



Mesure standardisée KA-04

Optimisation du fonctionnement d'installations frigorifiques par l'optimisation de la température d'évaporation

Documentation

Identifiant de la mesure

KA-04

Version

1.0 (11.2024)



1 Avant-propos

Lors de la session d'automne 2023, le Parlement a fixé aux fournisseurs d'électricité, dans la loi fédérale relative à un approvisionnement en électricité sûr reposant sur des énergies renouvelables, une nouvelle obligation à mettre en œuvre des mesures visant à accroître l'efficacité électrique. L'article 46b de la loi sur l'énergie (LEne ; RS 730.0) dispose que les fournisseurs d'électricité doivent mettre en œuvre des mesures visant à accroître l'efficacité énergétique des appareils, installations ou véhicules électriques existants chez les consommateurs finaux suisses, ou acquérir des preuves des mesures prises si elles sont mises en œuvre par des tiers. L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) fournit chaque année une liste des mesures standardisées et des économies d'électricité comptabilisables à l'aide de ces mesures. Les mesures non comprises dans la liste susmentionnée sont soumises à l'OFEN pour approbation en tant que mesures non standardisées.

Pour chaque mesure standardisée, l'OFEN met à disposition un protocole d'économie à l'aide duquel les fournisseurs d'électricité peuvent annoncer les mesures mises en œuvre. La documentation fournie présente en détail la méthode servant à déterminer les économies d'électricité comptabilisables. La méthode décrite ci-après vise à obtenir une estimation globale des économies d'électricité cumulées (énergie finale) pouvant être atteintes sur la durée d'impact par la mise en œuvre d'une mesure donnée visant à accroître l'efficacité électrique. Elle se fonde sur un calcul *ex ante* et fait usage d'hypothèses et de facteurs définis sur la base de normes en vigueur, d'études de marché, d'écrits scientifiques et d'expertises.

La documentation s'adresse aux fournisseurs d'électricité, aux responsables de la mise en œuvre des mesures visant à accroître l'efficacité énergétique et à toutes les personnes s'intéressant aux économies d'électricité dans le cadre des gains d'efficacité visés à l'article 46b LEne.

2 Objectif

L'objectif du présent document est d'estimer de manière forfaitaire les économies d'électricité découlant de l'augmentation de la température d'évaporation des installations frigorifiques par diverses mesures.

3 Symboles, termes et unités

Lettres latines

Symbole	Terme	Unité
E	Consommation électrique annuelle	kWh/a
ΔE_{eco}	Économies d'électricité comptabilisables	MWh
f	Facteur	-
N_s	Durée d'impact standard	a
T	Température	°C
\dot{Q}	Puissance de refroidissement	kW
Q	Besoin de froid annuel	kWh/a
t	Durée BIN	h/a
EER	Coefficient de performance frigorifique	-

Lettres grecques

Symbole	Terme	Unité
η	Taux d'utilisation	-

Indices

x	État (avant, après)
i	Catégorie d'application
j	Température extérieure



4 Description du calcul ex ante

4.1 Économies comptabilisables

Les économies d'électricité comptabilisables ΔE_{eco} pouvant être atteintes par la mesure sont déterminées par la différence entre la consommation d'électricité actuelle (état actuel) E_{alt} et la nouvelle consommation d'électricité (état après assainissement) E_{neu} sur la durée d'impact standard N_s .

Afin de tenir compte du taux naturel de renouvellement et d'optimisation des appareils et des installations, qui entraîne une baisse de la consommation d'énergie indépendamment du respect des engagements prévus par la loi, un coefficient de réduction f_{eco} de 0.75 est appliqué aux économies d'énergie comptabilisables.

$$\Delta E_{eco} = 0.001 \cdot (E_{alt} - E_{neu}) \cdot f_{eco} \cdot N_s$$

ΔE_{eco}	Économies d'électricité comptabilisables, en kWh
E_{alt}	Consommation électrique annuelle de l'état existant, en kWh/a
E_{neu}	Consommation électrique annuelle de l'état après assainissement, en kWh/a
f_{eco}	Facteur de réduction
N_s	Durée d'impact standard, en années

