

Les rendements de production et de distribution sont plus faibles.

5.5.2. Principe

■ Réseau déséquilibré

Dans un réseau sans équilibrage, les échangeurs situés à proximité du générateur sont généralement traversés par un débit excessif alors que les échangeurs les plus éloignés sont faiblement irrigués.

Prenons un exemple simple pour bien comprendre ce phénomène. Deux batteries identiques 1 et 2 sont raccordées en parallèle entre les points A et A'. On désire qu'elles aient la même puissance et donc le même débit.

La batterie 1, avec sa vanne de régulation, ses vannes d'isolement... et avec les tuyauteries de raccordement aux points A, A', forme la résistance hydraulique R_1 . Il en est de même avec la batterie 2 et la résistance R_2 . Du fait que les tuyauteries pour raccorder la batterie 2 sont plus longues, la résistance R_2 est supérieure à R_1 .

Le tronçon du générateur avec ses tuyauteries de raccordement aux points A, A' forme la résistance R_0 .

Sur le graphique de la **figure 5.5.2.A.**, on a représenté la caractéristique de la pompe P, et des tronçons R_0 , R_1 , R_2 . On construit la courbe du tronçon équivalent à R_1 en parallèle à R_2 ($R_1 \text{ p } R_2$) comme décrit au § 3.5.3. On trace ensuite la courbe du réseau global R. Il est équivalent à ($R_1 \text{ p } R_2$) en série avec R_0 (voir § 3.5.2.).

À l'intersection de la courbe de pompe P et de la courbe de réseau R, on trouve le point de fonctionnement.

Le débit de la pompe est aussi celui de l'ensemble ($R_1 \text{ p } R_2$). On obtient ainsi la perte de charge de ($R_1 \text{ p } R_2$). Elle correspond à la différence de pression entre les points A et A', et est égale à la perte de charge de R_1 ou de R_2 . Connaissant cette

perte de charge $J_1 = J_2$, on trouve les débits dans chaque batterie, qv_1 et qv_2 .

On peut remarquer que quelle que soit la pompe choisie, quelle que soit la résistance R_0 , **si $R_2 > R_1$ alors $qv_2 < qv_1$** .

■ Réseau équilibré

Dans un réseau équilibré, tous les échangeurs sont traversés par le débit souhaité.

En poursuivant l'exemple des deux batteries identiques, deux cas sont à considérer.

▷ La pompe P est parfaitement dimensionnée.

Sa hauteur manométrique est exactement égale à la perte de charge du circuit le plus défavorisé avec les débits désirés.

$$Hmt = J_0 + J_2$$

Il suffit alors d'ajouter sur le tronçon A-1-A' une résistance V_1 de façon que la résistance de l'ensemble $R_1 \text{ s } V_1$ soit égale à R_2 . On a donc :

$$V_1 = R_2 - R_1$$

Le graphique de la **figure 5.5.2.B.** est construit selon le même principe que le précédent. On constate que :

- le débit dans la batterie 1 a diminué : $qv_1 \downarrow$
- le débit dans la batterie 2 a augmenté : $qv_2 \uparrow$
- le débit général a diminué : $qv \downarrow$

Cette solution est énergétiquement la meilleure et en théorie la plus simple car elle exige un seul organe de réglage.

▷ La pompe P' est surdimensionnée.

Sa hauteur manométrique est supérieure à la perte de charge du circuit le plus défavorisé, avec les débits désirés. C'est le cas le plus fréquent.

$$Hmt' > J_0 + J_2$$

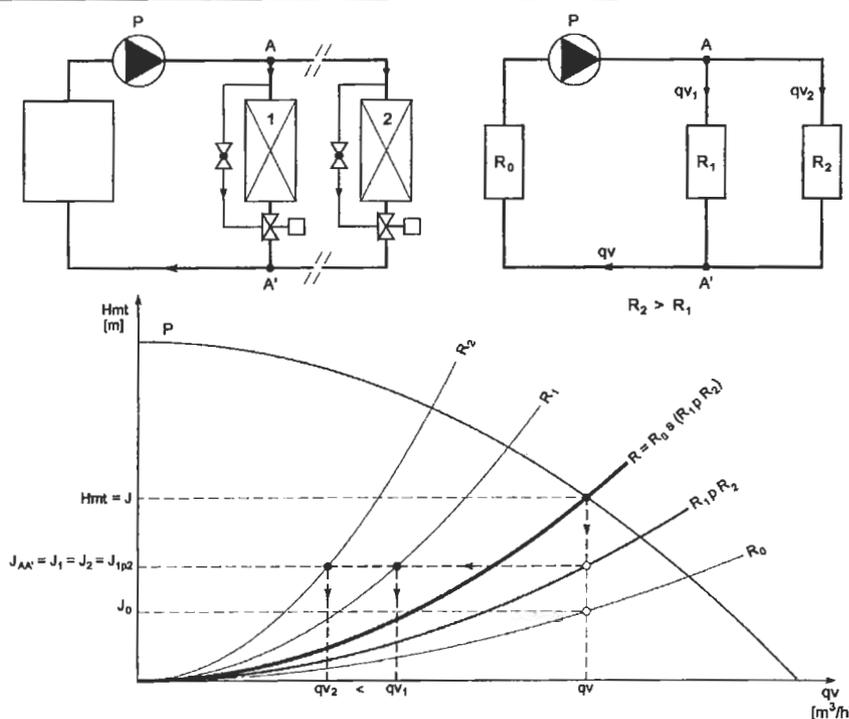


Figure 5.5.2.A. Réseau non équilibré comprenant deux batteries identiques.

L'excès de hauteur manométrique est consommé dans :

- une résistance de compensation V_0 , placée sur le tronçon commun.
- une résistance V_2 placée sur le tronçon A – 2 – A', et d'autre part la résistance V_1 placée sur le tronçon A – 1 – A'.
- les trois résistances R_0, R_1, R_2 .

La troisième résistance semble au premier abord injustifiée mais elle est utilisée dans les méthodes proportionnelle et compensée pour mesurer le débit.

Ces trois techniques d'équilibrage sont illustrées par les figures 5.5.2.C., D. et E. pages précédentes. Elles diffèrent essentiellement par la valeur de la perte de charge entre A et A' : $J_{AA'}$.

Dans le premier cas, elle est minimale : $J_{AA'} = J_2$.

Dans le second cas, elle est maximale : $J_{AA'} = Hmt' - J_0$.

Dans le troisième cas, elle est intermédiaire et choisie plus ou moins arbitrairement. Nous avons réparti équitablement l'excédent de Hmt entre les deux résistances V_0, V_2 . On a donc : $J_{V_0} \approx J_{V_2}$.

5.5.3. Moyens technologiques

Nous venons de voir qu'il est indispensable d'ajouter des résistances hydrauliques sur le réseau pour l'équilibrer. Quels sont les matériels disponibles sur le marché actuellement ?

■ Robinets de réglage

Dans leur version la plus simple, ils sont constitués d'un corps, d'une vis-pointeau et d'un bouchon. Ils portent alors le nom de té de réglage en raison de leur forme (voir figure 5.5.3.A.). En tournant la vis dans le sens des aiguilles d'une montre, la section de passage entre la vis et le siège se réduit. Le coefficient de vanne K_v diminue et la résistance hydraulique augmente.

La course utile de la vis correspond à 7 tours au plus, selon les modèles.

On appelle réglage, le nombre de tours à partir de la fermeture complète. Il s'agit donc de tours d'ouverture. Cette définition est universelle à l'ensemble des robinets de réglage.

La connaissance de la relation : réglage = $f(K_v)$ est indispensable pour une utilisation rationnelle de ces robinets. Ce n'est pas toujours le cas des matériels « premiers prix » pour lesquels il n'existe aucune notice technique.

Ces robinets existent droits ou d'équerre, dans les diamètres 3/8" à 3/4", avec différents modes de raccordement :

- tarudé pour tube acier et cuivre
- à braser pour tube cuivre
- à raccord à compression pour tube synthétique.

Le bouchon assure un deuxième niveau d'étanchéité et dissimule la vis de réglage.

Les tés de réglage sont souvent employés à tort pour isoler un appareil. Ils sont inadaptés à cette fonction. Après avoir été fermés, ils sont généralement ouverts en grand et l'équilibrage est détruit.

■ Robinets à double réglage

Ces robinets assurent les deux fonctions : isolement et réglage. Ce sont souvent des robinets à soupape inclinée. Ils comportent un volant de manœuvre et en cas de besoin, une fuite par exemple, ils peuvent être fermés rapidement, sans outillage, par n'importe quel intervenant (gardien, pompier, dépanneur...).

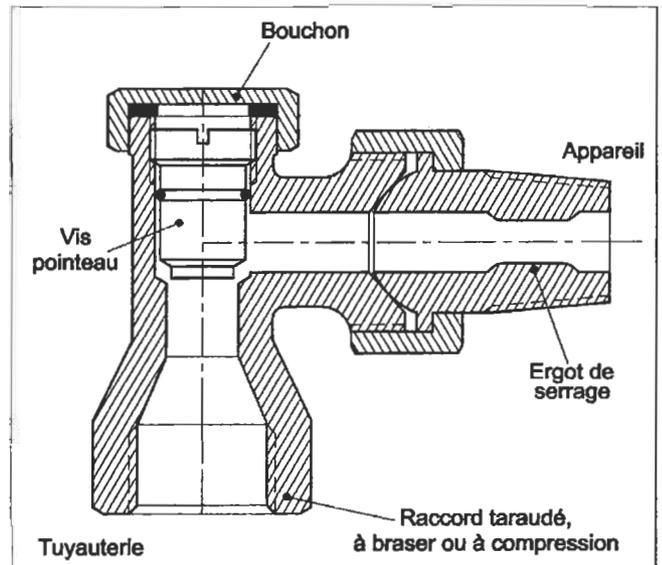


Figure 5.5.3.A. Té de réglage d'équerre.

Pour régler le débit, l'installateur actionne aussi le volant de manœuvre jusqu'à trouver le réglage convenable. Sur certains modèles, le réglage s'affiche directement, avec une résolution du dixième de tour (ex. : 2,3 tours). Il n'est pas alors nécessaire de compter les tours à partir de la fermeture.

Le bon réglage est ensuite « mémorisé » en serrant à fond une petite vis cachée sous le volant ou par un bouchon. Cette vis est en fait une butée qui empêche d'ouvrir la soupape au-delà du réglage (voir figure 5.5.3.B.). Le dispositif est plombé, si nécessaire.

Ce type de robinet est disponible de 3/8" à 2"1/2 avec raccords tarudés et de DN 20 à DN 300 avec brides.

Selon le diamètre du robinet, sa plage de réglage s'étend de 4 à 16 tours.

De nombreux robinets de réglage sont équipés d'un robinet de vidange à boisseau sphérique, avec bouchon.

Le sens de circulation du fluide est soit recommandé, soit imposé. Le fluide doit alors arriver sous la soupape.

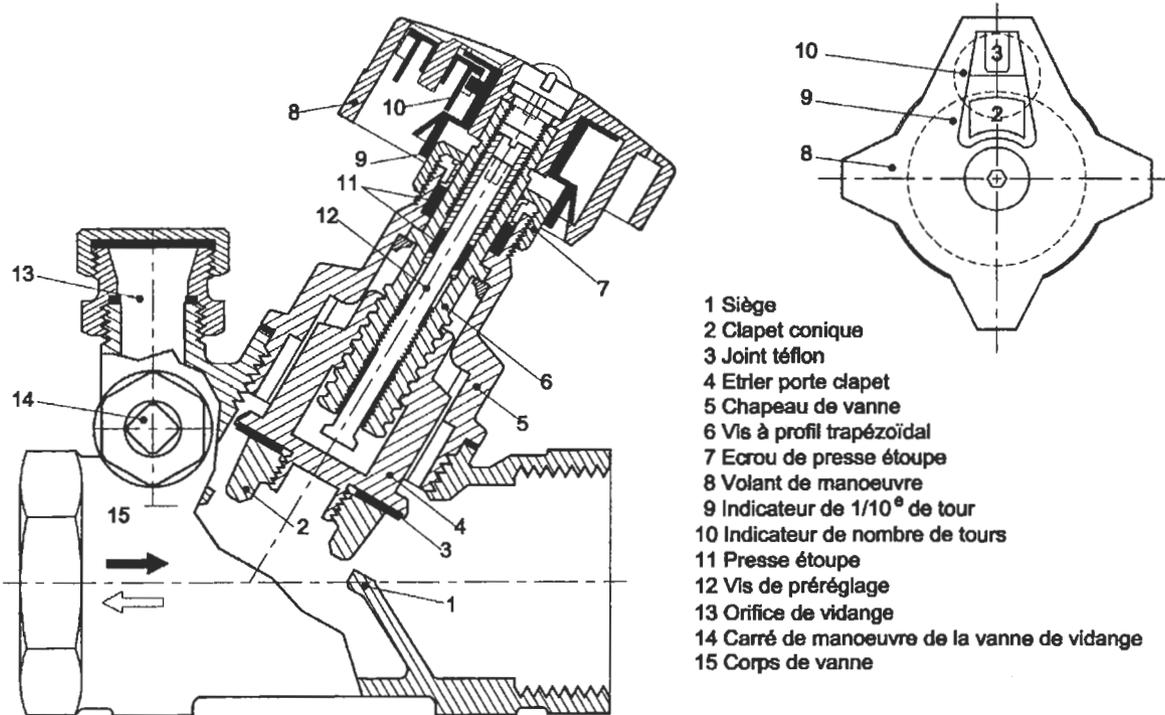
■ Robinets à double réglage et à prises de pression

Ces robinets sont identiques aux précédents mais comprennent en plus une prise de pression de chaque côté de la soupape (voir figures 5.5.3.C. et 5.5.3.D.). A l'aide d'un manomètre différentiel, il est possible alors de mesurer la perte de charge créée par la vanne Δp . Connaissant le type de vanne (marque, modèle, diamètre) et le réglage, on trouve dans la documentation technique du robinet son K_v . Avec ces deux informations, il est facile de calculer le débit dans le circuit par la formule classique :

$$[m^3/h] \quad q_v = K_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad \begin{matrix} [\text{bar}] \\ [kg/dm^3] \end{matrix}$$

Chaque fabricant de robinetterie propose un appareil de mesure de débit électronique capable de réaliser automatiquement ce processus. Il se compose de :

- un transmetteur de pression différentielle
- un clavier
- un calculateur
- un écran
- une mémoire.



