

La perte d'eau au cours de la réfrigération dans l'air des fruits et des légumes

Guy Létang

La mise en œuvre de la réfrigération permet de réduire la perte en fruits et légumes frais entre la production et la consommation de 30 % (taux de perte encore observé dans les pays dits « émergents ») à 6 % pour un surcoût de production de l'ordre de 10 %.

Les fruits et les légumes sont réfrigérés soit dans l'air, soit dans l'eau, soit encore avec des procédés mixtes ou sous vide. Les procédés de réfrigération dans l'air sont les moins rapides, mais ils sont polyvalents et donc mieux adaptés pour des stations ayant souvent des produits divers à traiter. De plus, compte non tenu de la perte de matière par évaporation d'eau, et malgré leur mise en œuvre encore souvent rudimentaire (palette posée au milieu d'une chambre froide), ils sont les moins coûteux et leur emploi tend à se généraliser. La réfrigération par trempage dans de l'eau fraîche plus ou moins agitée, appelée « *hydro-cooling* », permet d'améliorer la conservation des produits à courte durée de conservation comme les asperges et les cerises. Cette technique permet de refroidir rapidement mais elle est plus difficile à mettre en œuvre que la réfrigération dans l'air, son coût est supérieur et l'excès d'eau retenu par les produits est préjudiciable à leur bonne conservation. On a essayé d'améliorer la technique de « *hydro-cooling* » en lui substituant celle de « *hydrair-cooling* ». Ce procédé consiste à faire circuler de l'eau pulvérisée à contre courant de l'air froid au travers des palettes. L'efficacité du système augmente avec le débit d'air et l'ajourage des colis. Afin d'éliminer complètement les effets indésirables de l'eau résiduelle aussi bien sur la conservation des produits (développement de moisissures) que sur la tenue

Cet article a été également publié dans la revue Générale du Froid, n° 969, p. 37-42, de novembre 1996.

La production des fruits et des légumes représente 13 % en valeur de la production agricole française et 10 % de la consommation alimentaire des ménages

Sur les 3 500 000 tonnes de fruits produites annuellement en France, 2 000 000 de tonnes sont commercialisées à l'état frais. Les pommes, les poires et les raisins, qui sont des produits relativement faciles à conserver, en représentent les 2/3. Le 1/3 restant (650 000 tonnes) est composé des fruits récoltés en été, qui pourraient bénéficier d'une chaîne du froid plus efficace, il s'agit des fraises, des abricots, des pêches et des nectarines. En ce qui concerne les légumes, sur une production de 4 800 000 tonnes, 3 400 000 tonnes sont commercialisées en frais et près de la moitié de ce tonnage produit pendant la saison chaude pourrait bénéficier d'un traitement amélioré. Il s'agit principalement des choux-fleurs, des salades et des melons (950 000 tonnes), des aubergines, des poivrons, des courgettes, des concombres (340 000 tonnes), des artichauts, des asperges et des radis (210 000 tonnes).

des emballages souvent en carton, tout en conservant les avantages procurés par l'évaporation de l'eau, le Cemagref étudie actuellement un procédé dérivé de « *hydrair-cooling* » qui consiste à fabriquer un aérosol d'eau et à n'apporter que la quantité d'eau nécessaire aux échanges thermiques. Cette technique appelée « brumisation » est déjà utilisée au cours de la réfrigération des carcasses de gros animaux. L'évaporation de l'eau accélère le refroidissement dans le cas où l'eau n'est pas présente naturellement à la surface des produits et la perte d'eau est réduite dans des proportions plus importantes qu'avec la technique du « froid humide » où l'air est simplement saturé en eau.

Guy Létang
Cemagref
BP 121
92185 Antony

L'eau est un des constituants principaux des fruits et des légumes. Les graines mises à part, les organes végétaux en contiennent entre 80 et 95 % en poids. Comme pour l'ensemble des êtres vivants, c'est le constituant principal du milieu interne où se déroulent les réactions du métabolisme, et le maintien de sa teneur au-dessus d'un certain seuil est vital.

La turgescence des tissus végétaux assure l'aspect « fraîcheur », composante essentielle de la qualité organoleptique de ces deux familles d'aliments. La perte de cette « fraîcheur » apparente est aussi le témoin d'une perte en valeur nutritionnelle.

La réfrigération va ralentir la dégradation plus ou moins rapide de l'organe végétal, mais l'abaissement de la température devra s'accompagner de la maîtrise des échanges d'eau avec l'ambiance car la perte d'eau accélère la sénescence, alors que la présence d'eau liquide en surface favorise les néocroses locales et le développement microbien.

Le but de cet article est de décrire la différence de sensibilité à la déshydratation que peuvent présenter divers organes végétaux selon leur nature, d'étudier les mécanismes en relation avec le fonctionnement de l'équipement frigorifique et d'examiner quelques conséquences pratiques pour la gestion des moyens de la chaîne du froid dans la filière fruits et légumes.

