

REFROIDISSEMENT DES MAINS DE BANANES CONDITIONNÉES DANS DES CAISSES EN CARTON ONDULÉ DANS LE CAS D'UN ARRIMAGE COMPACT

par R. DEULLIN

Institut français de Recherches fruitières Outre-Mer

REFROIDISSEMENT DES MAINS DE BANANES
CONDITIONNEES DANS DES CAISSES EN CARTON
ONDULE DANS LE CAS D'UN ARRIMAGE COMPACT

R. DEULLIN (IFAC)

Fruits, sep. 1970, vol.25, n°9, p.583-591.

RESUME - Une étude expérimentale en vraie grandeur montre que le refroidissement des mains de bananes dans des caisses en carton ondulé est plus lent que celui des régimes en housses de polyéthylène. La surface utilisée pour le refroidissement ne représente que 40 p. cent de la surface totale de l'emballage, sa résistance thermique compte pour 85 p. cent de la résistance totale de transmission de la chaleur de bananes à l'air de refroidissement. Les perforations des parois des emballages, lorsqu'elles sont placées sur la surface de refroidissement (parois latérales) permettent d'augmenter la vitesse de refroidissement.

La résistance opposée par un chargement en arrimage compact à la circulation de l'air de ventilation a été mesurée et des précautions doivent être prises pour assurer une bonne ventilation.

La pratique de l'arrimage en cheminée ne se justifie pas.

Le conditionnement des mains de bananes dans des caisses en carton ondulé a eu pour effet de rendre leur refroidissement plus difficile au début du transport maritime. Il faut reconnaître que c'est là un des rares inconvénients de cet emballage qui présente, en contrepartie, toute une série d'avantages qui justifient pleinement son utilisation : meilleure protection des bananes dès la récolte avec diminution des frottages et des grattages de la peau des bananes, plus grande facilité pour

l'exécution des traitements antifongiques, disparition des pourritures occasionnées par la hampe, élimination pratique des pourritures provoquées par les blessures des pédoncules, suppression du transport de la hampe qui n'a pas de valeur marchande, abaissement du prix du fret maritime rapporté au kg de bananes, simplification des manutentions en mûrisserie. L'ensemble de ces avantages a permis d'améliorer la qualité des bananes qui sont mises à la disposition des consommateurs.

Il n'en reste pas moins, que les bananes qui sont placées dans des caisses en carton se refroidissent moins vite que lorsqu'elles sont expédiées sous la forme de régimes avec une housse en polyéthylène de faible épaisseur et cela pour les trois raisons suivantes :

- le carton ondulé conduit mal la chaleur,
- la surface de l'emballage qui est en contact avec l'air de refroidissement est plus faible,
- la forme géométrique des emballages permet d'exécuter un arrimage compact qui oppose une forte résistance à la circulation de l'air de refroidissement qui prend les passages les plus faciles (extérieur du chargement, irrégularités intérieures du chargement).

MAUVAISE CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE DU CARTON ONDULÉ

Le carton ondulé se compose d'une lame d'air immobilisée par une onde en papier kraft qui est collée entre deux feuilles de carton. L'air et le carton conduisent mal la chaleur et un assemblage de ces deux matières donne un matériau qui possède une mauvaise conductibilité calorifique.

PLUS FAIBLE SURFACE DE REFROIDISSEMENT

Les fonds et les dessus des caisses en carton sont en contact dans le cas d'un arrimage compact et ne sont pas balayés par l'air de refroidissement qui ne peut refroidir qu'une partie seulement des parois latérales. Il en résulte, en première approximation, qu'il n'y a que 40 p. cent environ de la surface totale d'une caisse en contact avec l'air de refroidissement.

