développement de l'échaudure.

Influence de la date de récolte et de l'AC dynamique

L'influence de la date de récolte, de la vitesse de réduction de la teneur en oxygène et de la concentration en dioxyde de carbone a été testée durant la saison d'entreposage 2006–2007 sur la variété Golden Delicious, récoltée à deux dates différentes (stade de maturité optimal le 25.09.2006 et de maturité plus avancé le 5.10.2006) (tabl. 1). Contrairement à l'année précédente, l'oxygène n'a été réduit que trois fois durant environ 200 jours d'entreposage, afin de pouvoir déterminer les éventuels changements de la concentration en oxygène critique. Les pommes ont d'abord été entreposées à 1°C en atmosphère normale, puis en conditions constantes LO à 3,0 % de CO₂ et 1,0 % d'O₂ à la même température durant deux semaines avant de réduire la teneur en oxygène. La concentration en oxygène critique a légèrement augmenté vers la fin de l'entreposage pour les deux dates de récolte (tabl. 2). Cela signifie que les pommes ont réagi plus sensiblement à la réduction de l'oxygène durant cette phase et que la concentration en oxygène ne devrait pas être trop basse en fin d'entreposage. Avec la deuxième date de récolte, une teneur en oxygène plus basse a pu être atteinte en début de période d'entreposage sans signal de stress par rapport à la première date de récolte. Cette différence n'a toutefois aucune conséquence dans la pratique, car des récoltes faites à différentes dates peuvent être entreposées dans la même chambre de stockage et contrôlées en mesurant la fluorescence de la chlorophylle. Les concentrations en oxygène critiques dépendent également de la valeur choisie pour

diminuer progressivement la teneur. Dans ce contexte, les valeurs indiquées dans le tableau 2 sont assorties d'une tolérance de +/-0,1 % O₂.

Pour documenter l'application de l'AC dynamique, signalons que la teneur la plus basse en oxygène atteinte n'a été influencée ni par la vitesse de réduction de l'oxygène, ni par la teneur en CO₂ dans l'atmosphère d'entreposage. Ces résultats préliminaires indiquent également qu'une réduction très rapide de l'oxygène sur environ dix jours agit sur la teneur en oxygène critique: celle-ci est plus élevée que lorsque la réduction est plus longue. Il semble qu'une lente réduction permette aux fruits de s'adapter physiologiquement et de mieux résister aux dégâts dus à de très faibles teneurs en oxygène. Les résultats concernant la teneur en CO₂ sont également intéressants pour la pratique: pour l'entreposage en AC dynamique on a toujours considéré jusqu'ici que la teneur en CO₂ devait être réduite proportionnellement à la concentration en O₂, afin d'éviter le développement de maladies physiologiques sur les fruits. Ce principe impliquerait donc pour la pratique d'équiper les entrepôts avec un Scrubber ou un adsorbant de CO₂ à très haute capacité, avec des coûts élevés d'acquisition et d'exploitation. Le maintien d'une teneur constante en CO₂ serait donc plus simple. Nos résultats ne permettant pas de tirer de conclusions définitives sur la concentration optimale en CO₂, il faudrait procéder à des essais supplémentaires pour vérifier cette hypothèse.

Aucune différence n'a été constatée pour les dégâts d'origine physiologique entre les fruits témoins entreposés en conditions LO et les pommes en AC dynamique. Comme l'année précédente, la fluorescence de la chlorophylle F- α a évolué exactement comme le coefficient respiratoire. Cette mesure donne ainsi un bon reflet du comportement respiratoire des fruits

Tableau 1 | Plan des essais 2006–2007 d'entreposage AC dynamique de la variété Golden Delicious (deux dates de récolte)

Méthode d'entreposage	Vitesse de diminution de l'oxygène	Concentration en CO ₂
Conditions LO constantes	Constante à 1%	Constante à 3 %
Diminution de l'oxygène lente	0,2 % par semaine	Constante à 3 %
Diminution de l'oxygène rapide (A)	0,2 % par jour	Constante à 3 %
Diminution de l'oxygène rapide (B)	0,2 % par jour	Proportionnelle à l'O ₂ (3:1)