4.2 Consommation électrique annuelle

La consommation électrique annuelle résulte de la somme des quotients de la charge annuelle de refroidissement et de l'efficacité de l'installation, qui dépendent à leur tour de l'utilisation et des conditions d'exploitation.

$$E_x = \sum_{j=1}^n \left(\frac{Q_j}{EER_{x,j}} \right)$$

E_x	Consommation électrique annuelle, en kWh/a
Q_j	Énergie frigorifique en fonction de la température extérieure, en kWh/a
EER_j	Coefficient de performance frigorifique en fonction de la température extérieure

L'énergie frigorifique dépend du nombre d'heures pendant lesquelles la température extérieure est de T_j et du besoin de puissance frigorifique pour une température extérieure T_j donnée.

$$Q_j = t_j \cdot \dot{Q}_j$$

Q_j	Énergie frigorifique en fonction de la température extérieure, en kWh/a
t_j	Nombre d'heures à la température extérieure selon BIN, en h/a
\dot{Q}_j	Besoin de puissance frigorifique à la température extérieure, en kW

Le nombre d'heures par an durant lesquelles la température extérieure est de T_j est déterminé au moyen de la méthode BIN en application de la norme SN EN 14825. Le besoin de puissance frigorifique en fonction de la température extérieure est calculé en indiquant la puissance pour une température extérieure donnée et un profil de charge consigné en fonction de l'application frigorifique, conformément au tableau 3.

Le coefficient de performance frigorifique est calculé à partir du rendement théorique de Carnot et le facteur de dégradation (du rendement). Le rendement théorique de Carnot dépend de la température de condensation T_c et de la température d'évaporation T_0 , qui peut être optimisée en fonction de la mesure.

$$EER_{x,j} = \frac{T_{0,x,i} + 273,15}{T_{c,j} - T_{0,x,i}} \cdot \eta_{CG}$$



$EER_{x,j}$	Coefficient de performance frigorifique en fonction de la température extérieure, sans unité
η_{CG}	Facteur de dégradation (du rendement de Carnot), sans unité
$T_{0,x,i}$	Température d'évaporation (dépend de l'application frigorifique), en °C
$T_{C,j}$	Température de condensation (dépend de la température extérieure), en °C

La température d'évaporation $T_{0,x,i}$ dépend de l'application frigorifique et de la différence de température supplémentaire $\Delta T_{tot,0,x}$.

$$T_{0,x,i} = T_{0,i} + \Delta T_{tot,0,x}$$

$T_{0,i}$	Température d'évaporation selon application, en °C
$\Delta T_{tot,0,x}$	Différence de température supplémentaire, en K

La différence de température supplémentaire $\Delta T_{tot,0,x}$ décrit le changement découlant de la mesure d'optimisation, qui peut être obtenu grâce à une modification de la température d'utilisation et/ou grâce au nettoyage des refroidisseurs d'air.

$$T_{tot,0,x} = \Delta T_{a,nutz} + \Delta T_{b,sch,x}$$

$\Delta T_{a,nutz}$	Différence de température découlant de l'ajustement de la température d'utilisation, en K
$\Delta T_{b,sch,x}$	Différence de température due à des refroidisseurs d'air sales, en K

Une mesure supplémentaire à l'ajustement de la température d'utilisation et au nettoyage des refroidisseurs d'air est le réglage de la surchauffe. Pour cette mesure, la température d'évaporation $T_{0,x,i}$ est déterminée par le spécialiste avant et après le réglage et il n'est donc pas nécessaire de la calculer.

