

Optimiser la courbe de chauffe par de nouveaux calculs d'émission de chaleur



Dans les chaufferies, la courbe de chauffe de la chaudière est souvent réglée de manière aléatoire par le technicien, généralement sans aucune traçabilité.

Pour remédier à ce problème, l'auteur de l'article a mis au point une nouvelle méthode de calcul, rationnelle et reproductible, à travers une approche inédite issue de son expérience de terrain.

Il a aussi mis au point une méthode graphique qui simplifie l'approche. Il en présente les grandes lignes dans cet article qui ne saurait remplacer le livre détaillé qu'il vient de publier⁽¹⁾.



Par Philippe Ferlay, ingénieur en énergétique et auteur de deux livres distribués par La librairie technique du bâtiment performant

L'objet du livre⁽¹⁾ résulte d'une insatisfaction personnelle à régulièrement observer une mauvaise mise en œuvre des courbes de chauffe. Très souvent, trop souvent à mon sens, le technicien d'exploitation règle la courbe de chauffe par tâtonnement selon le moment de la saison de chauffe. Elle se règle souvent selon le confort ressenti. S'il fait froid pendant toute la saison de chauffe, toute la courbe est déplacée vers le haut. S'il fait trop chaud seulement aux intersaisons, on abaisse la courbe de chauffe par un déplacement du point pivot mais on augmente la pente. S'il fait trop froid uniquement au pic de l'hiver, on abaisse la courbe de chauffe par translation mais on augmente la pente. Inversement, les réglages sont les opposés s'il fait trop chaud.

En général, les réglages ne sont pas consignés dans un registre et le technicien d'exploitation est livré à lui-même, sans bénéficier d'un apport technique de la part de la hiérarchie. Dans les faits, la courbe de chauffe devient expérimentale après plusieurs années de mauvaise pratique.

Le livre sur l'optimisation des courbes s'articule autour de trois parties : la première partie développe l'influence du confort sur la température ambiante. Puis, en seconde partie, un rendement total permet de définir individuellement les nombreuses pertes occasionnées par la mise en œuvre du chauffage. Enfin, en dernière partie, la température de départ de la chaudière

est optimisée par une série de calculs qui visent à optimiser la température de chauffe de la chaudière mais aussi à réduire le débit d'irrigation. Ce qui évite le surdimensionnement des réseaux hydrauliques. Le présent article vise à présenter le livre dans les grandes lignes.

1. La température ambiante nécessaire au confort attendu

Sans rappeler la norme 7730, la température opérative optimale dépend de l'activité et de l'habillement ; le livre produit la relation entre la température ambiante nécessaire pour atteindre le niveau de confort et la température opérative optimale correspondante.

2. Le rendement total

La puissance d'émission nécessaire pour assurer le maintien de la température ambiante prend en compte l'ensemble des déperditions du local et toutes les sujétions qui consomment inutilement de l'énergie ; celles-ci sont quantifiées par le rendement total qui est défini comme suit :

$$\eta_{\text{total}} = (6 - \eta_{\text{str}} - \eta_{\text{ctr}} - \eta_{\text{emb}} - \eta_{\text{boue}} - \eta_{\text{conf}}) \times (f_{\text{hyv}} \times f_{\text{chute}} \times f_{\text{ad}}) - 1$$

Où :

• η_{str} est le rendement partiel dû au gradient vertical de la température de l'air.

⁽¹⁾ «Optimiser la courbe de chauffe par de nouveaux calculs d'émission de chaleur».

- η_{ctr} est le rendement partiel dû à la régulation de la température de la pièce.
 - η_{emb} est le rendement partiel dû aux pertes thermiques spécifiques via des composants externes (systèmes intégrés au bâti).
 - η_{boue} est le rendement partiel dû à l'embouage de l'émetteur.
 - η_{conf} est le rendement partiel dû au confinement de l'émetteur.
 - f_{hydr} est le facteur d'équilibrage hydraulique.
 - f_{chute} est le facteur de la chute de température avant l'arrivée à l'émetteur.
 - f_{rad} est le facteur de l'effet du rayonnement (uniquement pour les systèmes de chauffage par rayonnement).
- Le livre renseigne sur les valeurs de rendement et de facteur qui sont mentionnées dans la formule précédente.