Tableau 2 | Concentrations critiques en oxygène (%) pour la variété Golden Delicious (deux dates de récolte, saison 2006–2007)

Méthode d'entreposage	Date de récolte 1			Date de récolte 2		
	1	2	3	1	2	3
Diminution de l'oxygène lente	0,31	0,22	0,37	0,11	0,23	0,38
Diminution de l'oxygène rapide (A)	0,43	0,23	0,38	0,11	0,19	0,41
Diminution de l'oxygène rapide (B)	0,45	0,28	0,44	0,12	0,22	0,38

1 = diminution de l'oxygène au début de l'entreposage, 2 = diminution de l'oxygène après 90–100 jours, 3 = diminution de l'oxygène à la fin de l'entreposage (188–197 jours).

(fig. 4 et 5). Après un entreposage de 3,5 mois, les fruits témoins et les fruits entreposés en AC dynamique ont présenté peu de différences de fermeté. Après 7 mois, en revanche, les fruits des deux dates de récolte conservés en AC dynamique se sont montrés significativement plus fermes que les fruits en conditions LO, un effet également observé après la maturation à température ambiante durant sept jours (fig. 6 et 7). Les fruits entreposés en AC dynamique tendaient également à être plus acides que les fruits témoins (données non publiées). Enfin, les trois variantes d'AC dynamique testées ont eu un effet comparable sur la qualité des fruits.

Depuis 2010, plusieurs firmes ont cherché des alternatives à la mesure de la fluorescence et se sont intéressées à celle du coefficient respiratoire (CR) ainsi qu'à la teneur en éthanol dans les cellules d'entreposage. Pour mesurer le CR, deux approches ont été évaluées. La première consiste à installer une petite cellule avec

un échantillon représentatif de 50kg de pommes et à mesurer le CR de cet échantillon. La deuxième repose sur une mesure du CR de toute la cellule d'entreposage. Ces deux approches ont également servi pour mesurer le contenu en éthanol. Ces essais doivent encore livrer leurs résultats définitifs et le transfert de ces technologies doit être étudié dans la pratique. Pour la faisabilité de ces dernières, la question de l'étanchéité des cellules, de l'hétérogénéité des fruits entreposés ou de l'absorption de l'éthanol par le bois et les matériaux d'isolation doit être résolue. De plus, toutes les variétés de pommes ne forment pas la même quantité d'éthanol, ce qui pourrait mener à des problèmes de fiabilité avec celles qui en produisent très peu.

La mesure du CR de toute la cellule d'entreposage tend à être préférée à celle d'un échantillon pour le réglage de l'atmosphère de stockage. Cependant, une mesure globale ne permet pas de détecter les dif-

Figure 4 | Evolution du CR et de la F- α durant l'entreposage en AC dynamique de Golden Delicious (première date de récolte, diminution lente de l'oxygène).

