

Chaîne du froid et sécurité alimentaire

Aspects économiques et techniques

SOMMAIRE :

1. AVANT-PROPOS ET AVERTISSEMENT

2. ASPECTS ECONOMIQUES ET SOCIAUX

3. ASPECTS TECHNIQUES

- I) Distinction entre réfrigération, congélation et surgélation**
- II) En milieu réfrigéré, les tissus végétaux ne se comportent pas de la même façon que les produits d'origine animale**
- III) Le refroidissement initial**
- IV) Quelques points simples mais importants à ne pas perdre de vue**
- V) Spécificités des régions chaudes**
- VI) Procédés et développements plus particulièrement intéressants pour les pays chauds**

1. AVANT-PROPOS:

La conservation des aliments est la première utilisation historique du froid, et c'est toujours la première utilisation en termes d'importance économique. A un moment où la sécurité alimentaire mondiale constitue un important sujet de préoccupation, la réduction des pertes de produits alimentaires devrait faire partie des axes majeurs de travail à l'échelle de la planète. En effet, selon diverses estimations, le tiers de la production agricole destinée à l'alimentation humaine est perdu, toutes causes confondues ; or, la FAO estime que pour satisfaire les besoins alimentaires d'une population qui devrait dépasser les 9 milliards d'habitants en 2050, il faudrait augmenter de 70 % la production agricole disponible. Dès à présent, ce sont environ un milliard de personnes qui souffrent de la faim. En outre, les maladies liées à la mauvaise conservation des aliments sont encore trop présentes dans le monde.

D'autre part, le développement de chaînes du froid fiables, efficaces et de capacité suffisante dans les pays en développement permettrait non seulement de réduire les pertes, mais aussi de favoriser le développement de la production d'aliments sains et de valeur nutritionnelle avérée, contribuant ainsi doublement à la solution du problème de la sécurité alimentaire mondiale.

Le présent dossier, réalisé par l'IIF à l'intention des non-spécialistes, aborde de façon synthétique – et non exhaustive - les différents aspects, techniques, sociaux et économiques de ce sujet. Ceux qui souhaitent approfondir ces sujets peuvent effectuer des recherches plus poussées dans la base documentaire de l'IIF (Fridoc).

Avertissement:

Le froid ralentit, voire arrête, les réactions biochimiques, qu'elles soient liées au métabolisme des tissus, à l'activité des agents de dégradation, à la production de toxines microbiennes ou fongiques, ou à la prolifération bactérienne. La clé de la conservation des aliments réside dans cette propriété, qui permet de maintenir les qualités nutritionnelles des aliments bien mieux que d'autres procédés tels que le fumage ou le séchage, pour autant qu'un certain nombre de règles soient respectées.

Trois points particulièrement importants doivent être soulignés en préambule :

- En aucun cas le froid ne permet de « remonter le temps biologique ». Espérer compenser une insuffisance de la chaîne du froid à un moment donné par un surcroît de froid ultérieur est illusoire : non seulement les réactions qui donnent lieu à la pourriture des aliments ou à la contamination par des bio-toxines sont irréversibles, mais en outre un « excès » de froid peut dégrader les aliments (« pathologies du froid » de certains fruits et légumes même à températures positives, dégradation de tous les aliments en cas de gel non maîtrisé).
- La maîtrise de la chaîne du froid ne peut en aucun cas dispenser de mesures d'hygiène : d'une part la prolifération microbienne sera d'autant plus importante, lorsque les aliments seront sortis du réfrigérateur, que les aliments auront été largement contaminés auparavant (le froid ralentit ou arrête la prolifération des microbes, il ne les tue pas, il ne tue pas les virus non plus); par ailleurs, si la surgélation détruit certains agents pathogènes, ce n'est que sous certaines conditions de durée et de température.

L'objectif de conservation dans de bonnes conditions de sécurité sanitaire implique donc une grande vigilance sur les deux points clés que sont l'hygiène et le respect des fourchettes de températures (et d'humidité) requises pour la conservation de chaque produit, et cela à tous les stades de la ferme à l'assiette.

- L'efficacité et la fiabilité de la chaîne du froid dépendent bien sûr de la qualité de la conception et de la réalisation des équipements ainsi que de leur maintenance, qui sont affaire de professionnels, mais aussi de précautions simples de la part d'intervenants qui ne sont pas des professionnels de l'équipement frigorifique : manutentionnaires, livreurs, transporteurs par exemple.

2. ASPECTS ECONOMIQUES ET SOCIAUX:

En ce qui concerne les denrées périssables, les pertes imputables à l'insuffisance ou à l'absence de chaîne du froid sont très importantes dans les pays en développement, où habite déjà plus de 80% de la population mondiale. Ces pertes sont estimées par l'IIF à près du quart de la production dans les pays en développement, chiffre à comparer avec celui de l'augmentation de production disponible jugée nécessaire d'ici 2050 selon des études publiées par la FAO : 70% dans l'ensemble, mais plus de 100% pour la viande.

Les aspects qualitatifs sont aussi très importants, qu'il s'agisse du risque sanitaire (développement d'agents pathogènes) ou des pertes de qualités nutritionnelles : les procédés traditionnels de conservation sans recours au froid (fumage, séchage notamment), ne permettent pas une aussi bonne conservation des qualités nutritionnelles et peuvent eux aussi présenter quelques inconvénients en termes de santé publique s'ils ne sont pas bien maîtrisés.