3. Mise en œuvre de la détermination de la courbe de chauffe

Nous nous plaçons dans le cas général pour lequel le ratio suivant est strictement inférieur à 0,7 :

$$\text{Ratio} = \frac{(\theta_{\text{sortie-eau}} - \theta_{\text{air-ambiant}})}{(\theta_{\text{entrée-eau}} - \theta_{\text{air-ambiant}})}$$

Le terme ΔT se calcule selon la formule générale :

$$\Delta T = \frac{(\theta_{\text{entrée-eau}} - \theta_{\text{sortie-eau}})}{\text{LN} \left[\frac{(\theta_{\text{entrée-eau}} - \theta_{\text{air-ambiant}})}{(\theta_{\text{sortie-eau}} - \theta_{\text{air-ambiant}})} \right]}$$

Deux cas de figure se présentent à nous : un bâtiment existant dont on ne modifie pas les réseaux et un bâtiment à construire pour lequel les réseaux sont à définir.

Pour chaque émetteur d'un réseau bitube référencé par l'indice (i), la puissance nette de l'émetteur (i) est calculée tout d'abord à la température de base. Le rendement total est calculé et noté ($\eta_{\text{total}(i)}$).

Le débit $m(i)$ est tout d'abord pré-calculé de sorte que la chute de température aux bornes de l'émetteur (δ) soit identique pour tous les émetteurs irrigués par le même réseau, mais ce n'est pas une obligation car la chute de température peut être différente d'un émetteur à l'autre à ce stade du calcul. La valeur du débit sera finalement déterminée en fin de calcul.

$$P(i) = (1 + \eta_{\text{total}(i)}) \times P_{\text{net}}(i) = m(i) \times C \times \delta$$

Puis, $T_{A(i)}$, la valeur de la température d'arrivée de l'émetteur (i) du réseau T_A , est calculée à la température de base dans le cas du bâtiment existant (débit connu).

$$T_A = \frac{T_{\text{amb}} - \phi 2(P) \times \left(\frac{P}{m \times C} + T_{\text{amb}} \right)}{1 - \phi 2(P)}$$

La fonction $\phi 2$, qui est explicitée dans le livre, permet de calculer la température d'arrivée nécessaire au maintien de la température ambiante dans l'environnement immédiat de l'émetteur concerné. À ce stade, il convient de vérifier si les émetteurs, qui sont en demande d'une valeur T_A importante, peuvent être remplacés par d'autres équipements nécessitant une valeur max moins forte ; dans ce cas, un moyen pratique est d'augmenter la puissance installée (Q_n). Ensuite, on détermine la valeur T_A la plus importante parmi les (n) émetteurs du réseau :

$$T_{A-\text{max}} = \text{MAX} (T_{A(1)} ; T_{A(2)} ; \dots ; T_{A(n)})$$

Dès la sélection d'une valeur $T_{A-\text{max}}$ commune à tous les émetteurs, le débit des autres émetteurs (i), dont la valeur $T_{A(i)}$ est moindre, est recalculé selon la méthode du bâtiment à construire ($T_{A-\text{MAX}}$ connu). La valeur du débit recalculé peut, le cas échéant, être amendée en raison de contraintes sur le débit (débit minimum à satisfaire aux conditions du constructeur ou limitation automatique du débit).

Le mathématicien Lambert (voir encadré) a défini une courbe atemporelle et indépendante des calculs d'émission de chaleur qui permet de lire la valeur de la fonction W, laquelle valeur est indispensable au calcul de la chute de température.

$$\delta = \Delta T_{\text{base}} \times \left(\frac{P}{Q_n} \right)^{1/n} \times W + T_A - T_{\text{amb}}$$

Soulignons que l'écart de température (δ) est calculé sans connaître le débit ou la température de sortie (T_r), ce qui est a priori surprenant. Une démonstration de la dernière formule et une explication au moyen d'un graphique renseigneront le lecteur du livre sur ce point.

