



Agriculture
Canada



Agriculture
Canada

Canadian Agriculture Library
Bibliothèque canadienne de l'agriculture
Ottawa K1A 0C5

23



Direction générale de la recherche
Bulletin technique 1993-18F

Techniques d'entreposage des fruits et des légumes sous atmosphère contrôlée

Canada

0-72
59
18

Cover illustration

The images represent the Research Branch's objective: to improve the long-term competitiveness of the Canadian agri-food sector through the development and transfer of new technologies.

Designed by Research Program Service.

Illustration de la couverture

Les dessins illustrent l'objectif de la Direction générale de la recherche : améliorer la compétitivité à long terme du secteur agro-alimentaire canadien grâce à la mise au point et au transfert de nouvelles technologies.

Conception par le Service aux programmes de recherches.



Techniques d'entreposage des fruits et des légumes sous atmosphère contrôlée

Clément Vigneault
Station de recherches
Saint-Jean-sur-Richelieu (Québec)

Vijaya G.S. Raghavan
Campus Macdonald de l'Université McGill
Sainte-Anne-de-Bellevue (Québec)

Robert Prange
Station de recherches
Kentville (Nouvelle-Écosse)

Bulletin technique 1993-18F

Direction générale de la recherche
Agriculture et Agro-alimentaire Canada
1994

On peut obtenir cette publication à l'adresse suivante :

Directeur

Station de recherches

Agriculture et Agro-alimentaire Canada

430 Gouin Boulevard

Saint-Jean-sur-Richelieu (Québec)

J3B 3E6

ou

Directeur

Station de recherches

Agriculture et Agro-alimentaire Canada

Kentville (Nouvelle-Écosse)

B4N 1J5

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1994

N° de cat. A54-8/1993-18F

ISBN 0-662-98774-8

Also available in English under the title

Techniques for controlled atmosphere storage of fruits and vegetables

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iv
INTRODUCTION	1
PARAMÈTRES DE CONCEPTION DE L'ENTREPOSAGE AC	1
Conception structurale de l'entrepôt.....	1
Volume libre standard.....	3
Taux d'infiltration	3
Mélange optimal des gaz et période de mise en régime AC	4
SYSTÈMES DE CONTRÔLE DE L'OXYGÈNE	4
Brûleurs externes	5
Azote liquide ou gazeux.....	5
Systèmes de séparation des gaz	6
Séparateur d'air à absorption modulée sous pression (AMP).....	6
Système à membranes-fibres creuses	6
Craquage de l'ammoniac	7
SYSTÈMES DE CONTRÔLE DU BIOXYDE DE CARBONE	7
Fixateur de CO ₂ à la soude caustique	7
Fixateur de CO ₂ à la chaux hydratée	8
Fixateur de CO ₂ à l'eau	8
Fixateurs de CO ₂ à charbon activé ou à tamis moléculaire.....	10
Système à membrane semi-perméable.....	10
SYSTÈME DE CONTRÔLE DE L'ÉTHYLÈNE.....	12
Catalyseur chauffé	12
Billes absorbant l'éthylène.....	12
AUTOMATISATION	14
Mesure de l'oxygène.....	14
Mesure du bioxyde de carbone.....	14
Mesure de l'éthylène	14
Échantillonnage des gaz.....	14
Contrôle de l'oxygène	14
Contrôle du bioxyde de carbone	14
SÉCURITÉ.....	15
BIBLIOGRAPHIE	15

RÉSUMÉ

Le présent rapport passe en revue les divers paramètres relatifs au choix d'un système qui permet d'établir et de maintenir des conditions optimales d'entreposage d'un produit horticole donné. On y expose deux catégories de contrôle des gaz : 1) les systèmes de contrôle d'oxygène, et 2) les systèmes de contrôle de bioxyde de carbone. On y traite également de l'enlèvement de l'éthylène, mais les systèmes existants ne permettent qu'un contrôle limité de ce gaz et demeurent chers. Les systèmes de contrôle des gaz les plus prometteurs sont ceux qui peuvent contrôler les concentrations de plus d'un gaz, tel que le séparateur d'air à absorption modulée sous pression et le système à membrane-fibre creuse.

INTRODUCTION

L'entreposage sous atmosphère contrôlée (AC) consiste, par définition, à ajouter ou à retirer des gaz pour produire un mélange de gaz qui entourent les produits et qui soit différent de l'air ambiant, soit 78,08 % de N₂, 20,95 % d'O₂, 0,03 % de CO₂ (Kader, 1992). La majorité des entrepôts AC présentent une réduction des concentrations d'O₂ et/ou une augmentation de celles de CO₂. La technique AC a réussi à prolonger la durée de conservation des pommes, des poires, des choux, des kiwis, des fruits à baies, des fruits à noyau, des bananes, des fruits à écales et des fruits séchés, et elle est prometteuse pour l'entreposage de longue durée d'autres denrées. L'application de la technologie AC peut, dans certains cas, prolonger la durée de conservation pour assurer un cycle de récolte à récolte, soit de 9 à 12 mois.

La respiration des matières végétales est ralentie par la réduction de la concentration d'O₂ et l'augmentation de celle du CO₂ dans l'espace d'entreposage, ce qui ralentit la consommation et la transformation internes des composés organiques du produit. De plus, l'entreposage AC permet de contrôler le dégagement d'éthylène, un démarreur du mûrissement. L'entreposage AC réfrigéré et à humidité relative élevée présentent les avantages suivants: 1) réduction des taux de respiration et de transpiration, 2) prévention de la dégradation chlorophyllienne, 3) diminution de l'amollissement et conservation de la fermeté, 4) réduction des infections bactériennes et fongiques (Bohling et al., 1977, et Smock, 1979) et 5) réduction des coûts de réfrigération grâce à la réduction du taux de respiration et du dégagement de chaleur.

Les systèmes d'entreposage AC, en raison des faibles concentrations d'O₂, peuvent être dangereux s'ils ne sont pas bien compris et soigneusement gérés. Une faible concentration d'O₂ dans l'atmosphère est dangereuse pour la vie humaine et animale.

Le présent rapport décrit la technologie AC actuelle, les paramètres de conception du système et les méthodes qui permettent de produire l'atmosphère appropriée.

PARAMÈTRES DE CONCEPTION DE L'ENTREPOSAGE AC

Lors de la conception d'un nouvel entrepôt AC et du choix des systèmes de contrôle appropriés, il faut tenir compte de plusieurs paramètres : 1) la conception structurale de la chambre d'entreposage, 2) le volume libre standard, 3) le taux d'infiltration, et 4) le mélange de gaz désiré et la période permise pour la mise en régime AC (Bartsch et Blanpied, 1990, et Bishop, 1990).

Conception structurale de l'entrepôt

Un entrepôt AC est essentiellement une chambre froide conventionnelle étanche. Les matériaux de construction et d'isolation sont fonction des coûts de construction, de la stabilité par grands vents, de la facilité d'assurer l'étanchéité, ainsi que des règlements relatifs à la sécurité des bâtiments et à la prévention des incendies (ASHRAE, 1986). Une structure de blocs de béton avec un revêtement métallique scellé sur les murs internes pour assurer l'étanchéité, des murs de béton préfabriqués, des panneaux isolants à couverture métallique serrés les uns contre les autres et collés avec du ruban adhésif, et une structure archée en bois ou en métal à laquelle au moins deux couches de mousse isolante de polyuréthane ont été ajoutées pour assurer l'étanchéité à l'air et à l'humidité peuvent constituer un entrepôt AC efficace (Bishop, 1990). Les structures de béton ou d'arches métalliques sont les plus stables par grand vent et les moins sensibles aux infiltrations d'air. La construction de blocs de béton est généralement la plus chère, alors que la structure de bois est la moins cher. Les exigences minimales d'isolation sont de 4,6 m² °C W⁻¹ au plafond, de 4,2 m² °C W⁻¹ dans les murs et de 2,3 m² °C W⁻¹ dans les planchers (ASHRAE, 1986).

La porte est un élément important de la construction de l'entrepôt, car elle peut être une source majeure de fuite d'air et de pénétration de chaleur. La porte peut être coulissante, avoir un facteur d'isolation élevé et être munie d'un système de fermeture à joint étanche ou d'un panneau léger couvrant toute l'ouverture de la porte, et maintenu c'est le panneau en place à l'aide de crochets à tension réglable. Idéalement,

il ne devrait y avoir qu'une seule porte ouvrant sur l'entrepôt, afin d'éviter l'infiltration d'air et les risques de suffocation accidentelle des employés. Une fenêtre d'observation amovible à double ou triple vitrage au niveau du sol ou du plafond peut être nécessaire pour inspecter le produit ou y avoir accès. Les fenêtres de plafond sont avantageuses, car elles permettent de voir davantage de produit et de surveiller les évaporateurs et les ventilateurs des systèmes de réfrigération. Une fenêtre fixe en dôme d'acrylique améliore le champ de vision. Il existe divers joints et produits pour rendre étanche le pourtour de la porte et de la fenêtre. La gelée de pétrole est économique, sans odeur et efficace pour rendre étanches les portes et colmater les petites fuites d'air.

