

INTRODUCTION

L'équilibrage des installations de chauffage a toujours posé de nombreux problèmes aux techniciens et aux installateurs... ainsi qu'aux usagers dont les conditions de confort en souffrent. Certes, ce problème technique n'est pas forcément simple à traiter mais depuis quelques années de nouvelles méthodes pratiques d'équilibrage sont proposées par des constructeurs de robinetteries notamment, qui permettent de le résoudre avec satisfaction.

De toutes façons **l'équilibrage ne s'improvise pas**. Il doit être réalisé selon des règles précises issues des lois de l'hydraulique appliquée aux réseaux de distribution et aux organes de réglage. On constate cependant que cette opération, pourtant indispensable à l'équilibre thermique des locaux et au bon fonctionnement des équipements, est rarement réalisée dès la première mise en fonctionnement de l'installation.

Ce n'est qu'après avoir été confronté à des problèmes de confort thermique et/ou acoustique, et généralement sous la pression des utilisateurs, que l'on se préoccupe de l'équilibrage en le réalisant fréquemment de façon empirique et avec des résultats souvent décevants. Pourtant le calcul des pertes de pression des circuits et des organes d'équilibrage est relativement simple et l'utilisation des moyens informatiques actuels, qui suppriment le côté fastidieux de cette étape, devrait engager les professionnels à ne pas l'oublier...

Cette méconnaissance est peut-être due au fait que l'hydraulique appliquée au génie climatique a toujours été le parent pauvre de la mécanique des fluides, il suffit pour s'en convaincre de recenser les quelques livres traitant des réseaux fluides, surtout si on les compare aux nombreux ouvrages consacrés à l'analyse des réseaux électriques, dont nous nous sommes d'ailleurs largement inspirés pour l'étude des réseaux maillés.

Absence d'ouvrages de formation variés mais aussi beaucoup d'idées reçues dans le domaine du bâtiment, idées souvent difficiles à faire évoluer malgré les énormes progrès accomplis et la formalisation scientifique d'un nombre toujours plus grand de règles de l'art...

C'est pour tenter de combler cette lacune que nous proposons au lecteur cet ouvrage à la fois pédagogique et pratique, destiné à tous ceux qui ont à concevoir, à réaliser et à exploiter des réseaux de distribution de fluides, qu'il s'agisse d'installations de chauffage, d'eau chaude sanitaire ou de climatisation, et plus particulièrement à ceux préoccupés par les problèmes d'équilibrage hydraulique de ces réseaux.

Cet ouvrage est divisé en quatre parties principales dont les **deux premières sont presque exclusivement consacrées aux règles pratiques d'équilibrage des installations neuves ou existantes**, du diagnostic aux calculs, et des calculs aux méthodes de réglage in situ.

Si ces règles pratiques sont directement utilisables, on espère néanmoins que le lecteur ne se contentera pas de les appliquer mais se référera le plus souvent possible aux deux autres parties, qui ont pour ambition de lui fournir les éléments de base de l'hydraulique appliquée au génie climatique. En effet la diversité des réseaux de distribution rencontrés dans le parc existant rend difficile l'application systématique de « recettes » qui pourraient dans certains cas s'avérer inefficaces ou même contre-indiquées si l'on ne prend pas la peine de comprendre l'essentiel des lois physiques correspondantes et la façon dont elles s'appliquent à la réalité du terrain.

C'est dans cette perspective de rapports fréquents à ces éléments de base que les développements théoriques ont été limités et que l'on a privilégié les applications numériques tout au long des six chapitres de la troisième partie et des quatre annexes*.

Par exemple les chapitres 3 et 6 consacrés à l'étude des réseaux maillés et à la stabilisation de pression dans les réseaux à débit variable sont parsemés d'exemples numériques destinés à faciliter l'effort du lecteur et à donner les ordres de grandeur indispensables à une appréhension des phénomènes.