Naturellement, après avoir calculé le débit et la température de départ à la température de base, il convient de continuer le calcul pour les autres températures extérieures mais cette fois, le débit maximum par émetteur est fixé et il est possible de déterminer le débit réduit en cas de régulation thermostatique du débit.

Enfin, notons une application directe pour les projets de



Une méthode nourrie par des années de pratique

Auteur d'un premier livre sur une méthode de détermination de la valeur $U_{\text{bât}}$ réelle d'un bâtiment, Philippe Ferlay innove à nouveau avec une approche inédite de la courbe de chauffe basée sur son expérience de terrain. Jeune ingénieur diplômé d'HEI Lille en 1991, et après plusieurs expériences dans le domaine des équipements et des lots techniques, il rejoint le groupe Altran pour effectuer plusieurs missions d'assistance à maître d'ouvrage en génie climatique directement intégrées chez des grands comptes comme l'équipe de construction Toyota de Valenciennes. Des missions d'études thermiques ou d'assistance à maître d'œuvre en génie climatique ont aussi été effectuées pour Bouygues ou Alstom. Ingénieur pointilleux, il gagne très vite la réputation de tout vérifier dans les moindres détails. C'est sans doute ce qui le pousse à améliorer ses connaissances en énergétique et en thermique. Il suit alors pendant 5 années les cours du soir du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam) pour décrocher en 2010 un deuxième diplôme d'ingénieur, cette fois très spécialisé en énergétique du bâtiment. C'est d'ailleurs à cette occasion qu'il aura l'idée de son premier livre. Sa carrière s'est ensuite poursuivie chez un maître d'ouvrage, en charge du chauffage et des fluides dans le cadre de la maintenance générale d'un parc de bâtiments. Son expérience lui apprend la solidité du technicien de chaufferie devant le réglage de la courbe de chauffe. «Souvent il la règle comme il peut au gré des demandes ou des insatisfactions. Cela devient vite très expérimental.» Il cherche alors des réponses à cette problématique à travers différents articles, en français, anglais ou allemand. «Je suis parti d'un problème de terrain pour remonter vers la théorie. Pour moi, l'hypothèse de départ fixant une chute de température sur un émetteur était fautive.» Au cours de quatre années de recherche, il imagine progressivement une nouvelle méthode de calcul qui se veut fiable et pratique. Il la traduit ensuite sous forme d'abaques à lecture rapide et la présente dans un deuxième livre édité par ses soins.

chaudière à condensation, il s'agit de connaître la température de sortie de l'émetteur :

$$T_R = T_{amb} - \Delta T_{base} \times \left(\frac{P}{Q_n} \right)^{1/n} \times W$$

Pour rappel, la valeur W est négative ; il s'agit donc de la somme de deux termes.

Dans le cas d'une génération de chaleur par chaudière à condensation, comme le montre la dernière relation, il est intéressant de surdimensionner les radiateurs pour bénéficier d'un retour plus froid, ce qui permet aussi d'assurer le moyen d'une relance énergétique du chauffage en cas d'intermittence de l'occupation du bâtiment. On peut en profiter pour réduire le débit et économiser l'énergie électrique y afférente.

4. Exemple de mise en œuvre du calcul pour un bâtiment à construire (TA-max connu)

Soient les données suivantes : la valeur maximale (T_{Amax}) pour le groupe d'émetteurs est 48 °C. L'émetteur se caractérise par les valeurs : $n = 1,3$; $Q_n = 1\,000\text{ W}$ / un besoin de puissance de 295,5 W et la température ambiante vaut 20 °C.

Le but est de calculer le débit pour 48 °C.