Tableau 1 - Teneur moyenne en eau de quelques fruits et légumes. ▼

| Teneur en eau (% poids) | |
|----------------------------|----|
| Légumes | |
| Asperge | 94 |
| Haricot vert | 89 |
| Melon | 89 |
| Tomate | 94 |
| Fruits | |
| Banane | 75 |
| Cerise | 82 |
| Orange | 84 |
| Poire | 83 |
| Pomme | 83 |

Importance et conséquences de la perte d'eau

Les fruits et les légumes sont des denrées alimentaires riches en eau (tableau 1). C'est l'eau qui est responsable de leur turgescence et qui leur donne leur aspect « fraîcheur » caractéristique. La perte d'eau représente non seulement une perte de matière, mais aussi une perte de qualité quand elle atteint un niveau tel que le métabolisme de l'organe végétal est altéré. La *perte d'eau limite*, qui se caractérise par un flétrissement irréversible, est relativement faible, de l'ordre de 4 à 6 % du poids initial. Elle peut être atteinte rapidement après récolte ou cueillette. Un légume feuillu (salade - radis) ou un organe végétal immature comme le haricot vert, séjournant sur le terrain après récolte dans des conditions estivales, peut perdre de 10 à 15 % de son poids en eau en une journée. La réfrigération précoce après récolte et la conservation au froid, en divisant par 10 l'allure de l'évaporation d'eau, autorise un délai de commercialisation de quelques jours pour les produits les plus sensibles. Les fruits, destinés à se détacher de la plante, sont moins fragiles que les organes récoltés en pleine végétation.

Le *flétrissement* est un phénomène irréversible, les grandes fonctions physiologiques diminuent d'intensité, puis s'arrêtent. Passé ce stade, toute humidification ne peut plus que favoriser le pourrissement. Le flétrissement fait perdre tout le potentiel « fraîcheur », composante principale de la qualité commerciale des fruits et des légumes, non seulement au produit directement concerné, mais aussi à l'ensemble du lot. Quand il n'est pas possible de consommer les produits immédiatement après leur récolte, il est nécessaire de ralentir leur activité métabolique précocement par réfrigération et de minimiser leur déperdition d'eau tout au long du circuit commercial.

Les effets de la température et de la composition gazeuse de l'ambiance [O_2 , CO_2 , C_2H_4] sur le métabolisme de la plupart des organes végétaux sont assez bien connus et maîtrisés. Les applications vont de la grande chambre froide de conservation en atmosphère contrôlée pour les fruits de longue conservation comme les pommes et les poires, à l'emballage en atmosphère modifiée pour les fruits et les légumes fragiles. Il n'en est pas de même pour la teneur en eau de l'ambiance, qui est plutôt subie dans la plupart des cas comme

une conséquence des conditions d'exploitation de l'installation frigorifique. C'est une lacune, car on a constaté que ses effets sont synergiques avec ceux des autres paramètres caractéristiques de l'ambiance.

Les effets physiologiques de la teneur en eau de l'ambiance

Les effets physiologiques de la teneur en eau de l'ambiance sont mal connus car on manque d'études systématiques (Come, 1991). Le stress hydrique résulte d'un déficit de l'offre en eau par le milieu par rapport aux besoins de l'organe, qui réagit en augmentant son activité métabolique et en synthétisant de l'éthylène, sa sénescence s'en trouvant alors accélérée. L'émission d'éthylène dans l'ambiance rend la stimulation de la sénescence contagieuse.

Chez les organes massifs et riches en réserves comme les fruits charnus, des désordres physiologiques peuvent apparaître au cours de la conservation au froid. Ils se traduisent par l'apparition des « maladies du froid ». En ce qui concerne les organes les plus fragiles, caractérisés par des réserves très faibles, une grande surface d'échange et un stress dû à la mutilation de la récolte (légumes feuillus - racines et tiges jeunes - bourgeons), la survie est rapidement menacée. Dans le cas des carottes, la fermeté qui est un des facteurs principaux de leur qualité, décroît quand la perte d'eau augmente (Woods, 1993).

Une humidité élevée, associée à une remontée de la température, permet la cicatrisation des blessures de récolte des tubercules. De même, un degré d'humidité proche de la saturation, limite « les maladies du froid » de la banane (Come, 1991).

Les effets microbiologiques de la teneur en eau de l'ambiance

D'une manière générale, le développement des champignons et des bactéries est favorisé par une humidité élevée. Dans le cas des fruits et des légumes, ce serait la présence d'eau liquide qui favoriserait la prolifération de la flore microbienne naturellement présente.

L'eau liquide peut être d'origine extérieure (arrosage), mais elle peut aussi provenir de la condensation de la vapeur d'eau de l'ambiance en des « points froids », où la température du produit peut se trouver momentanément en-dessous de la température de rosée de l'ambiance. Ce

phénomène peut se manifester de manière cyclique à l'intérieur des emballages. Des fluctuations de température de trop grande amplitude font alterner des phases où le produit est tour à tour plus chaud (évaporation) et plus froid que son emballage (condensation en surface), il en résulte un pompage irréversible de l'eau du produit et une accumulation d'eau liquide en certains points.

Cependant, une haute humidité de l'ambiance n'est pas forcément un facteur favorable au développement des micro-organismes.

Dans le cas de nombreuses variétés de choux (choux-fleurs - choux verts - choux de Bruxelles), des racines (carottes - céleris - rutabagas), des poireaux et des pommes de terre, on a observé qu'une humidité relative de l'ordre de 97 % était moins propice aux attaques fongiques qu'une humidité relative comprise entre 90 et 95 % (Burchill, 1992). De même, pour les fraises, des chercheurs italiens ont trouvé que le développement des moisissures était corrélé à la perte de poids par évaporation d'eau au cours de la conservation. Un haut degré d'humidité évite le « stress hydrique » au niveau de l'épiderme et les nécroses cellulaires qui peuvent en résulter : le terrain est moins favorable à l'établissement des micro-organismes, même psychotropes (Tonini et Ramini, 1986).