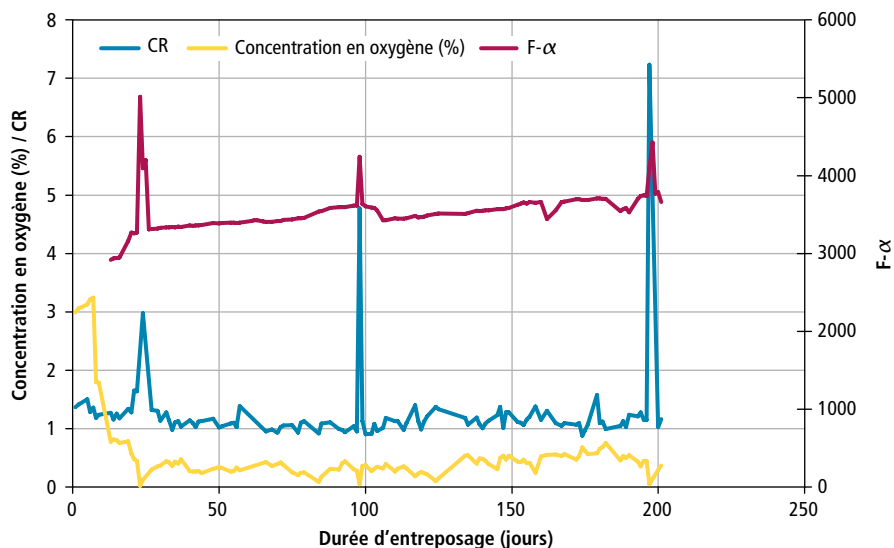
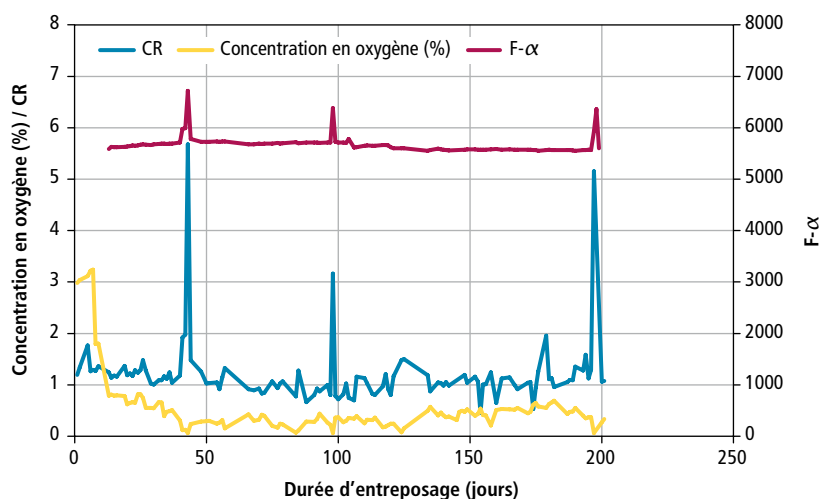


Figure 5 | Evolution du CR et de la F- α durant l'entreposage en AC dynamique de Golden Delicious (première date de récolte, diminution rapide de l'oxygène).

Figure 6 | Fermeté des pommes Golden Delicious après entreposage en conditions constantes LO et AC dynamique (première date de récolte).