LE CHARGEMENT OPPOSE UNE RÉSISTANCE PLUS FORTE À LA CIRCULATION DE L'AIR DE VENTILATION

Avec un chargement de bananes en régimes conditionnées avec des housses en polyéthylène, l'espace libre entre les emballages est de 20 à 30 p. cent du volume utile de la cale du navire et la résistance opposée par ce type de chargement à la circulation de l'air de ventilation est très faible. Mais, avec des caisses en carton correctement remplies, l'espace libre entre les cartons dans le cas d'un arrimage compact bien exécuté doit être de l'ordre de 5 p. cent à la base du chargement. L'air de ven-

tilation circule avec une vitesse élevée dans des espaces lamellaires qui lui opposent une forte résistance et il recherchera les passages les plus faciles provenant d'irrégularités dans le chargement ou encore plus simplement il le contournera par l'extérieur en formant un court-circuit d'air externe qui ne participe pas au refroidissement des bananes. Si les précautions nécessaires ne sont pas prises pour réduire au minimum les courts-circuits d'air externes, il n'y aura qu'une partie de l'air de ventilation qui circulera dans le chargement de caisses en carton, ce qui ralentit le refroidissement des bananes. Il est encore nécessaire de préciser que le refroidissement des bananes placées dans une caisse en carton n'est pas uniforme dans un chargement : la quantité d'air de refroidissement qui traverse le chargement diminue en fonction de la hauteur par suite des fuites latérales, alors que l'espace libre entre les caisses augmente avec les rangées supérieures et que l'écart de température entre l'air de refroidissement et les bananes diminue dans les rangées supérieures.

Ces considérations montrent que le refroidissement des bananes en caisses en carton ondulé peut être nettement plus lent que celui des régimes en housse de polyéthylène et qu'il est important de déterminer dans quelle mesure l'utilisation de caisses en carton est susceptible de ralentir le refroidissement des bananes. Suivant l'importance de ce ralentissement, il pourra devenir nécessaire de modifier les systèmes de ventilation des navires bananiers à construire et de rechercher éventuellement des moyens qui permettent d'améliorer le refroidissement des bananes.

L'étude mathématique de cette question n'est pas praticable à cause du nombre important des facteurs qui sont à considérer et du fait que leur action n'est pas toujours bien connue.

Il a été jugé préférable d'effectuer une étude expérimentale en vraie grandeur en se plaçant dans les conditions réelles de la pratique du transport maritime. Les résultats de cette étude sont présentés ci-dessous.

MÉCANISME DU REFROIDISSEMENT DES MAINS DE BANANES PLACÉES DANS UNE CAISSE EN CARTON

Le refroidissement consiste à transférer de la chaleur sensible des bananes à l'air de refroidissement. Ce transfert n'est pas simple ; il s'effectue par conduction et par convection. Il y a d'abord un transfert direct par conduc-

tion entre les bananes et la paroi interne de la caisse en carton lorsqu'il existe des ponts thermiques continus entre les bananes et l'emballage. L'importance des ponts thermiques est variable suivant les emballages.

Et il y a aussi un transfert indirect de chaleur entre les bananes et la paroi interne de l'emballage par double convection: les bananes cèdent de la chaleur à l'air placé dans la caisse en carton et cet air cède à son tour de la chaleur à la paroi interne de l'emballage.

Puis le flux de chaleur traverse les parois de l'emballage par conduction dans les zones qui sont en contact avec l'air de refroidissement, il parvient à la surface externe de la caisse et finalement la chaleur passe dans l'air de ventilation par convection.

