



Parmi toutes les utilités énergétiques rencontrées dans les agro industries, le froid reste l'une de celles qui apparaît parfois comme étant l'une de celles les plus "magiques". Souvent confiné dans une salle des machines à accès restreint, l'indispensable froid est produit par du personnel compétent, souvent discret et très souvent peu disert sur les technologies qu'il est fier de maîtriser. L'essentiel étant, pour l'utilisateur non averti que nous sommes tous que ça marche et que ça fasse du froid!

## L'audit énergétique appliqué au froid

# Contenu, attendus, impacts

Dans un contexte où l'ensemble des activités agroalimentaires, notamment le secteur viande, se doit de concilier production de froid et développement durable, une réflexion doit être portée sur le suivi des installations frigorifiques, et en particulier sur l'intérêt d'un audit énergétique de ces installations. Cet intérêt dépend évidemment des attentes que l'on peut avoir de cet audit, ainsi que des démarches qui seront adoptées pour le conduire.

Science et technique

GUILPART J.

Unité de Recherche Génie des procédés frigorifiques  
Cemagref – GPAN  
Parc de Tourvoie — BP 44 —  
92163 ANTONY Cedex

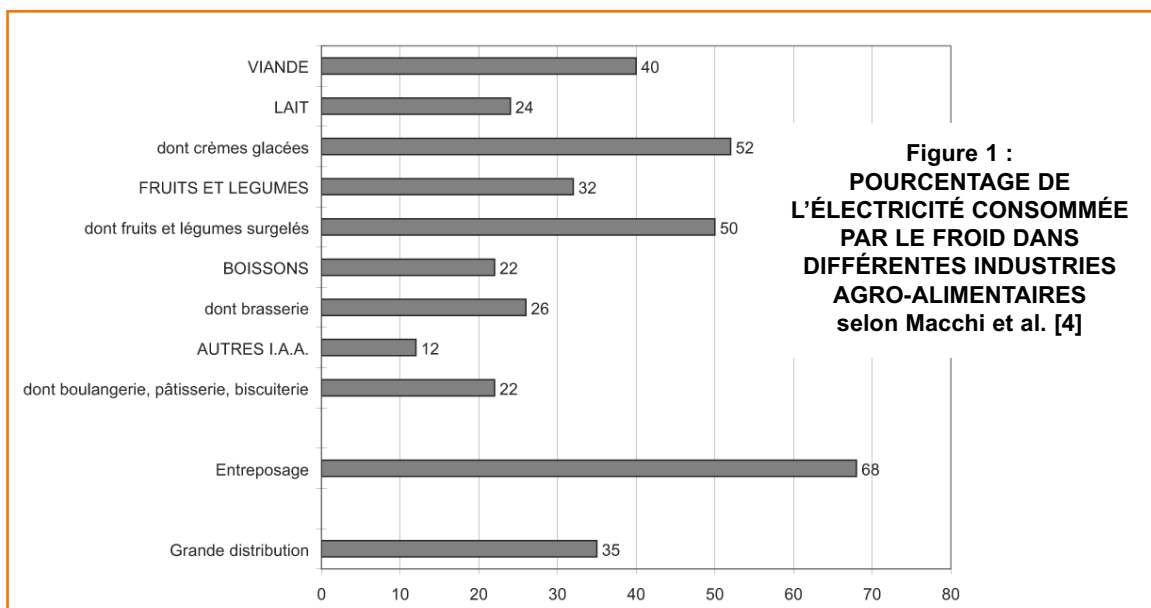


Figure 1 :  
POURCENTAGE DE  
L'ÉLECTRICITÉ CONSOMMÉE  
PAR LE FROID DANS  
DIFFÉRENTES INDUSTRIES  
AGRO-ALIMENTAIRES  
selon Macchi et al. [4]

Pourtant, le froid représente une part importante de la consommation énergétique des ateliers agro-alimentaires (cf. fig. 1) : sur l'ensemble du secteur agro-industriel, cette consommation électrique du froid s'élève à 30 — 35 TWh [4], et parallèlement, en intégrant à la fois les effets directs des fluides frigorigènes utilisés sur le forçage radiatif (exprimé en kg eq. CO<sub>2</sub>) et les effets indirects de l'énergie consommée par ces systèmes, le froid agro-alimentaire représente de 2 à 4% des émissions nationales de gaz à effet de serre.