Soit la relation suivante :

$$\mu = \frac{k_1}{k_2} = \frac{-(T_A - T_{amb})}{\Delta T_{base} \times \left(\frac{P}{Q_n} \right)^{1/n}}$$

Avec :

$$k_1 = \frac{1}{\Delta T_{base} \times \left(\frac{P}{Q_n} \right)^{1/n}} = \frac{1}{50 \times \left(\frac{295,5}{1\,000} \right)^{1/1,3}} = \frac{1}{19,5752}$$

$$k_2 = \frac{-1}{(T_A - T_{amb})} = \frac{-1}{(48 - 20)} = \frac{-1}{28}$$

$$\mu = \frac{k_1}{k_2} = -1,4304$$

La lecture du graphe indique la valeur de la fonction W : -0,6574.

$$\delta = 19,5752 \times (-0,6574) + 28 = -12,868 + 28 = 15,13\text{ K}$$

$$P = \delta \times m \times C \Rightarrow m = \frac{P}{\delta \times C} = \frac{295,5}{15,13 \times 4\,200} = 4,65 \times 10^{-3}\text{ kg/s} = 16,7\text{ kg/h}$$

Vérification :

$$\Delta T = \frac{(T_A - T_R)}{\text{LN} [(T_A - T_{amb}) / (T_R - T_{amb})]} = \frac{(15,13)}{\text{LN} [(48 - 20) / (48 - 15,13 - 20)]}$$

$$= \frac{(15,13)}{\text{LN} (2,176)} = 19,46\text{ K}$$

$$P = Q_n \times \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_{base}} \right)^n = 1\,000 \times \left(\frac{19,46}{50} \right)^{1,3} = 293\text{ W} \approx 295,5\text{ W}$$

Le résultat est très proche du résultat attendu aux arrondis de calcul près. Ainsi donc, il est possible de déterminer le débit sans fixer préalablement la température de retour. Ce qui est logique car le débit et la température de retour sont étroitement liés. Reprenons la précédente application numérique, supposons que la valeur maximale de T_A calculé soit 45 °C (et non plus

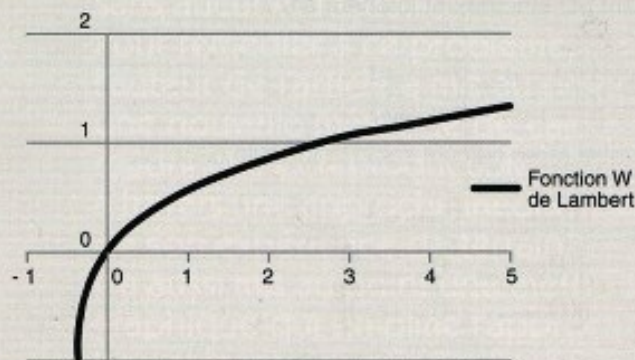
La fonction W de Lambert

Le mathématicien Jean-Henri Lambert a développé au XVIII^{ème} siècle une méthode pour déterminer des inconnues liées par des équations faisant intervenir des logarithmes. On lui doit en particulier la démonstration que le chiffre π n'est pas un chiffre rationnel. Longtemps oubliée, la méthode fut redécouverte de nos jours pour résoudre des problèmes de physique fondamentale mais aussi dans le cadre d'une multitude d'applications pratiques. Ce qui est notre cas ici. La fonction W de Lambert est parfois appelée fonction Oméga (Ω ou W).

La fonction W est la réciproque de la fonction de variable complexe définie par :

$$z = w \times e^w \Leftrightarrow w = W(z)$$

En écartant le cas des chiffres complexes, il existe une courbe $W(z)$ de chiffres réels compris entre $-1/e$ et $+\infty$:



48 °C) pour un besoin de puissance de 295,5 W ; le but est donc de déterminer le débit nécessaire pour 45 °C :

$$k_1 = \frac{1}{\Delta T_{base} \times \left(\frac{P}{Q_n} \right)^{1/n}} = \frac{1}{50 \times \left(\frac{295,5}{1\,000} \right)^{1/1,3}} = \frac{1}{19,5752}$$

$$k_2 = \frac{-1}{(T_A - T_{amb})} = \frac{-1}{(45 - 20)} = \frac{-1}{25}$$

$$\mu = \frac{k_1}{k_2} = -1,277$$

La lecture du graphe indique la valeur de la fonction W : -0,7642

$$\delta = 19,5752 \times (-0,7642) + 25 = 10,04\text{ K}$$

$$\delta = \frac{P}{m \times C} \Rightarrow m = \frac{P}{\delta \times C} = \frac{295,5}{10,04 \times 4\,200} = 7,00 \times 10^{-3}\text{ kg/s} = 25,22\text{ kg/h}$$