Quant aux chapitres 1, 4 et 5 et aux annexes 1 et 2, ils comportent des éléments pratiques immédiatement utilisables dans le cadre des activités d'un bureau d'étude (calcul des pertes de pression unitaires, des diaphragmes, des distributions de Tichelmann, etc.).

Nous espérons ainsi avoir abouti à un équilibre acceptable entre théorie et pratique qui, loin de s'opposer comme certains ont tendance à le faire croire, s'enrichissent au contraire mutuellement par une meilleure compréhension des lois physiques et une plus grande efficacité dans l'activité quotidienne.

En fin d'ouvrage un modèle complet de simulation numérique d'un sous-ensemble de chauffage devrait permettre à chacun, pour peu qu'il dispose au moins d'un micro-ordinateur de poche, de procéder quasi expérimentalement à de nombreux « essais » susceptibles de lui fournir des indications précieuses, qualitatives et/ou quantitatives, sur des notions aussi essentielles que, par exemple, l'autorité hydraulique ou la progressivité de réglage, et cela en « jouant » avec les différentes variables qui interviennent dans l'équilibre thermohydraulique des émetteurs.

Enfin une bibliographie détaillée permettra aux lecteurs de repérer les livres ou articles susceptibles de l'aider à comprendre ou à approfondir tel aspect particulier, pratique ou théorique, de l'équilibre hydraulique des réseaux.

P.F.

* C'est dans cet esprit que nous avons fait abstraction dans cet ouvrage de tout ce qui concerne la thermique des émetteurs, dont l'importance a justifié une étude de synthèse particulière publiée sous le titre « 35 PROBLEMES PRATIQUES SUR LES CORPS DE CHAUFFE ». (Éditions Parisiennes.)

SOMMAIRE

1^{re} PARTIE

LA CONSOMMATION ET LE CONFORT... D'UNE INSTALLATION DÉSÉQUILIBRÉE

Chapitre 1

Causes et diagnostic d'une installation déséquilibrée 11

1 Causes du déséquilibre thermique.

- 1.1. Les causes temporaires.
- 1.2. Les causes permanentes.

2 Comment évaluer ce déséquilibre ?

3 Comment le caractériser ?

4 Diagnostic du déséquilibre thermique consécutif au déséquilibre hydraulique.

Chapitre 2

Incidence sur la consommation et le confort d'un déséquilibre thermohydraulique 15

1 Hypothèses de travail.

2 Rappel des principales formules.

3 Calcul de la surchauffe des locaux consécutive à une modification de la loi de régulation.

4 Calcul du gaspillage énergétique maximal.

5 Calcul du gaspillage énergétique annuel.

6 Conclusion.

2^e PARTIE

LES METHODES D'ÉQUILIBRAGE HYDRAULIQUE

Chapitre 1

Méthodes de CALCUL d'équilibrage des installations neuves ou existantes 21

Chapitre 2

Nouvelle approche de l'équilibrage des installations NEUVES 31

Chapitre 3

Méthodes d'équilibrage in situ 35

1 Par approximations successives.

2 Par la mesure directe des débits.

2.1 À chaque émetteur.

2.2 À chaque pied de colonne.