### LES ATTENDUS D'UN AUDIT ÉNERGÉTIQUE

Les raisons qui motivent la commande d'un audit énergétique peuvent être de deux natures différentes :

1- *Soit l'installation ne donne pas entière satisfaction* : elle ne répond pas aux conditions nominales de fonctionnement attendues, elle consomme plus d'énergie que prévu, elle ne délivre pas les niveaux de température et/ou de puissances requises.... Bref, l'installation ne répond pas aux attentes de l'utilisateur. Dans ce cas, l'audit va plutôt se focaliser sur la recherche de l'origine de cette insatisfaction ou de ce dysfonctionnement, et dans la majorité des cas, une solution sera trouvée au problème. À l'issue de cet audit, le commanditaire sera satisfait, au même titre que l'expert qui l'aura réalisé. Si cette démarche est incontestablement intéressante parce qu'elle aboutit souvent à des résultats

extrêmement positifs, les avancées réelles en terme d'énergétique resteront cependant limitées : un problème est résolu (celui qui a mené à la conduite de l'audit), mais l'ensemble du procédé, tout comme l'intégration de l'ensemble des procédés de production et de transformation de l'énergie existants sur le site industriel n'ont pas été abordés... (voir plus loin).

2- *Soit l'installation donne satisfaction*. Elle fonctionne a priori correctement, donnant même des résultats a priori tout à fait intéressants sur le plan des performances et de la consommation d'énergie. Dans ce cas, on peut se demander pourquoi commanditer un audit énergétique...

Dans le premier cas, les attendus de l'audit sont clairs : répondre à une question posée, et résoudre un problème identifié. Un plan d'action assorti d'actions de corrections sera mis en œuvre pour résoudre le problème, et les conséquences sur les performances de l'installation seront chiffrées — à défaut d'être réellement mesurées.

Par contre dans le second cas, les attendus de l'audit peuvent paraître assez abscons. Pourtant, c'est dans ce second cas que les résultats peuvent être les plus surprenants et les plus bénéfiques : la satisfaction cache souvent une méconnaissance de la réalité. Au pire, on peut confirmer que l'on a raison d'être satisfait, et au mieux (et c'est souvent le cas), on prend conscience de la marge de pro-

grès dont on pourrait disposer. Le plan d'action proposé peut dans certains cas remettre de façon plus ou moins fondamentale l'installation qui jusqu'à présent donnait satisfaction, et c'est sur la base de critères raisonnés et raisonnables que l'on prendra la décision d'entreprendre ou non une modification plus ou moins fondamentale du site.

### LE CONTENU D'UN AUDIT CLASSIQUE

#### Première phase : identifier les bons interlocuteurs

La première phase de la réalisation d'un audit classique consiste à trouver le bon interlocuteur sur le site à auditer. Cet interlocuteur doit :

1- connaître le procédé et l'itinéraire technique que doit suivre le produit, des matières premières au produit fini. Il doit connaître les niveaux de températures, d'humidité, etc. requis à chaque étape du procédé pour conférer au produit les qualités d'usage qu'on en attend. Dans ce cas, l'ingénieur process semble être le meilleur interlocuteur ;

2- connaître l'installation mise en œuvre, son architecture, la nature des fluides utilisés, les paramètres retenus lors du dimensionnement initial de l'installation comme par exemple les temps de cycles, les débits, les puissances, les modes de régulations retenus etc. Dans ce cas le frigoriste en charge de l'installation semble le mieux positionné ;

3- connaître les performances actuelles de l'installation : les flux matière, les productions journalières, hebdomadaires, mensuelles et saisonnières. Il doit également connaître les consommations réelles de l'installation, et pouvoir établir des ratios de consommations exprimés par exemple en kWh par tonne de produit traité... Dans ce sens l'ingénieur fluides et énergie semble être le mieux positionné.

Souvent, dans nos industries, ces trois compétences sont réunies par plusieurs personnes, et ce sont ces personnes qu'il convient d'identifier et de mettre autour de la table.

### Seconde phase : la comparaison aux ratios classiques

Cette seconde phase nécessite la connaissance préalable de certains ordres de grandeurs disponibles dans la littérature comme par exemple dans [1], [2] ou [3]. Les échanges avec des collègues au cours de réunions professionnelles peuvent également être avantageusement mis en œuvre. À titre d'exemple, certains ratios relatifs au froid en agro-industries sont donnés dans le tableau 1.