Vérification :

$$\Delta T = \frac{(T_A - T_R)}{\text{LN} [(T_A - T_{amb}) / (T_R - T_{amb})]} = \frac{(10,04)}{\text{LN} [(45 - 20) / (45 - 10,04 - 20)]} = \frac{(10,04)}{\text{LN} (1,671)} = 19,55\text{ K}$$

$$P = Q_n \times \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_{base}} \right)^n = 1\,000 \times \left(\frac{19,55}{50} \right)^{1,3} = 295\text{ W}$$

5. Un paradoxe pour illustrer une application du livre

Supposons un cas concret : soit un radiateur type 11 ; $h = 500\text{ mm}$, $l = 2\,000\text{ mm}$, 60 éléments.

Ses caractéristiques sont : $n = 1,25$ et $Q_n = 1\,680\text{ W}$

Les déperditions du local sont de 1 289 W pour une température ambiante de 22 °C.

Le nomogramme n° 1

Une application de la méthode d'optimisation de la courbe de chauffe est de déterminer le débit sans calcul, seulement par l'utilisation de nomogramme. Deux nomogrammes sont livrés dans l'ouvrage.

Le nomogramme n° 1 peut toutefois être remplacé par le tableau suivant qui offre une lecture directe du terme $[50 \times (P/Qn)^{(1/n)}]$ en italique. C'est le point n° 1 à tracer sur le nomogramme n° 2 :

Ratio (P/Qn)	n = 1	n = 1,1	n = 1,2	n = 1,3
1	50	50	50	50
0,9	45	45	46	46
0,8	40	41	42	42
0,7	35	36	37	38
0,6	30	31	33	34
0,5	25	27	28	29
0,4	20	22	23	25
0,3	15	17	18	20
0,2	10	12	13	14
0,1	5	6	7	9

Le second nomogramme vise à connaître l'écart de température (δ) en traçant le segment depuis le point (n° 1) situé sur l'axe $(50 \text{ K} \times (P/Qn)^{(1/n)})$ jusqu'au point $(T_A - T_{amb})$ sur l'axe éponyme; puis, on prolonge ce segment jusqu'à l'axe (δ).

À l'intersection de cet axe, une lecture sur l'axe (δ) permet de déterminer la valeur (δ). Puis, la droite formée par le point (δ) et la puissance (P) rencontre l'axe des débits sur lequel il reste à lire la valeur du débit.

Bien entendu, ce nomogramme peut être lu dans tous les sens possibles.

Voici un exemple d'utilisation des nomogrammes

Soient les valeurs ($Qn = 3\,333 \text{ W}$; $P = 1\,000 \text{ W}$; ratio $= 1\,000/3\,333 = 0,3$; $n = 1,3$).

La lecture du premier tableau montre une valeur de 20°C .

Supposons que $(T_A - T_{amb}) = 25 \text{ K}$; le second nomogramme montre un écart (δ) de 10 K .

La lecture du débit pour une puissance de $1\,000 \text{ W}$ montre une valeur de 86 kg/h .

La résolution graphique au moyen de nomogrammes montre une nouvelle fois qu'il n'est pas nécessaire de connaître préalablement la température de retour ou le débit pour déterminer l'écart (δ).

Pour conclure, un nomogramme sera toujours moins précis qu'un calcul analytique. Ce n'est pas grave en soi car l'incertitude sur le débit, en raison de la difficulté à maîtriser l'équilibre hydraulique, demeure plus forte que l'erreur de lecture sur un nomogramme.

La température d'entrée vaut : $68,6^\circ\text{C}$.