- A. La différence de température supplémentaire découlant de l'ajustement de la température d'utilisation $\Delta T_{a,nutz,x}$ correspond à la modification de la température d'utilisation. Si par exemple la température d'utilisation d'un meuble frigorifique (prêt à brancher) est portée de 1°C à 3°C, la température d'évaporation du refroidissement augmente elle aussi de +2 K.

$$\Delta T_{a,nutz} = T_{nutz,neu} - T_{nutz,alt}$$

$T_{nutz,alt}$	Température d'utilisation antérieure d'une application, en °C
$T_{nutz,neu}$	Nouvelle température d'utilisation d'une application, en °C

Les installations mixtes sont exclues de cette mesure, à moins que la température d'utilisation ne soit ajustée sur tous les points de refroidissement. Dans ce cas, c'est le point de refroidissement dont la température d'utilisation a le moins changé qui détermine $\Delta T_{a,nutz}$.

- B. La différence de température supplémentaire due à des refroidisseurs d'air sales ne peut être utilisée que pour les applications avec refroidissement d'air. Si le refroidisseur d'air est *propre*, aucune différence de température supplémentaire par rapport à la température d'évaporation n'est calculée. Si le refroidisseur d'air est *sale*, une différence de température supplémentaire $\Delta T_{b,sch,x}$ est additionnée à la température d'évaporation. La mesure n'est pas applicable au refroidissement du processus, car elle ne prend pas en compte les refroidisseurs par du liquide.
- C. Un réglage correct de la surchauffe permet d'augmenter la température d'évaporation. Pour cette mesure, il faut indiquer la température d'évaporation effective T_0 avant et après la réalisation de la mesure. Cet élément peut être constaté peu après la réalisation du réglage dans certains cas, ou alors seulement au bout de quelques semaines (p. ex. installations mixtes). En cas de réglage de la surchauffe, il faut garder à l'esprit que la sécurité d'exploitation doit être garantie en tout temps.



La température de condensation $T_{C,j}$ dépend de la température ambiante T_j et de la différence de température totale $\Delta T_{tot,c}$.

$$T_{C,j} = T_j + \Delta T_{tot,c}$$

Il faut garder à l'esprit que la température de condensation ne peut en aucun cas être inférieure à la valeur seuil $T_{C,min}$.

$$T_{C,j} = \begin{cases} T_{C,j}, & T_{C,j} \geq T_{C,min} \\ T_{C,min}, & T_{C,j} < T_{C,min} \end{cases}$$

De plus, l'écart de température entre $T_{0,x,i}$ et $T_{C,j}$ ne doit jamais être inférieur à $\Delta T_{0,C,min}$, même lorsque la température extérieure et $T_{C,min}$ le permettent.

$$T_{C,j} = \begin{cases} T_{C,j}, & T_{C,j} - T_{0,x,i} \geq \Delta T_{0,C,min} \\ T_{0,x,i} + \Delta T_{0,C,min}, & T_{C,j} - T_{0,x,i} < \Delta T_{0,C,min} \end{cases}$$

$T_{C,j}$	Température de condensation, en °C
T_j	Température extérieure, en °C
$\Delta T_{tot,c}$	Différence de température totale, en K
$T_{C,min}$	Température de condensation minimale, en °C
$\Delta T_{0,C,min}$	Différence de température minimale, en K

La différence de température totale $\Delta T_{tot,c}$ est formée de plusieurs éléments. Il convient d'abord de distinguer s'il s'agit d'une condensation directe (air / condenseur direct) ou d'un refroidissement par un liquide (aéroréfrigérant avec circuit secondaire).

4.2.1 Condensation directe (air / condenseur direct)

Dans le cas d'une condensation directe (air), la différence de température totale résulte de la ΔT entre la température de condensation et la température extérieure (ΔT_{c-j}).

$$\Delta T_{tot,c} = \Delta T_{c-j}$$

$\Delta T_{tot,c}$	Différence de température totale, en K
ΔT_{c-j}	Différence entre la température de condensation et la température extérieure, en K

4.2.2 Refroidi par un liquide (aéroréfrigérant à circuit secondaire)

Dans le cas d'un aéroréfrigérant à circuit secondaire, la différence de température totale résulte de la ΔT entre la température de condensation et la température à l'entrée du circuit secondaire du condenseur ($\Delta T_{c-sek,ein}$) et de la ΔT entre la température à l'entrée du circuit secondaire du condenseur et la température ambiante ($\Delta T_{sek,ein-j}$).