La comparaison des valeurs fournies par l'interlocuteur interviewé au cours de la phase 1 permet d'avoir une idée a priori des points sur lesquels il conviendra de focaliser plus particulièrement l'attention par la suite.

### Troisième phase : affiner les bilans

La connaissance du procédé et de l'itinéraire technique suivi par les produits permettra, au moyen des outils classiques du génie des procédés, d'affiner les bilans matière et énergie. La réalisation de cette phase nécessite une bonne connaissance des caractéristiques physiques, chimiques, thermophysiques et thermo-chimiques des produits ( $C_p$ , chaleurs latentes, points de fusion,...). Elle nécessite également une bonne connaissance des spécificités de l'installation frigorifique utilisée, ainsi que des caractéristiques techniques de l'installation, en particulier des cadences et des débits de lignes. Cette phase vise à estimer les besoins frigorifiques journaliers, hebdomadaires, saisonniers voire annuels de l'application. La comparaison des chiffres

**Tableau 1 : QUELQUES VALEURS TYPQUES DE PERFORMANCES DES INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES COURANTES**

	Coefficient de performance typique	Ratio typique
Stockage positif ( $>0^\circ\text{C}$ )	2,5 à 3	40 à 50 kWh m <sup>3</sup> an <sup>-1</sup>
Réfrigération		20 à 30 kWh tonne <sup>-1</sup>
Stockage négatif ( $<-18^\circ\text{C}$ )	1 à 1,5	50 à 60 kWh m <sup>3</sup> an <sup>-1</sup>
Congélation		130 à 160 kWh tonne <sup>-1</sup>

théoriques obtenus avec les chiffres fournis par l'ingénieur process et/ou l'ingénieur fluides permettra de détecter rapidement d'éventuelles anomalies sur lesquelles il conviendra également de focaliser son attention par la suite.

### Quatrième phase : l'audit proprement dit

Cette phase se déroule sur le terrain, en compagnie des bons interlocuteurs identifiés au cours de la première phase. Son objectif est principalement de vérifier la validité des données fournies au préalable, ce qui peu parfois mener à quelques surprises... Elle consiste également à observer de visu l'état général du site, l'entretien général de l'installation, la présence des manuels techniques, du mode de fonctionnement (état d'esprit, motivation) des opérateurs... bref, autant de petits indices qui permettent de se faire une idée globale de la sensibilisation de chacun des opérateurs vis-à-vis du bon fonctionnement de l'outil de production en général et de sa performance énergétique en particulier. Cette vision globale du site et de la motivation des personnels impliqués est particulièrement importante : comment améliorer quelque chose à laquelle personne n'est sensible ni sensibilisé ?

Cette phase de terrain consiste également, tant que faire se peut, à récolter des données process et énergie, ce qui nécessite la mise en œuvre d'une métrologie adaptée. À noter que souvent, un simple chronomètre, un thermomètre et un baromètre peuvent être plus avantageusement mis en œuvre qu'un système de mesure informatisé lourd et complexe à mettre en place... ce qui n'empêche pas que la mise en œuvre de ces systèmes peut être extrêmement avantageuse, en particulier pour la mesure en continu et sur la durée (quelques jours) des paramètres

de procédés. En effet, l'intégration de ces paramètres dans le temps permet souvent de visualiser certaines aberrations énergétiques, telles que par exemple, le fonctionnement de compresseurs ou de pompes lorsque l'application n'est pas en appel de froid... ce qui arrive plus souvent qu'on ne le croit. Dans ce cadre, il convient de rappeler que l'exploitation des données GTC (gestion technique centralisée) est extrêmement intéressante et trop souvent négligée.

### Cinquième phase : la restitution

Cette phase de restitution doit s'appuyer sur un rapport remis suffisamment à l'avance pour que les bons interlocuteurs puissent en prendre connaissance. Elle tirera avantage à être réalisée oralement par celui qui a conduit l'audit, en leur présence. Cette phase doit être un échange entre les parties prenantes. Elle a pour objectif principal de faire toucher du doigt au commanditaire de l'audit les pistes d'améliorations que l'auditeur aura pu détecter au cours de son travail. Libre choix est donné à l'interlocuteur d'accepter, de remettre en cause ou de réfuter les diagnostics réalisés.