3^e PARTIE

LA TECHNIQUE DE L'ÉQUILIBRAGE

Chapitre 1

Les pertes de pression dans les conduites . 43

1 Pertes de pression par frottements continus ΔP_1 .

2 Pertes de pression singulières.

3 Pression dynamique.

4 Nouvelle écriture des relations [1] et [3].

5 Expression du coefficient de Darcy.

5.1 Nombre de Reynolds.

5.2 Rugosité relative.

5.3 Diagramme de Moody.

6 Présentation synoptique de l'enchaînement logique des calculs.

7 Remarques.

7.1 Domaine d'application des formules.

7.2 Influence de la température.

7.3 Précision des calculs.

7.4 Formules monômes.

8 Exemple numérique.

9 Annexes.

9.1 Formule de Colebrook.

9.2 Régime de transition.

9.3 Programme de calcul « PERT 1 ».

9.4 Solution variante de l'équation de Colebrook.

Chapitre 2

Les réseaux hydrauliques ramifiés 57

1 Point de fonctionnement de l'ensemble « réseau-pompe ».

2 Position du problème.

3 La méthode des coefficients Z.

3.1 Principe de la méthode.

3.2 Règles de composition.

3.3 Méthode pratique de calcul.

3.4 Exemple numérique.

3.5 Calcul des coefficients Z unitaires des tuyauteries.

3.6 Calcul des coefficients Z des accidents.

3.7 Influence du choix de la valeur de l'exposant n dans la relation $\Delta P = Z \cdot D^n$.

3.7.1 Influence de la valeur du débit nominal de calcul sur la détermination du coefficient Z.

3.7.2 Couplage en série des coefficients Z.

3.7.3 Couplage en parallèle des coefficients Z.

3.7.4 Conclusion.

4 Application pratique de la méthode des coefficients Z à l'étude des installations de chauffage.

- 4.1 Description de l'installation, calcul des pertes de pression et des coefficients Z.
- 4.2 Vérification du coefficient Z global de l'installation.
- 4.3 Calcul du coefficient Z de la colonne type déséquilibrée.
- 4.4 Calculs de simulation pour différentes conditions de déséquilibre hydraulique.
- 4.5 Etude approfondie de l'expérience n° 11.
- 4.6 Conclusion.

5 Quelques conséquences pratiques issues de l'étude sur le réglage et la stabilité des circuits hydrauliques en parallèle.

Chapitre 3

Introduction à l'étude des réseaux hydrauliques maillés 81

1 Les réseaux électriques.

- 1.1 Loi d'Ohm.
- 1.2 Lois de Kirchhoff.

2 Les réseaux fluides.

- 2.1 Loi fondamentale.
- 2.2 Lois de Kirchhoff transposées.
- 2.3 Difficulté de l'analogie directe.

3 Réflexions sur l'équilibre hydraulique des mailles.

4 Le problème des deux pompes en série avec bypass.

- 4.1 Définition du problème.
- 4.2 Hypothèses de travail.
- 4.3 Méthode itérative.
- 4.4 Méthode analytique.
- 4.5 Méthode de Hardy-Cross.
- 4.6 Méthode graphique.
 - 4.6.1 Itération graphique.
 - 4.6.2 Solution graphique directe.
- 4.7 Méthode matricielle.
 - 4.7.1 Principe de la méthode.
 - 4.7.2 Mise en équation.
 - 4.7.3 Application numérique.
- 4.8 Conclusions.

5 Application à l'étude des postes de mélange et de recyclage.

- 5.1 Poste de mélange (avec vanne à 3 voies).
 - 5.1.1 Mise en équation.
 - 5.1.2 Nature des solutions recherchées.
 - 5.1.3 Résolution analytique.
- 5.2 Poste de mélange et de recyclage.
 - 5.2.1 Mise en équation.
 - 5.2.2 Nature des solutions recherchées.

6 Annexes.

- 6.1 Annexe 1. Résolution manuelle par la méthode de Hardy-Cross du problème des deux pompes en série avec bypass.
- 6.2 Annexe 2. Méthode matricielle de mise en équation.
 - 6.2.1 Description du réseau.
 - 6.2.2 Relation entre les débits de bras et les débits de mailles.
 - 6.2.3 Matrice des forces motrices.
 - 6.2.4 Matrice des coefficients de résistance hydraulique.
 - 6.2.5 Mise en équation du réseau.
 - 6.2.6 Exemple d'application numérique.
 - 6.2.7 Résumé synoptique de la méthode.
- 6.3 Annexe 3. Complément sur le problème des deux pompes en série avec bypass.
 - 6.3.1 Rappel de la solution graphique.
 - 6.3.2 Nature du problème soulevé.
 - 6.3.3 Expression mathématique et calcul numérique du lieu des points définis par les couples.
{ D_3 , $\mathcal{P}$ }

Chapitre 4

Caractéristiques des organes de réglage .. 105

1 Rappel des définitions.

- 1.1 Autorité hydraulique a.
- 1.2 Finesse F.
- 1.3 Marge de réglage M.
- 1.4 Courbe caractéristique.