- 1 Siège
- 2 Clapet conique
- 3 Joint téflon
- 4 Etrier porte clapet
- 5 Chapeau de vanne
- 6 Vis à profil trapézoïdal
- 7 Erou de presse étoupe
- 8 Volant de manoeuvre
- 9 Indicateur de 1/10^e de tour
- 10 Indicateur de nombre de tours
- 11 Presse étoupe
- 12 Vis de pré réglage
- 13 Orifice de vidange
- 14 Carré de manoeuvre de la vanne de vidange
- 15 Corps de vanne

Figure 5.5.3.B. Robinet à double réglage.

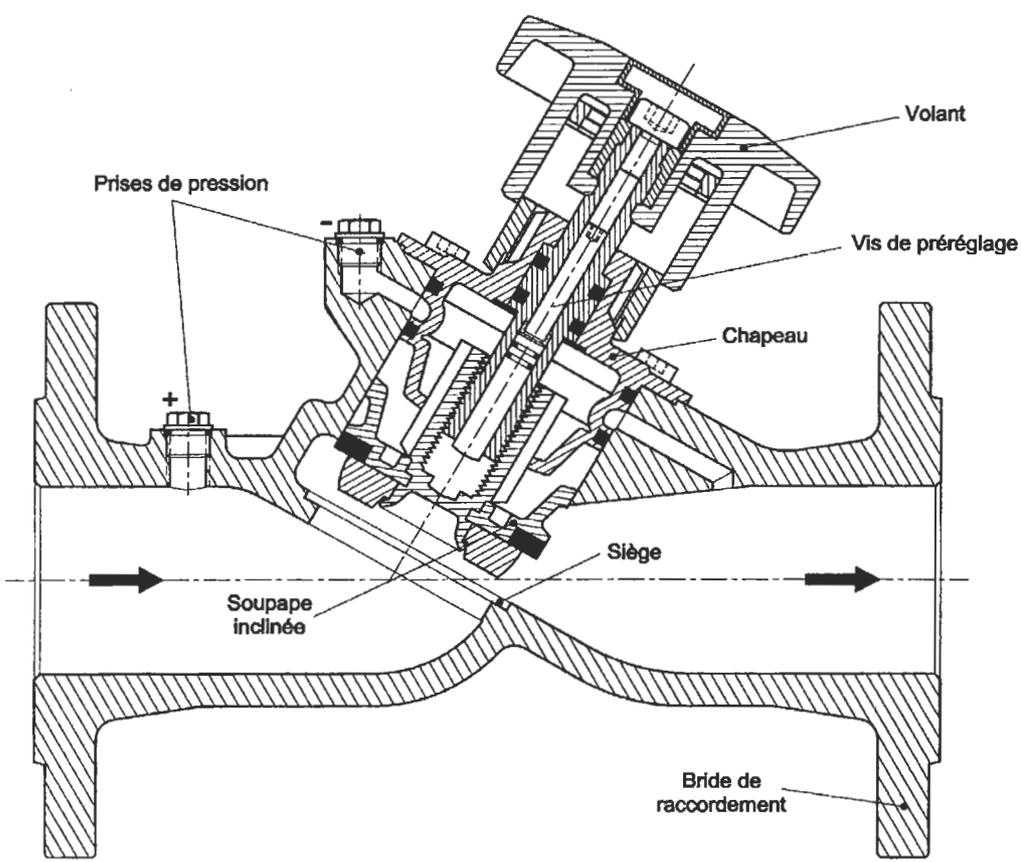


Figure 5.5.3.C. Robinet à double réglage avec prises de pression (d'après document OVENTROP).

Après avoir raccordé l'appareil aux prises de pression du robinet, sélectionner dans la bibliothèque le type de vanne et entrer au clavier le réglage, l'écran indique la pression différentielle mesurée et le débit calculé. Ces valeurs sont mises en mémoire dans l'appareil et éventuellement transférées dans un micro-ordinateur. Là, elles sont mises en forme, archivées et imprimées.

Avec cet équipement, on mesure rapidement le débit, avec une précision suffisante de l'ordre de 5 %. Il faut toutefois respecter trois règles :

- ▷ Éviter les perturbations de l'écoulement en amont et en aval du robinet.
- Longueur droite amont : $L \geq 5 d$ et $L \geq 10 d$ après une pompe ou une vanne de régulation.
- Longueur droite aval : $L \geq 2 d$.

▷ Créer dans le robinet une pression différentielle suffisante pour être mesurable :

$$\Delta p \geq 300 \text{ [Pa]}$$

▷ Ouvrir suffisamment le robinet pour disposer d'une bonne précision sur le Kv, au moins au tiers de l'ouverture maximale.

$$R \geq R_{\max}/3$$

Ces deux derniers points conditionnent la sélection des robinets de réglage avec prises de pression.

La contrainte majeure de cette technique est **qu'il n'est pas possible de mesurer le débit pendant le réglage.**

Imaginons que l'on réduise le débit en fermant partiellement la vanne. La Δp augmente alors et l'appareil qui a conservé l'ancien réglage R, l'ancien Kv, affiche un débit supérieur.

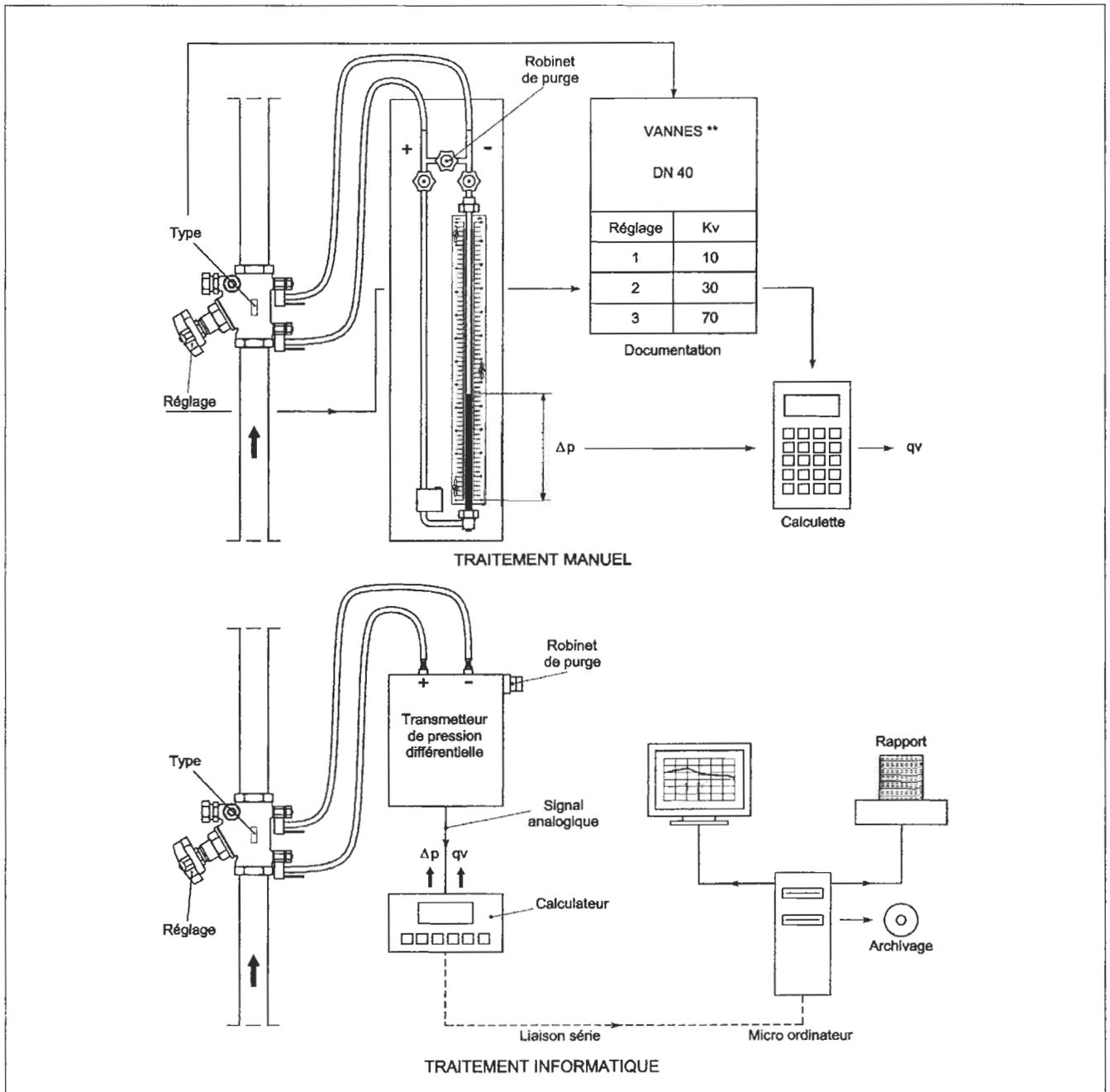


Figure 5.5.3.D. Mesure de débit à l'aide d'un robinet de réglage à prises de pression.

Il est nécessaire de rentrer dans l'appareil la nouvelle valeur de réglage pour qu'il affiche le nouveau débit.

Plutôt que de procéder ainsi par tâtonnements, par approches successives, il est plus rapide d'interpoler deux mesures.

– 1^{re} mesure avec le réglage $R_1 \leftrightarrow K_{v1}$

On mesure Δp_1 . On a un débit : $qv_1 = K_{v1} \cdot \sqrt{\Delta p_1}$

– 2^e mesure avec le réglage $R_2 \leftrightarrow K_{v2}$

On mesure Δp_2 . On a un débit : $qv_2 = K_{v2} \cdot \sqrt{\Delta p_2}$

On cherche le réglage $R \leftrightarrow K_v$ qui produira le débit qv souhaité. On aura alors $\Delta p = \left(\frac{qv}{K_v}\right)^2$.