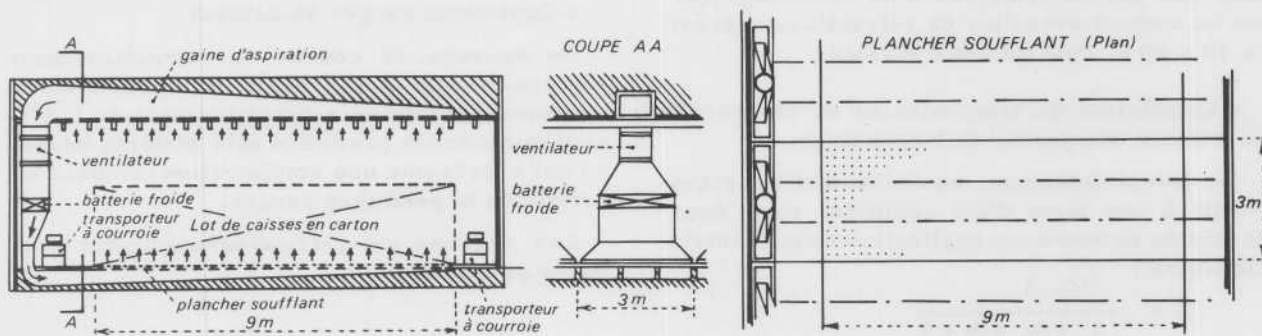
Cet exposé montre que le refroidissement des mains de bananes dans une caisse en carton n'est pas un phénomène simple et qu'il faut considérer qu'il peut exister des différences de refroidissement à l'intérieur d'un emballage, puis des différences entre les emballages d'une même rangée par suite de variations de la surface des emballages balayée par l'air et de différences de débit de l'air qui balaie chaque emballage et enfin ne pas oublier qu'il y a des différences systématiques entre les rangées en fonction de la hauteur. Les résultats qui sont indiqués doivent donc être considérés comme représentant des valeurs moyennes, étant encore entendu que les températures des bananes d'une même rangée en hauteur pourront présenter des écarts qui diminueront au cours du refroidissement. Il est également nécessaire de préciser que nous n'avons consi-

déré que le cas d'une caisse placée au milieu du chargement et que les emballages placés en bordure se refroidissent plus facilement que ceux placés à l'intérieur de la cargaison.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

L'étude du refroidissement des bananes a été effectuée dans un des trois hangars de prérefrigération de bananes de la SONACO (Société nationale de Conditionnement de la Côte d'Ivoire) au port bananier d'Abidjan, en opérant sur un lot de caisses en carton de 100 mètres cubes environ. Les caisses en carton avaient les dimensions suivantes : 63,5 x 39 x 22 cm en arri-mage compact sur 8 à 11 rangées en hauteur. Le chargement de caisses était placé sur un plancher soufflant assurant une distribution d'air uniforme par des orifices circulaires de 35 mm de diamètre placés au fond de rainures transversales de manière que les cartons de la rangée inférieure ne puissent pas obturer les orifices de distribution d'air (voir schéma du circuit de ventilation du hangar à bananes de la SONACO). Les températures des bananes à l'intérieur des caisses en carton sont mesurées avec des thermocouples cuivre-constantan. La circulation d'air est du type vertical ascendant et le coefficient de brassage sur hangar vide rapporté au volume du chargement est de 295. Le refroidissement des bananes a été mesuré en fonction de la position en hauteur de la caisse carton dans le chargement et dans deux cas différents : avec des cartons normaux et avec des cartons perforés.

L'expérimentation a été effectuée dans les conditions habituelles d'utilisation du hangar de



SCHEMA DU CIRCUIT DE VENTILATION DU HANGAR A BANANES DE LA SONACO A ABIDJAN (COTE D'IVOIRE).

préréfrigération et l'arrimage des caisses en carton a été exécuté normalement par le personnel de manutention du port bananier. La densité d'arrimage, rapportée au volume du chargement est de 338 kg de bananes par mètre cube.

REFROIDISSEMENT DES BANANES EN CAISSES CARTON SANS PERFORATION

● Première rangée en hauteur

C'est celle qui se refroidit le plus rapidement. Au début, la courbe de refroidissement peut être assimilée à une droite. L'écart moyen de la température entre l'air et les bananes était de 12,2°C et la vitesse de refroidissement horaire est de 0,9°C entre la première et la sixième heure.

● Quatrième rangée en hauteur

La courbe de refroidissement peut être assimilée à une droite ; l'écart moyen de température entre l'air et les bananes était de 12,5°C et la vitesse de refroidissement horaire est de 0,66°C entre la première et la sixième heure. La différence entre ces deux vitesses de refroidissement s'explique surtout par le fait que les caisses en carton de la première rangée ont une plus grande surface de refroidissement que celles de la quatrième rangée. Le refroidissement des caisses de la première rangée se fait par les parois latérales et 54 p. cent de la surface du fond, le refroidissement des caisses de la quatrième rangée ne se fait seulement que par une partie des parois latérales.