2 Hypothèses de travail.

3 Étude de l'organe de réglage à caractéristique linéaire.

- 3.1 Calcul du débit maximal.
- 3.2 Calcul du débit minimal.
- 3.3 Calcul du rapport des débits maximal et minimal.
- 3.4 Simplification de la formule fondamentale.

4 Étude de l'organe de réglage à caractéristique « Égal Pourcentage ».

- 4.1 Calcul du débit maximal.
- 4.2 Calcul du débit minimal.
- 4.3 Calcul du rapport des débits maximal et minimal.
- 4.4 Simplification de la formule fondamentale.

5 Applications numériques.

6 Application à l'étude d'un organe de réglage à commande thermostatique.

7 Vitesse de circulation dans un organe de réglage.

8 Pression différentielle maximale admissible.

9 Annexes.

Annexe 1. La précision de réglage

- 1 Calcul de la précision de réglage du débit.
- 2 Calcul de la précision de réglage de la température intérieure.

Annexe 2. La puissance absorbée par un organe de réglage.

- 1 Calcul de la puissance absorbée.
- 2 Calcul de la course y correspondant à la puissance absorbée maximale.
- 3 Expression de $Y_{E_{MAX}}$ en fonction de l'autorité hydraulique.
- 4 Calcul de l'autorité critique.
- 5 Calcul de la puissance absorbée maximale.
- 6 Exemples numériques.

Annexe 3. Complément sur l'autorité hydraulique des organes de réglage.

Annexe 4. Les coefficients C_v des vannes de régulation.

Annexe 5. Le programme de calcul OREG pour déterminer les principales caractéristiques d'un organe de réglage.

Chapitre 5

Le calcul des diaphragmes d'équilibrage .. 127

1 Rappel des formules de base.

2 Première étude simplifiée.

3 Deuxième étude simplifiée.

4 Exemple numérique

- 4.1 Suivant les formules extraites de la norme française.
- 4.2 Suivant la 1^{re} méthode simplifiée.
- 4.3 Suivant la 2^e méthode simplifiée.

5 Remarques.

Chapitre 6

La stabilisation de pression dans les réseaux à débit variable 133

1 Position du problème.

2 Solution indirecte.

3 Bypass de décharge automatique en tête de distribution.

- 3.1 Limite d'application du système.
- 3.2 Etats limites du système.

- 4 Bypass de décharge automatique en bout de distribution.
- 5 Vanne d'étranglement progressif en tête de distribution.
- 6 Première conclusion.
- 7 Exemples numériques.

- 7.1 Bypass automatique en tête de distribution.
- 7.2 Vanne d'étranglement progressif en tête.

- 8 Système mixte : combinaison des systèmes 1 et 3.
- 9 Bypass de décharge automatique placé à un endroit quelconque de la distribution.
 - 9.1 Définition précise du problème de réglage de la pression.
 - 9.2 Principe du bypass placé en cours de réseau.
 - 9.3 Modèle mathématique.

- 10 Étude mathématique du réseau type.
 - 10.1 Hypothèses de travail.
 - 10.2 Caractéristiques du réseau type en régime NOMINAL de fonctionnement.
 - 10.3 Cas particulier : bypass en bout de circuit.
 - 10.4 Cas général : bypass en cours de circuit.
 - 10.5 Problème de la vitesse de circulation.

- 11 Applications numériques.
 - 11.1 Vanne d'étranglement en tête de réseau (3^e système).
 - 11.2 Bypass en bout de réseau (2^e système).
 - 11.3 Bypass en cours de réseau.
 - 11.4 Bypass en tête de réseau.

- 12 Système de bypasses de décharge multiples placés en parallèle le long du réseau.
 - 12.1 Équations d'équilibre hydraulique.
 - 12.2 Calcul des débits de bypass.
 - 12.3 Nombre et position des bypasses.