On suppose que la variation de débit est proportionnelle à la variation de pression différentielle, ce qui permet d'écrire :

$$\frac{qv - qv_1}{qv_2 - qv_1} = \frac{\Delta p - \Delta p_1}{\Delta p_2 - \Delta p_1}$$

$$\Delta p = \Delta p_1 + (\Delta p_2 - \Delta p_1) \cdot \frac{qv - qv_1}{qv_2 - qv_1} = \left(\frac{qv}{K_v}\right)^2$$

$$K_v^2 = \frac{qv^2}{\Delta p_1 + (\Delta p_2 - \Delta p_1) \cdot \frac{qv - qv_1}{qv_2 - qv_1}}$$

$$K_v = \frac{qv}{\sqrt{\frac{(qv_2 - qv_1) \cdot \Delta p_1 + (qv - qv_1) \cdot (\Delta p_2 - \Delta p_1)}{qv_2 - qv_1}}}$$

$$K_v = qv \cdot \frac{\sqrt{qv_2 - qv_1}}{\sqrt{qv_2 \cdot \Delta p_1 - qv_1 \cdot \Delta p_1 + qv \cdot \Delta p_2 - qv \cdot \Delta p_1 - qv_1 \cdot \Delta p_2 + qv_1 \cdot \Delta p_2}}$$

$$K_v = qv \cdot \frac{\sqrt{qv_2 - qv_1}}{\sqrt{qv \cdot (\Delta p_2 - \Delta p_1) + qv_2 \cdot \Delta p_1 - qv_1 \cdot \Delta p_2}}$$

en remplaçant les débits qv_1 et qv_2 par leur valeur, on obtient directement :

$$K_v = qv \cdot \frac{K_{v2} \cdot \sqrt{\Delta p_2} - K_{v1} \cdot \sqrt{\Delta p_1}}{\sqrt{qv \cdot (\Delta p_2 - \Delta p_1) + K_{v2} \cdot \sqrt{\Delta p_2} \cdot \Delta p_1 - K_{v1} \cdot \sqrt{\Delta p_1} \cdot \Delta p_2}}$$

Si on réalise la première mesure avec le robinet de réglage totalement fermé, l'expression de K_v se simplifie :

$$R_1 = 0 \Leftrightarrow K_{v1} = 0 \Leftrightarrow qv_1 = 0$$

$$K_v = qv \cdot \frac{K_{v2} \cdot \sqrt{\Delta p_2}}{\sqrt{qv \cdot (\Delta p_2 - \Delta p_1) + K_{v2} \cdot \sqrt{\Delta p_2} \cdot \Delta p_1}}$$

Cette procédure de réglage est excellente. Elle est mémorisée dans un des programmes du calculateur et l'opérateur n'a qu'à suivre les instructions affichées par l'appareil.

■ Robinets à double réglage, à diaphragme de mesure

Un diaphragme permettant la mesure du débit est intégré à l'entrée du robinet à double réglage (voir **figure 5.5.3.E**).

Avec ces matériels, la relation entre la pression différentielle mesurée et le débit ne dépend pas du réglage du robinet. De plus, elle est commune à l'ensemble des robinets, quel que soit leur diamètre, qu'ils soient droits ou d'équerre.

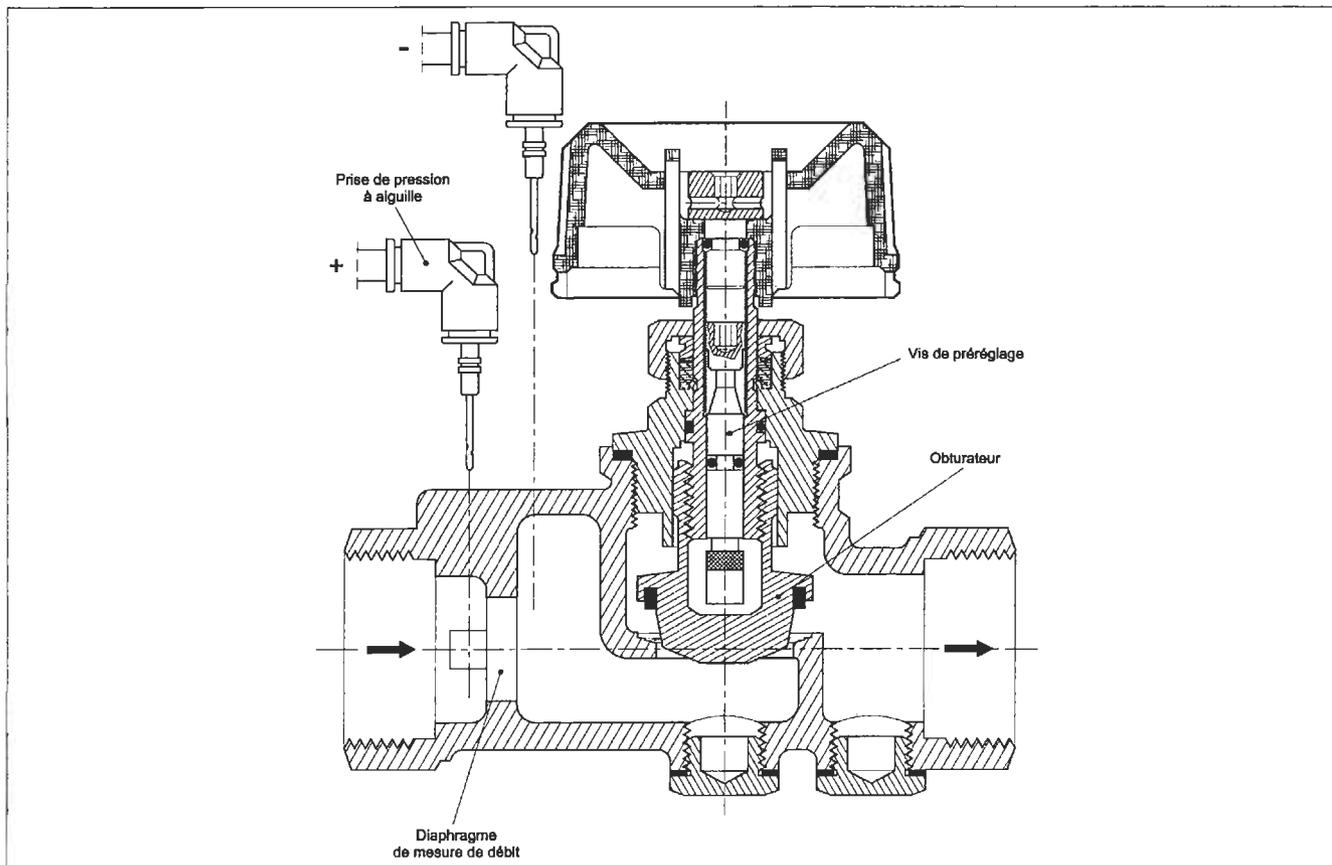


Figure 5.5.3.E. Robinet à double réglage, à diaphragme de mesure. (D'après documentation DESBORDES).

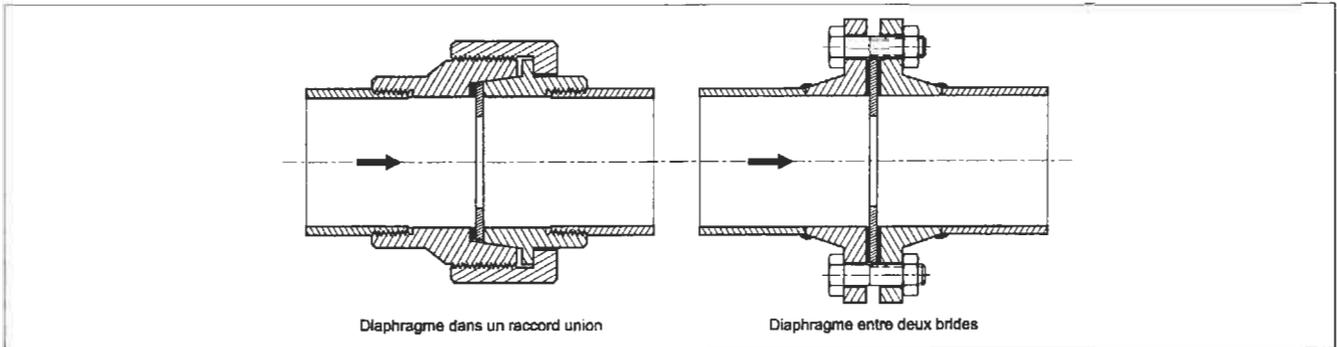


Figure 5.5.3.F. Implantation d'un diaphragme d'équilibrage.

La mesure du débit est plus simple. Il suffit de brancher le mesureur sur les prises de pression et de purger l'air.

Le calculateur indique le débit en temps réel, même pendant l'opération de réglage.

Ces robinets sont disponibles du 3/8" au 2".

Une longueur droite supérieure à cinq fois le diamètre, en amont du robinet, est recommandée.

■ Diaphragme d'équilibrage

Ces diaphragmes ne sont pas utilisés pour mesurer le débit. Ils créent simplement une résistance hydraulique constante, qui ne peut être ajustée, comme avec un robinet de réglage.

Nous préconisons l'emploi de diaphragmes, en complément d'un robinet de réglage permettant la mesure du débit, lorsque la perte de charge à ajouter est supérieure à 2 [m]. À partir de cette valeur, les robinets deviennent bruyants. En répartissant la perte de charge sur deux organes, on résout ce problème.

Le diaphragme d'équilibrage est simplement un disque mince, percé en son centre, implanté dans un raccord union ou entre deux brides (voir figure 5.5.3.F.).

Si D est le diamètre intérieur de la canalisation, le diamètre du trou d se calcule par :

$$[mm] \quad d = 11 \cdot \sqrt{Kv}$$

Cette relation simplifiée est précise à 10 %, si $d/D < 0,22$.

La présence d'un diaphragme dans la tuyauterie doit être signalée d'une façon durable, par exemple par une plaque rivetée indiquant :

Diaphragme
Kv = **

5.5.4. Méthodes

■ Calcul des réglages

Lors de la conception d'un réseau de distribution, le bureau d'études calcule le débit et la perte de charge de chaque tronçon.

La perte de charge à ajouter sur un circuit est égale à la différence entre la hauteur manométrique de la pompe et la perte de charge totale de circuit (voir figure 5.5.2.D.).

$$J_{\text{réglage}} = H_{\text{mt}} - J_{\text{circuit}}$$

Dans les réseaux comportant plusieurs niveaux d'arborescence, la perte de charge est en général fractionnée et créée par plusieurs robinets de réglage (voir figure 5.5.2.E.).

À partir de la perte de charge et du débit du robinet de réglage, on calcule son Kv. Le robinet est ensuite sélectionné. Son réglage est déterminé d'après le Kv.

Une fois l'installation terminée, les réglages sont reportés sur les robinets. L'ensemble du réseau étant en service, on mesure les débits sur quelques robinets de réglage pour vérifier l'exactitude des calculs.

Si les résultats ne sont pas satisfaisants, s'ils sont hors de la tolérance, on revoit les calculs et/ou on affine les réglages.

Cette méthode devrait être pratiquée sur toutes les installations neuves, et peut l'être aussi sur les anciennes.

Pour concrétiser cette démarche, nous proposons ci-après l'étude complète d'un réseau à eau chaude alimentant trois centrales de traitement d'air différentes. Cette application développe les étapes d'un projet classique. Elle comprend aussi la recherche des débits et des puissances échangées si le réseau n'est pas équilibré.

Étude d'un réseau de distribution de chaleur

L'étude porte sur un réseau de distribution à eau chaude, à température de départ constante 90 [°C], connecté à une bouteille de découplage hydraulique. Ce réseau alimente les batteries chaudes de trois centrales de traitement d'air BC₁, BC₂ et BC₃. La régulation est réalisée par des vannes trois voies montées en mélange VR₁, VR₂ et VR₃.

Le réseau est schématisé à la figure 5.5.4.A.

1 - SÉLECTION DES BATTERIES

Les trois batteries chaudes seront dimensionnées pour chauffer l'air de 5 à 30 [°C], les débits d'air étant les suivants :

BC ₁	0,9 [m ³ /s]
BC ₂	8 [m ³ /s]
BC ₃	2,5 [m ³ /s]

Les batteries seront choisies pour leur moindre coût, tout en conservant la vitesse de l'air à une valeur inférieure à 4 [m/s].

Travail demandé :

- Sélectionner les batteries à l'aide de l'abaque de la figure 5.5.4.B pages 100 et 101.

- Indiquer les références complètes des batteries sélectionnées.

- Préciser pour chacune des trois batteries, la puissance, le débit d'eau, la perte de charge sur l'eau et la température de retour.

- Calculer la température de retour à la bouteille.