On peut construire un système d'échantillonnage du produit fiable et efficace avec un tuyau d'égout en PVC incliné le long d'un mur interne, menant à l'extérieur par une ouverture et fermé à l'extrémité par un bouchon vissé. Avant de fermer l'entrepôt, il faut mettre assez de produit dans le tuyau, ainsi l'échantillonnage se fait simplement en enlevant le bouchon et en laissant sortir un échantillon du produit. Ce système peut être modifié pour l'adapter aux différentes grosseurs de fruit et exigences d'échantillonnage. Des échantillons de produits placés dans des sacs en filet avant de sceller l'entrepôt peuvent aussi être échantillonnés à l'aide d'une longue perche que l'on passe par une ouverture qui est pratiquée dans la porte ou le plafond et que l'on peut refermer d'une façon étanche.

Les dimensions des chambres AC sont un facteur important et doivent être déterminées d'après le volume prévu de produits à entreposer sous AC; 2) la période de commercialisation du produit une fois l'entrepôt ouvert; 3) la capacité de remplir rapidement la chambre au moment de la récolte (deux jours ou moins); 4) la compatibilité des cultivars et produits entreposés aux conditions de température et d'humidité de l'entrepôt; 5) les avantages économiques. L'expérience a démontré que l'on doit répartir la capacité totale d'entreposage dans le nombre maximal de chambres qui demeure économique. Cela permet à l'exploitant d'avoir plus de jeu

lorsqu'il faut remplir les chambres au moment de la récolte et de les ouvrir et plus de flexibilité dans les conditions d'entreposage.

Comme l'AC peut prolonger substantiellement la durée d'entreposage, la perte de poids des produits causée par une perte d'humidité excessive peut constituer un problème. La perte d'humidité est accélérée par une mauvaise circulation de l'air qui crée une différence de température entre l'air et la surface de l'entrepôt. La condensation sur les plafonds et les murs froids et les systèmes de réfrigération, ou l'infiltration d'air sec diminue l'humidité relative de l'air et augmente la perte de poids des produits. Pour que le produit conserve son humidité, il faut prendre les mesures suivantes :

- 1) Le produit doit être maintenu à la température la plus basse possible sans le geler ce qui réduit les possibilités de perte d'humidité du produit.
- 2) La différence de température entre la surface la plus chaude (surface du produit) et la surface la plus froide (système de réfrigération) doit être aussi petite que possible. Pour ce faire : a) s'assurer que les systèmes de réfrigération ont la plus grande surface possible. On réduit ainsi la condensation de l'humidité de l'air et la fréquence des cycles de dégivrage du système de réfrigération; b) couvrir le dessus des contenants près des arrivées d'air à l'aide de feuilles de plastique pour diriger l'air froid vers l'arrière de l'entrepôt; et c) aligner correctement les contenants de façon que l'air s'écoule uniformément à travers les produits tout en retournant vers le système de réfrigération.
- 3) La durée de fonctionnement du système de réfrigération et des ventilateurs doit être aussi réduite que possible une fois la température de l'entrepôt stabilisée, puisque le système de réfrigération enlève de l'humidité et les ventilateurs ajoutent de la chaleur dans la chambre. On peut régler les ventilateurs pour qu'ils fonctionnent périodiquement, même lorsque le système de réfrigération est arrêté, maintenant ainsi une

température et une atmosphère uniformes dans l'entrepôt, tout en aidant au dégivrage de l'évaporateur.

- 4) L'eau de condensation qui s'écoule du système de réfrigération ne doit pas être évacuée de l'entrepôt, mais doit s'écouler sur le plancher où elle peut réhumidifier l'air.
- 5) Les boîtes-palettes en bois devraient être pré-trempées dans l'eau; et de l'eau peut être versée sur le plancher avant de fermer l'entrepôt; ou des buses d'humidification peuvent être placées devant les ventilateurs du système de réfrigération pour accroître l'humidité dans l'entrepôt. L'humidification de l'atmosphère d'entreposage ne doit pas entraîner de condensation de surface sur les fruits et légumes, car cela augmenterait la perte de qualité.

Volume libre standard

Le volume libre standard est le volume de l'enceinte d'entreposage non occupé par les produits et les contenants. Le volume libre est habituellement exprimé en terme de volume libre standard (volume d'air dans l'entrepôt par volume de produit) et, dans de nombreux entrepôts, varie de 1,5 à 3,0 m³ de gaz par m³ de produit. L'entreposage en vrac ou en caisses, la forme et la densité du produit, la géométrie de l'entrepôt et la façon dont le produit est empilé influent sur le volume libre standard.

Taux d'infiltration

L'efficacité d'un entrepôt AC dépend de son étanchéité. L'infiltration d'air dans l'entrepôt est causée par des défauts de construction, des fluctuations de la pression barométrique, le vent et les gradients de température entre l'entrepôt et le milieu environnant (Bartsch et Blanpied, 1990). L'infiltration causée par les fluctuations barométriques peut être réduite en reliant à l'entrepôt un sac d'expansion d'une capacité de 1,5 % du volume total de l'entrepôt. Lorsque la pression barométrique baisse, le sac se gonfle de gaz refoulés de l'entrepôt et lorsque la pression augmente, ces gaz retournent dans l'entrepôt.

La soupape de type piège à eau permet de relâcher l'excès de pression lors de variations barométriques, mais laisse entrer l'air de l'extérieur lorsque la pression interne de l'entrepôt devient négative. L'extrémité d'un tuyau partant de l'entrepôt est placé dans 12 mm d'eau, ce qui permet une différence de pression allant jusqu'à 250 Pa ou 25 mm d'eau (Bishop, 1990). On peut remplacer le piège à eau par une soupape de décharge de pression mécanique à deux voies.

Il faut tester l'étanchéité de chaque entrepôt avant de le remplir de produit. Pour ce faire, il faut procéder de la façon suivante : fermer hermétiquement toutes les ouvertures de l'entrepôt et y relier un manomètre, puis pressuriser l'entrepôt jusqu'à 250 Pa (25 mm d'eau) avec un ventilateur ou un aspirateur. Ne pas dépasser cette pression, car cela pourrait causer des dommages structuraux. Déterminer le temps nécessaire pour que la pression tombe à la moitié de la valeur initiale. Plus la concentration d'O₂ désirée dans l'entrepôt est basse, plus l'entrepôt doit être étanche. Pour 1 % d'O₂, le temps devrait être de près de 30 minutes, et pour 3 % d'O₂, 20 minutes sont acceptables (Bartsch et Blanpied, 1990).

Si l'entrepôt n'est pas suffisamment étanche, on peut déceler les fuites en plaçant un générateur de fumée à l'intérieur de l'entrepôt et en répétant l'étape de pressurisation. La fumée s'échappera avec les fuites d'air que l'on pourra alors boucher avec un produit de remplissage acceptable. Si l'entrepôt doit être rendu très étanche, il vaudrait mieux recouvrir toute la surface intérieure avec une couche d'élastomère ou de feuilles d'Hypalon renforcées de nylon de 2 m de largeur (Waelti et Bartsch, 1990).

Mélange optimal des gaz et période de mise en régime AC

La respiration consiste en une décomposition oxydative de composés organiques comme les sucres. Les principaux produits sont CO₂, H₂O et de l'énergie. Le taux de respiration d'un produit dépend de l'âge physiologique, de la présence ou de l'absence de blessures ou de

maladies, de la température et du mélange atmosphérique.

Le choix d'un système de contrôle de l'AC et sa gestion sont fonctions des concentrations de gaz requises et de la période de mise en régime AC, soit la période de réduction de l'O₂. Les techniques de post-récolte qui prolongent la durée de conservation sont efficaces, car elles réduisent la respiration du produit, principalement en abaissant les températures. Les autres avantages de l'AC sont surtout dus à la réduction de la concentration d'O₂. On peut améliorer l'AC en réduisant rapidement l'oxygène assimilable par les pommes. Sharples et Munoz (1974) ont découvert qu'une période de mise en régime AC dépassant 7 jours entraînait des résultats nettement moins bons pour des pommes Orange Pippin de Cox. Lau (1983) a obtenu des pommes Golden Delicious et McIntosh de meilleure qualité en les entreposant en régime AC rapide (2,5 % d'O₂ en 2 ou 3 jours), par rapport à une mise en régime de 20 jours. D'autres avantages pourraient aussi être obtenus pour d'autres produits entreposés avec une mise en régime rapide. Si la concentration d'O₂ désirée est aussi basse que 1 ou 2 %, il faut alors avoir recours au système de mise en régime rapide. Des concentrations d'O₂ plus élevées et des périodes

de mise en régime AC moins cruciales peuvent suffire à des systèmes AC moins efficaces.

Dans les grands entrepôts, une basse concentration d'O₂ n'est pas seulement atteinte avec des systèmes externes d'extraction d'O₂. Il faut aussi utiliser la respiration du produit pour les stades finaux de la mise en régime AC et pour élever la concentration de CO₂.