Ainsi, un audit peut, sur de simples recommandations a posteriori triviales, donner des résultats surprenants... tout simplement parce que le rappel de quelques recommandations simples par un extérieur permet de prendre un peu de recul par rapport à une installation que l'on (croit) connaît (re) et que l'on (pense) maîtrise (r). À titre d'exemple, le tableau 2 donne quelques idées de résultats a posteriori triviaux... mais somme toute classiques. Qui a par exemple évalué le temps de retour d'un investissement permettant de gagner  $1^\circ\text{C}$  sur une température d'évaporation, ce qui permettrait de

gagner facilement 2% sur la consommation d'énergie?

Il faut reconnaître que les choix techniques sont souvent guidés par des critères de coût d'investissement minimal, au détriment des coûts d'exploitation, et en particulier des coûts énergétiques qui, il est vrai, ne représentent que peu en % du chiffre d'affaire du site industriel. Votre frigoriste vous offre ce que vous lui demandez : c'est à vous de poser vos choix.

Mais souvent, votre frigoriste sait que vos contraintes immédiates vous mènent à opter pour le choix d'un investissement minimal alors qu'il pourrait vous proposer de nombreuses autres solutions énergétiquement plus performantes.

Ainsi, la réalisation d'un audit énergétique permet, dans de nombreux cas, d'apporter des solutions techniques permettant de réaliser de

façon simple, rapide et efficace des économies d'énergie de l'ordre de 5 à 20% voire plus. Parfois, sans investissements importants – ou du moins à temps de retour raisonnable. Souvent tout de même, en envisageant des investissements plus conséquents, mais dont les temps de retour ne restent pas rédhibitoires.

## L'AUTRE MOITIÉ DU CHEMIN...

Mais les économies d'énergies conséquentes à cet audit classique ne constituent que la moitié d'un chemin plus difficile et complexe à parcourir...

Pour parcourir cette autre moitié du chemin, il faut accepter :

- 1- de ne pas considérer le froid comme une utilité à part;
- 2- de ne pas considérer le procédé comme figé;
- 3- et de ne pas prendre l'euro comme seul critère de décision pour un investissement.

## Le froid n'est pas une utilité à part

Il s'intègre dans un ensemble de procédés de conversion et de transformation de l'énergie. Si produire 1 kW de froid consomme 0,3 à 1 kW d'électricité, il co-produit 1,3 à 2 kW de chaleur (en fonction des coefficients de performance du système).

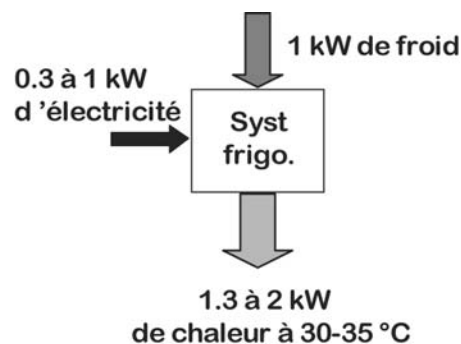
Cette chaleur est dans la majorité des cas actuels rejetée dans l'atmosphère (condenseurs, aérofrigoriférants...), principalement en raison de son niveau de température (30-35 °C). Sur de nombreux sites industriels, cette chaleur, même de bas niveau de température, peut être récupérée : préchauffage de l'eau de process, chauffage de locaux, etc. Pour ce qui concerne les industries de la viande, une étude ADEME [6] indique en effet que la production d'eau chaude et de froid représente 70% de la consommation énergétique du secteur. La récupération de chaleur peut donc s'avérer extrêmement intéressante. Cette récupération peut facilement s'envisager à moindre frais, moyennant une modification mineure de l'installation (condensation à eau). Il est à noter que le relevage du niveau de la température de condensation peut être réalisé au moyen d'une pompe à chaleur adaptée, délivrant des températures voisines de 75 – 85 °C. Bien évidemment, dans ces cas, une étude économique doit