2 - SÉLECTION DES VANNES DE RÉGULATION

Pour la suite de l'étude, on utilisera les débits et les pertes de charge des batteries présentés dans le tableau suivant :

	qv [m ³ /h]	J [m]
BC ₁	0,9	0,4
BC ₂	11	1,2
BC ₃	3	0,7

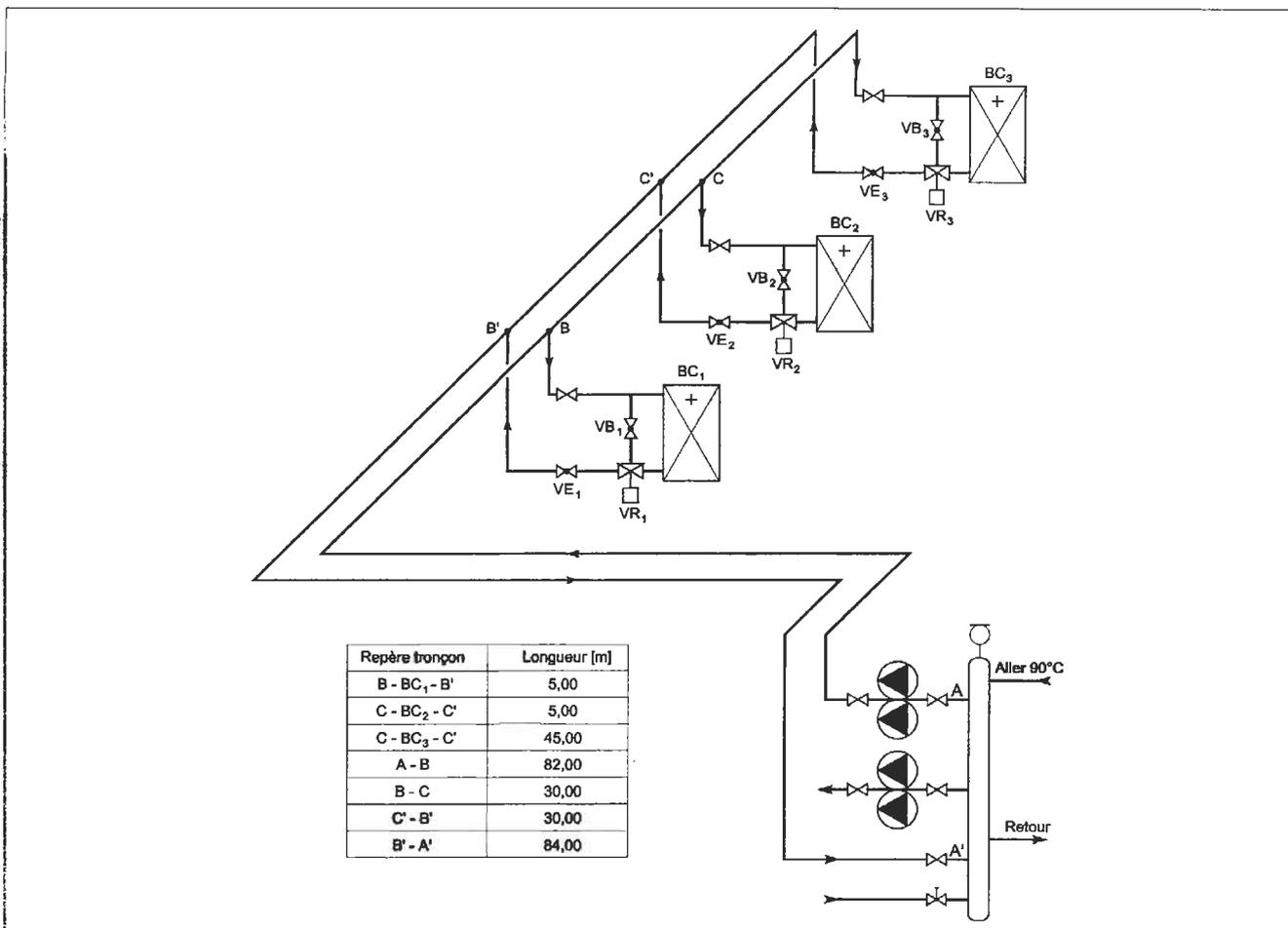


Figure 5.5.4.A. Schéma du réseau de distribution.

Travail demandé :

– Indiquer le diamètre nominal DN et le Kvs des vannes trois voies de régulation VR₁, VR₂ et VR₃, à l'aide de l'extrait de catalogue de la **figure 5.5.4.C**.

– Calculer la perte de charge et l'autorité de ces vannes.

3 – DIMENSIONNEMENT DU RÉSEAU

Le réseau sera réalisé en tube acier noir avec des courbes à souder 3d et des réductions à souder. Les vannes d'isolement seront à boisseau sphérique.

Travail demandé :

– Dimensionner le réseau.

– Calculer les pertes de charge de chaque tronçon, dans une feuille de calcul.

– Calculer les pertes de charge de chaque circuit.

4 – SÉLECTION DE LA POMPE

Le réseau sera équipé d'un circulateur double avec des moteurs triphasés 400 V.

Travail demandé :

– Donner la référence du circulateur à l'aide de l'extrait de catalogue de la **figure 5.5.4.D**.

– Préciser la vitesse de rotation choisie.

– Indiquer le rendement du circulateur et la puissance électrique absorbée.

5 – ÉQUILIBRAGE DU RÉSEAU

L'équilibrage sera réalisé par les vannes VE₁, VE₂ et VE₃.

Travail demandé :

– Calculer la perte de charge à créer dans les vannes d'équilibrage.

– Choisir ces vannes et indiquer leur réglage à l'aide de l'extrait de catalogue des **figures 5.5.4.E. et F**.

6 – ÉQUILIBRAGE DES VANNES TROIS VOIES

Les vannes de réglage VB₁, VB₂ et VB₃ réalisent l'équilibrage de la branche bipasse des vannes trois voies.

Travail demandé :

– Choisir ces vannes et indiquer leur réglage à l'aide de l'extrait de catalogue des figures 5.5.4.E. et F.

7 – MODÉLISATION DU RÉSEAU DÉSÉQUILBRÉ

On étudie le réseau sans les vannes de réglage VE₁, VE₂, VE₃.

Travail demandé :

– Modéliser le réseau en un nombre minimal de résistances.

– Représenter graphiquement la caractéristique qv/H_{mt} des résistances élémentaires, des résistances équivalentes et de la pompe.

– Déterminer graphiquement le débit dans la pompe et dans chaque batterie.

– Faire de même par le calcul.

– Déterminer la puissance de chaque batterie.

Résolution

1 – Sélection des batteries chaudes (voir figure 5.5.4.G, pages 108 et 109)

▷ BC₁

$$qv_{\text{air}} = 0,9 [\text{m}^3/\text{s}] \rightarrow \text{Grandeur 2} \rightarrow v_{\text{air}} = 3,0 [\text{m/s}]$$

Variante de puissance 3 – DN 25

Réf KDEE – 02 – 0 – 3 – 4 – 1

$$\Delta p \approx 3,5 [\text{kPa}] \rightarrow J = 350 [\text{mm}]$$

$$qv = 0,24 [\text{l/s}] \text{ soit } 0,86 [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$\theta_r = 90 - 27 = 63 [^\circ\text{C}]$$

$$P_{\text{air}} = qv_{\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}} \cdot \Delta\theta_{\text{air}} = 0,9 \times 1,2 \times 1 \times (30 - 5) = 27 [\text{kW}]$$

$$P_{\text{eau}} = qv_{\text{eau}} \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta\theta_{\text{eau}}$$

$$P_{\text{eau}} = 0,24 \cdot 10^{-3} \times 10^3 \times 4,18 \times (90 - 63) = 27 [\text{kW}]$$

▷ BC₂

$$qv_{\text{air}} = 8 [\text{m}^3/\text{s}] \rightarrow \text{Grandeur 7} \rightarrow v_{\text{air}} = 3,9 [\text{m/s}]$$

Variante de puissance 3 ou 4. On choisit la variante 3 par économie – DN 50

Réf KDEE – 07 – 0 – 3 – 4 – 1

$$\Delta p \approx 11 [\text{kPa}] \rightarrow J = 1100 [\text{mm}]$$

$$qv = 3,0 [\text{l/s}] \text{ soit } 10,8 [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$\theta_r = 90 - 19 = 71 [^\circ\text{C}]$$

$$P = 8 \times 1,2 \times 1 \times (30 - 5) = 240 [\text{kW}]$$

▷ BC₃

$$qv_{\text{air}} = 2,5 [\text{m}^3/\text{s}] \rightarrow \text{Grandeur 4} \rightarrow v_{\text{air}} = 3,4 [\text{m/s}]$$

Variante de puissance 3 – DN 25.

Réf KDEE – 04 – 0 – 3 – 4 – 1

$$\Delta p \approx 7 [\text{kPa}] \rightarrow J = 700 [\text{mm}]$$

$$qv = 0,8 [\text{l/s}] \text{ soit } 2,88 [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$\theta_r = 90 - 22 = 68 [^\circ\text{C}]$$

$$P = 2,5 \times 1,2 \times 1 \times (30 - 5) = 75 [\text{kW}]$$

▷ Température de retour à la bouteille

$$\theta_r = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_{r_i} \cdot qv_i}{\sum_{i=1}^n qv_i}$$

$$\theta_r = \frac{(63 \times 0,86) + (71 \times 10,8) + (68 \times 2,88)}{0,86 + 10,8 + 2,88}$$

$$\theta_r = 69,9 [^\circ\text{C}] \approx 70 [^\circ\text{C}]$$

2 – Sélection des vannes de régulation

La perte de charge des vannes trois voies doit être égale ou supérieure à celle des batteries, afin de disposer d'une autorité suffisante ($a \geq 0,5$).

Les calculs sont présentés au tableau 5.5.4.H.

3 – Dimensionnement du réseau

Chaque tronçon du réseau est dimensionné pour que sa perte de charge linéique soit comprise entre 10 et 20 [mm].

Les diamètres des tubes et des appareils sont reportés sur le schéma de la figure 5.5.4.I. Les besoins en réductions apparaissent ainsi :

- Le tableau 5.5.4.J. montre la feuille de calcul des pertes de charge par tronçon, puis par circuit.

- Le tableau 5.5.4.K. montre la feuille de calcul de détail des coefficients de perte de charge singulière ζ .

4 – Sélection de la pompe

Le tableau 5.5.4.J. indique que le circuit de la batterie chaude 2 est le plus défavorisé car c'est lui qui a la plus grande perte de charge.

Ce n'est pas le circuit le plus long.

La pompe doit disposer d'une hauteur manométrique égale ou supérieure à la perte du circuit le plus défavorisé, pour le débit total du réseau.

$$\begin{cases} qv = 14,9 [\text{m}^3/\text{h}] \\ \text{Hmt} \geq J_{\text{max}} \quad \text{Hmt} \geq 7,1 [\text{m}] \end{cases}$$

Après avoir positionné ce point sur le courbier général des circulateurs (figure 5.5.4.D, p. 102), on constate que la courbe repérée 50 – 120 est la plus proche des caractéristiques recherchées. Ce circulateur convient le mieux.

Il est disponible en version double avec moteurs triphasés 400-415 V à 2 pôles (3000 [tr/min]).

Il a pour référence complète :

UPSD 50 – 120 F/3 × 400 V

Le courbier spécifique de ce circulateur indique que la vitesse 3 est nécessaire.

Puissance électrique = 620 [W]

Rendement global (pompe et moteur) = 50 %

Intensité nominale = 1,30 [A]

cos ϕ nominal = 0,80

5 – Équilibrage du réseau

Pour le débit total souhaité $qv = 14,9 [\text{m}^3/\text{h}]$, la pompe délivre une hauteur manométrique égale à $\text{Hmt} = 7,9 [\text{m}]$.

Le débit-volume et la hauteur manométrique totale :

$$\begin{cases} qv = 14,9 [\text{m}^3/\text{h}] \\ \text{Hmt} = 7,9 [\text{m}] \end{cases}$$

sont les caractéristiques du point de fonctionnement souhaité pour la pompe et le réseau équilibré.

La perte de charge que doit ajouter chaque robinet de réglage est égale à :

$$J_{VE} = \text{Hmt} - J_{\text{circuit}}$$

Tableau 5.5.4.H. Sélection des vannes trois voies.

	qv [m ³ /h]	J _{bc} [bar]	Kv maxi	Kvs ≅ Kv maxi	DN	J _{VR} = (qv/Kvs) ²		a = $\frac{J_{VR}}{J_{VR} + J_{BC}}$
						[bar]	[mm]	
VR ₁	0,9	0,0392	4,54	3	15	0,09	917	0,70
VR ₂	11	0,118	32,08	30	50	0,134	1370	0,53
VR ₃	3	0,0687	11,45	8	25	0,140	1433	0,67

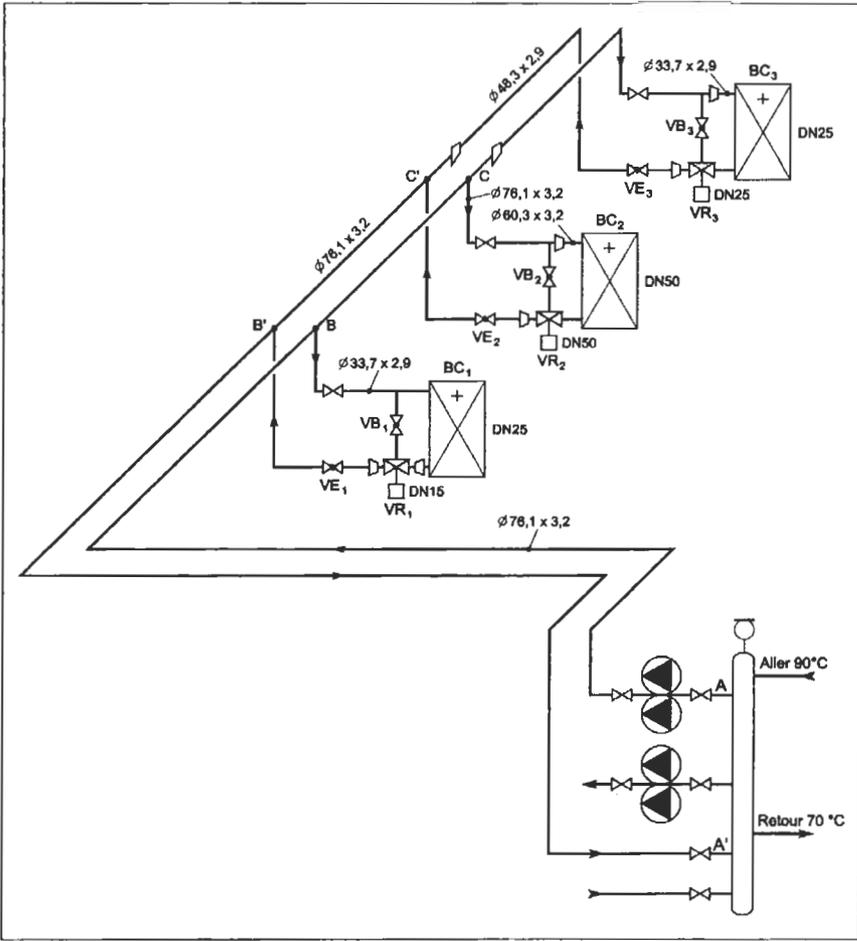


Figure 5.5.4.I. Schéma du réseau dimensionné.