Quand on choisit un système de contrôle d'AC, on doit également tenir compte des exigences de lessivage du CO₂. Des concentrations élevées de CO₂ peuvent causer des dommages à de nombreuses variétés de fruits (Lidster et al., 1990). Le système d'entreposage AC doit donc pouvoir extraire le CO₂. Des concentrations faibles d'O₂ peuvent aussi causer des dommages (Lidster et al., 1990), mais la réduction de l'O₂ peut être contrôlée par de petits orifices percés dans l'entrepôt.

SYSTÈMES DE CONTRÔLE DE L'OXYGÈNE

Si la respiration du produit ne réduit pas la concentration d'O₂ suffisamment vite, il faut alors avoir recours à l'une des méthodes suivantes : 1) brûleurs externes, 2) azote liquide ou gazeux et 3) systèmes de séparation des gaz.

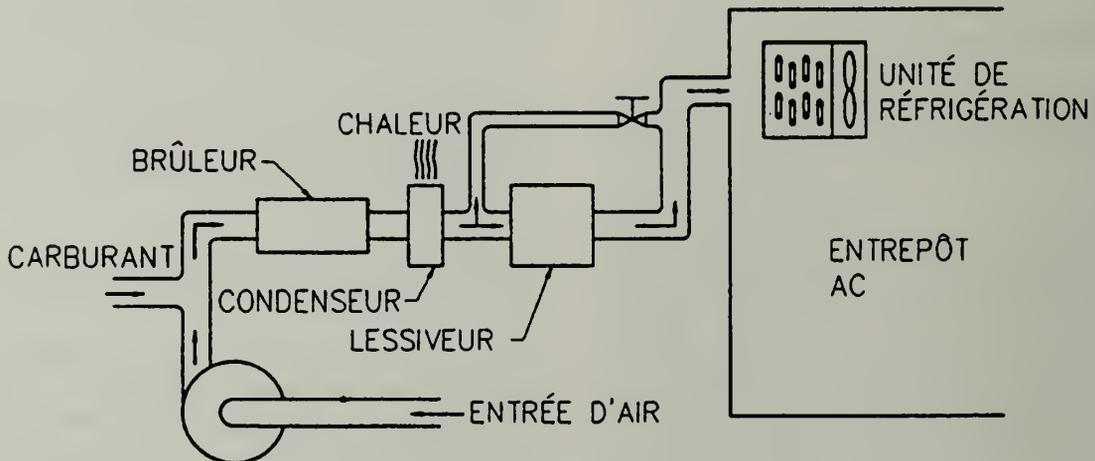


Fig. 1 Schéma d'un système ouvert servant à contrôler l'O₂ dans un système de purge.

Brûleurs externes

On utilise des brûleurs externes depuis de nombreuses années pour réduire la concentration d'O₂. Ils enlèvent l'O₂ par combustion de propane ou de gaz naturel pour produire un mélange de CO₂ et de vapeur d'eau qui est circulé dans l'entrepôt. Il existe deux types de brûleurs :

- 1) Le brûleur à flamme nue qui utilise l'air externe et libère le gaz d'échappement à faible concentration d'O₂ dans l'entrepôt AC. L'air de l'entrepôt pourrait être recirculé, mais sa faible teneur en O₂ ne maintient pas facilement une flamme. À la figure 1, l'air est mélangé à un hydrocarbure et brûlé à la flamme nue. Le gaz d'échappement est refroidi par un pulvérisateur d'eau et soufflé dans l'entrepôt.
- 2) On préfère habituellement utiliser un brûleur catalytique, car il permet la combustion complète et continue à l'aide d'un catalyseur, ce qui réduit la concentration d'O₂ à un niveau aussi bas que 3 %.

Les brûleurs externes sont économiques, mais présentent des risques d'explosion à cause de leur méthode de combustion. Les inconvénients sont la production de grandes quantités de CO₂ et d'éthylène dans un effluent gazeux chaud qui doit être lessivé et refroidi.

Azote liquide ou gazeux

L'azote liquide ou gazeux est également un moyen efficace d'obtenir une mise en régime rapide. La quantité de N₂ requise pour abaisser l'O₂ est fonction de la concentration désirée et du volume libre standard de l'entrepôt (fig. 2). L'azote liquide est pulvérisé dans l'entrepôt au moyen de buses placées devant les ventilateurs de l'unité de réfrigération (Bartsch, 1986), le N₂ se trouvant ainsi atomisé (fig. 3). L'injection d'azote liquide dans l'entrepôt assure une certaine

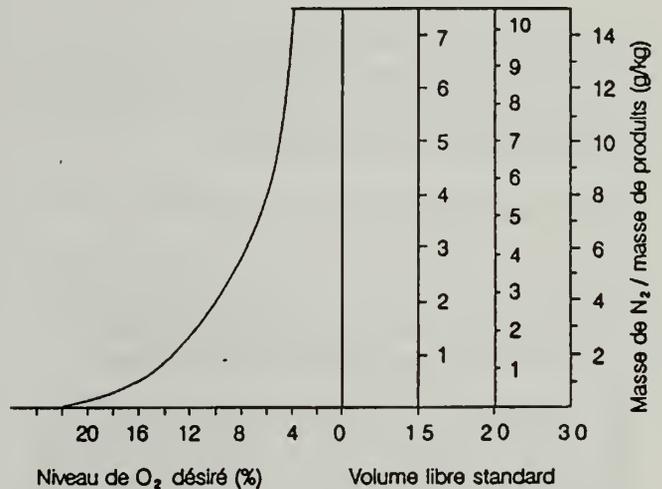


Fig. 2 Quantité de N₂ requise pour la purge de l'O₂ en fonction de la concentration finale d'O₂ désirée et du volume libre standard.

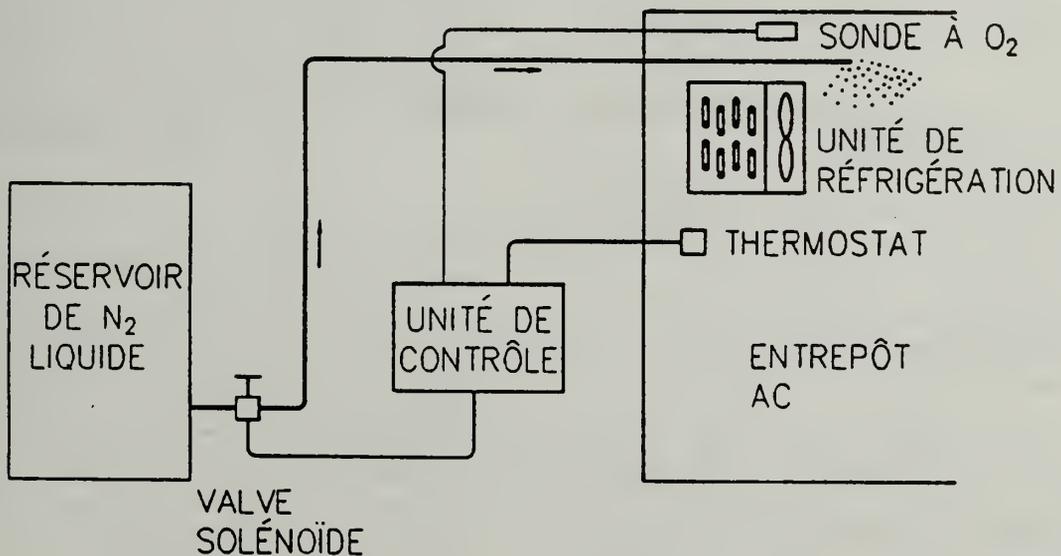


Fig. 3 Schéma d'un générateur d'azote liquide convenant à l'application AC.

réfrigération, mais le coût supplémentaire d'isolation des canalisations d'approvisionnement vers la chambre et les possibilités de brûlure des fruits par le gel peuvent annuler les économies de réfrigération (Waelti et Cavalieri, 1990). Une autre méthode consiste habituellement à introduire de l'azote gazeux dans l'entrepôt jusqu'à ce que la concentration d'O₂ atteigne 5 % ou moins dans les 48 heures. On utilise la respiration des fruits pour rajuster la concentration d'O₂ au niveau désiré et permettre l'accumulation de CO₂.

Cette méthode de mise en régime ne comporte pas de risque d'explosion et ne génère pas d'éthylène ni d'autres gaz, mais elle est relativement chère, à moins de disposer d'azote sur place.

Systèmes de séparation des gaz

On trouve trois types de séparateurs de gaz sur le marché. Il s'agit de : i) système d'absorption modulée sous pression (AMP), ii) système de séparation à membrane-fibre creuse (SMFC) et iii) craquage de l'ammoniac à haute température. Ils peuvent également servir à contrôler la concentration de CO₂, mais on préfère habituellement utiliser d'autres fixateurs (Bartsch et Blanpied, 1988).