**Tableau 2**

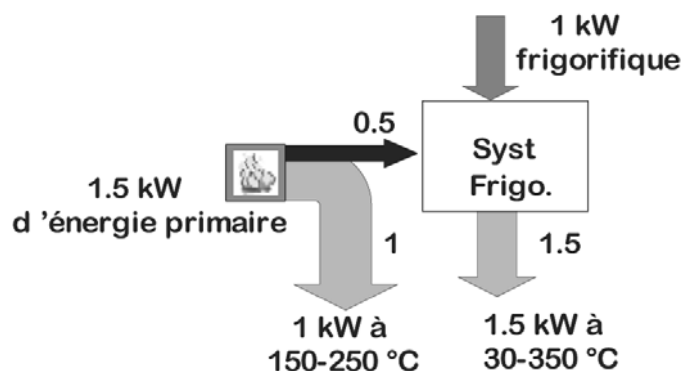
*Quelques constats fréquents réalisés au cours d'audits énergétiques et questions à se poser pour améliorer les performances énergétiques des installations frigorifiques (liste non exhaustive...)*

Constat	Question posée/éléments de réponses
Le givrage peut représenter 20% des coûts énergétiques	Les portes sont-elles ouvertes? quid des entrées d'air parasites?
La ventilation peut représenter 15% des coûts énergétiques	Est-elle bien dimensionnée? est-elle bien gérée?
L'isolation peut représenter 10% des coûts énergétiques	Épaisseur et état général de l'isolant et du pare-vapeur?
Le pompage des fluides secondaires peut représenter 5% des coûts énergétiques	Dimensionnement des pompes? régulation? vitesse variable? choix du frigoporteur?
1 °C sur la température d'évaporation = 2% sur la consommation d'énergie et 1 °C sur la température de condensation = 3% sur la consommation d'énergie	Dimensionnement des échangeurs, choix technologiques,...?
Le sous-dimensionnement des échangeurs augmente les pinçements	10 % de surface d'échange # 2 % sur les consommations d'énergie
Un encrassement des échangeurs peut augmenter le pinçement de 7 à 10 K	Les condenseurs, sont-ils régulièrement nettoyés?
Une pression de condensation élevée n'est pas toujours utile...	Pourquoi adopter des Tk de 35-45 °C... en plein hiver?
Une régulation simple... n'est pas toujours efficace!	Le TOR, le by-pass refoulement/aspiration ou la vanne à pression constante sont encore (trop) largement répandus (et proposés!)
Une architecture simple non plus	Un seul niveau de production de froid pour deux utilisations à températures différentes est fréquent. Revoir le cycle frigorifique adopté?

**Figure 2**  
**LA TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE PAR UN SYSTÈME FRIGORIFIQUE**



**Figure 3**  
**NIVEAUX DE PERFORMANCES OBTENUS AVEC UN SYSTÈME DE TRIGÉNÉRATION PRODUCTION SIMULTANÉE D'ÉNERGIES ÉLECTRIQUE, THERMIQUE ET FRIGORIFIQUE**



accompagner l'investissement nécessaire.

Si le site est consommateur d'autant sinon de plus d'énergie thermique que d'énergie frigorigère, l'investissement dans un système tritherme, voire dans un système de trigénération peut s'avérer extrêmement avantageux. (figure 3).

Là encore, la prise de recul par rapport à l'intégration du procédé frigorigère dans l'ensemble des procédés de conversion et de transformation de l'énergie du site est nécessaire. Une optimisation (minimisation) de l'ensemble de la consommation d'énergie primaire par une méthode adaptée (méthode du pincement – pinch- en anglais), peut être fort utile dans ce sens. Ainsi, de nombreuses études ont démontré que l'utilisation de ces méthodes d'optimisation pouvait mener à des économies d'énergie de 25 à 40% sur l'ensemble des utilités thermiques d'un site industriel [7].