Repère	qv [m ³ /h]	Tuyau	Di [mm]	v [m/s]	v ² /2g [mm]	j [mm/m]	L [m]	J lin. [mm]	Σζ	J sing. [mm]	J app. [mm]	J totales [mm]	CIRCUITS				
													BC 1	BC 2	BC 3		
B-BC 1-B'	0,9	33,7 x 2,9	27,9	0,41	8,5	8,4	5	42	10,0	85	400+917	1317	1 445	1 445			
C-BC 2-C	11	76,1 x 3,2	69,7	0,80	32,7	9,5	5	48	5,6	185	1200+1370	2570	2 802	2 802		2 802	
C-BC 3-C	3	48,3 x 2,9	42,5	0,59	17,6	9,8	45	440	3,7	66	700+1433	2133	2 638			2 638	
A-B	14,9	76,1 x 3,2	69,7	1,09	60,0	17,1	82	1 398	4,0	239			1 637	1 637	1 637	1 637	
B-C	14	76,1 x 3,2	69,7	1,02	53,0	15,1	30	454	0,0	0			454		454	454	
C'-B'	14	76,1 x 3,2	69,7	1,02	53,0	15,1	30	454	1,9	100			553		553	553	
B'-A'	14,9	76,1 x 3,2	69,7	1,09	60,0	17,1	84	1 432	3,5	213			1 645	1 645	1 645	1 645	

Tableau 5.5.4.J. Feuille de calcul des pertes de charge.

J circuit | 4 726 | 7 091 | 6 927

Désignation	ζ	B-BC 1-B'		C-BC 2-C'		C-BC 3-C'		A-B		B-C		C'-B'		B'-A'	
		Nb	Σζ	Nb	Σζ	Nb	Σζ	Nb	Σζ	Nb	Σζ	Nb	Σζ	Nb	Σζ
Sortie de réservoir	0,5									1	0,5				
Entrée de réservoir	1													1	1
Elargissement brusque 1/2" · 1"		3,1	1	3,1											
Elargissement progressif		0,3			1	0,3									
		1,1					1	1,1							
		0,2					1	0,2							
Courbe à souder 3d · 90°		0,4	2	0,8											
		0,4					4	1,6							
		0,4			2	0,8			4	1,6				4	1,6
Piquage 76,1 · 33,7		0									1	0			
		7,5	1	7,5											
		0,1										1	0,1		
		-1,5	1	-1,5											
Piquage 76,1 · 76,1		0,7					1	0,7							
		2,4			1	2,4									
		1,8										1	1,8		
		1,2			1	1,2									
Robinet à boisseau sphérique		0,12	1	0,1					1	0,1					
Robinet à papillon		0,09									2	1,9			
		0,94			1	0,9								1	0,9
Totaux					10,0		5,6		3,7		4,0	0,0		1,9	3,5

Tableau 5.5.4.K. : Feuille de détail des coefficients ζ.

La sélection des robinets d'équilibrage et le calcul de leur réglage est présenté au **tableau 5.5.4.L.**

Les robinets de réglage du diamètre de la tuyauterie conviennent bien, à part VE₁ qui doit créer une perte de charge supérieure à 3 [m] et qui sera bruyant.

On peut décider d'ajouter un diaphragme avec une perte de charge de 2,5 [m] environ. Son Kv est alors :

$$K_v = \frac{q_v}{\sqrt{J_D}} = \frac{0,9}{\sqrt{0,245}} = 1,82$$

Le diamètre du trou à percer est :

$$d = 11 \cdot \sqrt{K_v} = 11 \times \sqrt{1,82} \approx 15 \text{ [mm]}$$

Reste à créer une perte de charge dans la vanne :

$$J_{VE_1}' = 3,17 - 2,5 = 0,67 \text{ [m]}$$

$$K_v = \frac{0,9}{\sqrt{0,0657}} = 3,51$$

Le réglage du robinet DN 25 est alors de 2 tours. Il est dans la plage recommandée par le constructeur.

6 – Équilibrage des vannes trois voies

Les robinets de réglage VB₁, VB₂, VB₃ créent une résistance identique à celle de la batterie chaude.

Le débit dans la voie commune de la vanne trois voies est ainsi identique pour les positions extrêmes de réglage (q_v maxi et q_v nul dans la batterie). Les perturbations entre les régulations terminales sont évitées.

La sélection des robinets d'équilibrage et le calcul de leur réglage sont présentés au **tableau 5.5.4.M.**

Toutes les vannes de réglage sont du diamètre de la branche d'alimentation.

7 – Modélisation du réseau déséquilibré

Le réseau a été découpé en sept tronçons dont on a calculé la perte de charge pour le débit souhaité.

Chaque tronçon représente une résistance hydraulique de valeur facile à calculer $R = J / q_v^2$.

En observant le schéma hydraulique de la **figure 5.5.4.N.**, on s'aperçoit que les tronçons A – B et B' – A' sont en série. Ils sont équivalents à une seule résistance 5.

Il en est de même pour les tronçons B – C et B' – C'. Ils sont équivalents à une seule résistance 4.

Le réseau est alors modélisé par cinq résistances élémentaires seulement.

Afin de déterminer le point de fonctionnement de la pompe et du réseau déséquilibré, on associe petit à petit les résistances élémentaires, en série ou en parallèle, jusqu'à trouver la résistance équivalente à l'ensemble du réseau.

▷ Résolution graphique

On reporte sur un graphique à échelles linéaires ou à échelles logarithmiques la caractéristique des cinq résistances élémentaires (1 à 5).

Sur le graphique log-log, cette opération est plus rapide car toutes les résistances sont représentées par des droites parallèles (voir **figures 5.5.4.O.** et **P.**).

Tableau 5.5.4.L. Sélection et réglage des robinets d'équilibrage du réseau

	q _v [m ³ /h]	J _{circuit} [m]	J _{VE} = Hmt - J _{circuit}		K _v = $\frac{q_v}{\sqrt{J_{VE}}}$	DN	Réglage [tour]
			[m]	[bar]			
VE ₁	0,9	4,73	3,17	0,31	1,62	25	1,3
VE ₂	11	7,09	0,81	0,079	39,1	65	4,2
VE ₃	3	6,93	0,97	0,095	9,73	40	2,6

Tableau 5.5.4.M. Sélection et réglage des robinets de réglage des bippases de vanne trois voies

	q _v [m ³ /h]	J _{VB} = J _{BC}		K _v = $\frac{q_v}{\sqrt{J_{VB}}}$	DN	Réglage [tour]
		[m]	[bar]			
VB ₁	0,9	0,4	0,0392	4,54	25	2,2
VB ₂	11	1,2	0,118	32,1	65	3,8
VB ₃	3	0,7	0,0687	11,5	40	2,9

Les résistances équivalentes 6 à 9 sont ensuite construites. Les pertes de charge des résistances en série s'additionnent pour le même débit. Les débits des résistances en parallèle s'additionnent pour la même perte de charge.

Puis on reporte la courbe de pompe.

Il ne reste plus qu'à interpréter le graphique.

– Le point de fonctionnement de la pompe et du réseau se situe à l'intersection de leurs courbes. On trouve le débit dans la pompe : **q_v = 15,9 [m³/h]**.

– Le débit dans 9 est identique au débit dans 5 et 8. On trace une verticale q_v.

– La perte de charge de 8 est identique à celles de 1 et 7. On trace une horizontale J₈.

On trouve le débit dans la batterie chaude 1 : **q_{v1} = 1,5 [m³/h]**.

– Le débit dans 7 est identique au débit dans 4 et 6. On trace une verticale q_{v7}.

– La perte de charge de 6 est identique à celles de 2 et 3. On trace une horizontale J₆.

On trouve le débit dans la batterie chaude 2

q_{v2} = 11,2 [m³/h]

et dans la batterie chaude 3 :

q_{v3} = 3,2 [m³/h].

▷ Résolution par le calcul

• On commence par calculer les cinq résistances élémentaires, 1 à 5.

$$R_1 = \frac{J_1}{q_{v1}^2} = \frac{1,445}{0,9^2} = 1,7834 \text{ [h}^2/\text{m}^5\text{]}$$

$$R_2 = \frac{J_2}{q_{v2}^2} = \frac{2,802}{11^2} = 0,02316 \text{ [h}^2/\text{m}^5\text{]}$$

$$R_3 = \frac{J_3}{q_{v3}^2} = \frac{2,638}{3^2} = 0,2932 \text{ [h}^2/\text{m}^5\text{]}$$

$$R_4 = \frac{J_4}{q_{v4}^2} = \frac{0,454 + 0,553}{14^2} = \frac{1,007}{14^2} = 5,139 \cdot 10^{-3} \text{ [h}^2/\text{m}^5\text{]}$$

$$R_5 = \frac{J_5}{q_{v5}^2} = \frac{1,637 + 1,645}{14,9^2} = \frac{3,282}{14,9^2} = 0,01478 \text{ [h}^2/\text{m}^5\text{]}$$

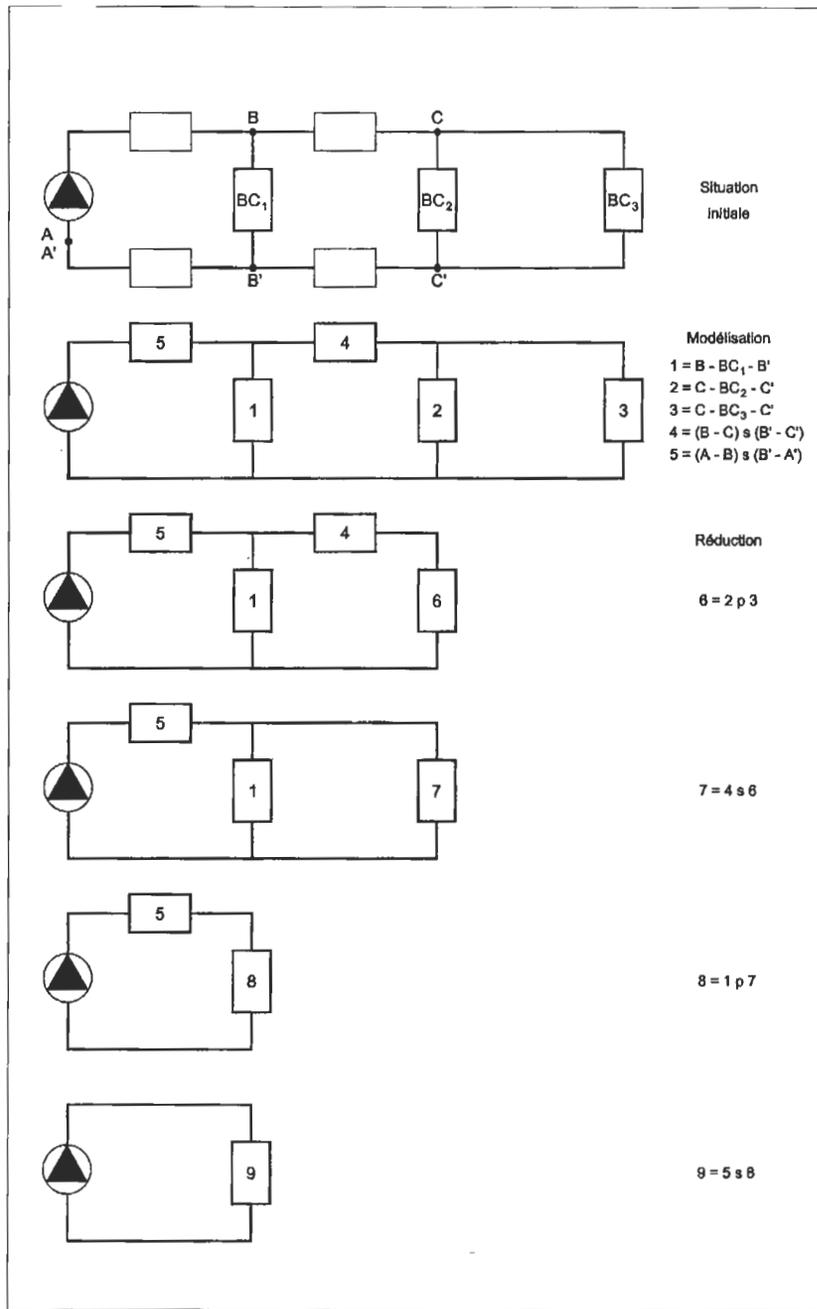


Figure 5.5.4.N. Modélisation et réduction du système.