Séparateur d'air à absorption modulée sous pression (AMP)

La plupart des systèmes AMP fonctionnent selon le même principe (Anon., 1987). Un courant d'air (fig. 4) est comprimé, purifié à l'aide de filtres et poussé à travers un filtre moléculaire qui absorbe sélectivement l'O₂. Le courant gazeux qui sort du séparateur de gaz contient des concentrations élevées de N₂. L'O₂ retenu dans le séparateur est libéré dans l'atmosphère ambiante par ventilation du séparateur. Deux récipients d'absorption montés en parallèle permettent au cycle absorption/désorption de se dérouler tout en maintenant le débit de gaz riche en N₂ assez constant. La pureté du N₂ produit peut varier entre 90 et 99,9 %, selon la pression, le débit d'air circulant à travers le système AMP et la température du gaz. L'AMP a démontré son efficacité pour l'entreposage AC des pommes (Bartsch et Blanpied, 1988). Le système exige un air exempt d'huile et d'eau, et requiert des vérifications mécaniques périodiques. Son coût initial est assez élevé.

Système à membrane-fibre creuse

Ce système est basé sur les différents taux de perméation des gaz passant à travers une membrane. Comme on peut le voir à la figure 5,

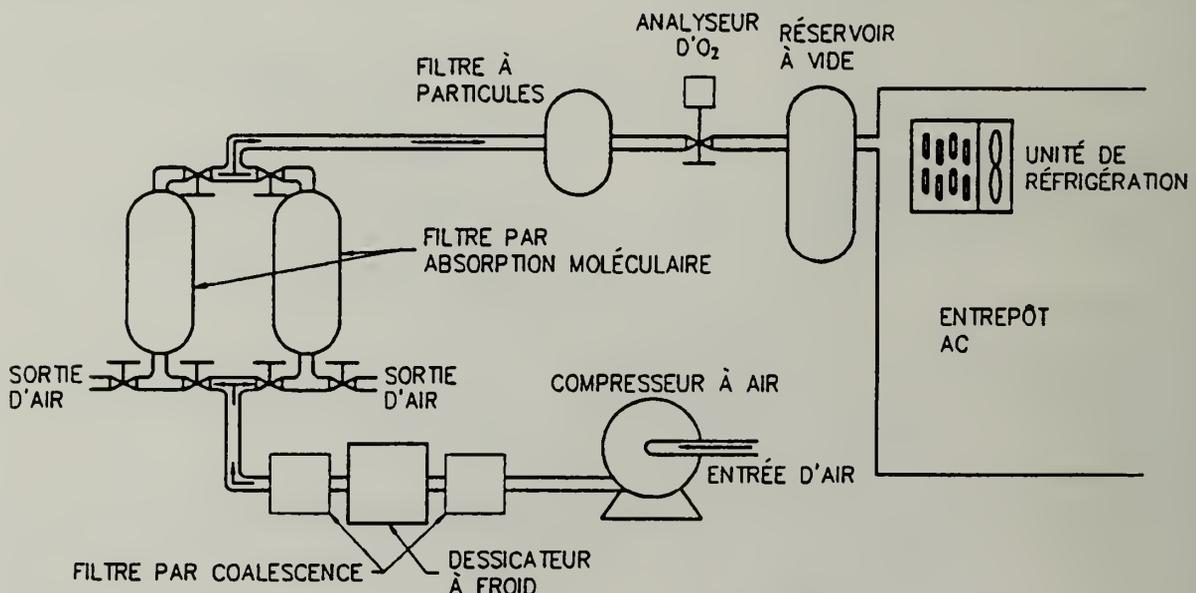


Fig. 4 Schéma d'un système d'absorption modulée sous pression.

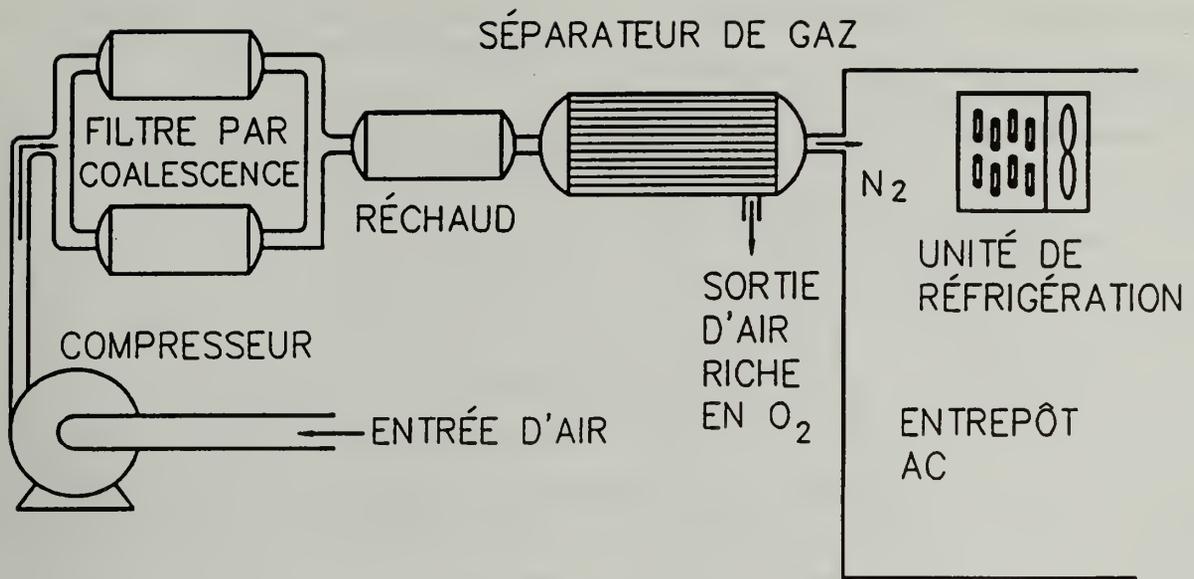


Fig. 5 Schéma d'un système séparateur à membrane-fibre creuse.

de l'air comprimé et filtré est chauffé et poussé dans une chambre dans laquelle sont montées des membranes-fibres creuses où l'O₂ et le CO₂ sont séparés du N₂ de par leur perméabilité différentielle plus élevée. Le courant gazeux riche en O₂ et en CO₂ est ventilé dans l'atmosphère ambiante, alors que le N₂ presque pur entre dans l'entrepôt pour purger l'O₂ et établir la concentration désirée. Le SMFC a été utilisé avec succès pour l'entreposage AC des pommes (Bartsch et Blanpied, 1988). Le coût initial et de remplacement d'un SMFC sont élevés. Comme pour l'AMP, ce dernier exige de l'air exempt d'eau et d'huile. Cependant, il requiert moins d'entretien.

Craquage de l'ammoniac

Le craquage de l'ammoniac est un procédé dans lequel de l'ammoniac anhydre est séparé à haute température en azote et en hydrogène gazeux. L'air de l'entrepôt circule à travers ce système et l'oxygène réagit avec l'hydrogène pour former de l'eau. L'air de retour se compose d'azote et de vapeur d'eau exempte de CO₂ et d'hydrocarbures. Le système requiert de l'ammoniac gazeux qui peut être dangereux, le coût de fonctionnement est élevé et le courant d'air riche N₂ doit être refroidi avant d'entrer dans l'entrepôt (Bishop, 1990).

SYSTÈMES DE CONTRÔLE DU BIOXYDE DE CARBONE

On trouve dans le commerce cinq systèmes qui permettent d'enlever d'un entrepôt AC le surplus de CO₂. Il s'agit de : 1) la soude caustique, 2) la chaux hydratée, 3) l'eau, 4) le charbon activé et les tamis moléculaires, et 5) les membranes. Le fonctionnement de ces systèmes de lessivage requiert une mesure régulière du CO₂ de l'atmosphère de l'entrepôt. Le lessivage du CO₂ est régulé par le débit passant à travers le fixateur.

Fixateur de CO₂ à la soude caustique

La soude caustique (NaOH) dissoute dans l'eau est une des plus vieilles méthodes de fixation du CO₂ utilisées dans les entrepôts AC (Pflug, 1960). La concentration de CO₂ est contrôlée en ajustant la durée d'exposition de la solution de soude caustique à l'atmosphère de l'entrepôt. La soude caustique a été en grande partie abandonnée en raison de la corrosivité du mélange soude-eau. Cependant, on a mis au point des systèmes qui utilisent de la soude caustique sèche laquelle pourrait constituer une solution de rechange viable aux solutions aqueuses (Bartsch et Blanpied, 1990).