### **Le froid a deux niveaux d'impact sur l'environnement**

Cette notion de double impact se traduit dans l'indice TEWI (total equivalent warming impact) qui est la somme de l'effet indirect de la production de froid sur le réchauffement climatique (liée à la consommation d'énergie, traduite en kg eq. CO<sub>2</sub> de l'énergie primaire utilisée) et de l'effet direct du fluide contenu dans l'installation. En effet, différentes études indiquent que les émissions furtives et/ou accidentelles des installations de froid industriel avoisinent les 8-10% par an et que le potentiel de réchauffement atmosphérique des fluides utilisés doit être pris en comp-

te dans le TEWI. À titre d'exemple, 1 kg de HCFC22 émis dans l'atmosphère a un pouvoir radiatif équivalent à 1 500 kg de CO<sub>2</sub> et 1 kg de l'un des HFC utilisés couramment, le R404A a un pouvoir radiatif équivalent à 3 200 kg de CO<sub>2</sub>. Ainsi, l'utilisation de fluides à effet de serre extrêmement faible (comme les hydrocarbures) ou nuls (comme l'ammoniac) pourrait être avantageusement envisagée... sous réserve de respecter les recommandations et les exigences des règlements sur les installations classées au titre de la protection de l'environnement (ICPE), ce qui est malheureusement souvent difficile. Dans tous les cas, un contrôle sévère et régulier de l'étanchéité de l'installation (voir réglementation) est toujours utile, positif... et obligatoire.

### **Il existe aujourd'hui des techniques de contrôle commande avancées et de GTC qui font appel à des technologies "innovantes"**

Les vieux principes de régulations basés sur du tout ou rien, du tout ou peu ou des vannes de pertes de charges sont totalement dépassés : il existe actuellement des actionneurs proportionnels de type vitesses variables, vannes progressives,... qui, associés à des systèmes de gestion technique centralisés et à des automates intelligemment programmés, permettent de faire des économies d'énergie appréciables, de l'ordre de 10 à 25% [5, 8]. Il est à souligner l'importance d'une exploitation raisonnée des données fournies et stockées par les systèmes de GTC : leur exploitation permet de constater les dérives de paramètres dans le

temps, comme par exemple une hausse des pressions de condensation liées à un encrassement des condenseurs... en se rappelant que chaque degré de hausse de la température de condensation conduit à une surconsommation de l'ordre de 2 à 3%...

### **Il ne faut pas considérer le froid comme étant associé à un procédé figé**

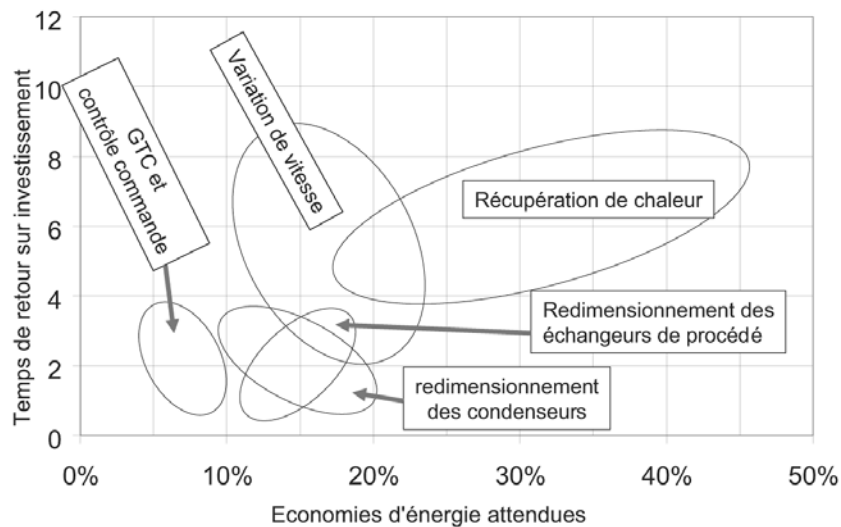
Il est vrai que la mise au point des paramètres de procédés nécessite souvent beaucoup d'expérience, de tâtonnements et de savoir-faire pour arriver à conférer au produit les qualités que l'on en attend. Les températures de process, les pressions, les débits,... retenus sont toujours le fruit d'une longue expérience, et souvent, ces paramètres sont considérés comme étant indispensable à maintenir pour obtenir un produit de qualité. Cette mise au point est certes complexe car souvent, ces paramètres interagissent entre eux. Une fois le procédé et ses paramètres de conduites définis, il semble impossible à modifier : le procédé est "figé" par sa propre configuration.

Cette configuration n'est cependant valide que pour la ligne de production telle qu'elle est actuellement. Par exemple, le redimensionnement des échangeurs de procédés pourrait modifier certains de ces paramètres, comme les températures et les débits, ce qui peut avoir des conséquences importantes sur les consommations énergétiques du procédé ([5]). S'est-on souvent posé la question de la conséquence d'une modification de la ligne de production sur sa performance énergétique et sur le temps de retour de l'investissement associé? Les résultats obtenus en termes de diminution de la consommation énergétique et de l'impact environnemental du procédé mériteraient que de telles études soient plus souvent conduites.