De lourdes pertes après récolte pèsent d'une autre façon sur l'alimentation, en même temps que sur l'économie rurale : en augmentant fortement la différence entre les prix à la consommation et les prix payés aux producteurs, elles rendent les produits moins accessibles aux consommateurs car plus chers, et réduisent les revenus des producteurs, décourageant ainsi la production alimentaire. Dans certains cas, le taux de pertes prévisibles est franchement dissuasif (cas où la production est limitée à ce qui peut être consommé rapidement et dans les environs immédiats). Sans aller jusqu'à ces cas extrêmes, la chaîne du froid est un élément crucial pour des fruits et légumes qui ne sont pas considérés par le public comme les plus périssables : souvent, la récolte a lieu sur une saison, voire sur un mois tandis que les consommateurs en demandent sur la période la plus longue possible, voire en demandent le plus plusieurs mois après le pic de production. Dans de nombreux pays, y compris des pays à revenu intermédiaire, et a fortiori dans les pays les moins avancés, il n'est pas rare de voir une profusion de fruits à un endroit et pratiquement rien à quelques dizaines de kilomètres de là, ou de voir les prix multipliés par trois ; dans de tels cas, la chaîne du froid n'est pas seule en cause (il y a aussi la logistique, les infrastructures...), mais elle est à l'origine d'une grande partie du problème. Le même phénomène existe évidemment pour les produits d'origine animale, beaucoup plus fragiles que les fruits et légumes.

L'impact de la mauvaise conservation des aliments sur l'offre alimentaire mondiale est donc sans doute bien supérieur aux seules pertes constatées : il faudrait ajouter à celles-ci les pertes « latentes » d'aliments dont la production n'a même pas été entreprise. Cet aspect est sans doute le plus difficile à chiffrer, il n'en est pas moins important car on peut très bien se trouver dans un cercle vicieux : la production ne se développe pas faute de chaîne du froid, celle-ci ne se développe pas faute de produits à stocker, transporter et vendre en quantité suffisante pour amortir les installations dans des conditions économiquement viables.

Il faut noter enfin que la perte annuelle de quelques centaines de millions de tonnes de denrées alimentaires par défaut de chaîne du froid se traduit par le gaspillage des ressources utilisées pour les produire et les transporter, et par un impact supplémentaire sur le réchauffement planétaire lié à la dégradation des produits mais aussi à l'émission de gaz à effet de serre à toutes les étapes de la production et de la distribution de produits qui ne sont finalement pas consommés. Bien que cela sorte du sujet de ce dossier, on ne peut ignorer ce fait, quand la question de l'impact direct ou indirect de l'agriculture sur le climat est régulièrement soulevée.

Si, au-delà du constat, on considère les perspectives, on peut relever au moins les points suivants :

- l'urbanisation croissante, en particulier dans les pays en voie de développement, accroît les distances entre lieux de production et de consommation ;
- le développement des classes moyennes dans certains pays se traduit par une demande d'alimentation plus diversifiée, incluant des denrées très sensibles aux conditions de température et d'humidité ; d'autre part, même dans les régions pauvres, de nombreux programmes de développement visent à faire sortir de la pauvreté au moins une partie de la population ; sans nécessairement atteindre le niveau de vie des classes moyennes, des centaines de millions de personnes souhaitent diversifier leur alimentation et consommer des produits périssables pour autant que ceux-ci soient disponibles à un prix abordable ;
- l'objectif de meilleure alimentation globale pour l'humanité va d'ailleurs dans le même sens, puisqu'il ne s'agit pas seulement de ration calorique mais aussi de qualité nutritionnelle ;
- le développement de filières à forte intensité de main d'œuvre et à forte valeur ajoutée telles que les fruits et légumes contribue à améliorer la situation de l'emploi en milieu rural ; or, il s'agit souvent de produits périssables, nécessitant le recours à la chaîne du froid pour une bonne conservation.

Les besoins en chaîne du froid devraient donc augmenter, en valeur relative, plus vite que la production alimentaire totale, par augmentation à la fois de la part des produits périssables dans l'alimentation et de la proportion de ces produits bénéficiant de la chaîne du froid.

Les maillons essentiels d'une chaîne du froid efficace sont l'entreposage sur les lieux de production et de distribution, le transport frigorifique, et les interfaces correspondantes.

L'entreposage frigorifique mérite une mention particulière dans la mesure où il permet d'allonger la durée entre la récolte et la consommation des produits, d'où un meilleur ajustement de l'offre à la demande : les consommateurs bénéficient de prix plus attractifs et d'une disponibilité prolongée des produits ; et la réduction de la variabilité des cours obtenue par le recours au stockage temporaire permet aux producteurs d'avoir des stratégies d'investissement à plus long terme.

Le transport frigorifique a aussi un effet qui dépasse la simple réduction des pertes. En permettant d'augmenter la distance entre lieux de production et de consommation, il donne aux producteurs un accès à des marchés plus vastes, ce qui peut également rendre économiquement viables des filières de production qui ne le seraient pas autrement.

Pour les produits les plus fragiles, qui sont souvent des produits à forte valeur ajoutée à destination des marchés domestiques ou a fortiori à l'exportation, une chaîne du froid fiable est même une condition sine qua non du développement de la production.

Il faut enfin noter que l'amélioration de la chaîne du froid dans les pays en développement nécessite des investissements matériels conséquents mais aussi un effort important de formation et de sensibilisation, et de gouvernance (contrôles, certification, dialogue interprofessionnel, planification des investissements privés et publics tels que réseaux de distribution d'énergie et de transports, etc.). Comme toute chaîne, la chaîne du froid a en effet la solidité de son maillon le plus faible, et la défaillance d'un élément est préjudiciable à l'ensemble des acteurs.

Une stratégie alimentaire globale doit donc, pour être efficace, intégrer le développement de chaînes du froid fiables, efficaces, et de capacité suffisante, aux autres volets : agronomie, économie, nutrition et santé publique, emploi, autres procédés de conservation, infrastructures, utilisation raisonnée des ressources.... Une telle démarche nécessite également que des programmes spécifiques de recherche-développement soient définis et mis en œuvre pour les pays chauds en développement.