La chute de température est souhaitée égale à : $\delta = 15 \text{ K}$

Le régime est donc : $(68,6^\circ\text{C}/53,6^\circ\text{C})$

On peut croire que le débit vaut :

$$P = \delta \times m \times C \Rightarrow m = \frac{P}{\delta \times C} = \frac{1\,289}{15 \times 4\,200} = 20 \times 10^{-3} \text{ kg/s} = 74 \text{ kg/h}$$

Nous nous plaçons dans le cas général pour lequel le ratio suivant est strictement inférieur à 0,7 :

$$\text{Ratio} = \frac{(\theta_{\text{sortie-eau}} - \theta_{\text{air-ambiant}})}{(\theta_{\text{entrée-eau}} - \theta_{\text{air-ambiant}})} = \frac{53,6 - 22}{68,6 - 22} = 0,68$$

Le terme ΔT se calcule selon la formule générale :

$$\Delta T = \frac{(\theta_{\text{entrée-eau}} - \theta_{\text{sortie-eau}})}{\text{LN} \left[\frac{(\theta_{\text{entrée-eau}} - \theta_{\text{air-ambiant}})}{(\theta_{\text{sortie-eau}} - \theta_{\text{air-ambiant}})} \right]} = \frac{15}{\text{LN}(1,475)} = 38,62 \text{ K}$$

$$P = Qn \times \left(\frac{\Delta T}{50} \right)^{1,25} = 1\,680 \times \left(\frac{38,62}{50} \right)^{1,25} = 1\,216 \text{ W}$$

Force est de constater un écart significatif entre la puissance $1\,289 \text{ W}$ qui correspond au niveau des déperditions du local et la puissance d'émission ($1\,216 \text{ W}$). En vérité, la chute de température fixée arbitrairement à 15 K ne se produira pas à la température ambiante souhaitée.

Calculons la chute de température qui sera observée dans le cas présent :

$$k1 = \frac{1}{\Delta T_{\text{base}} \times \left(\frac{P}{Qn} \right)^{(1/n)}} = \frac{1}{50 \times \left(\frac{1\,289}{1\,680} \right)^{(1/1,3)}} = \frac{1}{40,45}$$

$$k2 = \frac{-1}{(T_A - T_{\text{amb}})} = \frac{-1}{(68,6 - 22)} = \frac{-1}{46,6}$$

$$\mu = \frac{k1}{k2} = -1,152$$

Optimiser la courbe de chauffe par de nouveaux calculs d'émission de chaleur

Très pédagogique, cet ouvrage, dont l'objet est l'optimisation des courbes de chauffe, s'articule autour de trois parties. La première partie développe l'influence du confort sur la température ambiante. Puis, en seconde partie, un rendement total permet de définir individuellement les nombreuses pertes occasionnées par la mise en œuvre du chauffage.

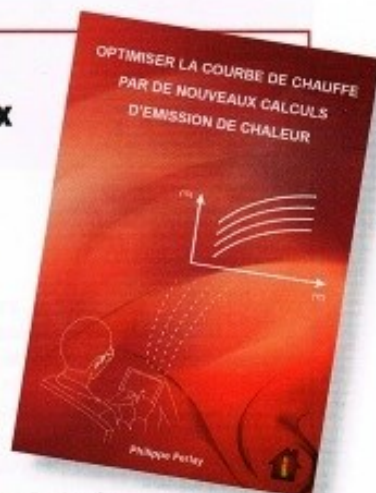
Enfin, en dernière partie, la température de départ de la chaudière est optimisée par une série de calculs qui visent à optimiser la température de chauffe de la chaudière mais aussi à réduire le débit d'irrigation. Ce qui évite le surdimensionnement des réseaux hydrauliques.

Le lecteur sera aussi surpris de constater que, pour connaître le débit d'irrigation, il n'est pas nécessaire de fixer préalablement la chute de température dans le corps de chauffe. Des applications simples illustrent les moyens de calcul exposés de sorte que le lecteur puisse se les approprier facilement. La méthodologie détaillée du livre est très facilement programmable sous la forme d'un calcul pratique avec un tableur (Excel, Open Office, etc).