Fixateur de CO₂ à la chaux hydratée

Le fixateur à la chaux hydratée [Ca(OH)₂] constitue une des méthodes les plus simples et les plus efficaces de régulation des concentrations de CO₂ dans un entrepôt AC. Il se compose d'une boîte de contreplaqué (ou d'un autre matériau) isolée et étanche installée à l'extérieur de l'entrepôt AC et reliée à celle-ci (fig. 6). La boîte contient suffisamment de chaux pour toute la période d'entreposage; cependant, il faut remplacer la chaux si l'absorption de CO₂ diminue. Le débit d'air vers le fixateur peut se faire par convection naturelle ou à l'aide de ventilateurs et de clapets. Le CO₂ et la chaux hydratée réagissent dans un rapport 1:1 pour former du CaCO₃ (pierre à chaux) et du H₂O. La chaux dolomitique qui a une teneur élevée en Mg n'est pas aussi efficace que la chaux calcique. Comme l'efficacité du fixateur du CO₂ par la chaux dépend de la surface de la chaux exposée, la chaux à particules fines (tamisage fin) est plus efficace que la chaux à grosses particules (tamisage grossier); la chaux doit être emballée dans des sacs de 25 kg sans doublure en polyéthylène et empilés sur une palette en laissant un espace de 10 cm entre les couches pour que l'air circule au maximum. On peut améliorer l'efficacité en ne remplissant chaque sac que partiellement, par ex. à 50 %, car dans un sac de 25 kg moins de 20 % de la chaux est consommée en raison du durcissement de la couche externe. Pour maintenir la concentration de CO₂ à moins de 2 %, on

recommande d'utiliser 12 kg de chaux par tonne de pommes pour un entreposage de 3 à 4 mois.

On peut placer 50 % de la chaux recommandée pour la période d'entreposage prévue sur des palettes reposant sur le plancher ou en simple couche sur des palettes placées sur le haut des piles de produits. Cette chaux consommera le CO₂ produit par certains fixateurs d'O₂ et par les fruits au début de la période d'entreposage.

Fixateurs de CO₂ à l'eau

Il existe deux types de fixateurs à l'eau, le fixateur de CO₂ à saumure (fig. 7, Palmer, 1959) et le système modifié (fig. 8) de Smock et al., (1960). Dans le fixateur à saumure, de l'eau salée est pompée sur l'évaporateur de l'unité de réfrigération, où elle absorbe le CO₂. L'eau retourne par gravité à un réservoir situé à l'extérieur de l'entrepôt AC, puis est pompée du réservoir vers un aérateur où le CO₂ est libéré dans l'air extérieur. On peut éviter le problème de corrosion causé par l'utilisation d'eau salée en utilisant une unité de réfrigération sèche. Le système modifié de la figure 8 utilise deux aérateurs : l'un situé à l'extérieur et l'autre à l'intérieur de la chambre.

Les systèmes à l'eau peuvent contrôler efficacement les concentrations de CO₂ et augmenter l'humidité relative à l'intérieur de la

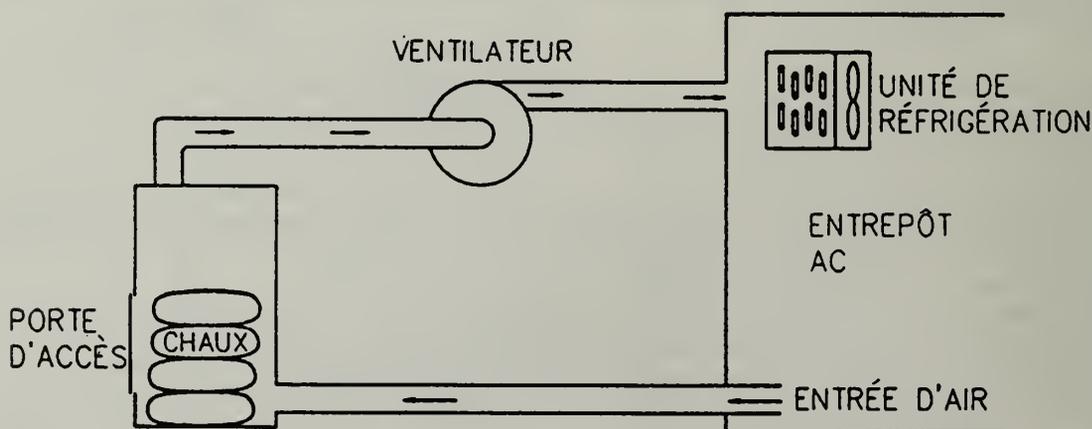


Fig. 6 Schéma d'un fixateur à chaux pour l'entreposage AC.

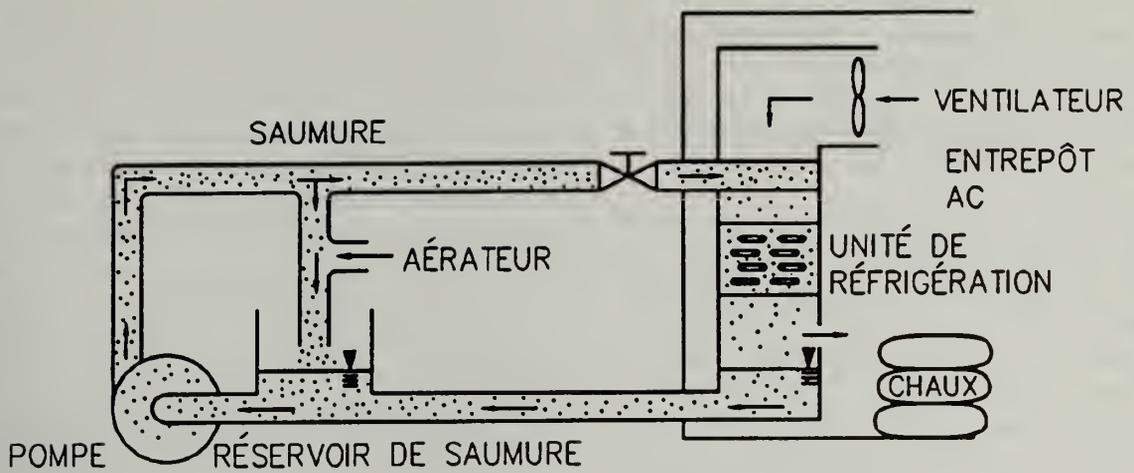


Fig. 7 Schéma d'un fixateur de CO_2 à saumure-eau pour l'entreposage AC.

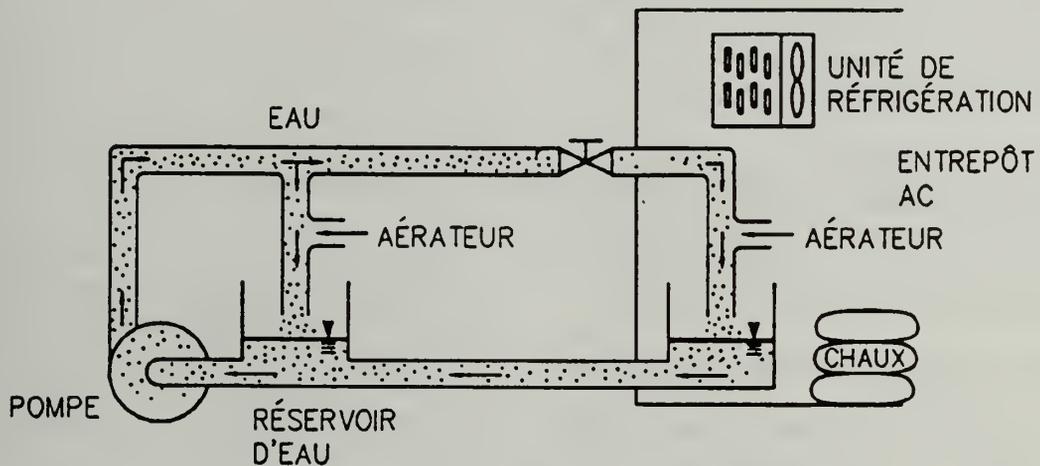


Fig. 8 Schéma d'un fixateur de CO_2 à l'eau modifié pour l'entreposage AC.

chambre. La concentration de CO_2 est maintenue en ajustant le débit d'eau aux aérateurs et par la durée de leur fonctionnement. Comme le taux de respiration peut être plus élevé au début de l'entreposage, Bartsch et Blanpied (1984) recommandent de placer de la chaux hydratée à l'intérieur de l'entrepôt AC pour aider à contrôler les concentrations de CO_2 (fig. 7 et 8). La combinaison des fixateurs à l'eau et de la chaux hydratée est une solution moins coûteuse que la construction d'un fixateur à l'eau ayant la capacité de répondre aux taux de respiration élevés du début de saison d'entreposage.

Le système d'absorption du CO_2 pour l'entrepôt AC doit être conçu en tenant compte de la quantité

de produit dans l'entrepôt AC, de taux de production de CO_2 des produits et de la concentration requise de CO_2 . Pflug (1960) recommande 100 L d'eau par heure et par tonne de pommes, pour 5 % de CO_2 et 3 % d' O_2 à une température d'entreposage de 1 °C. On obtient de cette façon une capacité de lessivage de 0,02 m³ de CO_2 par mètre cube d'eau ayant circulée dans l'entrepôt.

Les fixateurs à l'eau doivent être utilisés dans des entrepôts maintenus au-dessus de 0 °C afin d'éviter la congélation. Les fixateurs à l'eau présentent un inconvénient. Lorsque l'eau est aérée à l'extérieur de l'entrepôt pour libérer le CO_2 , l'eau absorbe de l' O_2 qui est ensuite

introduit dans l'entrepôt. Les fixateurs à l'eau sont de moins en moins utilisés.