F. Mohd-Som *et al.*, ont trouvé que le ruissellement de l'eau apportée par brumisation à la surface de choux *brocoli*, pouvait avoir un effet inhibiteur sur le développement de la flore microbienne en surface. La population des lots expérimentaux brumisés se trouvait réduite de 25 % après cinq jours de conservation par rapport au lot témoin, conservé dans les mêmes conditions de température de +4 °C, mais avec une humidité relative de 83 % (Mohd-Som, Spomer, Martin et Schmidt, 1995).

Le fait que l'on se soit intéressé beaucoup plus aux conséquences qualitatives de la perte en eau qu'à son aspect « perte de matière directe » tient à ce que la dépréciation qualitative qui en résulte, entraîne une moins value commerciale et une perte de produit par déchet, sans commune mesure.

Cependant, l'aspect « perte de matière directe » n'est plus à négliger quand la valeur du produit est relativement élevée comme dans le cas des fruits à noyaux, des fraises et des asperges.

Les mécanismes de la perte d'eau

La perte d'eau des produits dont il est question dans cet article, vient principalement du fait que la pression de vapeur de l'eau contenue dans le produit (p_{wp}) est supérieure à celle qui règne dans l'ambiance environnante (p_{wm}). C'est le phénomène d'évapotranspiration dont l'intensité peut être exprimée par la relation [01].

$$m_w = \beta \cdot S \cdot [p_{wp} - p_{wm}] \quad [01]$$

| | | |
|---------|-----------------------|----------------------------|
| m_w | débit d'eau | kg / s |
| β | coefficient d'échange | kg / s.m ² . Pa |
| S | Surface d'échange | m ² |

Le produit [$\beta \cdot S$] est souvent remplacé par un coefficient B exprimé en kg d'eau / s. kg_{produit}. Pa.

m_w s'exprime alors en kg d'eau / s. kg_{produit}.

La perte de poids comprend, en plus de la perte d'eau, la consommation des réserves nécessaire à la survie de l'organe végétal dont les issues sont évacuées sous forme de CO₂ et de H₂O par la respiration. Cette composante de la perte de poids ne sera pas prise en considération dans le cadre de cet article, car liée au métabolisme. Elle est d'une part inéluctable, et d'autre part, fortement ralentie par l'abaissement de la température. Le métabolisme entraîne aussi une production d'énergie dégradée en chaleur dont une partie participe à l'évapotranspiration.

A titre d'exemple, et pour fixer les idées, on peut comparer deux produits représentant des cas extrêmes. La pomme « *golden delicious* » conservée en atmosphère contrôlée et à basse teneur en oxygène, aux environs de + 1 °C, évapore 200 fois moins d'eau que la même surface sphérique d'eau libre, placée dans les mêmes conditions d'ambiance. La consommation des réserves représente 25 % de la perte de poids totale.

La laitue est un produit dont le coefficient d'échange B est du même ordre de grandeur que celui d'une sphère d'eau libre de même masse. A l'opposé de la pomme, fruit charnu et protégé par un épiderme, la laitue est un produit « sensible » comme la plupart des légumes feuillus et des organes végétaux immatures (gousses - tiges - bourgeons), pour lesquels la perte d'eau par évapotranspiration est importante et représente la majeure partie de la perte de poids.

■ La perte d'eau au cours du refroidissement

Au cours du refroidissement, la température du produit étant supérieure à la température de vapeur saturante de l'ambiance, la pression de la vapeur d'eau à la surface du produit est toujours supérieure à celle qui règne dans l'ambiance, même quand cette dernière est pratiquement saturante, comme dans le cas du système de réfrigération dit à « froid humide ».

Des essais systématiques de réfrigération ont été conduits avec des cylindres de plâtre à la surface desquels l'activité de l'eau restait égale à 1 au cours de leur refroidissement dans l'air (figure 1). Ces cylindres ont été traités dans différentes conditions de températures sèche et humide (tableau 2).

Les résultats sont présentés par le tableau 3 et illustrés par la figure 2. Leur analyse montre que la perte d'eau au bout du temps t_{θ^*} : [ΔP]_{Ref} peut être exprimée par la relation [02] qui se présente sous la forme d'une somme de deux composantes (Létang, Alvarez et ude, 1994).

$$[\Delta P]_{Ref} = \beta \cdot S / K \cdot [p_{wp0} - p_{wp}^*] + \beta \cdot S \cdot [p_{wp}^* - p_{wm}] \cdot t_{\theta^*} \quad [02]$$

$\beta \cdot S / K \cdot [p_{wp0} - p_{wp}^*] = \text{composante 1}$ -
 $\beta \cdot S \cdot [p_{wp}^* - p_{wm}] \cdot t = \text{composante 2}$

Tableau 2. – Conditions de réfrigération appliquées aux cylindres d'essais.

| Régime | 14,5/8,7 | 9,4/9,3 | 8,9/5,5 | 4,6/3,8 | 5,0/1,7 | 1,1/1,0 |
|-----------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Température sèche °C | 14,5 | 9,4 | 8,9 | 4,6 | 5,0 | 1,1 |
| Température humide °C | 8,7 | 9,3 | 5,5 | 3,8 | 1,7 | 1,0 |
| Humidité relative % | 45 | 100 | 60 | 88 | 55 | 100 |

La température initiale des cylindres était de + 41 °C et leur température finale de + 10,5 °C.

| Régime | 14,5/8,7 | 9,4/9,3 | 8,9/5,5 | 4,6/3,8 | 5,0/1,7 | 1,1/1,0 |
|---|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| Temps de refroidissement +41°C↓+10,5°C en mn. | 184 | 192 | 130 | 118 | 106 | 103 |
| Perte de poids en % P _{initial} . composante 1/composante 2 | 0,92/1,10 | 1,15/0 | 0,90/0,50 | 0,89/0 | 1,00/0,40 | 0,90/0 |

Tableau 3. – Résultats des pertes d'eau observées sur les cylindres d'essais.