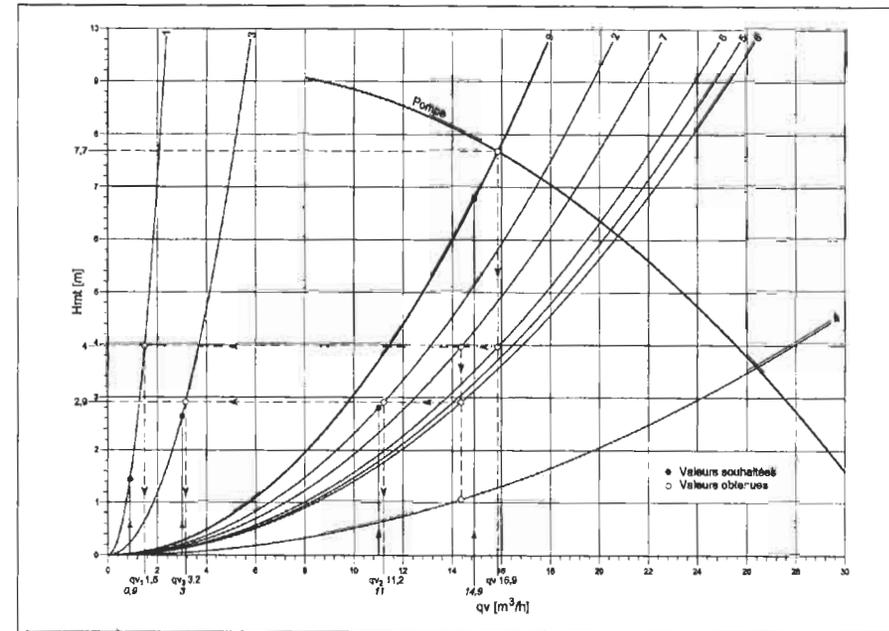


Figure 5.5.4.O. Graphique à échelles linéaires

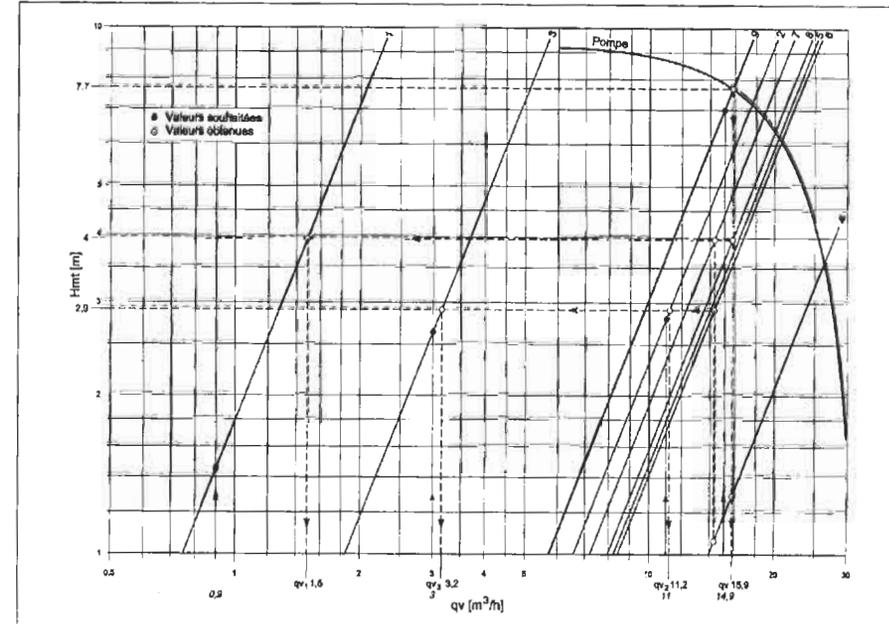


Figure 5.5.4.P. Graphique à échelles logarithmiques.

- On calcule ensuite les quatre résistances équivalentes, 6 à 9.

$$R_6 = \left[\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{R_2}} + \frac{1}{\sqrt{R_3}}} \right]^2 = \left[\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{0,02316}} + \frac{1}{\sqrt{0,2932}}} \right]^2 = 0,01411 \quad [\text{h}^2/\text{m}^5]$$

$$R_7 = R_4 + R_6 = 5,139 \cdot 10^{-3} + 0,01411 = 0,01925 \quad [\text{h}^2/\text{m}^5]$$

$$R_8 = \left[\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_7}}} \right]^2 = \left[\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{1,7834}} + \frac{1}{\sqrt{0,01925}}} \right]^2 = 0,01580 \quad [\text{h}^2/\text{m}^5]$$

$$R_9 = R_5 + R_8 = 0,01478 + 0,01580 = 0,03058 \quad [\text{h}^2/\text{m}^5]$$

- On détermine l'équation de la courbe de pompe par la méthode développée en annexe.

$$\text{Hmt} = -0,0115 \cdot \text{qv}^2 + 0,0979 \cdot \text{qv} + 9,02$$

- On cherche les coordonnées du point de fonctionnement en écrivant :

$$\text{Hmt} = J_9 = R_9 \cdot \text{qv}^2 \text{ soit,}$$

$$-0,0115 \cdot \text{qv}^2 + 0,0979 \cdot \text{qv} + 9,02 = 0,03058 \cdot \text{qv}^2$$

$$-0,0421 \cdot \text{qv}^2 + 0,0979 \cdot \text{qv} + 9,02 = 0$$

On résout le polynôme de la forme : $ax^2 + bx + c = 0$

$$\Delta = b^2 - 4 \cdot a \cdot c = 0,0979^2 - 4 \times (-0,0421) \times 9,02$$

$$\Delta = 1,529$$

$$\text{qv} = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2 \cdot a} = \frac{-0,0979 - \sqrt{1,529}}{2 \times (-0,0421)}$$

$$\left\{ \text{qv} = 15,84 \quad [\text{m}^3/\text{h}] \right.$$

$$\left. \left\{ \text{Hmt} = J_9 = R_9 \cdot \text{qv}^2 = 0,03058 \times 15,84^2 = 7,68 \quad [\text{m}] \right. \right.$$

- On calcule J_8 .

$$J_8 = R_8 \cdot \text{qv}_8^2 = R_8 \cdot \text{qv}_9^2 = 0,01580 \times 15,84^2 = 3,966 \quad [\text{m}]$$

- On calcule qv_1 et qv_7 .

$$\text{qv}_1 = \sqrt{\frac{J_1}{R_1}} = \sqrt{\frac{J_8}{R_1}} = \sqrt{\frac{3,966}{1,7834}}$$

$$\text{qv}_1 = 1,49 \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$\text{qv}_7 = \sqrt{\frac{J_7}{R_7}} = \sqrt{\frac{J_8}{R_7}} = \sqrt{\frac{3,966}{0,01925}} = 14,85^2 \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$\text{ou } \text{qv}_7 = \text{qv}_8 - \text{qv}_1 = 15,84 - 1,49 = 14,35 \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

- On calcule J_6 .

$$J_6 = R_6 \cdot \text{qv}_6^2 = R_6 \cdot \text{qv}_7^2 = 0,01411 \times 14,35^2 = 2,91 \quad [\text{m}]$$

- On calcule qv_2 et qv_3 .

$$\text{qv}_2 = \sqrt{\frac{J_2}{R_2}} = \sqrt{\frac{J_6}{R_2}} = \sqrt{\frac{2,91}{0,02316}}$$

$$\text{qv}_2 = 11,20 \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$\text{qv}_3 = \sqrt{\frac{J_3}{R_3}} = \sqrt{\frac{J_6}{R_3}} = \sqrt{\frac{2,91}{0,2932}}$$

$$\text{qv}_3 = 3,15 \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

▷ Puissance des batteries

En utilisant l'abaque de sélection (figure 5.5.4.B), on trouve les variations de température sur l'air, puis les puissances :

$$\Delta\theta_{\text{air1}} \approx 29 \quad [\text{K}] \quad P_{\text{BC1}} = 0,9 \times 1,2 \times 1 \times 29 = 31 \quad [\text{kW}]$$

$$\Delta\theta_{\text{air2}} \approx 25,5 \quad [\text{K}] \quad P_{\text{BC2}} = 8 \times 1,2 \times 1 \times 25,5 = 245 \quad [\text{kW}]$$

$$\Delta\theta_{\text{air3}} \approx 26 \quad [\text{K}] \quad P_{\text{BC3}} = 2,5 \times 1,2 \times 1 \times 26 = 78 \quad [\text{kW}]$$

▷ Conclusion de notre étude

Si le réseau ne comporte aucune vanne d'équilibrage, toutes les batteries bénéficient d'un surdébit et disposent d'une surpuissance.

	Écart de débit	Écart de puissance
BC ₁	+ 66 %	+ 15 %
BC ₂	+ 2 %	+ 2 %
BC ₃	+ 5 %	+ 4 %

On pourrait conclure hâtivement que l'équilibrage n'est pas nécessaire.

Il est certain que la vanne de régulation VR₁ ne fonctionnera que sur une partie de sa course. La précision de réglage en sera affectée et cela peut entraîner un pompage aux faibles charges.

D'autre part, le débit pompé étant supérieur aux besoins (+ 14 %), le défaut d'équilibrage engendre une surconsommation électrique :

$$P_{\text{électrique}} = 640 \quad [\text{W}], \text{ au lieu de } 620 \quad [\text{W}] \text{ soit } + 3,2 \%$$

Sur une saison de chauffe la surconsommation électrique s'élève à :

$$\Delta E = \left(\frac{640 - 620}{1\,000} \right) \times 5\,500 = 110 \quad [\text{kWh}]$$

■ Réglage avec mesure des débits

La mesure et le réglage des débits sont réalisés à l'aide de robinets de réglage à prises de pression ou à diaphragme incorporé, comme expliqué au § 5.5.3.

▷ Méthode itérative

On règle les débits dans les robinets, les uns après les autres, dans un ordre quelconque.

Le réglage du débit dans une branche entraîne une modification du débit dans toutes les autres branches. Aussi, il est nécessaire de régler plusieurs fois tous les robinets. A chaque passage du régleur, les débits s'approchent un peu plus des valeurs souhaitées.

Afin de limiter le nombre de passages, on peut :

- Prérégler au jugé les robinets de réglage. Cela n'est pas très difficile dans le cas où tous les appareils sont identiques. Le robinet le plus éloigné de la pompe reste grand ouvert.

- Régler en premier les circuits les plus déséquilibrés. Après le premier passage, on connaît les robinets dont le débit était le plus éloigné du débit souhaité.

En commençant le second passage par ces robinets, on réduit considérablement la perturbation.

- Régler en anticipant la variation de débit. Si à chaque passage, on doit refermer le robinet 3 par exemple, il est possible de le fermer plus que nécessaire.

Cette méthode risque de demander beaucoup de temps, surtout si le déséquilibre initial est important. Elle n'est envisageable que pour les réseaux comportant peu de circuits et dont les robinets de réglage sont géographiquement peu éloignés.

▷ Méthode proportionnelle

- Travail préliminaire

Pour appliquer cette méthode, il est impératif que le réseau soit fractionné en **modules d'équilibrage**.

Une branche alimentant un certain nombre d'appareils en parallèle, tous munis d'un robinet de réglage, comporte en tête un robinet appelé **robinet de compensation**. Elle forme alors un module d'équilibrage, comme par exemple le module 1.5 de la **figure 5.5.4.Q**.