Fixateurs de CO₂ à charbon activé ou à tamis moléculaire

Les systèmes à charbon activé ou à tamis moléculaire (fig. 9) se composent d'un contenant rempli de charbon activé ou d'un tamis moléculaire, de deux ventilateurs et de quatre soupapes à minuterie. L'opération s'effectue en deux étapes consécutives : 1) l'air provenant de l'entrepôt AC passe par le fixateur où le CO₂ est absorbé, 2) l'absorbant saturé de CO₂ est réactivé en faisant circuler de l'air extérieur à travers le fixateur. Lorsqu'on utilise un tamis moléculaire, un système de chauffage est nécessaire pour augmenter la température de l'absorbant durant la réactivation. Les deux systèmes ont des coûts de fonctionnement faibles, car il suffit de remplacer les absorbants à tous les 5 ans.

Ce système, comme le fixateur à l'eau, peut introduire de l'O₂ dans l'entrepôt, car de l'air extérieur frais pénètre dans le fixateur durant la réactivation. On évite ce problème en utilisant le gaz N₂ au cours du processus de réactivation.

Système à membrane semi-perméable

Lorsque des fruits et des légumes sont emballés dans des pellicules de polymères, la composition

atmosphérique de l'espace libre est fonction de la respiration du produit et de la perméation des gaz à travers la pellicule. Plus de 40 % des fruits et légumes de certains marchés sont maintenant commercialisés dans de tels emballages (Desrosiers et Desrosiers, 1977). La composition, l'épaisseur et la surface de l'emballage, ainsi que la température et la différence de pression partielle des gaz entre l'extérieur et l'intérieur de l'emballage, sont les principaux paramètres déterminant l'échange gazeux à travers la pellicule ou la membrane semi-perméable de l'emballage. Chaque gaz a un taux de perméation caractéristique qui est fonction de sa capacité à se dissoudre et à diffuser à travers une membrane et qui, en partie, détermine sa concentration interne.

Marcellin et Leteinturier (1967) ont élargi l'utilisation des membranes semi-perméables aux gros chargements en palettes et aux entrepôts. Le système crée un état d'AC au moyen d'une série de sacs rectangulaires de caoutchouc de silicone reliés en parallèle (fig. 10). La taille de l'échangeur dépend des dimensions de l'entrepôt et du taux de respiration du produit entreposé. Ces unités peuvent être installées à l'intérieur ou à l'extérieur de l'entrepôt. Lorsqu'elle se trouve à l'extérieur (exposée à l'air ambiant), l'AC circule à l'intérieur des sacs de caoutchouc de silicone. L'analyse du mélange AC indique si le nombre de

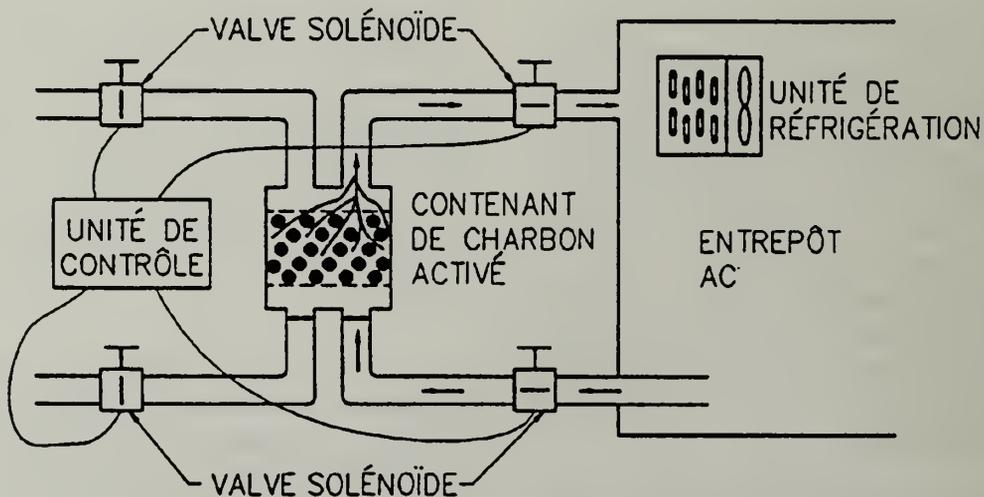


Fig. 9 Schéma d'un fixateur de CO₂ à charbon activé pour l'entreposage AC.

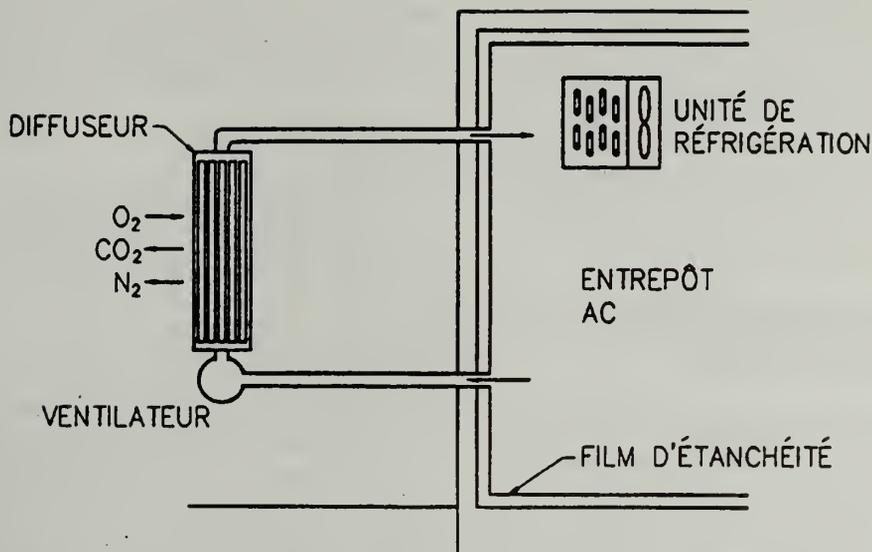


Fig. 10 Schéma d'un système à membrane semi-perméable pour l'entreposage AC.

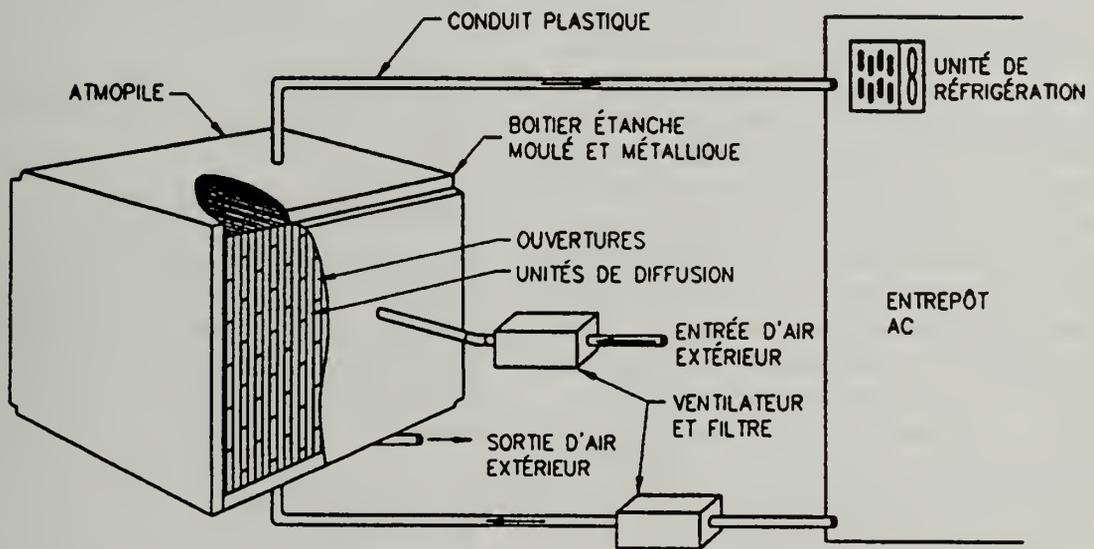


Fig. 11 Schéma d'un système Marcellin modifié pour l'entreposage AC.

sacs utilisés est suffisant. Pour maintenir une AC à 5 % de CO₂ et à 3 % d'O₂, il faut 50 m² de membrane de silicone par 100 t de fruits lorsque le volume libre standard est d'environ 2,9 à 3,6 (Raghavan et Gariépy, 1984). Bien que ce système ait été conçu à l'origine pour les pommes et les poires, il peut servir à entreposer des légumes tels que choux, poireaux, céleris et rutabagas (Gariépy et al., 1984).

Une version modifiée du système Marcellin (fig. 11) se compose de panneaux de diffusion des gaz enfermés dans un contenant métallique étanche avec deux voies distinctes de flux d'air et d'une unité de contrôle (Raghavan et al., 1984). Les panneaux de diffusion des gaz sont constitués de cadres carrés sur lesquels des membranes de silicone sont fixées de façon étanche pour permettre à l'air extérieur et à l'air de l'entrepôt

de circuler en sens opposés sans se mélanger. La circulation de l'air de l'entrepôt et de l'extérieur dans le diffuseur est assurée par des ventilateurs centrifuges contrôlés par minuterie pour un pourcentage de cycle complet. Bien que ce système soit relativement nouveau au Canada, on l'a utilisé avec succès dans une installation commerciale de choux depuis 1982.