– t_{Θ} représente la durée du refroidissement considérée comme le temps nécessaire pour passer de la température initiale Θ_{s0} à la température d'équilibre Θ^* .

La température d'équilibre Θ^* est définie comme la température atteinte lorsque le produit ne se refroidit plus. Elle est comprise entre la température humide de l'ambiance Θ_h (activité de l'eau en surface = 1), et la température sèche Θ_m de l'ambiance (activité de l'eau en surface = 0).

► La composante 1 = $\beta \cdot S / K \cdot [p_{wp0} - p_{wp}^*]$ peut être interprétée comme la perte d'eau participant au refroidissement du corps.

– Elle augmente avec la quantité de chaleur extraite du corps : $M \cdot C_p \cdot [\Theta_{s0} - \Theta^*]$.

Les pressions de vapeur d'eau p_{wp0} et p_{wp}^* , respectivement pressions de la vapeur d'eau à la surface du produit au début du refroidissement et à l'équilibre, sont des fonctions croissantes de Θ_{s0} et Θ^* .

La perte d'eau est d'autant plus importante que l'écart entre ces deux températures est grand et que Θ_{s0} est élevée.

– Elle dépend de l'allure de l'extraction de chaleur au travers du facteur $\beta \cdot S / K$.

Ce facteur représente le rapport du coefficient de facilité d'échange d'eau au coefficient de facilité d'échange de chaleur. Il est pratiquement constant dans l'intervalle des conditions expérimentales.

– Elle est indépendante du temps de refroidissement.

► La composante 2 = $\beta \cdot S \cdot [p_{wp}^* - p_{wm}] \cdot t_{\Theta}$ peut être interprétée comme l'effet des conditions d'échange d'eau à la surface du produit quand il a atteint la température d'équilibre Θ^* .

– Elle dépend des conditions d'échange d'eau en surface [$\beta \cdot S$].

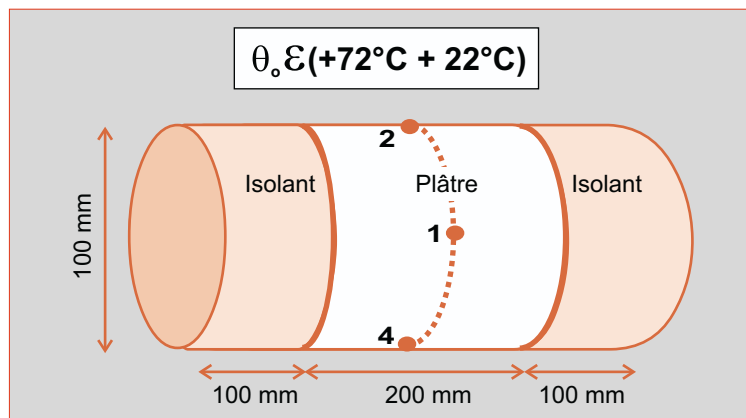


Figure 1. – Matériel et conditions expérimentales.

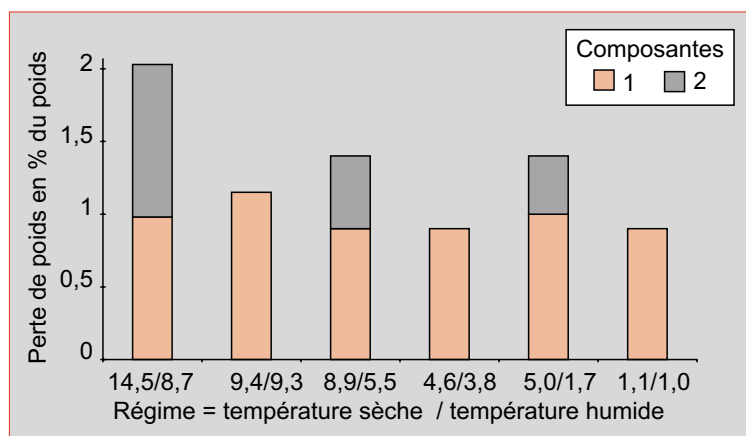


Figure 2. – Perte de poids d'un produit humide au cours de son refroidissement de +41°C à +10,5°C sous différents régimes de réfrigération.

– Elle dépend de l'humidité de l'air au travers du facteur [$p_{wp}^* - p_{wm}$].

p_{wp}^* représente la pression de la vapeur d'eau à la surface du produit quand cette dernière atteint la température d'équilibre Θ^* et p_{wm} représente la pression de la vapeur d'eau dans l'ambiance.

La composante 2 est nulle dans le cas du « froid humide » où l'air est saturé en eau : $p_{wp}^* = p_{wm}$.