$$\Delta T_{tot,c} = \Delta T_{c-sek,ein} + \Delta T_{sek,ein-j}$$

$\Delta T_{tot,c}$	Différence de température totale, en K
$\Delta T_{c-sek,ein}$	Différence entre la température de condensation et la température d'entrée, en K
$\Delta T_{sek,ein-j}$	Différence entre la température d'entrée et la température ambiante, en K



4.2.3 Free-Cooling de serveurs informatiques

Si le système de refroidissement des *serveurs informatiques* implique un Free-Cooling, la charge de refroidissement est nulle à partir d'une certaine température extérieure (au bulbe humide). La valeur seuil dépend de la température d'application.

$$\dot{Q}_j = \begin{cases} \dot{Q}_j, & T_j > T_{fc,min} \\ 0, & T_j \leq T_{fc,min} \end{cases}$$

\dot{Q}_j	Besoin de puissance frigorifique, en kW
T_j	Température extérieure, en °C
$T_{fc,min}$	Température seuil pour l'application du Free-Cooling, en °C

4.2.4 Nombre d'heures d'exploitation du refroidisseur de processus

Comme certains *refroidisseurs de processus* ne fonctionnent pas 24 heures sur 24, le nombre d'heures d'exploitation $h_{pr.}$ par jour peut être ajusté pour cette application. Cela entraîne une diminution des heures d'exploitation selon BIN.

$$t_j = \begin{cases} t_j, & h_{pr.} = 24 \\ t_j \cdot \frac{t_{pr.}}{24}, & h_{pr.} < 24 \end{cases}$$

t_j	Nombre d'heures selon BIN, en h/a
$t_{pr.}$	Nombre d'heures d'exploitation par jour pour les refroidisseurs de processus.

5 Variables d'entrée

Généralités

- Type d'application frigorifique (*choix multiple*)
- Type de dissipation de chaleur (*choix entre deux options*)
- Besoin de puissance frigorifique, en kW (*nombre à virgule*)

Selon l'application

- Présence de Free-Cooling, pour les *serveurs informatiques* (*choix entre deux options*)
- Nombre d'heures d'exploitation par jour, pour le *refroidissement du processus* (*nombre entier*)

Selon la mesure

- Ajustement de la température d'utilisation, en °C (*nombre à virgule*)
- Nettoyage du refroidisseur d'air (*choix entre deux options*)
- Réglage de la surchauffe, en °C (*nombre à virgule*)

6 Hypothèses et données

Généralités

- La température extérieure à laquelle le besoin de puissance frigorifique est défini s'élève à 35 °C.
- La température de condensation minimale $T_{C,min}$ et l'écart de température $\Delta T_{0,C,min}$ sont de 25 °C.
- Les durées BIN correspondent aux valeurs standard de la station météorologique de Zurich conformément au cahier technique SIA 2028 [2].
- Le cycle de Carnot η_{CG} est de 0.45 [3,4].



- v. Les différences de température ΔT_{c-j} , $\Delta T_{c-sek,ein}$ et $\Delta T_{sek,ein-j}$ sont définies au tableau 2 [1].
- vi. Le Free-Cooling est utilisé lorsque la température de l'air extérieur au thermomètre à bulbe humide est inférieure de 15 K $T_{fc,min}$ à la température d'application (21 °C resp. 28 °C) [1]. La limite appliquée pour le Free-Cooling est donc la température extérieure correspondante avec une humidité relative de l'air de 50 %.