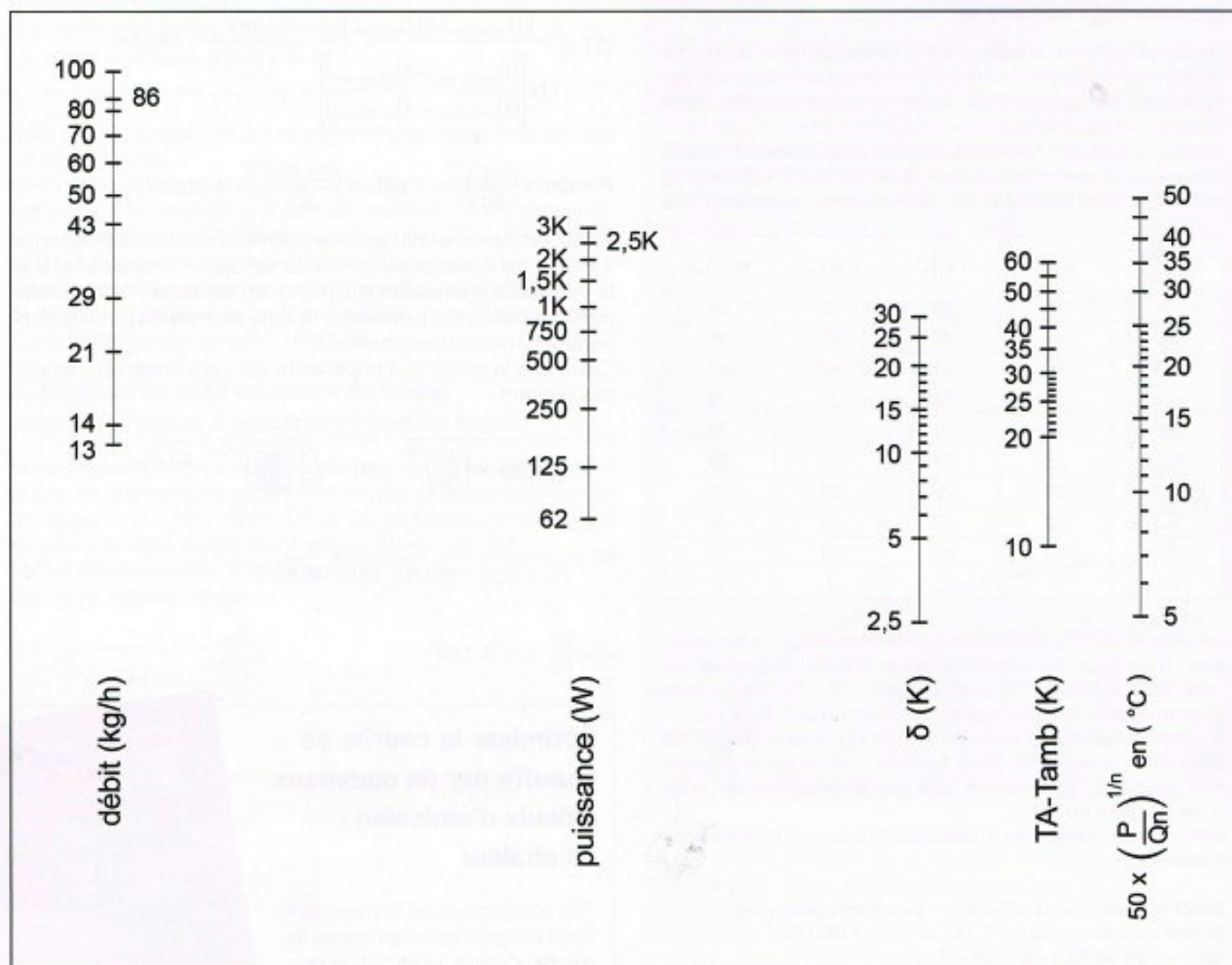
Outre la partie calculatoire, le livre explique en termes simples les principaux problèmes concrets qui se posent en matière d'émission de chaleur. Plusieurs abaques sont aussi livrés pour s'affranchir de calculs de dimensionnement par une simple lecture de courbes, par exemple lors d'une simple vérification.