Remarques:

- 1) On entend souvent dire que les consommateurs des pays en développement n'ont pas les moyens financiers de payer plus cher pour avoir des produits plus sûrs au plan sanitaire. Mais la question du coût doit être abordée de façon plus complète : compte tenu des gains escomptés en termes d'une part de réduction des pertes – et donc, des écarts entre prix d'achat et prix de vente - et d'autre part d'élargissement des marchés (durées et distances de commercialisation), la mise en place d'une chaîne du froid peut très bien entraîner une baisse des prix pour les consommateurs et une hausse des revenus des producteurs.
- 2) De la même façon, la question de l'impact de la chaîne du froid sur le climat doit intégrer les émissions de gaz à effet de serre (GES) évitées grâce à la réduction des pertes de produits dont la production et le transport ont entraîné des émissions de GES ; la réduction du gaspillage d'énergie pour produire des aliments qui n'arrivent pas dans l'assiette des consommateurs peut surcompenser le coût énergétique de la chaîne du froid.

- 3) La réfrigération (refroidissement à température positive, sans congélation) permet d'allonger la durée de conservation, de façon variable selon les produits (de quelques jours à quelques mois). Le rôle du stockage frigorifique dans ces conditions, comme outil d'atténuation de la variabilité des prix, ne devrait donc pas être envisagé de la même façon que le stockage des denrées de base d'origine végétale : l'effet du stockage frigorifique à température positive (produits réfrigérés, non surgelés) sur la variabilité des prix réside surtout dans le fait que la vente des produits peut être différée par rapport au moment de la production, ce qui permet de mieux faire correspondre l'offre à la demande, et de réduire ainsi les chutes et flambées de prix au cours du cycle de production, sans empêcher des variations saisonnières qui peuvent être importantes (sauf si les cycles de production sont compatibles avec les durées de conservation) ; en revanche, cette forme de stockage ne permet guère de gérer des excédents structurels ni même de compenser les variations de production d'une année à l'autre.
- 4) Les études de marché préalables à la décision d'installer une chaîne du froid devraient tenir compte du prix que les consommateurs seraient prêts à payer pour les produits périssables concernés, mais aussi des prévisions d'augmentation de la production: l'allongement de la durée de conservation et des distances franchissables devrait permettre de commercialiser des quantités plus importantes, d'où une meilleure rentabilité des équipements. Un point important est la collecte, souvent compliquée par la multitude de petits producteurs, ainsi que la formation de ceux-ci, que ce soit pour augmenter la production ou pour améliorer les conditions de récolte : la viabilité d'une chaîne du froid peut dépendre fortement des progrès réalisés sur ces deux points. A l'aval, côté consommateur, le marché n'est pas le même si on prend en compte seulement la production actuelle, ou aussi les perspectives d'augmentation de production et de réduction des pertes, et les baisses de coûts qui en résultent. Par ailleurs, le développement de la chaîne du froid dans des pays où elle est actuellement très réduite devrait entraîner une amélioration de la chaîne de distribution des matériels et pièces détachées, voire inciter à les fabriquer sur place au lieu de les importer, d'où un abaissement des coûts unitaires.
- 5) Les effets d'une défaillance accidentelle ou d'un défaut délibéré de respect des températures ne sont pas toujours immédiatement sensibles ; en cas de dépassement de température modéré en intensité et en durée, c'est seulement la durée de vie résiduelle du produit qui est affectée, la conséquence sera donc subie soit par un opérateur situé à l'aval de l'opérateur défaillant, soit par le consommateur final ; la perte de confiance qui en résulte peut affecter toute la chaîne, il est donc important de mettre en place des systèmes de contrôle fiables.
- 6) Les conséquences d'une maîtrise insuffisante des températures sont en général moins graves lorsqu'il s'agit de végétaux que lorsqu'il s'agit de viande ou de poisson. Dans un contexte où les températures ne sont pas suffisamment maîtrisées et garanties par des contrôles fiables, une stratégie de développement peut consister à commencer par des fruits et légumes pas trop exigeants relativement au froid (moindre coût et moindres risques) si cela peut faire gagner sur la durée et les distances de commercialisation de ces produits.
- 7) S'agissant des fruits et légumes, le froid n'est pas le seul facteur de réduction des pertes : les itinéraires cultureux – y compris le moment de la récolte- sont un autre facteur sur lequel on reviendra dans la partie « technique » ; un troisième facteur sur lequel des gains sensibles sont souvent possibles sont les chocs mécaniques dans les opérations de cueillette, de transbordement, et de transport ; ces chocs ont un impact direct (écrasement...), et un autre indirect (moins bonne tenue à température ambiante mais aussi en chambre froide). Une démarche économiquement cohérente doit donc examiner non seulement le facteur froid évoqué plus haut, mais aussi les deux autres, qui impliquent d'une part un effort – y compris financier – de formation et d'incitation des producteurs, et d'autre part un effort – qui a aussi un

coût – au niveau de la main-d'œuvre manutentionnaire et des conditionnements. Pour être complet, il faut également mentionner un quatrième facteur, plus technique, qui est le contrôle d'atmosphère en entrepôt et dans les emballages individuels – voir point II) de la partie technique.

- 8) La qualité sanitaire dépend de la chaîne du froid mais aussi du respect d'un certain nombre de normes et bonnes pratiques qui sont décrites notamment dans des documents publiés par la Commission du Codex Alimentarius (<http://www.codexalimentarius.net>). Les aliments peuvent par exemple être contaminés par des résidus de pesticides, des agents pathogènes divers, virus ou bactéries, ou encore par des bio-toxines produites lorsque certaines conditions de température ou d'humidité ne sont pas respectées ; dans certaines conditions d'humidité, même des produits relativement peu périssables comme des graines ou des céréales peuvent être contaminés ; le respect des taux d'humidité appropriés peut nécessiter le recours à des appareils dont les principes de fonctionnement reposent sur les lois de la thermodynamique, comme pour la chaîne du froid. C'est le respect de l'ensemble de ces règles (qui incluent des prescriptions relatives aux températures à respecter), et parfois aussi des législations nationales des pays importateurs, qui conditionne l'ouverture des marchés à l'export, ainsi que dans certains cas l'accès aux marchés que représentent les classes aisées des pays en développement (il arrive que les produits importés d'Europe, par exemple, soient préférés aux produits locaux par la clientèle aisée de certains pays en développement, les exigences de l'Union européenne étant considérées comme un gage de sécurité).