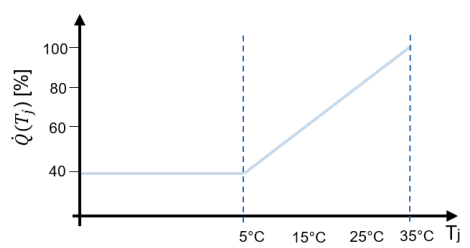
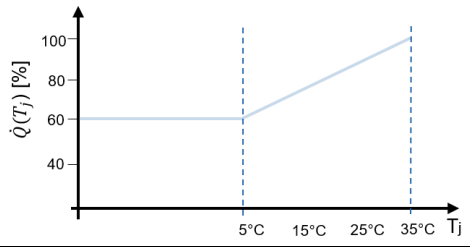
Tableau 2 Détermination de ΔT_{c-j} , $\Delta T_{c-sek,ein}$ et $\Delta T_{sek,ein-j}$

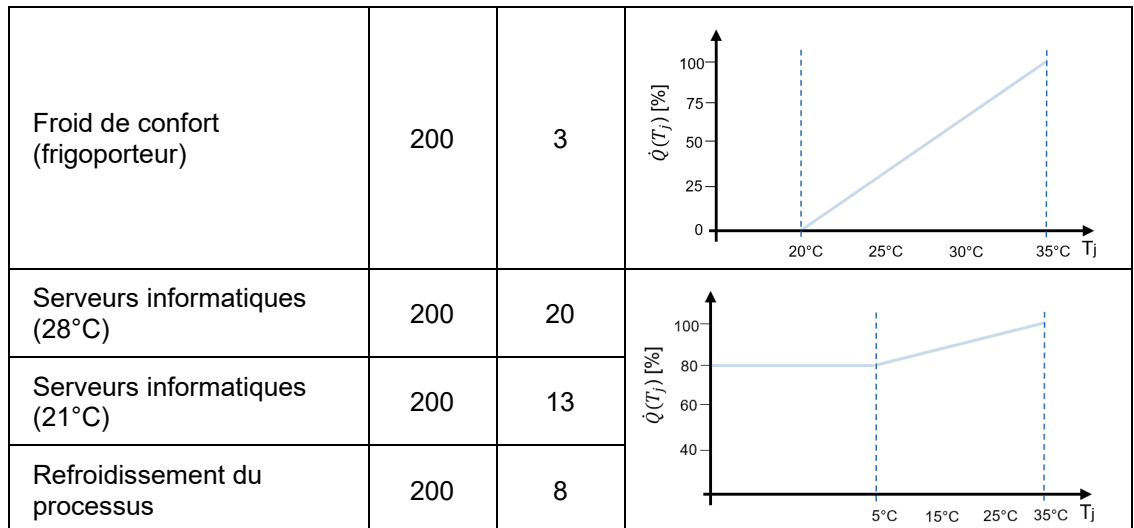
Condenseur aérefroidisseur	Calcul de ΔT	ΔT [K]
Air (condenseur direct) : froid négatif	$\Delta T_{c-j} = T_c(\text{température de condensation})$ $- T_{air}(\text{entrée condenseur})$	10
Air (condenseur direct) : autres applications	$\Delta T_{c-j} = T_c(\text{température de condensation})$ $- T_{air}(\text{entrée condenseur})$	13
Eau (aérefroidisseur)	$\Delta T_{c-sek,ein} = T_c(\text{temp. condens.})$ $- T_{agent\ caloporteur}(\text{entrée condenseur})$	9
Eau (aérefroidisseur)	$\Delta T_{sek,ein-j} = T_{agent\ caloporteur}(\text{entrée condenseur})$ $- T_j(\text{temp. ext.})$	6

Selon l'application

- vii. La température d'évaporation $T_{0,i}$ dépend de l'application conformément au tableau 3. Cela permet également de définir le profil de charge [1].
- viii. Selon l'application, la méthode décrite n'est valable que jusqu'à un certain besoin de puissance frigorifique \dot{Q}_{max} . Les valeurs correspondantes sont précisées dans le tableau 3.