La comparaison entre ces deux vitesses de refroidissement permet de calculer la surface utile de refroidissement : la portion de la surface des parois latérales d'un emballage qui est en contact avec l'air de refroidissement est de 70 à 80 p. cent de cette surface.

● Coefficient de transmission de chaleur K au travers des parois de l'emballage.

Le calcul théorique, en assimilant le carton ondulé à une lame d'air comprise entre deux parois de carton avec application de la formule classique :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

avec $\alpha_1 = 12$ (convection interne), $\alpha_2 = 30$ (convection externe), $e_1 = 0,003$ (épaisseur du carton en mètre), $e_2 = 0,006$ (épaisseur de la lame d'air en mètre), $\lambda_1 = 0,07$ (coefficient de conductibilité du carton humide), $\lambda_2 = 0,04$ (coefficient de conductibilité de l'air) donne $K = 3,2$.

La valeur de ce coefficient, déduite des mesures expérimentales, en utilisant le chiffre de 0,77 p. cent trouvé pour le coefficient de surface utile est de 2,8 calories/m²/heure/°C.

REFROIDISSEMENT DES BANANES EN CAISSES CARTON PERFORÉES

Chaque caisse comporte 4 perforations circulaires de 4 centimètres de diamètre sur chacune des deux parois latérales longitudinales, soit 8 perforations au total ayant une surface de 1,02 dm², ce qui représente 2,3 p. cent de la surface latérale d'une caisse et 1,1 p. cent de la surface totale d'une caisse.

● Première rangée en hauteur

La courbe de refroidissement n'est plus assimilable à une droite et les vitesses de refroidissement sont les suivantes :

2e heure : 2,6°C	5e heure : 1°C
3e heure : 1,9°C	6e heure : 0,8°C
4e heure : 1,3°C	

La vitesse moyenne de refroidissement horaire est de 1,5°C pour la période comprise entre la première heure et la sixième heure, ce qui correspond à une augmentation de 65 p. cent par rapport au cas de la caisse sans perforation ; mais il faut tenir compte du fait que la température initiale des bananes était de 28°C alors qu'elle était de 29,8°C dans l'essai de refroidissement sans perforation.

● Quatrième rangée en hauteur

De nouveau, la courbe de refroidissement est assimilable à une droite avec une vitesse moyenne horaire de refroidissement de 1,4°C au début entre la première et la sixième heure, ce qui représente une amélioration comparable à celle de la première rangée.

Les courbes de refroidissement sont indiquées par la figure 1.

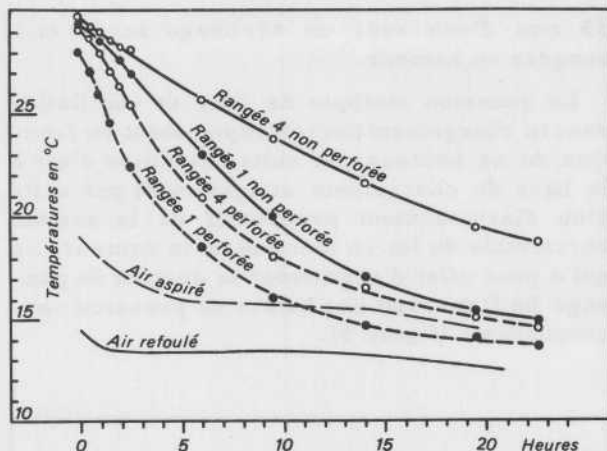


FIGURE 1 — REFROIDISSEMENT DES BANANES EN CAISSES CARTON AVEC VENTILATION A DEBIT NORMAL.

INFLUENCE DE LA POSITION EN HAUTEUR DE LA CAISSE SUR LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT

Une série de mesures de température des bananes à différentes hauteurs permet de classer les vitesses de refroidissement en valeurs décroissantes :

- première rangée (plus grande surface de refroidissement que les rangées intermédiaires et air le plus froid)
- dernière rangée (plus grande surface de refroidissement) que les rangées intermédiaires
- deuxième rangée
- troisième rangée
- et ensuite, sans qu'il y ait de grandes différences entre elles, l'ensemble des autres rangées depuis la quatrième jusqu'à l'avant-dernière.