- 13 Exemple de calcul d'un système de bypasses multiples.
- 14 Conclusion.
- 15 Annexes.

- 15.1 Annexe 1. Calcul de l'expression $\sum_{x=1}^{x=y} \frac{1}{(n-x+1)^2}$
- 15.2 Annexe 2. Table de la fonction $\sum_{x=1}^y \frac{1}{x^2}$
- 15.3 Annexe 3. Table de la fonction $\sum_{x=1}^y \frac{1}{(n-x+1)^2}$

4^e PARTIE ANNEXES GÉNÉRALES

Annexe 1 Le phénomène de thermosiphon dans les installations de chauffage accéléré par pompe ... 155

- 1 Calcul de l'effet thermosiphon.
- 2 Incidence de l'effet thermosiphon.
- 3 Prise en compte de l'effet thermosiphon dans le calcul des installations.
- 4 Conclusion.
- 5 Annexe : programme THESIPH.

Annexe 2 Les distributions de Tichelmann 165

- 1 Rappel théorique.
 - 1.1 Distributions de type courant.
 - 1.2 Distributions de Tichelmann.
- 2 Exemple numérique.
 - 2.1 Distribution bitube courante.
 - 2.2 Distribution de Tichelmann.

- 3 Conclusion.
- 4 Annexe : Réseaux ramifiés et maillés.

Annexe 3 Complément sur le réglage et la régulation de la température intérieure par action sur le débit, dans un local chauffé par radiateur 175

- 1 Problème préliminaire.
 - 1.1 Expression du débit D dans un circuit contrôlé par un organe de réglage.
 - 1.2 Formulation mathématique du problème préliminaire.
 - 1.3 Solution du problème.
 - 1.4 Etudes numériques.
 - 1.5 Première conclusion.

- 2 Problème fondamental.
 - 2.1 Recherche d'une courbe caractéristique assurant une relation linéaire entre y et t_a.
 - 2.2 Recherche d'une courbe caractéristique assurant une relation linéaire entre y et t_e.
 - 2.3 Première conclusion.

- 3 Problèmes complémentaires.
 - 3.1 Problème complémentaire n° 1.
 - 3.2 Problème complémentaire n° 2.
 - 3.3 Problème complémentaire n° 3.
 - 3.4 Problème complémentaire n° 4.
 - 3.5 Problème complémentaire n° 5.

- 4 Conclusion.

Annexe 4 Simulation numérique d'un sous-ensemble de chauffage : le programme SIMCHAUF 187

- 1 Objet de l'étude.
- 2 Hypothèses de travail.
- 3 Équations utilisées.
 - 3.1 Équilibre thermique des locaux.
 - 3.2 Émission calorifique des radiateurs.
 - 3.3 Pertes de pression dans la tuyauterie, organes de réglage et d'équilibrage et accidents divers.
 - 3.4 Répartition des débits.
 - 3.5 Principe de calcul des réseaux déséquilibrés.
 - 3.6 Caractéristiques des organes de réglage.

4 Présentation simplifiée du programme SIMCHAUF.

- 4.1 SIMCHAUF 1
 - 4.1.1 Thermique des émetteurs.
 - 4.1.2 Hydraulique des circuits.
- 4.2 SIMCHAUF 2

5 Données numériques

- 5.1 Émetteurs.
- 5.2 Circuits.

6 Première application : le réglage des émetteurs.

- 6.1 Calcul à l'équilibre nominal.
- 6.2 Calcul de quelques configurations de réglage de référence.

7 Deuxième application : le déséquilibre hydraulique des émetteurs.

- 7.1 Conséquences du déséquilibre hydraulique.
- 7.2 Le réglage des organes d'équilibrage.
- 7.3 Étude de l'influence de différents paramètres.
 - 7.3.1 Autorité hydraulique des organes de réglage.
 - 7.3.2 Importance relative de la perte de pression des émetteurs.

8 Conclusion.

BIBLIOGRAPHIE