Tableau 3 Température d'évaporation et profil de charge selon l'application

Refroidissement	\dot{Q}_{max} [kW]	$T_{0,i}$ [°C]	Profil de charge
Froid positif	40	-10	
Froid négatif	30	-30	
Froid de confort (évaporation directe)	80	7	



Selon la mesure

- ix. La durée d'impact standard N_s des mesures pour l'ajustement de la température d'utilisation (A) et le nettoyage des refroidisseurs d'air (B) est d'un an pour chacun.
- x. La durée d'impact standard N_s de la mesure pour le réglage de la surchauffe (C) est de trois ans.
- xi. Pour les mesures d'ajustement de la température d'utilisation (A) et de réglage de la surchauffe (C), on admet que tous les échangeurs de chaleur sont *propres*.
- xii. La mesure de réglage de la surchauffe (C) ne peut être saisie que si les mesures (A) et (B) sont réalisées au préalable.
- xiii. La différence de température supplémentaire due à des refroidisseurs d'air sales ne peut être utilisée que pour les applications avec refroidissement d'air. Si le refroidisseur d'air est propre, aucune différence de température supplémentaire par rapport à la température d'évaporation (selon le tableau 3) n'est calculée. Si le refroidisseur d'air est sale, une différence de température supplémentaire $\Delta T_{b,sch,x}$ est additionnée à la température d'évaporation, conformément au tableau 1 [1].

Tableau 1 Diminution de la température d'évaporation en raison de refroidisseurs d'air sales

Application	Salissure	$\Delta T_{b,sch,x}$ [K]
Froid de confort (évaporation directe et frigoporteur)	propre	0.0
	sale	-2.0
Froid positif, froid négatif	propre	0.0
	sale	-0.4
Serveurs informatiques (21°C), serveurs informatiques (28°C)	propre	0.0
	sale	-2.0

7 Résultats

Compte tenu des hypothèses et des données présentées, les économies d'électricité comptabilisables pour chaque installation frigorifique sont déterminées en fonction des variables d'entrée fixées. Pour ce faire, on utilise la liste de monitoring KA-04, accessible au public.



8 Exemple

Scénario A : Les meubles frigorifiques destinés au froid positif sont nettoyés. La puissance de refroidissement s'élève à 20 kW au total, le commerce d'aliments se trouve à Zurich.

Application	Variables d'entrée	Valeurs		Économies d'électricité comptabilisables
		Avant	Après	[MWh]
Froid positif	Site	Zurich		
	Besoin de refroidissement au point de dimensionnement, kW	20		
	Dissipation de chaleur	Air (direct)		
	Température d'utilisation, °C	1.0	1.0	
	Salissure des refroidisseurs d'air	sale	propre	
Total				0.3

Scénario B : Climatisation de confort avec un réseau frigoporteur à Locarno. La puissance frigorifique au point de dimensionnement est de 120 kW pour une température de 35 °C. Au préalable, la température d'utilisation de l'installation de refroidissement a été réglée (8 °C) et les refroidisseurs d'air ont été nettoyés. À la suite de cela, la surchauffe (SC) a été réglée. Avant le réglage, la température d'évaporation était de 1 °C, elle s'élève à 4 °C après le réglage.

Application	Variables d'entrée	Valeurs		Économies d'électricité comptabilisables
		Avant	Après	[MWh]
Froid de confort (agent réfrigérant)	Site	Locarno		
	Besoin de refroidissement au point de dimensionnement, kW	120		
	Dissipation de chaleur	Air (direct)		
	Température d'utilisation, °C	8.0	8.0	
	Salissure des refroidisseurs d'air	propre	propre	
	Température d'évaporation avant/après réglage SC, °C	1.0	4.0	
Total				3.7

9 Sources

- [1] Atelier d'experts, valeurs empiriques
- [2] Société suisse des ingénieurs et architectes, *Données climatiques pour la physique du bâtiment, l'énergie et les installations du bâtiment*, SIA 2028, 2010
- [3] BITZER Kühlmaschinenbau GmbH, *programme en ligne de sélection des compresseurs Bitzer - logiciel Bitzer version 6.5.0*, <https://www.bitzer.de/websoftware/Default.aspx>, consulté pour la dernière fois le 12 août 2024



- [4] Tecumseh Products Company LLC, *programme en ligne de sélection des compresseurs Tecumseh - version 4.0*, http://www.tecumseh.com/de/Europe/Sel_Soft_V4_0, consulté pour la dernière fois le 12 août 2024