3. ASPECTS TECHNIQUES:

I) Distinction entre réfrigération, congélation et surgélation:

La congélation consiste à refroidir puis conserver les aliments à une température inférieure au point de congélation (à partir de laquelle l'eau des aliments gèle) ; cette température est en général légèrement inférieure à 0 °C (l'eau contenue dans les aliments contient différents éléments qui en abaissent le point de congélation). Dans la pratique, on doit garder les aliments à une température inférieure à -18 °C, voire nettement moins, selon le type d'aliment, si on veut bénéficier d'une longue durée de conservation ; les « freezers » des réfrigérateurs domestiques permettent d'éviter la décongélation prématurée des aliments achetés surgelés, mais pas de les conserver pendant des mois.

La surgélation est une congélation effectuée de façon à franchir rapidement la zone de cristallisation maximale de la glace, pour préserver les parois des cellules constitutives des aliments tels que viande, poissons, fruits et légumes. Les aliments surgelés doivent être conservés à des températures nettement inférieures à la température de congélation comme indiqué à l'alinéa précédent.

La réfrigération consiste à abaisser la température du produit tout en restant au-dessus de la température de congélation (point important, car une diminution accidentelle des températures légèrement en-dessous du point de congélation dégrade la structure cellulaire, et parfois d'autres caractéristiques).

La super-réfrigération consiste à conserver les aliments à une température à peine supérieure, voire très légèrement inférieure, à la température de début de congélation, tout en évitant qu'une proportion trop importante de l'eau ne se transforme en glace (une certaine fraction de l'eau peut être gelée, mais cette fraction doit rester assez faible pour ne pas endommager les parois cellulaires).

L'avantage de ce procédé, qui est actuellement l'objet de travaux de développement, est un allongement conséquent de la durée de conservation ; mais il nécessite une très bonne maîtrise des processus de refroidissement et du maintien de la température qui, plus encore que dans le cas de la réfrigération « classique », doit être constante dans le temps et homogène dans la pièce ; en outre, tous les aliments ne se prêtent pas de la même façon à la sur-réfrigération.

II) En milieu réfrigéré, les tissus végétaux ne se comportent pas de la même façon que les produits d'origine animale:

Les produits d'origine animale sont soit des produits sans structure cellulaire tels que le lait ou le beurre, soit des tissus morts (viande, poisson). Selon leur fragilité, ils sont conservés à des températures plus ou moins proches de 0 °C, tandis que du côté des températures minimales, la seule contrainte est de ne pas risquer de gel accidentel qui endommagerait les produits.

S'agissant des tissus animaux, il convient de signaler que leur évolution post-mortem en chambre froide dépend en partie des conditions de transport avant abattage, puis des conditions d'abattage.

A noter également, un phénomène bien connu des bouchers : une viande doit subir un processus de maturation en chambre froide, la viande d'un animal qui vient d'être abattu n'est pas la meilleure.

Contrairement aux produits d'origine animale, les tissus végétaux sont vivants, ils continuent de respirer, donc de consommer de l'oxygène – il n'y a plus de photosynthèse dans les entrepôts - et de dégager du dioxyde de carbone (CO₂), de la vapeur d'eau et de la chaleur. Cela a plusieurs conséquences:

- la pièce réfrigérée (entrepôt, remorque de véhicule...) n'est pas réchauffée que par l'extérieur, mais aussi par les produits qui s'y trouvent, cela doit être pris en compte dans le dimensionnement du groupe de réfrigération ;
- le dégagement de vapeur d'eau modifie l'hygrométrie de la pièce, ce dont on doit tenir compte également (un air trop sec dessèche et flétrit les produits, d'où une perte de poids et de qualité ; d'un autre côté, un air trop humide favorise la prolifération d'agents indésirables, voire la formation de certaines bio-toxines) ;
- la production de CO₂ et la consommation d'oxygène modifient la composition de l'atmosphère dans laquelle sont placés les produits en l'absence d'échanges avec l'extérieur – si ceux-ci sont sous emballage étanche par exemple - ce qui en retour ralentit le métabolisme des tissus;
- le métabolisme s'accompagne aussi de la consommation des réserves de la plante ou du fruit, d'où une perte de poids qui a un impact économique évident ;
- les fruits ne dégagent pas que de l'eau et du CO₂, mais aussi de l'éthylène, qui intervient dans le processus de mûrissement.

Le métabolisme est évidemment ralenti par le froid (comme indiqué en première page du dossier), d'où l'intérêt d'un refroidissement initial rapide ; on pourrait aussi penser que la meilleure température de conservation est la plus proche de 0 °C (sans risque de gel) ; toutefois, de nombreux végétaux développent des « pathologies du froid », parfois à des températures relativement élevées ; ainsi certains produits se conservent à des températures de l'ordre de 14 °C tandis que d'autres doivent être maintenus à des températures de 2 à 4 °C.

Au vu de ce qui précède, on comprend également que le contrôle d'atmosphère en entrepôt, mais aussi dans les emballages individuels, puisse être un complément utile du froid. Cette technique suppose des équipements supplémentaires et des compléments logistiques: approvisionnement en gaz, gestion des déchets : emballages sous films non récupérables, etc.