– Elle dépend de la durée du refroidissement t_{Θ} .

Dans les conditions habituelles de réfrigération, à savoir : température d'air proche de 0 °C et surface de batterie froide permettant d'assurer une humidité supérieure à 85 % - domaine des régimes :

$$[4,6 / 3,8 - 1,1 / 1,0] \text{ (tableau 3),}$$

la composante 1 est nettement supérieure à la composante 2. Le « froid humide », en annulant la composante 2, n'a qu'un effet limité sur la perte d'eau au cours du refroidissement. Par contre, si la charge frigorifique dépasse la puissance nominale de la batterie froide - cas du régime : [5,0 / 1,7] (tableau 3), l'annulation de la composante 2 présente un avantage, c'est ce qui peut expliquer les améliorations apportées par le « froid humide » souvent signalées dans la pratique..

Seul l'apport d'eau en surface par « brumisation » pendant le refroidissement permet de diminuer la composante 1, d'annuler la composante 2 et de garder l'intensité des échanges de chaleur sans puiser dans les réserves d'eau du produit.

En annulant la composante 2, qui reste seule active au cours de la conservation quand le produit est en équilibre avec l'ambiance, le « froid humide » permet de pratiquement annuler la perte de poids par évaporation d'eau pendant cette période.

Les figures 3 et 4 représentent les résultats enregistrés au cours du refroidissement de courgettes initialement à la température de + 22 °C et conditionnées en colis « carton » de 5 kg palettisés.

La réfrigération était réalisée dans une ambiance à la température de + 7 °C, saturée en eau, et délivrée par une installation « froid humide ».

La palette A était placée au milieu de la chambre froide, dans le flux d'air projeté par les diffuseurs des batteries froides, l'air circulait autour de la palette. Dans le cas de la palette B, l'air était forcé au travers des colis. Le suivi du refroidissement des courgettes a été réalisé en sept points répartis en profondeur dans la palette, depuis l'entrée de l'air (position 1) jusqu'à son échappement (position 7).

La dispersion des résultats concernant les temps de refroidissement est importante, surtout dans le cas de la palette A. Elle est difficile à interpréter en raison de la complexité de l'écoulement dans

un tel arrangement d'objets et de la diversité des conditions d'échange de chaleur et d'eau (température, humidité et vitesse de l'air) qui en découlent localement. Cependant, alors que les durées de refroidissement résultant des conditions d'échange de chaleur entre l'ambiance et le produit, sont dans un rapport de 1 à 4, les pertes de poids sont du même ordre de grandeur [1,06 % en moyenne pour la palette A et 0,97 % en moyenne pour la palette B]. L'indépendance entre la perte d'eau au cours du refroidissement et l'allure du refroidissement lorsque l'ambiance est saturée, observée avec les cylindres de plâtre, semble se confirmer dans le cas des courgettes.

■ La perte d'eau pendant la conservation

La composante 2 = $\beta \cdot S \cdot [p_{wp}^* - p_{wm}] \cdot t$, reste active après le refroidissement quand l'humidité de l'ambiance autour du produit n'est pas saturante, ou qu'une source de chaleur rayonnante apporte de l'énergie à la surface du produit.

La perte d'eau est d'autant plus intense que l'écoulement de l'air est « agressif » par sa vitesse et sa turbulence et que le produit présente peu de résistance au relargage de l'eau en surface [β grand].

Une grande surface d'échange spécifique [S / M_p] accentue le phénomène. Les « reliefs et arrêtes » en surface sont autant de points où l'effet est plus marqué (extrémités des feuilles - surfaces de coupe).

L'humidité de l'ambiance d'une chambre froide est difficile à maîtriser, surtout si cette chambre est de petite taille et en communication fréquente avec l'extérieur. Les « ouvertures de portes » entraînent des entrées de chaleur et d'humidité créant des conditions de fonctionnement de la batterie froide dépassant souvent ses possibilités nominales et ne permettant plus de maintenir les conditions d'ambiance requises.

Les échanges d'eau entre le produit et la batterie froide peuvent être décrits par un modèle simple dérivé de celui proposé par Cortella *et al.*, 1991. Le débit d'eau relarguée par le produit m_w , exprimé en kg d'eau / s. kg_{produit}, peut être représenté par la relation [03] :

$$m_w = \frac{p_{wp} - p_{wb}}{\frac{1}{B} + C \frac{\Theta_p - \Theta_b}{Q_s}} \quad [03]$$

- B coefficient d'échange de matière - kg eau / s. kg produit · Pa
- C $h / \beta = [(D_{pw} / DT) \cdot DHv]_{\Theta_b}$ - constante psychrométrique
- Θ_p et p_{wp} température et pression de vapeur d'eau à la surface du produit - °C / Pa
- Θ_b et p_{wb} température et pression de vapeur d'eau à la surface de la batterie froide - °C / Pa
- Q_s puissance frigorifique sensible échangée au niveau de la batterie froide - W / kg de produit

La relation [03] n'est simple qu'en apparence, car les facteurs ne sont pas indépendants.

– Les grandeurs Θ_p et p_{wp} d'une part et Θ_b et p_{wb} d'autre part sont liées physiquement.

– La température du produit Θ_p est une contrainte du procédé, elle dépend de la nature du produit.