Une colonne desservant un certain nombre de branches en parallèle est pourvue d'un robinet de compensation. Elle forme aussi un module d'équilibrage, comme par exemple le module 1 de la même figure. Les robinets de réglage de la colonne sont en fait les robinets de compensation des branches.

Enfin, le collecteur alimentant les colonnes en parallèle est équipé d'un robinet de compensation et forme le module de

niveau 1 de l'arborescence. Les colonnes sont des modules de niveau 2, les branches des modules de niveau 3, etc.

Le nombre de niveaux est illimité.

Les modules d'un niveau peuvent être tous différents et en nombre illimité.

Les modules sont repérés en partant de la pompe, par le numéro du module de niveau 2, numéro du module de niveau 3, etc. Par exemple, le module 2.4 est le 4^e module de niveau 3, du 2^e module de niveau 2.

Le module de niveau 1 porte le repère 0.

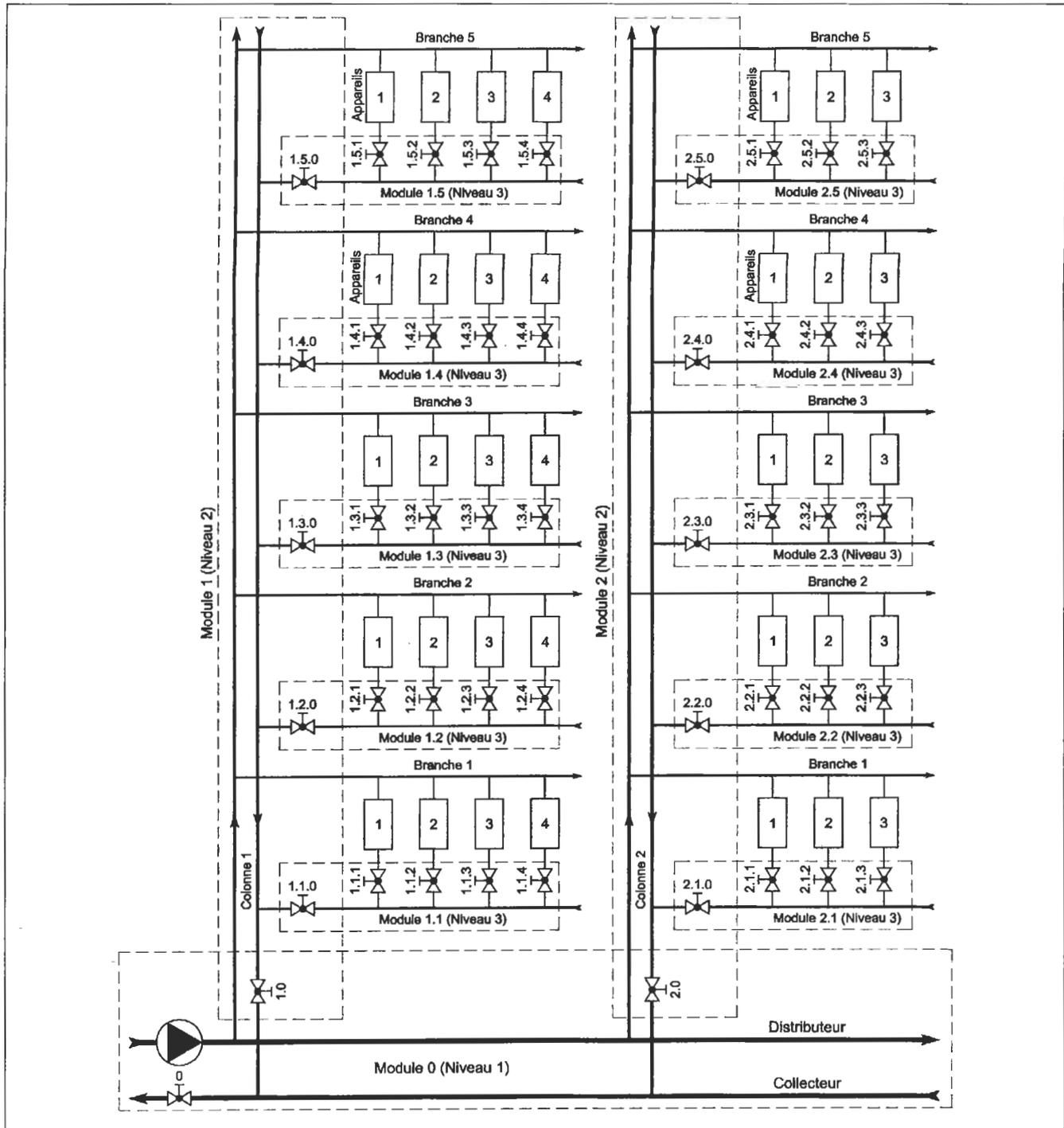


Figure 5.5.4.Q. Découpage du réseau en modules d'équilibrage et repérage des robinets de réglage.

Les robinets de réglage d'un module sont aussi numérotés en partant de l'entrée du module. Le robinet de compensation porte toujours le numéro 0.

• Procédure d'équilibrage

– Ouvrir complètement tous les robinets de réglage et les vannes de régulation.

– Régler le débit de la pompe à la valeur souhaitée avec le robinet de compensation générale 0.

– Mesurer les débits à l'entrée de chaque module de niveau 2 avec les robinets 1.0, 2.0, 3.0...

Calculer le taux de débit T de chaque module :

$$T = \frac{\text{Débit mesuré}}{\text{Débit souhaité}}$$

Consigner ces valeurs.

– Mesurer les débits à l'entrée de tous les modules de niveau 3, alimentés par le module de niveau 2 ayant le T_{maxi} .

– Commencer l'équilibrage du module de niveau 3 ayant le T_{maxi} (voir exemple **figure 5.5.4.R.**).

– Mesurer le débit dans chaque appareil de ce module. L'appareil le plus défavorisé du module est celui qui a le T_{mini} . Si les appareils sont identiques, c'est le plus éloigné de l'entrée.

– Régler le robinet le plus éloigné, appelé **robinet de référence**, (1.2.4 dans l'exemple) avec $T_{\text{ref}} = T_{\text{mini}}$.

Le débit est alors $qv_{\text{mesuré}} = T_{\text{ref}} \cdot qv_{\text{souhaité}}$.

Bloquer le réglage mais laisser le mesureur en place pendant l'équilibrage complet du module.

– Régler le robinet suivant, celui qui a le repère immédiatement inférieur (1.2.3 dans l'exemple), avec un second mesureur, tel que son taux de débit soit égal au taux de référence. Pendant le réglage, le taux de référence peut augmenter sensiblement. Si c'est le cas, recommencer avec le nouveau T_{ref} . Bloquer le réglage.

– Régler tous les robinets du module, par ordre décroissant de repère avec $T = T_{\text{ref}}$, T_{ref} étant le taux de référence du moment.

Remarque :

Quand on referme un robinet de réglage, par exemple le second du module, le débit augmente dans tous les autres robinets du module. Mais **la répartition des débits n'est pas modifiée dans les robinets en aval du réglage**. Les débits dans ces robinets varient dans la même proportion, donc ils conservent un taux de débit commun : T_{ref} .

$$\begin{aligned} \frac{qv \text{ en } 3}{qv \text{ souhaité en } 3} &= \frac{qv \text{ en } 4}{qv \text{ souhaité en } 4} = \dots \\ &= \frac{qv \text{ mesuré dans la référence}}{qv \text{ souhaité dans la référence}} = T_{\text{ref}} \end{aligned}$$

– Une fois ce module équilibré, passer aux autres modules de niveau 3, alimentés par le même module de niveau 2. On traitera les modules par ordre décroissant de taux de débit, de T_{maxi} à T_{mini} .

– Quand tous les modules de niveau 3 sont équilibrés, on règle le module de niveau 2 selon la même procédure, du robinet le plus éloigné jusqu'au robinet le plus proche de l'alimentation. Les robinets de réglage du module de niveau 2 sont les robinets de compensation du module de niveau 3. Tous les circuits passant par ce module de niveau 2 ont maintenant le même taux de débit.

– On recherche ensuite le module de niveau 3 ayant le T_{maxi} dans le module de niveau 2 qui avait initialement le taux de débit immédiatement inférieur au précédent. On reproduit l'ensemble du processus de réglage d'un module de niveau 2.

– Quand tous les modules de niveau 2 sont équilibrés, on règle le module de niveau 1 toujours selon le même principe, du robinet le plus éloigné vers le robinet le plus proche de la pompe. Cela fait, tous les circuits du réseau ont le même taux de débit.

– On règle finalement le débit dans le robinet de compensation générale 0, et tous les taux de débit passent alors à 1. L'équilibrage est terminé.

▷ Méthode compensée

La méthode compensée reprend le principe de la méthode proportionnelle mais en maintenant tous **les taux de débit constants et égaux à 1 pendant l'équilibrage**.

Elle présente plusieurs avantages par rapport à la méthode proportionnelle :

– Il n'est pas nécessaire de mesurer les débits à l'entrée des modules ni de calculer les taux de débit pour déterminer dans quel ordre il faut équilibrer les modules.

Il est possible de régler n'importe quel module dont les modules de niveau supérieur sont déjà réglés. Les modules de même niveau sont alors isolés.

– Pour équilibrer un module, il n'est pas utile de mesurer le débit dans chaque robinet pour déterminer le T_{mini} . On installe le mesureur une seule fois sur chaque robinet et on procède au réglage définitif, avec la valeur souhaitée de débit ($T = 1$). Le gain de temps est très important.

– Cette méthode effectue l'équilibrage avec les résistances minimales. Si la pompe est surpuissante, l'excédent de hauteur manométrique est consommé entièrement dans le robinet de compensation générale. Il est clairement mis en évidence.

– L'équilibrage est réalisable par tranches, au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

• Procédure d'équilibrage d'un module

Voir **figure 5.5.4.S.**

– Régler le débit souhaité dans le robinet le plus éloigné, appelé robinet de référence. On essaye de créer une perte de charge minimale avec ce robinet, tout en restant mesurable : $\Delta p = 3$ [kPa]. Si la pression différentielle est supérieure, la réduire en fermant partiellement le robinet de compensation, à l'entrée du module. Bloquer le réglage mais laisser le mesureur en place.

– Régler le robinet suivant, celui qui a le repère immédiatement inférieur. Pendant cette opération le débit peut évoluer sensiblement dans le robinet de référence. Si c'est le cas, le ramener à sa valeur initiale en actionnant le robinet de compensation. Réajuster le réglage puis le bloquer.

– Régler les autres robinets du module en suivant la même procédure.

L'équilibrage par la méthode proportionnelle ou par la méthode compensée requiert au moins deux opérateurs, de préférence équipés d'une liaison radio.

■ Réglage avec mesure des températures

Cette méthode, aussi vieille que le chauffage à eau chaude pulsée, ne doit être envisagée qu'en dernier recours, pour des installations anciennes sans dispositifs de mesure de débit et sans perspective de rénovation.