SYSTÈME DE CONTRÔLE DE L'ÉTHYLÈNE

Il est souvent nécessaire d'enlever l'éthylène (C_2H_4) des entrepôts, car il cause le mûrissement de nombreux fruits et des désordres physiologiques aux légumes (Phan, 1971). Des concentrations aussi faibles que 0,1 ppm dans le fruit provoquent le mûrissement des pommes (Blanpied, 1985) et des kiwis (Bishop, 1990). Bien que des concentrations faibles d' O_2 et élevées de CO_2 réduisent la production d'éthylène et la sensibilité à l'éthylène (Phan, 1971), l'éthylène produit par les pommes et d'autres organismes, comme les champignons, doit être enlevé. Plusieurs types de fixateurs d'éthylène ont été popularisés (Blanpied, 1989), mais tous ont des limites qui en restreignent l'utilisation. Deux d'entre eux se retrouvent dans le commerce : i) fixateur à catalyseur chauffé et ii) fixateur à billes absorbant l'éthylène. On a également démontré que les rayons ultraviolets de certaines longueurs d'onde et l'ozone peuvent servir à oxyder l'éthylène. Cependant, il est nécessaire de poursuivre la recherche et le développement pour produire un système commercialement acceptable.

Le type de système de fixation du CO_2 influe également sur la concentration d'éthylène. Si l'on a recours à la purge atmosphérique, par ex., les générateurs d'azote ou gaz, on enlève la plus grande partie, mais pas la totalité, de l'éthylène produit par les pommes. Cette méthode de contrôle de l'éthylène peut suffire pour les produits qui génèrent moins d'éthylène que les pommes. Le charbon activé, qui sert à fixer le CO_2 , absorbe également l'éthylène. Cet éthylène peut être libéré dans l'atmosphère durant le cycle de désorption du CO_2 . L'enlèvement de l'éthylène à l'aide du charbon activé n'est pas

suffisamment efficace pour l'entreposage des pommes, mais peut suffire pour des produits qui génèrent moins d'éthylène.

Catalyseur chauffé

Un catalyseur chauffé peut maintenir l'éthylène à 1 ou 2 ppm dans un entrepôt de pommes McIntosh en vrac de $360 m^3$ (Blanpied, 1985). Ce système est muni d'un ventilateur qui fait circuler l'air de l'entrepôt à travers deux plaques de céramique qui servent d'échangeurs de chaleur en contact avec un catalyseur chauffé électriquement (fig. 12). Un clapet motorisé permet l'inversion du flux d'air qui traverse ces plaques à intervalles minutés. L'échangeur de chaleur en céramique est très efficace, mais l'utilisation de céramiques plus perméables réduirait l'énergie requise pour faire fonctionner le ventilateur. Ce catalyseur réussit à enlever jusqu'à 87 % de l'éthylène qui y circule. Le principal inconvénient du système catalytique est la grande quantité de chaleur requise pour enlever l'éthylène et le refroidissement de l'air avant son retour dans l'entrepôt.

Billes absorbant l'éthylène

Le fixateur à billes qui absorbe l'éthylène contient de petites particules sphériques de silicate d'aluminium imprégnées de permanganate de potassium ($KMnO_4$). Les billes sont habituellement chargées dans une cartouche scellée (fig. 13) à travers laquelle circule l'air qui provient de l'entrepôt AC. La réaction de l'éthylène avec le permanganate de potassium fait passer la couleur des billes de pourpre à brun au moment où elles atteignent le point de saturation.

Blanpied (1985) recommande une capacité d'enlèvement de 1,4 mL d'éthylène par m^3 de pommes McIntosh par heure, et de 0,28 $mL m^{-3} h^{-1}$ pour les pommes Empire. Il recommande également deux lits verticaux de 1,2 x 1,2 x 0,1 m contenant 140 kg de billes avec un ventilateur de $280 L s^{-1}$ pour un entrepôt de McIntosh de $360 m^3$. La performance des billes dépend du fabricant (Blanpied, 1985). Le fixateur doit être fréquemment vérifié afin d'en remplacer les billes usées.

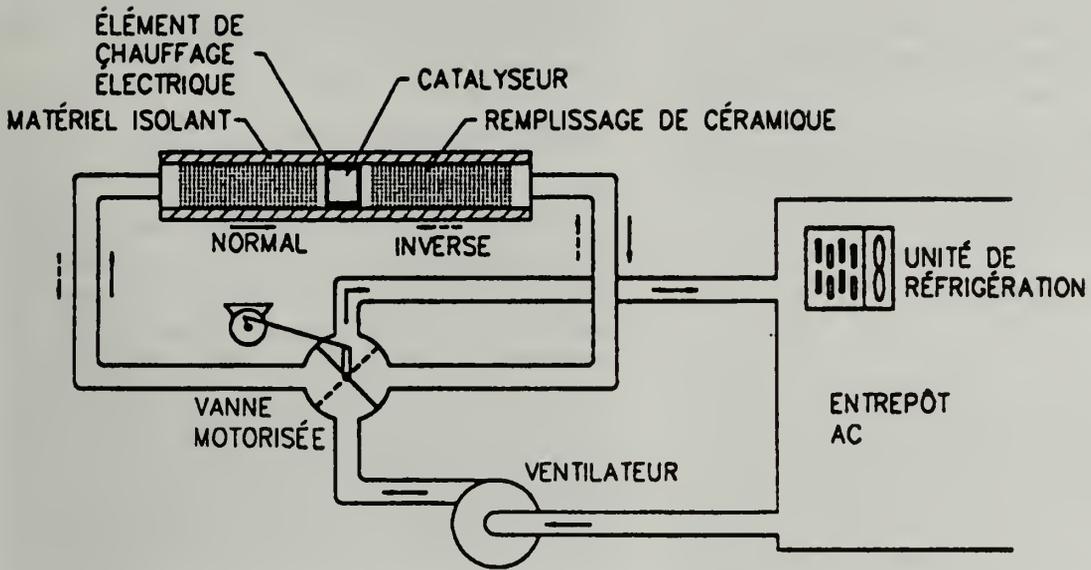


Fig. 12 Schéma du fixateur d'éthylène à catalyseur pour l'entreposage AC présenté par Blanpied (1985).

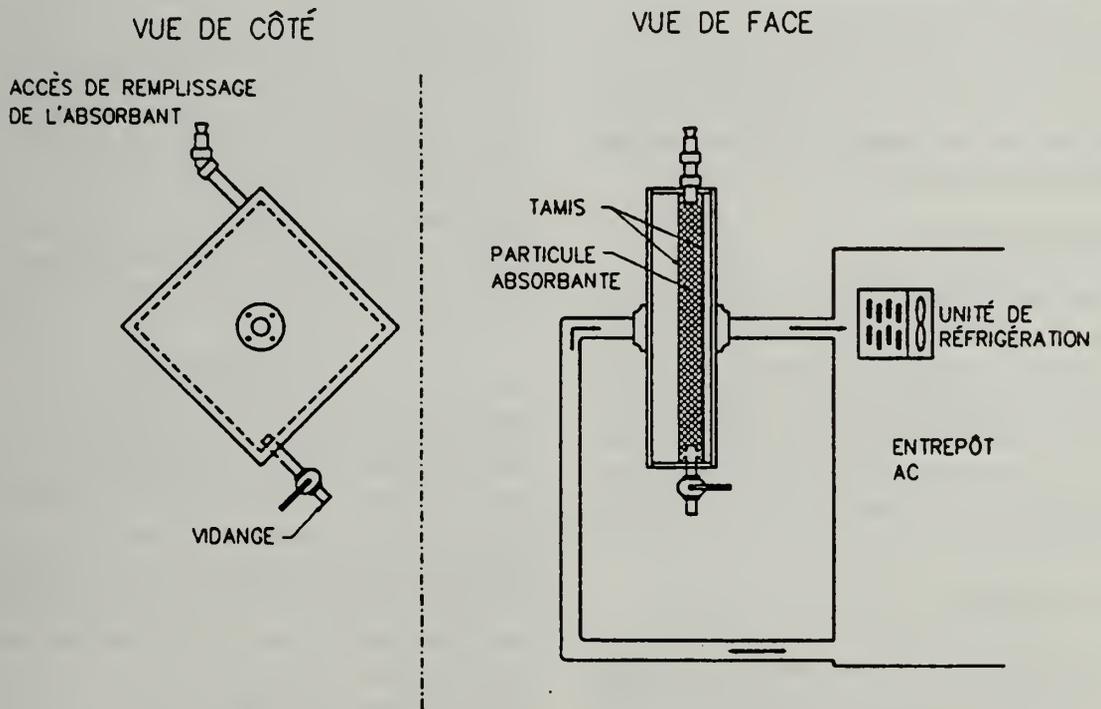


Fig. 13 Schéma du système à billes absorbant l'éthylène pour l'entreposage AC présenté par Blanpied (1985).