La température de la batterie froide Θ_b est liée à la température du produit Θ_p par la définition de la batterie froide (caractéristiques et fonctionnement) retenue pour répondre à la charge frigorifique représentée par la chaleur sensible Q_s , au travers de la relation [04] :

$$Q_s = h \cdot A_b \cdot [\Theta_{ac} - \Theta_{as}] \quad [04]$$

« h » est le coefficient d'échange de chaleur sensible à la surface de la batterie froide et A_b la surface d'échange exprimée en m² / kg produit.

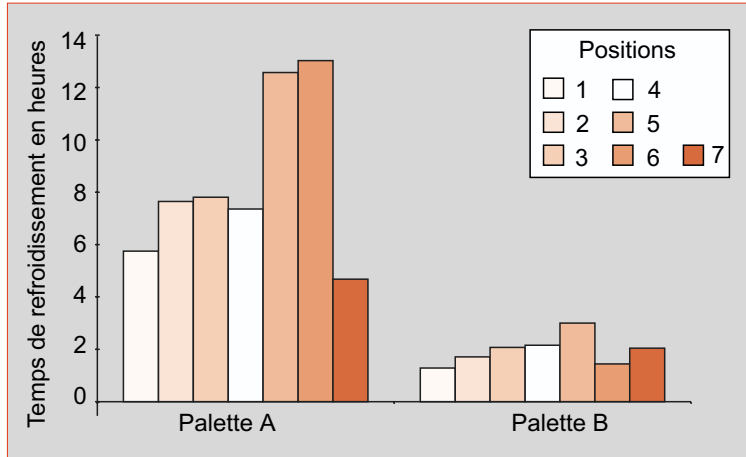
La température de l'air à l'entrée de la batterie froide Θ_{ac} représente la température de l'air dans la chambre froide. Elle peut être considérée comme peu différente de la température des produits Θ_p dans le cas de la conservation.

Θ_{as} représente la température de l'air à la sortie de la batterie froide.

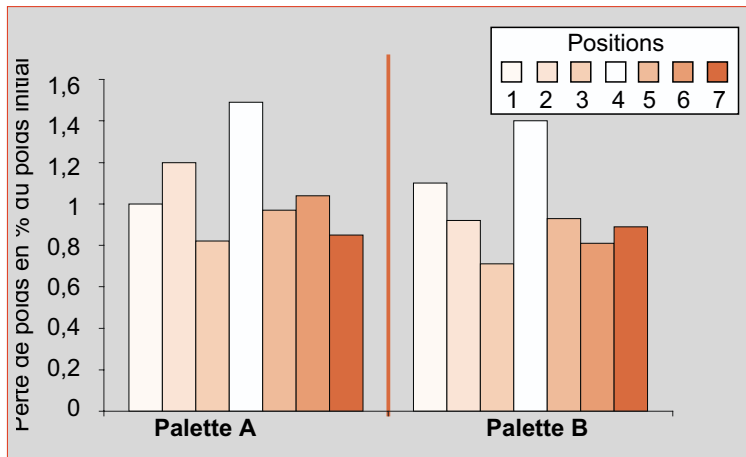
Si on appelle $\xi = [\Theta_{ac} - \Theta_{as}] / [\Theta_{ac} - \Theta_b]$ l'efficacité de la batterie froide, la relation [04] s'écrit :

$$Q_s = h \cdot A_b \cdot \xi \cdot [\Theta_p - \Theta_b] \quad [4bis]$$

– Cortella *et al.*, (1991) ont réalisé des simulations pour les conditions résumées dans le tableau 4.



▲ Figure 3. – Temps de refroidissement de +22 °C à +10 °C pour des courgettes conditionnées en palettes et placées dans une ambiance à + 7 °C-100 % HR.



▲ Figure 4. – Perte de poids de courgettes conditionnées en palettes et réfrigérées de +22°C à +10°C dans de l'air à +7°C - 100 % HR.

Tableau 4 – Valeurs simulées pour trois produits courants (Cortella *et al.*, 1991)

| Produit | Température à la surface du produit | Coefficient d'échange B 10 ⁻¹¹ kg / s.kg produit. Pa | Puissance frigorifique sensible Q _s 10 ³ W / kg |
|---------|-------------------------------------|--|--|
| Pomme | = 0 °C | 4,2 | 25 et 45 |
| Pêche | = 0 °C | 56,5 | 29 et 49 |
| Laitue | = 0 °C | 731,5 | 53 et 73 |

Ils ont trouvé que la perte d'eau augmente avec la charge frigorifique sensible Q_s et l'écart de température $[\Theta_p - \Theta_b]$ qui en résulte, ce qui est une règle bien connue, mais aussi qu'elle passe par un maximum pour une valeur de la différence $[\Theta_p - \Theta_b]$ d'autant plus grande que Q_s est élevée et que la résistance au transfert d'eau $[1/B]$ est grande (tableau 5).

Tableau 5. – Relevés d'écarts de température réalisés dans une grande chambre froide. ▶

| | Pomme | Pêche | Laitue |
|---------------------------------------|-------|--------|--------|
| $[\Theta_p - \Theta_b]$ perte max. | 10 °C | 3,5 °C | 1 °C |

Ces résultats, obtenus par simulation en régime permanent, demandent à être confirmés par l'expérimentation.

Des relevés réalisés dans une grande chambre froide de conservation pour pommes montrent un assez bon accord entre la mesure de la quantité d'eau recueillie sur la batterie froide m_w et les prévisions faites à partir des conditions de fonctionnement « moyennes » de cette dernière (tableau 6) (Létang et Ude, 1995).