### **Il ne faut pas considérer l'euro comme seul critère de décision.**

Souvent, de telles études conduisent à proposer des solutions techniques nécessitant des investissements conduisant à des temps de retour parfois motivants (quelques mois), parfois raisonnables (quelques années), mais souvent incompatibles avec les exigences des actionnaires de l'entreprise. À titre d'exemple, les valeurs de temps de retour liées à l'investis-

**Figure 4**  
**ÉCONOMIES D'ÉNERGIE ET TEMPS DE RETOUR LIÉS À L'INVESTISSEMENT DANS DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES « INNOVANTES » EN INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE**  
selon Gautherin et al. [9]



sement dans différentes solutions techniques sont présentées figure 4. Dans un contexte devenu complexe, où les politiques d' "éco marketing", l'imminence d'un changement de réglementation (élimination du HCFC 22 en 2014 par exemple), la mise en conformité rendue obligatoire (ICPE par exemple), les incertitudes sur les coûts de l'énergie, ou tout simplement, le sentiment d'éco-citoyenneté grandissant peuvent devenir des choix décisionnels importants, il ne devient plus raisonnable de n'éclairer ses choix d'investissements qu'à la seule lumière de la pression actionnariale et financière.

### CONCLUSION

Très souvent, la raison qui pousse à la commande et à la réalisation d'un audit énergétique est claire et identifiée : il s'agit d'établir un diagnostic sur les origines d'un fonctionnement insatisfaisant ou d'un dysfonctionnement identifié de l'installation. Dans la majorité des cas, les résultats de l'audit conduisent à la proposition d'une série

d'actions correctives dont les résultats sont souvent très positifs au regard de la consommation d'énergie : des valeurs de 15 à 25% d'économie voire plus sont facilement atteignables. Il s'agit là d'un gisement appréciable, qui cependant ne représente que la moitié du chemin qu'il est possible de parcourir dans le domaine de la réduction des consommations énergétiques de nos sites agro-industriels.

Le parcours de l'autre moitié du chemin, principalement basé sur l'intégration des procédés de conversion et de transformation de l'énergie et sur la réingénierie des procédés, permet d'envisager qu'à l'horizon 2050, la réduction d'un facteur 4 des émissions de gaz à effet de serre visée par le protocole de Kyoto n'est pas une utopie pour ce qui concerne nos ateliers frigorifiques.

Continuons d'avancer dans cette direction : la durabilité et le développement de nos activités agro-industrielles sont à ce prix.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] Guide de l'entreposage frigorifique, Editions Institut international du froid, 177 Bd Malherbes, Paris.
- [2] Le froid efficace dans l'industrie, Editions ADEME, 1999.
- [3] Diagnostic énergétique des installations frigorifiques industrielles, Editions ADEME, 2000.
- [4] MACCHI H., GUILPART J., DUCRUET C., HIVET B., 1998. Le froid dans les IAA. Consommations électriques et charges en fluide frigorigène, Revue générale du froid, n° 987, p. 51 – 54.
- [5] LEDUCQ D., GUILPART J., 2000. Le contrôle-commande dans les ateliers frigorifiques. Revue générale du froid, n° 1009, p. 33 – 36.
- [6] PINOT M., 2008. Analyse et synthèse des actions de l'ADEME pour les économies d'énergie dans les IAA. (Rapport de stage ADEME).
- [7] L'analyse Pinch : pour une gestion plus efficace de l'énergie, de l'eau et de l'hydrogène. Natural Resources of Canada. ISBN : 0-662-89793-3.
- [8] LEDUCQ D., NOUHIN M., GUILPART J., GUEGUEN R., 2003. Contrôle optimal d'une installation frigorifique. Revue générale du froid, n° 1033, p. 31 – 36.
- [9] GAUTHERIN W., FOURNAISON L., GUILPART J., 2007. Evaluation des gisements d'énergie. Filière des produits laitiers et fromagers. Revue générale du froid et du conditionnement d'air, Vol. 1077, p. 31 – 40.