Signalons enfin que le froid peut provoquer d'autres réactions, par exemple la formation d'une couche de « cire » qui protège contre le dessèchement.

La susceptibilité des végétaux aux températures trop basses peut dépendre de différents facteurs, tels que :

- l'intégrité physique (absence de blessures dues à des chocs mécaniques), d'où l'importance de la manutention qui dépasse la seule question de l'aspect des produits :
- l'état de maturité et la teneur en eau au moment de la récolte, ou encore des carences ou excès de certains éléments, d'où l'importance des itinéraires culturels.

III) Le refroidissement initial:

Le refroidissement initial est une phase qui demande une attention particulière. Pour des raisons d'hygiène – arrêt du développement des bactéries et autres organismes indésirables en surface- et de bonne conservation, on cherche en général à avoir un refroidissement rapide jusqu'au cœur des produits. Pour les végétaux, comme on l'a vu dans la partie sur le comportement de ces produits, la rapidité du refroidissement voit son coût en partie au moins compensé par le ralentissement précoce du métabolisme et du dégagement de chaleur qui s'ensuit. Dans le cas de la surgélation, comme indiqué dans la première section, la baisse de température doit toujours être rapide. Le cas échéant, un pré-refroidissement permet de franchir plus vite l'étape de la surgélation.

Il existe divers procédés, qui utilisent soit un courant d'air froid et rapide, soit un bain d'eau froide ; selon la taille et la température initiale des pièces, certains procédés peuvent ne pas répondre aux exigences simultanées de vitesse de refroidissement au cœur des pièces à conserver, de non-congélation des parties extérieures exposées au froid, d'hygiène (qualité de l'eau, fragilisation de l'écorce de certains fruits..). Il importe donc, au moment de passer un marché de conception d'une unité de refroidissement, de préciser (parmi d'autres paramètres) non seulement les températures à atteindre, mais aussi les températures d'entrée, ainsi que la taille et la nature des pièces à refroidir.

IV) Quelques points simples mais importants à ne pas perdre de vue:

La fiabilité et l'efficacité de la chaîne du froid dépendent évidemment de la qualité de la conception et de la réalisation des équipements, qui sont une affaire de professionnels ; ces sujets ne peuvent être traités en quelques pages, une abondante littérature existe par ailleurs.

Mais d'autres points méritent l'attention, et cette attention doit être d'autant plus soutenue qu'elle incombe à des intervenants dont le premier métier n'est pas le froid, et qu'un effort de formation et de sensibilisation doit être mené à leur égard. L'expérience et les études effectuées dans divers contextes montrent que les points critiques de la chaîne du froid se situent aux interfaces entre les différentes étapes qui vont « de la fourche à la fourchette », ou plus généralement (pour inclure l'élevage) « de la ferme à l'assiette ».

La récolte des fruits et légumes doit être effectuée de préférence à des heures où la température de ces produits est la plus proche possible de celle de l'entrepôt, pour réduire l'énergie nécessaire au refroidissement initial.

En attendant d'être chargés dans un véhicule frigorifique – le plus vite possible - , les produits doivent évidemment être gardés à l'ombre et dans un endroit le plus frais possible (attention aux bâches sombres, aux petits abris fermés en tôle...) lorsque la température de l'air est élevée par rapport à celle où l'on veut conserver les produits.

Si une étape du transport ne peut être effectuée dans les conditions de température idéales (cela peut être toléré pour certains produits comme les fruits et légumes pas trop fragiles, même si cela réduit leur durée de conservation), il faut au moins éviter la surchauffe : éviter les heures chaudes,

éviter absolument les couleurs sombres (préférer les matériaux réfléchissants ou peints en blanc), prévoir un minimum d'aération tout en veillant à ne pas exposer les produits à un courant d'air trop sec et intense.

A toutes les étapes de chargement ou déchargement, travailler autant que possible à la température de conservation des produits (cas des entrées et sorties d'entrepôts) ; lorsque ce n'est pas possible, veiller à laisser les portes ouvertes le moins longtemps possible et dans la mesure du possible, effectuer ces opérations aux heures les moins chaudes.

Dans tous les cas, le transport en dehors des heures chaudes permet de réduire le coût du transport (coût énergétique du transport frigorifique, coût en perte de produits lors du transport non frigorifique).

Ce qui précède relève du simple bon sens ; pour autant, de multiples contraintes peuvent contrecarrer les bonnes intentions de départ, il convient donc de les garder à l'esprit, de les rappeler régulièrement au personnel et aux acteurs indépendants (agriculteurs, commerçants...), et d'en tenir compte dans l'organisation et la planification des opérations.

La disposition des produits en entrepôt ou véhicule frigorifique demande aussi des précautions particulières : cette disposition a une influence directe sur la circulation de l'air, et celle-ci doit permettre une bonne homogénéité des températures ; à défaut, on risque d'avoir certaines parties trop chaudes et d'autres trop froides. Ce point est un peu plus technique que les précédents et nécessite une formation spécifique du personnel (la disposition optimale du chargement dépend de la localisation des sources d'air froid et de la nature des contenants –cagettes, cartons...-).

V) Spécificités des régions chaudes:

Les lois de la thermodynamique sont les mêmes en climat chaud ou tempéré, les principes généraux de fonctionnement des appareils aussi. Toutefois, en raison même des lois générales de la thermodynamique et des caractéristiques des fluides frigorigènes, certains facteurs ont plus d'importance par temps chaud, et la recherche d'optimum économique peut conduire à des choix d'équipement différents.