Ce résultat est intéressant parce qu'il montre l'importance de la surface de refroidissement : les caisses de la dernière rangée se refroidissent plus rapidement que celles de la seconde rangée qui sont en contact avec un air plus froid et à une plus grande vitesse. Une estimation des surfaces utiles de refroidissement des caisses en carton en fonction de la hauteur donne les valeurs suivantes :

- le rangée : 0,5 m²
- de la 2e rangée à l'avant-dernière : 0,36 m²
- dernière rangée : 0,70 m²

Il est intéressant de constater que les vitesses de refroidissement des rangées comprises

entre la seconde et l'avant-dernière sont peu différentes (figure 2 et figure 3).

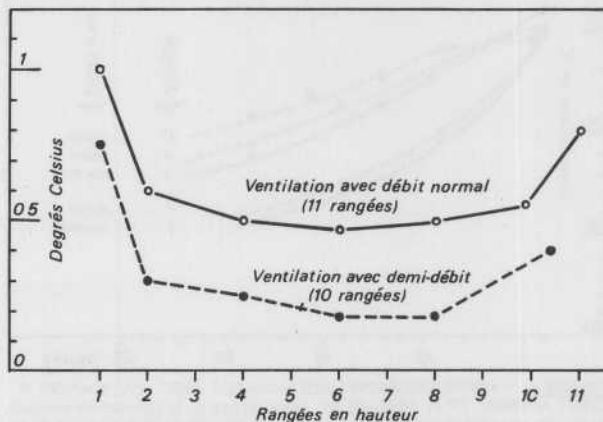


FIGURE 2 — VITESSE DE REFROIDISSEMENT DES BANANES EN FONCTION DE LA RANGÉE EN HAUTEUR.

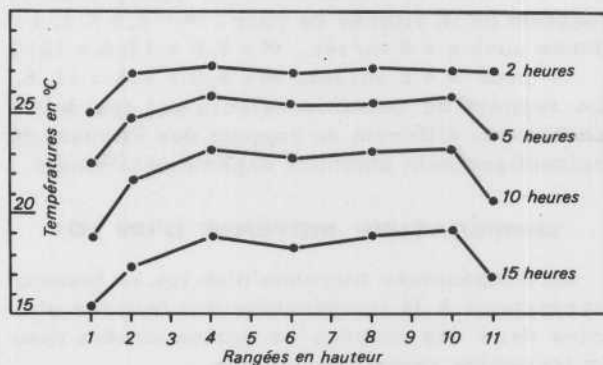


FIGURE 3 — TEMPERATURE DES BANANES EN FONCTION DE LA POSITION DE LA CAISSE EN HAUTEUR, VENTILATION A DEBIT NORMAL.

INFLUENCE DU DÉBIT D'AIR DE VENTILATION SUR LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT DES BANANES

Si l'on se place avec des origines de température voisines (figure 4), en utilisant des portions de courbes de refroidissement, pour pouvoir effectuer des comparaisons, on constate que pour la 4e rangée, à partir de 26°C, les vitesses moyennes de refroidissement obtenues au cours des deux essais considérés sont les suivantes :

- débit d'air normal : 0,47°C
- demi débit : 0,32°C

Le rapport des vitesses est de 1,4, valeur qui correspond sensiblement à la variation du coefficient de convection superficielle en fonction de la vitesse de l'air. La formule de JURGES

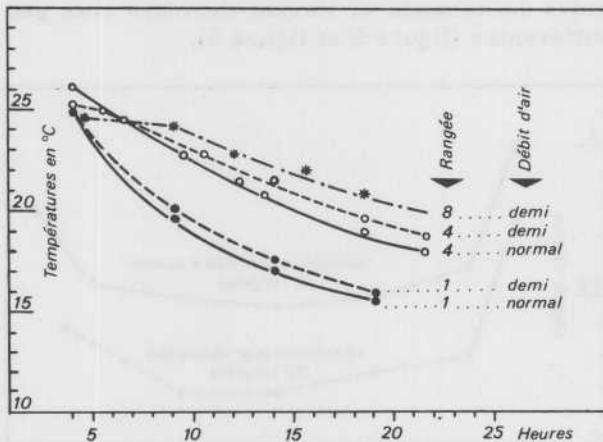


FIGURE 4 — REFROIDISSEMENT DES BANANES AVEC VENTILATION A DEBIT NORMAL ET A DEMI-DEBIT (dans le cas de la ventilation normale, la courbe de refroidissement de la rangée 8 est très voisine de celle de la rangée 4 — elle n'a donc pas été représentée).