AUTOMATISATION

Pour utiliser efficacement un entrepôt AC, il est important de disposer des instruments appropriés pour mesurer les paramètres d'entreposage, c'est-à-dire, la température et la concentration des gaz. Les mesures et les contrôles peuvent s'effectuer à l'aide de simples instruments ou de systèmes complètement informatisés.

Mesure de l'oxygène

La mesure et le contrôle de l'O₂ sont déterminants pour une exploitation efficace d'un entrepôt AC moderne à faible concentration d'O₂. Les analyseurs d'O₂ paramagnétiques et polarographiques sont les plus recommandés pour une application à de faibles concentrations d'oxygène. L'analyseur chimique ORSAT est encore couramment utilisé pour déterminer la concentration d'O₂. Les frais d'investissement de cet appareil sont faibles et sa précision est suffisante pour des concentrations d'O₂ plus élevées, cependant il nécessite un opérateur qualifié et ne se prête pas à l'automatisation (Bishop, 1990).

Mesure du bioxyde de carbone

Les analyseurs à infrarouge fournissent des mesures précises du CO₂. L'analyseur chimique ORSAT peut également servir à mesurer le CO₂, mais présente les mêmes défauts que ceux indiqués ci-dessus pour l'analyse de l'O₂.

Mesure de l'éthylène

L'éthylène est difficile à mesurer, surtout aux faibles concentrations qui existent en entreposage des fruits. La seule méthode pratique de mesure de l'éthylène est la chromatographie en phase gazeuse qui requiert un appareil onéreux et un opérateur qualifié. Un chromatographe en phase gazeuse peut servir à l'analyse simultanée de l'O₂, du CO₂ en plus de l'éthylène.

Échantillonnage de gaz

Les échantillons de gaz requis pour les analyses doivent être prélevés à des endroits éloignés des entrées et des sorties de l'entrepôt AC. L'infiltration d'air dans les échantillons est une cause courante d'erreurs de mesure des

concentrations d'O₂ et de CO₂ des entrepôts AC. On peut éviter ces problèmes en faisant une bonne gestion des installations et en faisant attention dans les manipulations.

Contrôle de l'oxygène

Pour maintenir l'O₂ à la concentration voulue, de l'air est ajouté à débit contrôlé. La quantité totale d'air requise dépend de l'étanchéité de l'entrepôt et du taux de respiration du produit. Le contrôle automatique de l'O₂ est souhaitable dans des conditions de faibles concentrations d'O₂ afin de le stabiliser plus efficacement et plus facilement. On peut facilement automatiser les entrepôts AC en installant une simple valve à solénoïde sur l'entrée d'air. La valve d'admission d'air est automatiquement ouverte pendant une période de temps donnée lorsque l'analyse des gaz en détermine le besoin (Bishop, 1990).

Contrôle du bioxyde de carbone

Le contrôle du CO₂ dépend de la méthode utilisée. Pour la purge des gaz et les méthodes de lessivage externe, l'opération peut être activée par une valve à solénoïde qui contrôle la circulation du gaz.

Les systèmes automatisés peuvent simplifier le contrôle des entrepôts à faibles concentrations d'O₂, mais ils ne doivent pas servir de prétexte pour négliger le bon fonctionnement de toutes les composantes. Il est recommandé de vérifier régulièrement les concentrations gazeuses afin de réduire les erreurs du système automatique causées par un échantillonnage ou des réglages défectueux.

SÉCURITÉ

Les installations d'entreposage AC sont dangereuses en raison de la faible teneur en O₂ de leur atmosphère. Les accidents sont souvent fatals. Personne ne devrait entrer ou placer sa tête à l'intérieur d'un entrepôt AC en fonctionnement. Tous les entrepôts AC doivent être clairement identifiés avec des panneaux d'avertissement et les portes d'accès doivent être verrouillées. À des concentrations d'O₂ inférieures à 6 %, la perte de conscience survient en moins de 30 secondes, suivie de la mort.

BIBLIOGRAPHIE

- Anon. 1987. On-site PSA nitrogen for reliable, economical supply. Air Products and Chemicals, Inc., Allentown, Pa., 8 pp.
- ASHRAE. 1986. Refrigerated warehouses design. Applications handbook. Chapter 25.
- Bartsch, J.A. 1986. Creating a low oxygen atmosphere with liquid nitrogen. Agricultural Engineering Facts. Dept. Agric. Eng. Cornell University, Ithaca, N.Y. Fac. Rep. No. EF-9, 4 pp.
- Bartsch, J.A.; G.D. Blanpied. 1988. Air separator technology for controlled atmosphere storage. A workshop sponsored by Cornell Cooperative Extension. Cornell University. Ithaca, N.Y., 13 pp.
- Bartsch, J.A.; G.D. Blanpied. 1990. Refrigeration and controlled atmosphere storage for horticultural crops. Northeast Regional Agricultural Engineering Service. Cornell University, Ithaca, N.Y. NRAES J. Paper no 22. 44 pp.
- Bishop, D. 1990. Controlled atmosphere storage. Cold and chilled storage technology. Dellino, C.V.J. (ed.), Van Nostrand Reinhold Publisher, N.Y., p. 66-98.
- Blanpied, G.D. 1985. Handbook for low ethylene CA storage of McIntosh and Empire apples. Pomology Department. Cornell University, Ithaca, N.Y., 33 pp.
- Blanpied, G.D. 1989. A study of alternative methods for maintaining low ethylene concentrations in apple CA rooms. Fellman, J. (ed.), Proceedings of the fifth international controlled atmosphere research conference, Wenatchee, Wash.
- Bohling, H.; H. Hansen. 1977. Storage of white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) in controlled atmosphere. *Acta Hort.*, 62: 49-54.
- Desrosiers, J.; N. Desrosiers. 1977. The technology of food preservation. 4th ed. AVI Pub. Co. Inc., Westport, Conn.
- Gariépy, Y.; G.S.V. Raghavan; R. Plasse; C.T. Phan; R. Thériault. 1984. Long-term storage of cabbage, celery, and leek under controlled atmosphere. *Acta Hort.*, 157: 193-202.
- Kader, A.A. 1992. Modified atmospheres during transport and storage, Pages 85-92 in: A.A. Kader (tech. ed.) *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. Publ. 3311, Cooperative Extension, University of California, Div. of Agric. and Nat. Res., 296 pp.
- Lau, O.L. 1983. Storage responses of four apple cultivars to a "Rapid CA" procedure in commercial controlled-atmosphere facilities. *J. Amer. Hort. Sci.*, 108(4): 530-533.
- Lidster, P.D.; G.D. Blanpied, R.K. Prange. 1990. Dommages causés aux fruits et aux légumes en entreposage commercial sous atmosphère contrôlée. Publication 1847/F, Agriculture Canada, Ottawa, Ont.
- Marcellin, P., J. Leteinturier. 1967. Premières applications industrielles des membranes en caoutchouc de silicone à l'entreposage des pommes en atmosphère contrôlée. *Inst. Int. Froid.; Congr. Intern. Froid. Madrid (Espagne)*, p. 1-9.
- Palmer, R. 1959. Special report to CA storage operators. *Amer. Fruit Grower*. 79(8): 20-21.
- Pflug, I.J. 1960. Oxygen reduction in CA storages: A comparison of water versus caustic soda absorbers. *Mich. Agr. Expt. Stat. Q. Bull.*, 43(2): 455-466.
- Phan, C.T. 1971. L'éthylène, métabolisme et activité métabolique. Masson et Cie. Paris (France), 130 pp.
- Raghavan, G.S.V.; Y. Gariépy; R. Thériault; C.T. Phan; A. Lanson. 1984. System for controlled atmosphere long-term cabbage storage. *Int. J. Refrig.*, 7(1): 66-71.
- Raghavan, G.S.V.; Y. Gariépy. 1984b. Structure and instrumentation aspects of storage systems. *Acta Hort.*, 157: 5-30.

- Sharples, R.O., G.C. Munoz. 1974. The effects of delay in the period taken to cool and establish low oxygen conditions on the quality of Cox's Orange Pippin apples. *J. Hort. Sci.*, 49: 277-286.
- Smock, R.M. 1979. Controlled atmosphere storage of fruits. *Hort. Review*, 1: 301-336.
- Smock, R. M.; L.L. Creasy, G.D.; Blanpied. 1960. Water scrubbing in CA rooms. Cornell University, Ithaca, NY. Paper no S-508. 6 pp.
- Waelti, H.; J.A. Bartsch. 1990. Controlled atmosphere facilities. pp. 373-389. In: M. Calderon and R. Barkai-Golan (eds.) *Food Preservation by Modified Atmospheres*. CRC Press, Boca Raton, Fl.
- Waelti, H.; R.P. Cavalieri. 1990. Matching nitrogen equipment to your needs. *Washington State University Tree Fruit Postharvest Journal*. Vol. 1 (2): 3-13. Liste des figures

CANADIAN AGRICULTURE LIBRARY



BIBLIOTHEQUE CANADIENNE DE L'AGRICULTURE

3 9073 00102626 1