La maîtrise de la perte d'eau : les moyens d'action

– Pendant le refroidissement

En ce qui concerne la phase de refroidissement, seule la « brumisation » permet de réduire la perte d'eau de manière significative. L'application de la « brumisation » à des produits traités en palette passe par le contrôle des conditions locales d'écoulement du médium diphasique à travers l'empilement et la maîtrise de la captation des gouttelettes d'eau, afin d'assurer un traitement homogène dans la masse sans accumulation d'eau excessive. Des travaux sont actuellement en cours à la division

Génie des procédés frigorifiques du Cemagref.

Dans le cas des produits fragiles, dont la conservation est limitée à quelques jours, la réduction de la perte d'eau au cours de la réfrigération peut représenter une journée supplémentaire de survie commerciale en retardant le flétrissement, sans compter les effets bénéfiques que peut constituer une petite réserve d'eau excédentaire, face aux aléas des circuits de distribution.

La présence d'un emballage protecteur au cours de cette phase peut réduire la perte d'eau, mais il n'est réellement efficace que s'il est appliqué intimement sur le produit (sous vide). Si c'est un film tendu autour du colis, il constitue un piège froid sur lequel va s'accumuler l'eau qui s'évapore des produits plus chauds. Dans tous les cas, la présence d'un emballage réduit fortement l'allure du refroidissement.

– Pendant la conservation

Comme on l'a vu au paragraphe précédent, pendant la conservation, la perte d'eau augmente avec l'apport de chaleur sensible dans l'enceinte frigorifique et dépend de la réponse de l'installation frigorifique à cette charge. Il y a tout intérêt à limiter les entrées de chaleur dans la chambre froide, en organisant au mieux les mouvements des produits pendant leur séjour au froid.

Les entrées de chaleur dans les chambres froides de conservation sont principalement dues aux ouvertures de portes. Une porte de dimensions 2 m x 1,80 m, « grande ouverte », située entre un local à + 20 °C - 60 % HR et une chambre froide à 0 °C - 90 % HR, laissent échanger 0,5 m³ d'air à la seconde. Cet échange représente 20 kW en puissance frigorifique dont 12 kW de chaleur sensible. Cet apport de chaleur est important pour une installation frigorifique d'une puissance de l'ordre de 6 kW, équipant une chambre froide de 100 m³.

Tableau 6. – Conditions de conservation et perte d'eau des pommes (les paramètres sont définis en haut de la page précédente). ▼

| Θ_p °C | Θ_b °C | p_{wp} Pa | p_{wb} Pa | B 10 ⁻¹¹ kg/ s. kg.pom. Pa | C | Q_s W / kg pom. | m_w | |
|---------------|---------------|-------------|-------------|---|----------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------|
| | | | | | | | 10 ⁻⁹ kg/ s. prévu | kg pom. mesuré |
| +1,5 | -0,2 | 682 | 601 | 4,3 | 1,63 10 ⁸ | 0,072 | 3,0 | 3,2 |
| +2,4 | +0,2 | 729 | 620 | 4,0 | 1,63 10 ⁸ | 0,104 | 3,8 | 3,5 |

La perte d'eau des produits « sensibles » sera d'autant plus importante que la chambre en contiendra peu. L'apport d'eau libre sous une autre forme, par la surface des réserves d'eau recevant les fleurs coupées après récolte ou encore par les « brumisateurs » équipant depuis plus récemment les serres réfrigérées pour les fruits et les légumes, représente un palliatif.

Il faut éviter de surcharger une chambre froide contenant des produits « sensibles » à la perte d'eau, et en particulier, avec des produits chauds, surtout si ces derniers évaporent eux-mêmes peu d'eau. Lorsque cela est possible, il vaut mieux dédier un équipement spécifique aux produits « sensibles » et y assurer une humidification correctrice.

Il faut éviter une amplitude importante des fluctuations de température de l'ambiance, traduisant la plupart du temps, une mauvaise adaptation de la puissance frigorifique disponible aux besoins. Il en résulte un phénomène de « pompage » de l'eau pendant les périodes où la température de la batterie froide est trop basse par rapport à celle des produits entreposés. C'est ainsi, que depuis quelques années, la production de froid de certains groupes frigorifiques équipant les camions transportant les fruits, les légumes et les fleurs, est régulée de façon à maintenir une haute humidité dans la caisse.

Il faut veiller aussi à ce que la ventilation assure un bon brassage de l'ambiance, sans zone morte ni zone trop exposée, par un arrangement des palettes et des colis ménageant des canaux de circulation.

Elle doit avoir un bon rendement, car c'est aussi une source de chaleur sensible.

Toute réduction de perte d'eau réalisable en amont de la filière, avant la mise en vente au magasin de détail, ne peut qu'aider le produit à affronter cette dernière étape où il lui faut arriver au mieux de sa forme.

En effet, quels que soient les efforts faits pour assurer au produit une ambiance « fraîche » et humide, comme par exemple en le plaçant dans un meuble de vente frigorifique ouvert, cette ambiance sera un mélange entre l'air froid traité par l'équipement frigorifique du meuble et l'air du magasin.

Le produit sera soumis à un apport calorifique direct non négligeable par rayonnement, que vien-

dra pallier dans le meilleur des cas une « bienfaisante brumisation », sans laquelle il lui faudra puiser dans ses réserves, et ce d'autant plus intensément qu'il se réchauffera.