qui exprime le coefficient de convection en fonction de la vitesse de l'air : $\alpha = 4,8 + 3,4 v$ donne pour $v = 4$ m/sec. $\alpha = 4,8 + 13,6 = 18,4$ pour $v = 2$ m/sec. $\alpha = 4,8 + 6,8 = 11,6$. Le rapport de ces deux valeurs est égal à 1,6 chiffre peu différent du rapport des vitesses de refroidissement obtenues expérimentalement.

TEMPÉRATURE MOYENNE D'UN LOT

La température moyenne d'un lot, en hauteur correspond à la température des bananes placées dans des caisses en carton situées dans la troisième rangée en hauteur.

RÉSISTANCE D'UN ARRIMAGE COMPACT À LA CIRCULATION DE L'AIR DE VENTILATION

Les chargements de bananes en caisses carton se différencient essentiellement des chargements de bananes en régimes parce qu'ils présentent une résistance notable à la circulation de l'air, alors que les chargements composés de régimes n'opposaient qu'une très faible résistance à l'air de refroidissement.

Les mesures de pression statique sous le chargement permettent de connaître la résistance d'un chargement. Dans le cas considéré, en moyenne, pour un arrimage compact sur 8 hauteurs, la pression statique au-dessus du plancher soufflant est de 16 mm de colonne d'eau. Cette valeur dépend de la qualité de l'arrimage. Lorsqu'il est très serré, elle peut atteindre des valeurs comprises entre 25 et

35 mm d'eau avec un arrimage sur 10 et 11 rangées en hauteur.

La pression statique de l'air de ventilation dans le chargement décroît rapidement en fonction de sa hauteur par suite des fuites d'air à la base du chargement et également par suite d'un élargissement progressif de la section horizontale du lot en fonction de la hauteur, ce qui a pour effet d'augmenter la section de passage de l'air avec une baisse de pression correspondante (figure 5).

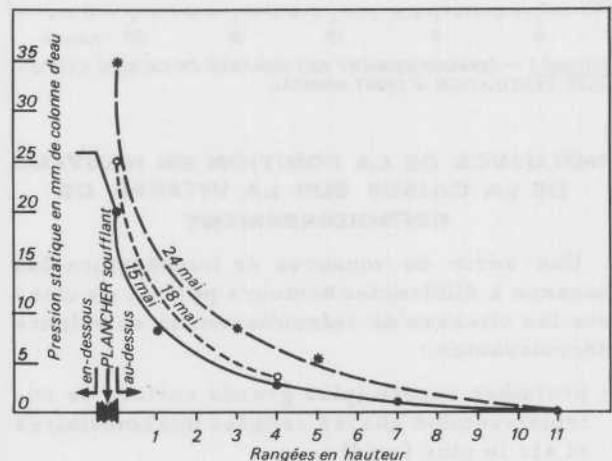


FIGURE 5 — PRESSION STATIQUE DE L'AIR DE REFOULEMENT.

ARRIMAGE DES CAISSES EN CARTON EN CHEMINÉE

Ce mode d'arrimage (voir figure 6) consiste à réaliser une cheminée entre quatre caisses en carton d'une même rangée. Avec les cartons considérés, la cheminée a une section carrée de 24,5 cm de côté. La superposition des rangées constitue une cheminée verticale qui a une très faible résistance et qui est utilisée par l'air de refroidissement qui ne circule plus dans les espaces intermédiaires existant entre les caisses en carton et qui sont beaucoup plus résistants que les cheminées. La surface utile de refroidissement de chaque caisse en carton se trouve alors réduite à celle qui est constituée par une des quatre parois de la cheminée, c'est-à-dire à $0,235 \times 0,22 = 0,05 \text{ m}^2$ au lieu de $0,30 \text{ m}^2$ dans le cas d'un arrimage compact régulier.