Une température extérieure élevée contribue théoriquement de deux façons à augmenter le coût du maintien de la température d'une pièce froide fermée:

- Pendant une durée donnée, la quantité de chaleur qui entre de l'extérieur au travers de l'isolation et qu'il faut donc évacuer est proportionnelle à l'écart de température entre extérieur et intérieur ; cela a un coût en énergie, mais aussi en investissement (puissance du groupe de réfrigération) ; le dimensionnement optimum de l'isolation –qui a un coût également, mais généralement moins que proportionnel à l'efficacité- n'est donc pas le même qu'en climat tempéré ; la protection de l'isolation contre la pénétration de vapeur d'eau (qui fait perdre son efficacité à l'isolant thermique) doit également être regardée attentivement (pare-vapeur).
- La quantité d'énergie minimale qu'il faut fournir pour évacuer une quantité de chaleur donnée d'une pièce froide est à peu près proportionnelle à l'écart entre les températures de la pièce à refroidir et de l'extérieur, augmenté d'une marge nécessaire au fonctionnement de l'appareil ; en outre, l'élévation de la température du condenseur implique une élévation de la pression de refoulement du compresseur, d'où une baisse du rendement de celui-ci (sauf si on utilise des compresseurs bi-étagés) ; la conséquence est évidemment un coût de fonctionnement plus élevé mais aussi un coût d'investissement supérieur (moteur plus puissant, tuyaux et échangeurs de chaleur plus largement dimensionnés....).

Ces deux effets, qui ne s'ajoutent pas mais se multiplient, accroissent la justification économique de procédés et de matériels qui ont un coût mais réduisent la dépense énergétique et permettent de réduire le dimensionnement des appareils de production de froid ; en particulier:

- le refroidissement évaporatif qui peut être utilisé pour réduire la température au niveau du condenseur (partie chaude de l'équipement, où la chaleur extraite de la pièce froide est évacuée vers l'extérieur); le refroidissement évaporatif peut aussi être utilisé pour la climatisation de locaux d'habitation ou de stockage, ou de certains bâtiments d'élevage;
- le stockage de froid, soit pour pallier les irrégularités de l'approvisionnement en énergie, soit pour « stocker » la relative fraîcheur de la nuit (lorsque l'amplitude thermique journalière est importante) et faire travailler les appareils avec un moindre écart entre température du condenseur et température de l'évaporateur, ce qui procure un meilleur rendement ; voir aussi le point VI) à propos de ces techniques.

Il faut ajouter à cela que, l'insolation étant aussi plus importante dans les régions chaudes, l'albédo (qui désigne le rapport entre l'énergie solaire réfléchi par une surface et l'énergie reçue par celle-ci) est un facteur qui mérite d'autant plus l'attention.

Signalons aussi que, à défaut de disposer de véhicules équipés d'un groupe frigorifique, on peut effectuer un transport dans des conditions thermiques correctes en utilisant, selon le cas, de la glace ou des plaques eutectiques froides (plaques accumulatrices de froid) préalablement congelées. Il faut cependant penser à l'autonomie dont on dispose, au réchauffement admissible, et aux températures acceptables (la glace convient pour le poisson, pas pour les fruits qui en général doivent être conservés à des températures plus élevées) ainsi que, dans le cas de la glace, au taux d'humidité acceptable. Dans tous les cas, il convient d'avoir un véhicule bien isolé et d'être vigilant sur les points évoqués au chapitre précédent car c'est non seulement une question de coût de réfrigération mais aussi d'autonomie.

Un autre facteur important est l'humidité : l'air saturé en humidité est d'autant plus chargé en vapeur d'eau que sa température est élevée ; comme la température de la chambre froide ne change pas avec le climat (c'est la température de conservation des aliments qui compte), on comprend aisément que les entrées d'air extérieur (ouvertures de portes...) ont des conséquences sur le givrage des évaporateurs beaucoup plus importantes en climat chaud humide qu'en climat tempéré (les évaporateurs sont les éléments où se font les échanges thermiques au niveau des pièces froides). Or, le givrage a un coût énergétique (moindre efficacité des échanges thermiques, coût du dégivrage).

Par ailleurs, lors des ouvertures de portes, l'entrée d'air extérieur dans une remorque de camion, un entrepôt ou un meuble de vente à portes verticales est d'autant plus rapide que la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur est élevée. Pour cette raison, et celle mentionnée à l'alinéa précédent, la durée d'ouverture des portes doit être l'objet d'une attention d'autant plus vigilante en climat chaud, et les dispositifs limitant les échanges d'air sont d'autant plus justifiés (rideaux d'air, rideaux souples, sas...).

Enfin, dans le choix des fluides frigorigènes, les conditions climatiques et le niveau de vigilance des équipes d'entretien et de surveillance doivent être pris en compte. Par exemple, l'ammoniac, qui est un fluide frigorigène économique, techniquement intéressant, et sans effet sur la couche d'ozone stratosphérique ni sur le climat, nécessite des précautions d'emploi (toxicité, inflammabilité, risque d'explosion dans certaines conditions). Autre exemple, le dioxyde de carbone (CO₂) ne convient pour des cycles à compression classiques que si la température du point chaud (condenseur) est sensiblement inférieure à 31 °C (température du point critique); son utilisation dans les pays chauds est cependant possible dans des systèmes où le CO₂ circule entre l'évaporateur situé dans la pièce froide et un échangeur intermédiaire qui constitue lui-même le point froid d'un autre cycle

fonctionnant avec un autre fluide, ammoniac par exemple, dont le point chaud est en contact avec le milieu extérieur. Un tel système coûte plus cher en investissement mais permet des économies de fonctionnement, les fluides fonctionnant dans des plages de températures où leurs caractéristiques thermodynamiques sont meilleures ; son intérêt croît lorsque l'écart de température entre l'extérieur et l'intérieur croît : en effet, plus cet écart est important, plus le COP (coefficient de performance) d'un système à un seul circuit est susceptible de s'éloigner du COP maximal théorique. En revanche, ce dernier ne dépend que de l'écart entre température extérieure et température de la pièce froide.