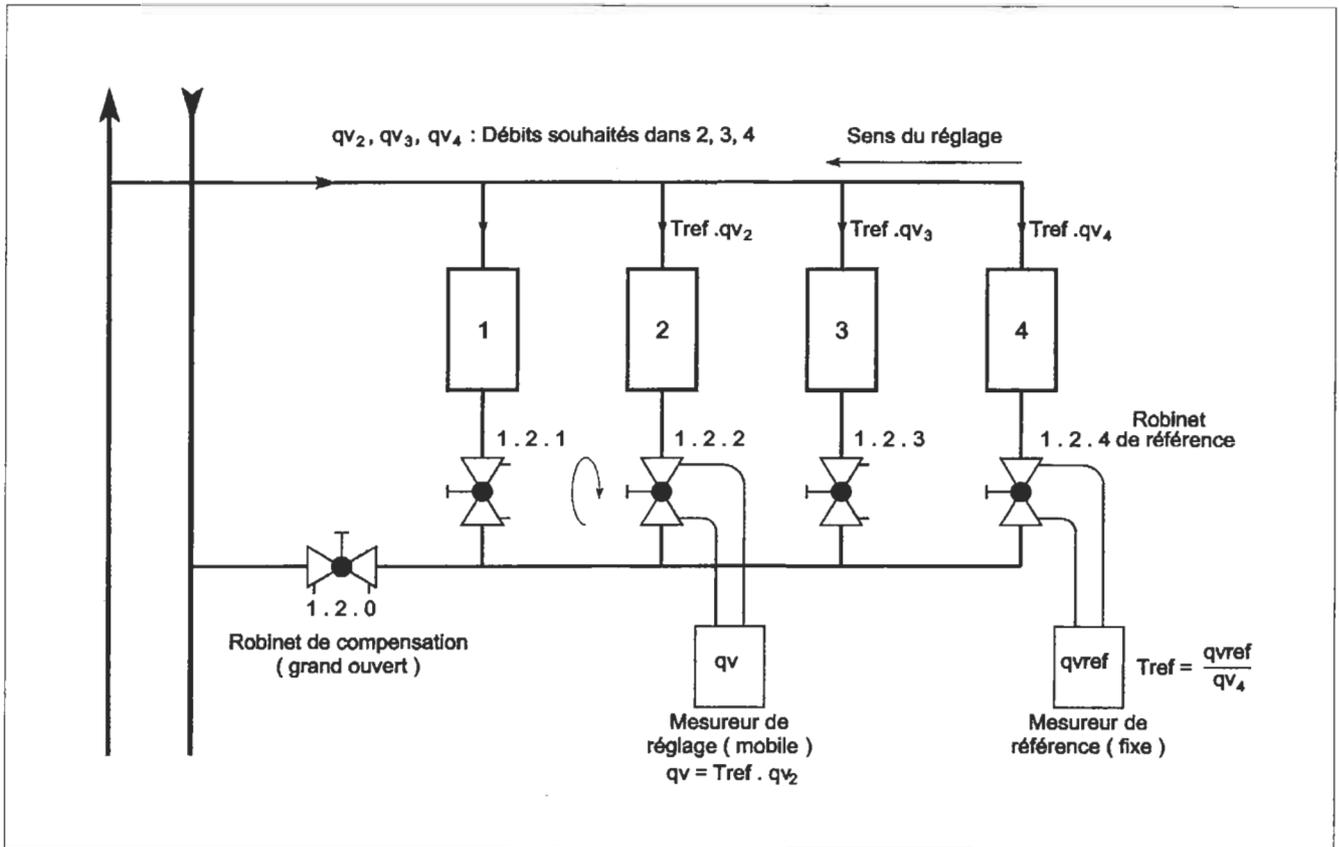


Figure 5.5.4.R. : Équilibrage d'un module par la méthode proportionnelle (réglage du robinet n° 2).

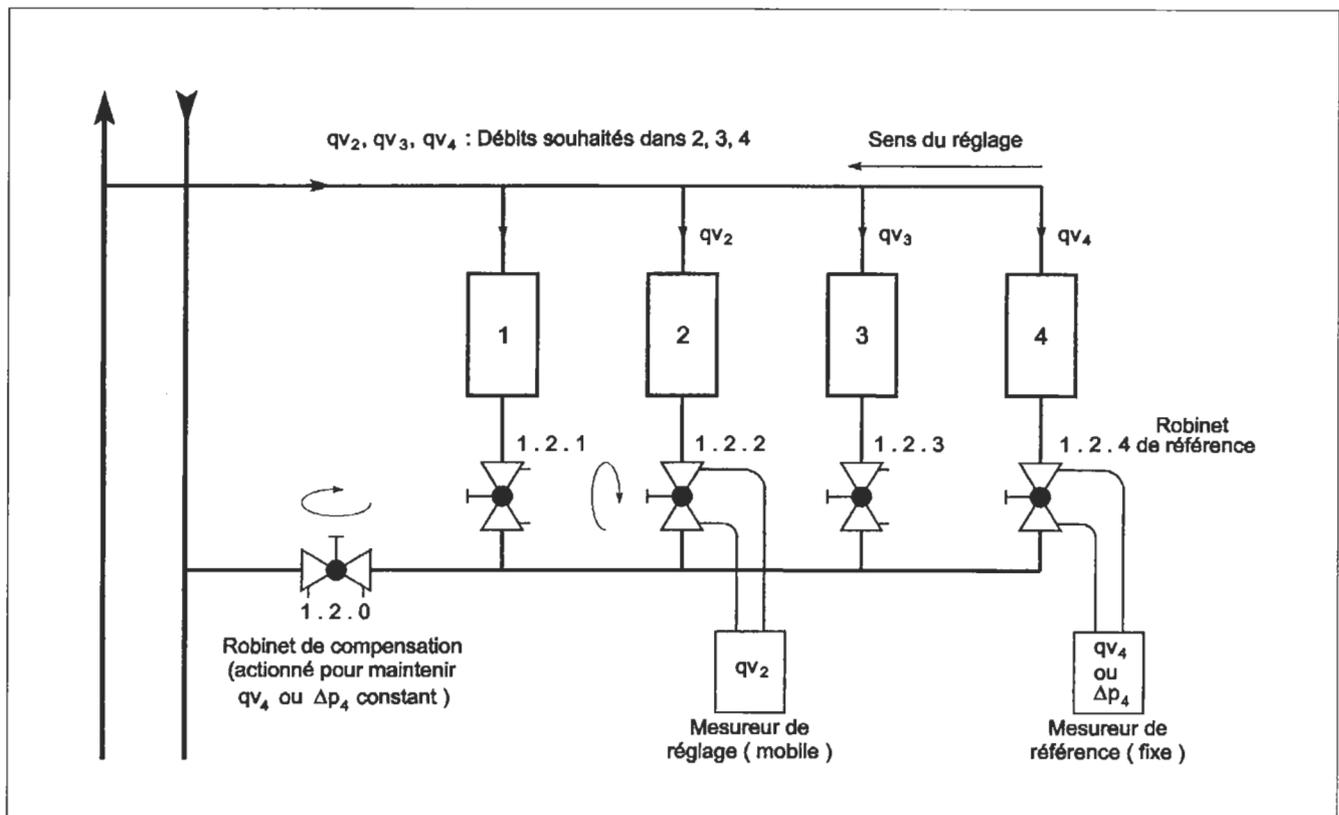


Figure 5.5.4.S. : Équilibrage d'un module par la méthode compensée (réglage du robinet n° 2).

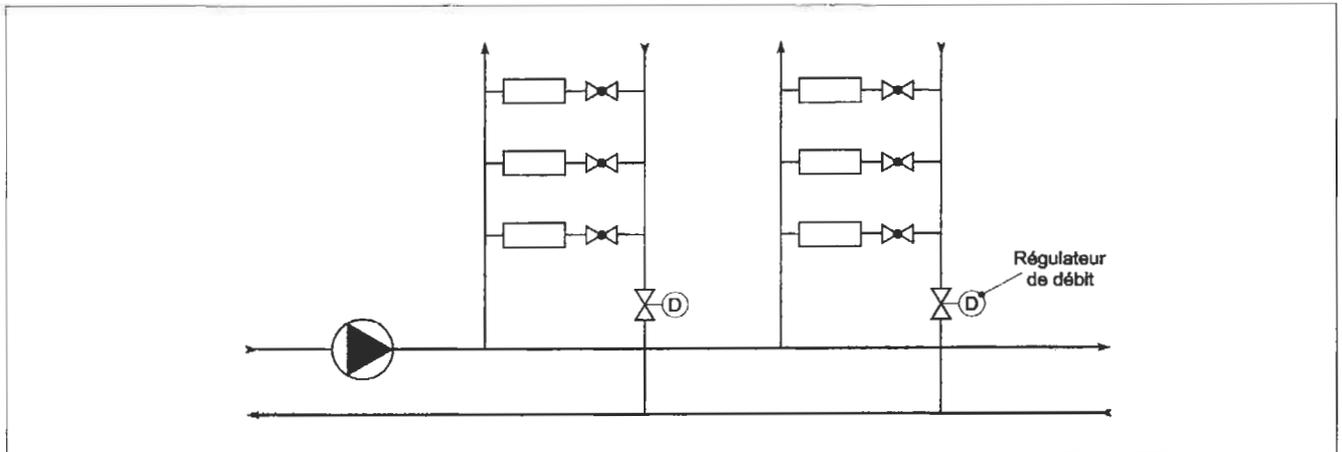


Figure 5.5.5.A. Réseau de distribution dont le premier niveau est équilibré par des régulateurs de débit.

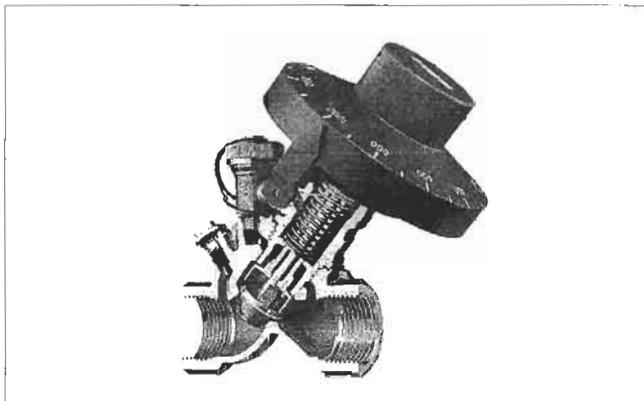


Figure 5.5.5.B. Régulateur de débit automatique (photo OVENTROP).

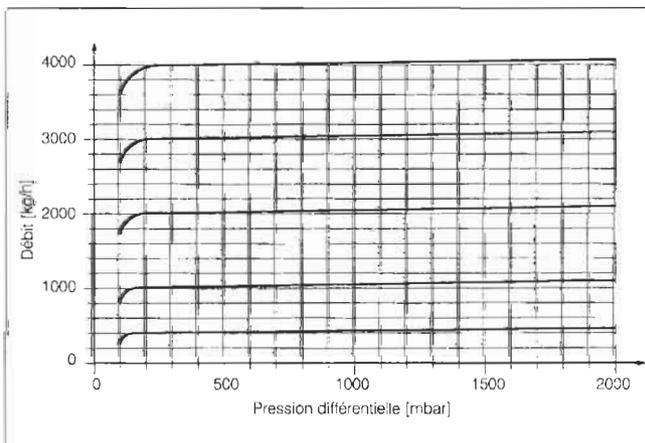


Figure 5.5.5.C. Diagramme d'un régulateur de débit DN 40 (d'après document OVENTROP).

Elle consiste à mesurer les températures d'entrée et de sortie des échangeurs. Contrairement aux autres méthodes, les mesures sont réalisables uniquement pendant la période de fonctionnement de l'installation et de préférence aux moments où les charges sont les plus élevées. Cette contrainte rend la planification des tâches très difficile. Elle impose deux interventions différentes sur les installations associant réseau chaud et réseau froid comme par exemple les systèmes à ventilo-convecteurs à quatre tubes.

Elle semble peu applicable aux réseaux d'eau glacée sur lesquels les écarts de température sont très réduits (4 à 6 [K] en régime nominal).

● Principe

- La température de consigne de la production est rendue fixe si elle est asservie à la température extérieure. Les vannes de régulation terminales sont mises en marche forcée, grandes ouvertes.
- Le débit de la pompe est réduit afin d'augmenter les écarts de température aller-retour ($\Delta\theta$).
- Pour le premier niveau d'équilibrage, les $\Delta\theta$ des colonnes sont comparés au $\Delta\theta$ général du réseau.
- Pour le niveau 2, les $\Delta\theta$ des branches sont comparés au $\Delta\theta$ du pied de colonne et ainsi de suite jusqu'aux échangeurs.

Un $\Delta\theta$ de colonne supérieur au $\Delta\theta$ général est révélateur, probablement, d'un manque de débit dans cette colonne. Au prix de bon nombre d'hypothèses et par simplicité, on admet que le débit est inversement proportionnel au $\Delta\theta$:

$$T = \frac{\text{Débit mesuré}}{\text{Débit souhaité}} = \frac{\Delta\theta \text{ général}}{\Delta\theta \text{ colonne}}$$

En supposant la perte de charge du robinet constante, on a :

$$K_v = k \cdot q_v$$

$$\frac{K_v \text{ initial}}{K_v \text{ souhaité}} = \frac{\text{Débit mesuré}}{\text{Débit souhaité}} = T$$

D'où finalement :

$$K_v \text{ souhaité} = K_v \text{ initial} \cdot \frac{\Delta\theta \text{ colonne}}{\Delta\theta \text{ général}}$$

5.5.5. Solution alternative

Plutôt que d'ajuster manuellement les résistances hydrauliques indispensables à l'équilibrage au moyen de robinets de réglage statiques, on installe **des régulateurs de débit** automoteurs. Ceux-ci créent exactement et en permanence les résistances hydrauliques nécessaires pour obtenir les débits souhaités (figure 5.5.5.A).

Le débit, en traversant un ajutage, produit une pression différentielle qui s'applique de part et d'autre d'une membrane. La force résultante s'oppose à celle d'un ressort taré selon la valeur de consigne désirée. Le clapet est en équilibre lorsque ces deux forces sont égales. Si le débit tend à augmenter par exemple, la Δp sur la membrane s'accroît et la force résultante devient supérieure à celle du ressort. Le clapet se déplace vers la fermeture jusqu'à trouver un nouvel équilibre des forces (voir figure 5.5.5.B.).