Ce livre s'adresse aux concepteurs, aux metteurs au point et aux techniciens d'exploitation qui souhaitent améliorer l'efficacité énergétique des installations dont ils ont la charge.

www.librairie-technique.com



Le nomogramme n° 2



Lecture du débit en fonction de la puissance et de la chute de température.

La nomenclature

Symbole	Grandeur	Unité
T	Température	[°C]
C	Chaleur massique	[kJ.(K.kg) - 1]
η_{total}	Rendement total	x
T_A	Température arrivée (ou entrée) de l'émetteur	[°C]
T_R	Température de sortie de l'émetteur	[°C]
δ	Chute de température entre l'entrée et la sortie de l'émetteur	[°C]
T_{amb}	Température ambiante	[°C]
T_{ext}	Température extérieure	[°C]
P_{nette}	Puissance de chauffage nette qui correspond à la somme des déperditions par les parois et au renouvellement d'air, y compris les infiltrations	W
P	Puissance	W
Q_n	Puissance nominale de l'émetteur pour $\Delta T = 50$ K, qui est appelée dans le livre (Q_n) ; dans la littérature, cette valeur est parfois appelée P50	W
ΔT_{base}	Écart de température nominale entre l'eau et l'air ambiant dont la valeur vaut $\Delta T = 50$ K après 1997.	K

La lecture du graphe en annexe indique la valeur de la fonction W : $-0,867$

$$\delta = 40,45 \times (-0,867) + 46,6 = 11,53 \text{ K}$$

$$\delta = \frac{P}{m \times C} \Rightarrow m = \frac{P}{\delta \times C} = \frac{1\,289}{11,53 \times 4\,200} = 26,6 \times 10^{-3} \text{ kg/s} = 96 \text{ kg/h}$$

Vérification :
puissance d'émission :

$$\Delta T = \frac{(\theta_{\text{entrée-eau}} - \theta_{\text{sortie-eau}})}{\text{LN} \left[\frac{(\theta_{\text{entrée-eau}} - \theta_{\text{air-ambiant}})}{(\theta_{\text{sortie-eau}} - \theta_{\text{air-ambiant}})} \right]} = \frac{11,53}{\text{LN} \left[\frac{68,6 - 22}{68,6 - 11,53 - 22} \right]} = \frac{11,53}{\text{LN} \left[\frac{46,6}{35,07} \right]} = 40,56 \text{ K}$$

$$P_{\text{émission}} = Q_n \times \left(\frac{\Delta T}{50} \right)^n = 1\,680 \times \left(\frac{40,56}{50} \right)^{2,25} = 1\,293 \text{ W} \approx 1\,289 \text{ W}$$

Puissance hydraulique cédée :

$$P = 4\,200 \times 26,6/1\,000 \times 11,53 = 1\,288 \text{ W}$$

La température de retour sera donc $68,6 - 11,53 = 57,07 \text{ °C}$ et non pas $53,6 \text{ °C}$ comme prévu.

On peut arbitrairement fixer un débit au regard d'une chute de température mais, contrairement aux attentes, il n'est pas acquis qu'il en soit ainsi à l'équilibre thermique permanent. D'où le paradoxe, il n'est pas possible de fixer une chute de température aux bornes de l'émetteur sans prendre les précautions nécessaires.

6. Conclusion

Le but du livre est de proposer une méthode rationnelle et reproductible ; de nombreux exemples sont livrés pour permettre au lecteur de s'accaparer les éléments qui permettent la détermination de la courbe de chauffage.

Plusieurs abaques sont aussi livrés pour s'affranchir de calculs de dimensionnement par une simple lecture de courbes, par exemple lors d'une simple vérification.

Ce livre s'adresse aux concepteurs, aux metteurs au point et aux techniciens d'exploitation qui souhaitent améliorer l'efficacité énergétique des installations dont ils ont la charge. ■