VI) Procédés et développements plus particulièrement intéressants pour les pays chauds:

Préambule (deux rappels de base) :

Fonctionnement des systèmes les plus courants (cycle à compression mécanique de vapeur):

Le système le plus couramment utilisé consiste à faire circuler un fluide frigorigène dans un circuit qui passe dans la pièce à refroidir (entrepôt, réfrigérateur, remorque de camion...) et dans le milieu extérieur ; le cycle peut être décrit de façon simplifiée comme suit :

- à la sortie de la pièce froide, le fluide gazeux est aspiré et comprimé par un compresseur de telle sorte que sa température devient supérieure à celle du milieu extérieur ; il va ensuite se refroidir dans un échangeur (dont le dessin est étudié pour que la chaleur aille rapidement du fluide - chaud - vers l'extérieur - moins chaud, voire frais), ce faisant il va atteindre sa température de condensation (d'où le nom de condenseur donné à cette partie du circuit, où le fluide cède de la chaleur au milieu extérieur en se condensant) ;

- le fluide liquéfié passe ensuite dans un détendeur, d'où baisse de pression et vaporisation partielle, ce qui fait descendre la température du fluide en-dessous de celle de la pièce froide ; le fluide va ensuite dans la partie du circuit appelée « évaporateur » située dans la pièce à refroidir, l'évaporation absorbant de la chaleur fournie par cette pièce et donc extraite de celle-ci;

- à la sortie de l'évaporateur, le compresseur aspire le fluide passé à l'état gazeux et le refoule, en le compressant, vers le condenseur, et ainsi de suite.

Le coefficient de performance (COP) d'un cycle frigorifique est le rapport de la puissance frigorifique à la puissance fournie, autrement dit c'est le rapport entre la quantité de chaleur extraite de la pièce froide et la quantité d'énergie consommée sur une période donnée; quel que soit le système et le procédé employés, le COP est inférieur au COP « maximal théorique » qui est égal à la température du point froid (température absolue, exprimée en °K) divisée par l'écart des températures entre la pièce froide et le milieu extérieur dans lequel la chaleur est évacuée.

L'optimisation de ces systèmes est le résultat d'un compromis entre la taille (et la forme) des différentes parties et l'efficacité des transferts de chaleur, entre les caractéristiques thermiques des fluides (notamment leurs capacités à absorber puis céder beaucoup de chaleur lors des changements de phase : évaporation et condensation, et les couples pression-température auxquels ces changements de phase interviennent) et leurs autres caractéristiques telles que le coût, la viscosité...

Ci-après, un exemple de compromis à optimiser, et aussi de raison qui empêche d'atteindre le COP « maximal théorique »: pour qu'il y ait évacuation de chaleur du fluide vers l'extérieur au niveau du condenseur, il faut que la température du condenseur soit plus élevée que celle de l'extérieur ; plus cet écart de température est important, plus le coût énergétique est élevé (baisse du coefficient de performance), mais d'un autre côté, si l'écart de température entre le condenseur et le milieu extérieur est plus faible, les échanges thermiques sont plus lents, sauf à augmenter la surface de l'échangeur et le volume du fluide frigorigène dans le circuit, ce qui a un coût, y compris énergétique (circulation du fluide); les mêmes considérations interviennent au niveau de l'évaporateur.

Autre exemple de compromis : il peut être intéressant d'avoir deux cycles frigorifiques –voire plus- en « cascade », au lieu d'un seul : cela permet d'utiliser des fluides différents, chacun adapté à sa plage de températures de fonctionnement, et éventuellement de répondre à certaines contraintes

techniques ; le gain en fonctionnement est à apprécier au regard du surcoût d'équipement (sachant que le COP « maximal théorique » reste inchangé).

Remarques importantes :

- contrairement au rendement d'un moteur thermique, le COP d'un système frigorifique peut très bien être supérieur à 1; le COP d'une installation à compression mécanique de vapeur moyennement performante dans des conditions « normales » sous climat tempéré est de l'ordre de 3 ;
- le COP d'un système frigorifique dépend en grande partie de ce qu'on lui demande, et notamment de l'écart de température entre la pièce froide et celle du milieu extérieur, comme on l'a vu plus haut; par conséquent, pour apprécier si un appareil est « performant » en termes de consommation d'énergie, il faut considérer non seulement son COP, mais aussi le rapport de son COP au COP « maximal théorique » ; un fournisseur sérieux ne donne pas une valeur de COP sans préciser les températures de fonctionnement correspondantes (pièce froide et milieu extérieur).

Le stockage de froid est obtenu en général en refroidissant un fluide qui absorbera ensuite beaucoup de chaleur lorsque sa température augmentera faiblement, ou, mieux, en congelant un fluide qui absorbera beaucoup de chaleur en fondant (plusieurs types existent selon la température de changement de phase voulue). Les plaques eutectiques que l'on met dans les glacières portables après les avoir refroidies au congélateur sont un exemple de stockage de froid. Il ne s'agit pas d'une technologie nouvelle, en revanche son usage semble devoir se développer en même temps que celui de la chaîne du froid dans les régions chaudes où l'amplitude thermique journalière est importante : le stockage thermique peut être envisagé pour conserver la relative fraîcheur de la nuit et faire « travailler » les installations avec des températures de condenseur plus faibles pendant la journée, ce qui améliore l'efficacité et réduit la consommation énergétique.

D'une façon générale, on a recours au stockage de froid pour constituer une sorte de « volant d'inertie thermique » : au lieu de faire travailler le groupe de refroidissement à la température extérieure du moment (ce qui exige de dimensionner l'installation en fonction des heures les plus chaudes), on le fait travailler pour une production de froid « moyenne », l'excès de froid produit la nuit est stocké et restitué aux heures chaudes ; cela réduit bien entendu le dimensionnement et le coût des appareils, cela permet aussi de les faire fonctionner à un régime plus régulier (moins de marche-arrêt), et avec une meilleure efficacité (plage de températures de fonctionnement réduite).