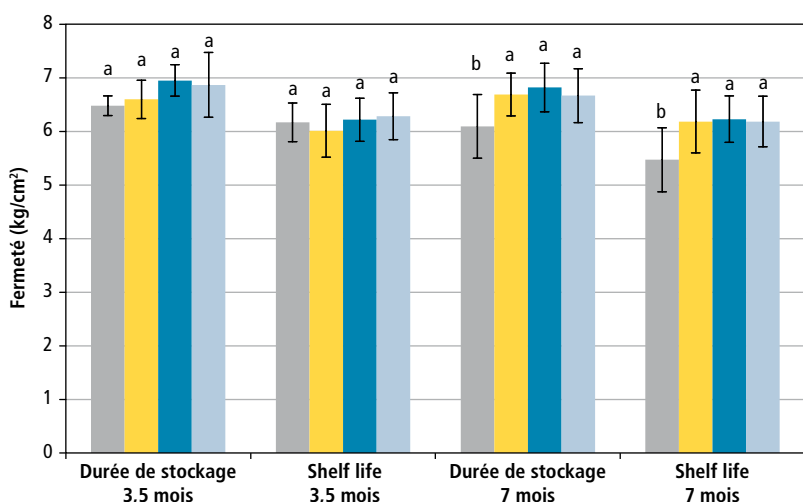
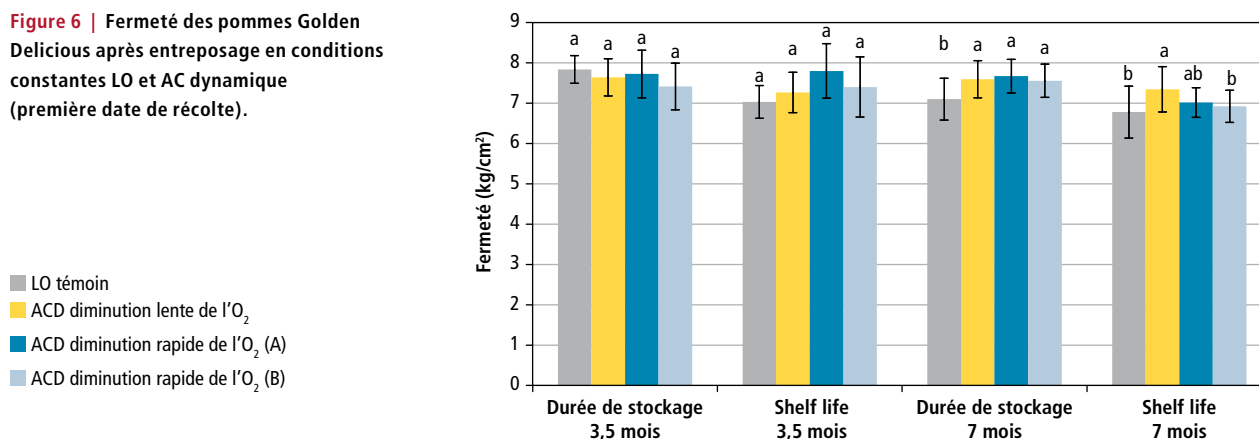


Figure 7 | Fermeté des pommes Golden Delicious après entreposage en conditions constantes LO et AC dynamique (deuxième date de récolte).

férences de teneur en oxygène critique entre les différents lots entreposés, contrairement aux capteurs de fluorescence, qui permettent de mesurer différents lots dans une cellule. Grâce à cette méthode, la teneur en oxygène peut être réglée sur le lot «le plus sensible».

Bibliographie

- Gasser F., Dätwyler D., Schneider K., Naunheim W. & Höhn E. 2003. Effects of Decreasing Oxygen Levels in the Storage Atmosphere on the Respiration of Idared Apples. *Proc. 8th Int. CA Conference*, Rotterdam, *Acta Hort.* **600**, 189–192.
- Prange R. K., DeLong J. M. & Harrison P. A., 2005b. Quality Management through Respiration Control: Is there a Relationship between Lowest Acceptable Respiration, Chlorophyll Fluorescence and Cytoplasmic Acidosis? *Proc. 5th Inter. Postharvest Symp.*, *Acta Hort.* **682**, 823–830.

Conclusions

- L'essai indique que les pommes peuvent être entreposées à de très basses concentrations en oxygène (0,4–0,6 %) sans subir de dégâts physiologiques. La teneur en oxygène critique dépend de la variété, mais également de variations annuelles.
- La teneur en oxygène critique peut être identifiée en mesurant la fluorescence de la chlorophylle F- α , mais aussi en se basant sur la production minimale de CO₂ ou sur l'augmentation du quotient respiratoire CR.
- En AC dynamique, une seule variété de pomme devrait être conservée dans une cellule de stockage et la fluorescence de la chlorophylle surveillée à l'aide de capteurs sur un échantillon représentatif des différentes dates de récolte.
- Le contrôle de la teneur en oxygène critique par la mesure de la fluorescence de la chlorophylle F- α est efficace et simple, pour autant que le maintien des pommes dans l'obscurité et de rapports géométriques constants (distance entre le capteur et les pommes) soit respecté. ■