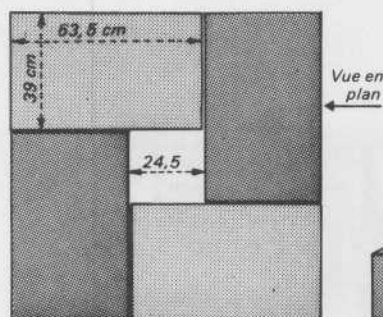
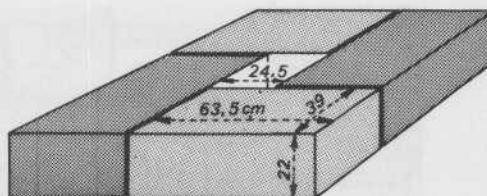


FIGURE 6 — ARRIMAGE EN CHEMINÉE.



En contrepartie, la vitesse de l'air en contact avec la paroi des caisses en carton doit être plus grande, parce qu'il n'y a plus de courts-circuits d'air externes et parce que la section de passage de l'air constituée par l'ensemble des cheminées doit être inférieure à celle des sections des espaces intermédiaires entre les caisses en carton. Le coefficient d'échange superficiel entre l'air et la paroi externe du carton devrait donc augmenter de 10 à 20 p. cent environ, mais il faut aussi tenir compte de l'existence d'un court-circuit d'air interne au centre de chaque cheminée : l'air y circule directement sans entrer en contact avec les emballages et l'effet défavorable de ce court-circuit d'air interne doit être plus important que le gain de transmission de chaleur obtenu avec l'augmentation du coefficient d'échange superficiel. Ce mode d'arrimage présente encore deux inconvénients : il occasionne une perte de volume de 5 à 10 p. cent et il augmente les frais de la main-d'oeuvre d'arrimage. En conséquence, il ne présente pas d'avantage par rapport à un arrimage compact bien exécuté et il ne se justifie pas.

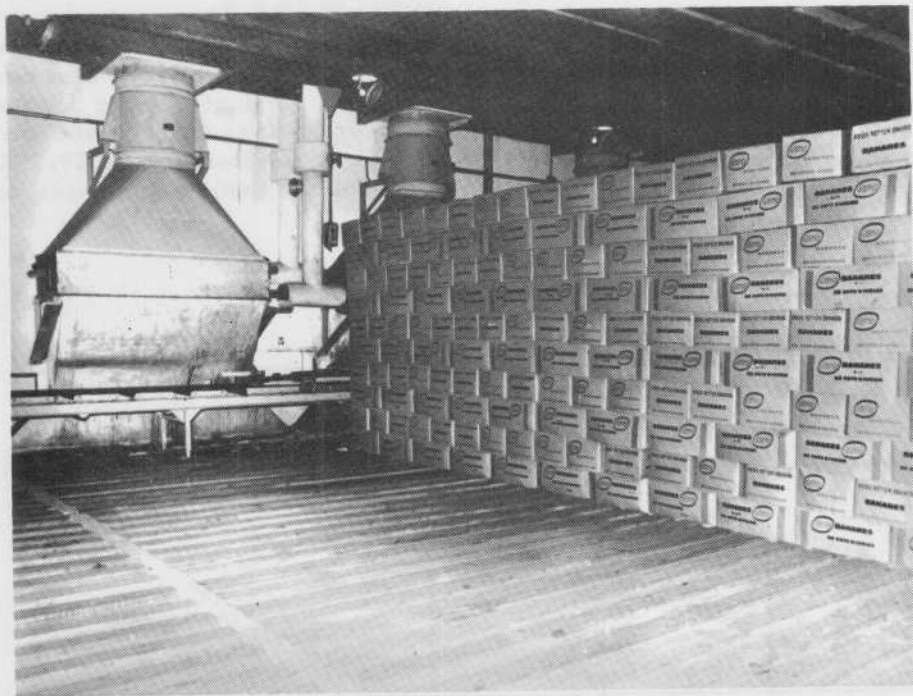
COMPARAISON ENTRE LE REFROIDISSEMENT DES BANANES EN RÉGIMES ET DES BANANES EN CAISSES CARTON