Tout soufflage intempestif de l'air froid est à éviter car il ne ferait qu'améliorer le mélange de l'air froid avec l'air du magasin, augmentant la température et diminuant l'humidité de l'ambiance, toutes conditions intensifiant les échanges de chaleur et d'eau à la surface du produit.

Dans la pratique, on relève des pertes d'eau en magasin qui atteignent 3,5 % par jour pour les carottes et les haricots verts, 4 à 5 % pour les salades, les poireaux, les asperges et les artichauts, ce qui traduit des allures de perte d'eau quatre fois plus rapides qu'en serre réfrigérée.

La meilleure réponse à une telle situation est une mise en condition du produit avant la vente, en particulier par la mise à une température de l'ordre de 10 - 12 °C, un apport d'eau par « brumisation » pour saturer l'ambiance et un séjour rapide en rayon par un réassortiment le plus continu possible.

Conclusion

La quantité d'eau perdue par les fruits et les légumes au moment de leur mise en vente aux consommateurs conditionne leur qualité, et par voie de conséquence leur valeur marchande.

En ce qui concerne les produits les plus sensibles, légumes feuillus et organes végétaux immatures, fruits à noyaux et fruits rouges, au métabolisme très actif, la réduction de la perte d'eau dès le refroidissement qui doit être précoce, permet de prolonger la conservation d'au moins une journée sur les trois ou quatre habituellement observées. La « brumisation » est le moyen de limiter la perte d'eau au cours de la réfrigération dans l'air.

La limitation de la perte d'eau au cours de la conservation sera obtenue par l'élimination de tout apport de chaleur sensible intempestif dans la chambre froide et le maintien d'une ambiance saturée en eau (froid « humide » - « brumisation »). On veillera à limiter les ouvertures de portes au temps nécessaire aux opérations de transfert des produits. La puissance de ventilation sera adaptée et les produits « sensibles » ne seront pas directement exposés au flux d'air.

La présence d'un emballage permet de limiter les échanges d'eau avec l'ambiance de la chambre froide, mais c'est aussi un écran pouvant provoquer la condensation à l'intérieur des colis en cas de variation importante de la température extérieure. La présence d'eau liquide sur les produits provoque des nécroses et favorise le développement microbien.

La mise en vente est une épreuve où la maîtrise des conditions de température et d'humidité est

en opposition avec les contraintes d'une bonne exposition. Tout ménagement du produit au cours de son cheminement depuis la récolte jusqu'à l'exposition à la vente, préservera ses réserves en eau et l'aidera à affronter la dernière étape. Ce ménagement résultera de la maîtrise de conditions favorables aux points les plus facilement contrôlables, à savoir : la réfrigération à la station, la conservation et le transport au froid ainsi que la remise en température avant l'exposition à la vente. □

Résumé

La qualité des fruits et des légumes est en partie liée à leur apparence, à la turgescence de la denrée qui lui donne son aspect « fraîcheur » caractéristique. Après leur cueillette, cet aspect s'altère progressivement jusqu'au flétrissement. L'auteur caractérise et analyse les mécanismes de la perte en eau au cours de la réfrigération et de la conservation des produits frais.

Abstract

The quality of fruit and vegetables depends partly on their appearance: the turgidity of the cells gives the appearance of freshness to the produce. Fruit and vegetables gradually lose water until they are completely shrivelled. The author describes and analyses the process of water loss during chilling and storage in order to give recommendations for improving the methods for keeping produce fresh.

Bibliographie

- BURCHILL, R.-T., 1992. Strategies for the control of postharvest diseases of vegetables. Post, *harvest News and Information*, Vol. 3, n° 4, 81N 83N.
- COME, D., 1991. Altération des produits végétaux entreposés. *Ind. Agr. Alim.*, 06/91, p. 503, 507.
- CORTELLA, G., FORNASIERI, E., MENINI, G., PANOZZO, G., 1991. A general analysis on the weight loss of foodstuff in cold storage. *Proc XVIIIth Int. Congress of refrigeration*, Montréal, Vol. IV, p. 2001-2006.
- LETANG, G., UDE, M., 1995. La conservation des pommes en AC/ULO : perte de poids et qualité. *Compte-rendu d'expérimentation*, Cemagref, 22 p.
- LETANG, G., ALVAREZ, G., UDE, M., 1994. La brumisation dans la filière fruits et légumes : intérêts et contraintes. Le froid et la qualité des légumes frais, IIF, Com.C2 D2/3, Brest, Sept 7-9, p. 129-139.
- MOHD-SOM, F., SPOMER, L.-A., MARTIN, S.-E., SCHMIDT, S.-J., 1995. Microflora changes in misted and nonmisted Broccoli at refrigerated storage temperatures. *Journ.of Food Qual.*, n°18, p. 279-293.
- TONINI, G., FRAMINI, F., 1986. Il calo peso, la maturità e l'incidenza della botrytis cinerea sulle fragole in relazione al sistema ed al momento della prerefrigerazione. *Incontro frutticolo SOI Ferrara*, 14/02/1986.
- WOODS, J.-L., 1993. Moisture transpiration from carrots and changes in the mechanical and sensory properties. *Proc. Workshop « Systems and operations for post-harvest quality »*, Leuven, 09/14-15/1993, p. 187-194.