Le stockage de froid peut aussi être appréciable lorsque l'énergie n'est pas fournie de façon régulière, qu'il s'agisse de l'électricité du réseau ou du solaire par exemple. Son intérêt (économies vs coût de l'installation) dépend bien entendu du climat, de l'amplitude thermique journalière, de la régularité de l'approvisionnement en énergie et du coût de celle-ci.

Le refroidissement évaporatif (ou refroidissement par évaporation d'eau) utilise d'une part le fait que, à température ambiante, l'évaporation d'une certaine quantité d'eau absorbe environ 600 fois plus de chaleur qu'une élévation de température de 1 °C et d'autre part le fait que l'air non saturé en humidité peut absorber une certaine quantité de vapeur d'eau supplémentaire : la chaleur absorbée par la vaporisation est fournie par l'air et par l'eau liquide, ce qui les rafraîchit; la quantité de vapeur d'eau que l'air peut contenir à saturation augmente plus vite que la température, et, pour un taux d'humidité relative donné, la quantité de vapeur d'eau qu'une masse d'air peut absorber avant d'arriver à saturation augmente également plus vite que la température; ces caractéristiques rendent le froid évaporatif particulièrement intéressant dans les régions à climat chaud et sec, même s'il est aussi utilisé dans les pays tempérés (par exemple dans les tours de refroidissement des centrales thermiques) ; a contrario, le potentiel de refroidissement évaporatif tend vers zéro lorsque l'air se rapproche de la saturation.

Le refroidissement évaporatif peut être utilisé pour la climatisation de locaux d'habitation ou de stockage, ou de certains bâtiments d'élevage ; toutefois, il faut rester en-dessous d'un certain degré d'humidité relative pour des raisons de confort : lorsqu'il fait chaud, la régulation thermique de l'organisme humain repose précisément sur le refroidissement évaporatif (évaporation d'eau par les pores de la peau) qui ne fonctionne pas bien si l'air est trop humide (transpiration) ; de même, pour le stockage, l'augmentation de l'humidité relative réduit le flétrissement et la perte de poids des fruits et légumes, mais un excès d'humidité relative favorise la prolifération d'organismes indésirables (dégradation, voire production de bio-toxines).

Dans la pratique, on ne peut donc pas utiliser directement la totalité du potentiel de refroidissement évaporatif.

On peut pallier ce problème dans une certaine mesure en utilisant le refroidissement évaporatif indirect : dans ce cas, l'air extérieur destiné à la pièce froide est refroidi en passant dans un circuit étanche qui passe dans une enceinte refroidie par évaporation ; l'humidité relative augmente alors moins que dans le cas précédent : cette augmentation est due seulement à la baisse de température, l'humidité absolue n'augmente pas du tout contrairement à ce qui se passe avec le refroidissement évaporatif direct décrit plus haut.

On peut aussi refroidir l'air successivement de façon indirecte puis directe, et obtenir ainsi des températures plus fraîches, au prix d'une complication accrue du dispositif.

Une autre utilisation du froid évaporatif consiste à rafraîchir l'air qui circule au niveau du condenseur par vaporisation de très fines gouttes d'eau, ce qui est la source d'économies substantielles puisque la température du milieu extérieur dans lequel la chaleur est évacuée est réduite (voir ci-dessus le rappel sur le COP).

Le froid solaire: dans les régions chaudes, l'énergie solaire est généralement plus abondante que dans les régions tempérées. Elle peut être convertie en énergie électrique qui peut faire fonctionner des installations frigorifiques (à condition de stocker cette énergie ou le froid produit). Elle peut aussi être utilisée directement pour produire du froid ; cela se fait en général au moyen de systèmes frigorifiques à sorption : adsorption dans le cas où un gaz est adsorbé par un solide (procédé encore expérimental) ou, procédé plus couramment employé, absorption d'un gaz par une solution liquide, dont le principe de fonctionnement est indiqué ci-dessous.

Système frigorifique à absorption : dans les systèmes les plus courants, le fluide frigorigène est aspiré à l'état gazeux depuis l'évaporateur, et refoulé à haute pression et haute température vers le condenseur, par un compresseur; dans un système à absorption, cette étape d'aspiration et refoulement est réalisée au moyen d'une solution composée d'un absorbant et de fluide frigorigène à l'état liquide (par exemple, eau et ammoniac respectivement): le fluide frigorigène sortant à l'état gazeux de l'évaporateur est aspiré dans un absorbeur par cette solution, qui se trouve ainsi enrichie en fluide frigorigène ; la solution est ensuite chauffée dans un régénérateur par l'énergie solaire à une température suffisante pour libérer une partie du fluide frigorigène à l'état de vapeur surchauffée à haute pression qui se trouve ainsi refoulée vers le condenseur ; quant à la solution, appauvrie en frigorigène, elle est renvoyée dans l'absorbeur ; entre l'absorbeur et le régénérateur, la solution passe dans un échangeur: la solution qui va de l'absorbeur vers le régénérateur est préchauffée par la solution qui va en sens inverse, ce qui réduit la température de cette dernière. La seule énergie électrique nécessaire (qui peut être photovoltaïque ou autre) est pour faire fonctionner la pompe qui refoule la solution sous pression vers le régénérateur ; comme c'est un liquide qui est refoulé sous pression, l'énergie nécessaire est bien plus faible que pour la compression de vapeur des systèmes usuels. Mis à part ce point, ces systèmes fonctionnent, pour l'essentiel, en utilisant directement la chaleur solaire. Cela peut les rendre intéressants en dépit de leurs coefficients de performance inférieurs à ceux des systèmes classiques à compression de vapeur.