Le tableau ci-dessous donne la comparaison des refroidissements obtenus dans le cas du voyage expérimental du navire bananier TARPON en novembre 1960 avec des régimes de bananes Poyo conditionnés en housses de polyéthylène et le refroidissement des mains de bananes Poyo en caisses en carton dans le hangar de la SONACO à Abidjan en mai 1968.

La vitesse moyenne de refroidissement des régimes de bananes entre les temps 1 heure et 6 heures est de 1,5°C avec une température initiale de 25,2°C.

La vitesse moyenne de refroidissement des mains de bananes placées dans des caisses en carton non perforées entre les temps 1 heure et 6 heures est de 0,66°C avec une température initiale des bananes de 29,7°C. En effectuant une correction pour tenir compte de la

Temps en heures	Température des bananes	
	régimes en polyéthylène	mains de bananes en caisses carton non perforées
0	25,2°	29,7°
1	23,8°	29°
2	22°	28,3°
3	20,8°	27,6°
4	19,8°	27°
5	19°	26,3°
6	18,3°	25,7°



différence de température entre les bananes et l'air, les vitesses moyennes de refroidissement horaire corrigées sont respectivement les suivantes au début du refroidissement :

- régimes de bananes en polyéthylène : 1,9°C
- bananes en mains en cartons non perforés : 0,66°C dans le cas de bananes avec une température initiale de 29,7°C.

La comparaison de ces deux chiffres montre

bien que le refroidissement des bananes en cartons sans perforation est beaucoup plus difficile que celui des régimes conditionnés en housse en polyéthylène.

Les perforations des caisses en carton, lorsqu'elles sont placées sur la surface de refroidissement, c'est-à-dire sur les parois latérales des emballages apportent une amélioration importante au refroidissement des bananes.

CONCLUSION

L'étude expérimentale, qui a été effectuée en vraie grandeur, pour déterminer la vitesse de refroidissement des mains de bananes conditionnées dans des caisses en carton ondulé, a montré que le refroidissement des bananes est nettement plus lent que celui des régimes conditionnés dans des housses en polyéthylène.

La résistance thermique provient pour 85 p. cent des caractéristiques de l'emballage et pour 15 p. cent seulement de la convection extérieure entre l'air de refroidissement et l'emballage, ce qui indique qu'une augmentation de la vitesse de l'air de refroidissement n'aura qu'une action limitée sur la vitesse de refroidissement des bananes.

La surface utile de refroidissement des caisses en carton placées à l'intérieur du chargement est de 40 p. cent environ de la surface totale de la caisse.

Les caisses de la rangée inférieure qui ont une surface de refroidissement de 50 p. cent et les caisses de la rangée supérieure qui ont une surface utile de refroidissement de 62 p. cent de la surface totale de la caisse se refroidissent plus vite que les caisses des autres rangées.

Les perforations améliorent le refroidissement lorsqu'elles sont placées sur la surface utile de refroidissement, c'est-à-dire sur les parois latérales de la caisse en carton.

L'arrimage compact oppose une résistance importante à la circulation de l'air de ventilation qui cherchera à utiliser les passages les moins résistants. Il y aura donc lieu d'éviter les possibilités de courts-circuits d'air externe et de courts-circuits d'air interne (irrégularité d'arrimage).

L'arrimage des caisses en carton en cheminée n'est pas justifié : le refroidissement est moins efficace, il y a une perte de volume de cale et les frais de manutention sont plus élevés.

Nous adressons nos vifs remerciements à la Direction de la Société de Conditionnement de la Côte d'Ivoire (SONACO) qui nous a donné toutes les facilités pour l'exécution de cette étude dans un des hangars de prérefrigération des bananes du port d'Abidjan.