Summary

Control of the critical oxygen level during dynamic CA storage of apples

The concept of dynamic controlled atmosphere storage (DCA) involves the reduction of oxygen in the storage atmosphere to near the lowest level tolerated by the fruit, the so-called anaerobic compensation point. Fruit quality loss during DCA storage is presumed to be slowed down compared to normal ULO storage. Storage conditions below the critical oxygen level will cause anaerobic conditions followed by severe quality losses in stored fruit. Two methods based on RQ and fluorescence signal $F-\alpha$ monitoring were tested to detect the critical oxygen concentration (ACP) during DCA-storage of several apple varieties. Both methods yielded identical oxygen values for ACP: 0.2-0.4 %, depending on the apple variety. After the critical oxygen limit was reached, the oxygen concentration was increased by about 0.1–0.3 %. In this way, fruits were held for 200 days at oxygen levels of 0.3 to 0.6 % without any physiological disorders while fruit firmness of DCA stored apples was in general significantly higher than that of ULO-stored control fruit.

Key words: *Malus domestica*, apple, low-oxygen tolerance, dynamic CA storage, anaerobic compensation point, respiration.

Zusammenfassung

Lagerung von Äpfeln unter dynamisch kontrollierter Atmosphäre

Bei der dynamischen CA-Lagerung (DCA = Dynamic Controlled Atmosphere) von Äpfeln wird der Sauerstoffgehalt in der Lageratmosphäre schrittweise abgesenkt mit dem Ziel, einen möglichst tiefen Sauerstoffwert zu erreichen, um die Qualität der Früchte während der Lagerung möglichst gut zu erhalten. Die Sauerstoffkonzentration darf dabei aber einen kritischen Wert nicht unterschreiten, da die Früchte sonst infolge Sauerstoffmangel geschädigt werden. Zwei Methoden, welche auf der Messung des Respirationsquotienten und der Chlorophyllfluoreszenz beruhen, wurden getestet, um die kritische Sauerstoffkonzentration bei der dynamischen CA-Lagerung (DCA) von verschiedenen Apfelsorten zu erfassen. Beide Methoden ergaben identische Werte. Diese betragen, abhängig von der Apfelsorte, zwischen 0,2 und 0,4 %. Nach Erreichen des kritischen Wertes wurde die Sauerstoffkonzentration um rund 0,2 bis 0,3 % über die kritische Konzentration erhöht, um eine sichere Lagerung zu gewährleisten. Auf diese Weise konnten die Früchte während rund 200 Tagen bei Sauerstoffkonzentrationen von 0,3 bis 0,6 % ohne jegliche physiologischen Lagerschäden gelagert werden. Die Fruchtfleischfestigkeit von DCA gelagerten Äpfeln war im allgemeinen signifikant höher als diejenige der Kontrollfrüchte unter konstanter CA-Atmosphäre.

Riassunto

Stoccaggio di mele in atmosfera controllata dinamica

L'atmosfera controllata dinamica (AC dinamica) consiste nel ridurre gradualmente il tenore in ossigeno nell'atmosfera di stoccaggio fino al livello più basso permettendo di mantenere la migliore qualità dei frutti durante la conservazione. La concentrazione di ossigeno, tuttavia, non deve scendere al di sotto della soglia critica, poiché si rischia di causare danni di asfissia alla frutta. Per determinare la concentrazione critica d'ossigeno nel corso dello stoccaggio sotto AC dinamica sono stati testati due metodi con diverse varietà di mele: la misura del coefficiente respiratorio e la fluorescenza della clorofilla. I due metodi hanno dato risultati simili. Le soglie critiche rilevate si situano tra lo 0,2 e lo 0,4 %, indipendentemente dalla varietà di mela testata. Una volta raggiunto il valore critico, la concentrazione d'ossigeno è stata aumentata dallo 0,2 allo 0,3 % al di sopra di questa soglia, per garantire uno stoccaggio sicuro. In questo modo è stato possibile conservare i frutti per circa 200 giorni con un tenore in ossigeno tra lo 0,3 e lo 0,6 %, senza subire dei danni fisiologici. La fermezza delle mele conservate in AC dinamica superava inoltre significativamente quella dei frutti di controllo conservati in atmosfera controllata.