

4.1. PERTES DE CHARGE

► 4.1.1. DÉFINITION

Le déplacement d'un fluide dans une canalisation implique l'existence d'une force qui engendre son mouvement. Cette force résulte d'une pression en amont du réseau, qui est couramment appelée la hauteur de charge ou, plus simplement, la charge par analogie à la hauteur d'une colonne d'eau égale à la dénivellation.

Cette hauteur de charge est donc variable suivant les endroits du circuit. De plus, sous l'effet du frottement du fluide sur les parois des canalisations et des obstacles rencontrés, cette charge initiale diminue tout au long du parcours.

On parle ainsi de pertes de charge. Elles se mesurent en Pascal (Pa) ou en mm de colonne d'eau (1 mm CE = 9,81 Po ; 1 bar = 10⁵ Po). Les pertes de charge dépendent du matériau, du débit, de la forme du tracé, du diamètre et de la longueur des canalisations.

On distingue les pertes de charge par frottement, et les pertes de charge singulières dues aux accidents de parcours et aux obstacles (coudes, vannes, tés...).

Dans un circuit donné, les pertes de charge totales sont égales à la somme des pertes de charge élémentaires de chaque tronçon qui compose ce circuit.

► 4.1.2. LES PERTES DE CHARGE PAR FROTTEMENT

Elles sont données par la formule :

$$J = \frac{\lambda}{d} \rho \frac{v^2}{2} \quad (\text{en Po/m})$$

Formule dans laquelle :

- λ est le coefficient de perte de charge linéique, nombre sans unité, donné par la formule de Colebrook (1) valable en écoulement turbulent, lisse ou rugueux.
- ρ est la masse volumique du fluide en kg/m³ (pour l'eau $\rho = 1\,000$ kg/m³).

(1) Formule de Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\epsilon/d}{3,72} \right)$$

ϵ = coefficient de rugosité en m ($\epsilon = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m pour les tubes en cuivre)

$\text{Re} = \frac{vd}{\nu}$ nombre de Reynolds (sans unité) avec :

ν = viscosité cinématique en m²/s ($\nu = 0,36 \cdot 10^{-6}$ m²/s pour l'eau à 80 °C)

- v est la vitesse du fluide en m/s.

- d est le diamètre intérieur en m.

Le calcul est complexe ; aussi, les installateurs utilisent des abaques, telles que celle présentée en figure 8. Cette abaque donne les pertes de charge par frottement J en Pa/m qu'il faut multiplier par la longueur de la canalisation pour avoir la perte de charge par frottement d'une portion de circuit donné.

► 4.1.3. LES PERTES DE CHARGE SINGULIÈRES

Elles sont données par la formule :

$$Z = \zeta \rho \frac{v^2}{2} \quad (\text{en Pascal})$$

- $\rho v^2/2$ est obtenu par le calcul, ou directement sur l'abaque de la figure 8.

- ζ (dzéta) est un coefficient sans dimension qui caractérise un accident de parcours.

On trouvera au tableau 13 la liste des principaux coefficients ζ .

Les pertes de charge dues aux vannes de réglage ou de régulation sont des pertes de charge singulières.

Leur coefficient ζ varie avec le degré d'ouverture de la vanne ; il doit donc être connu pour chaque position de l'organe de réglage.

Les fabricants donnent les caractéristiques des vannes dans leurs documentations techniques.

Plutôt que le coefficient ζ , c'est souvent un coefficient k_v qui est donné. La perte de charge singulière de la vanne s'exprime alors :

$$Z = 100\,000 \frac{Q_v^2}{k_v^2} \quad (\text{en Pascal})$$

Formule dans laquelle :

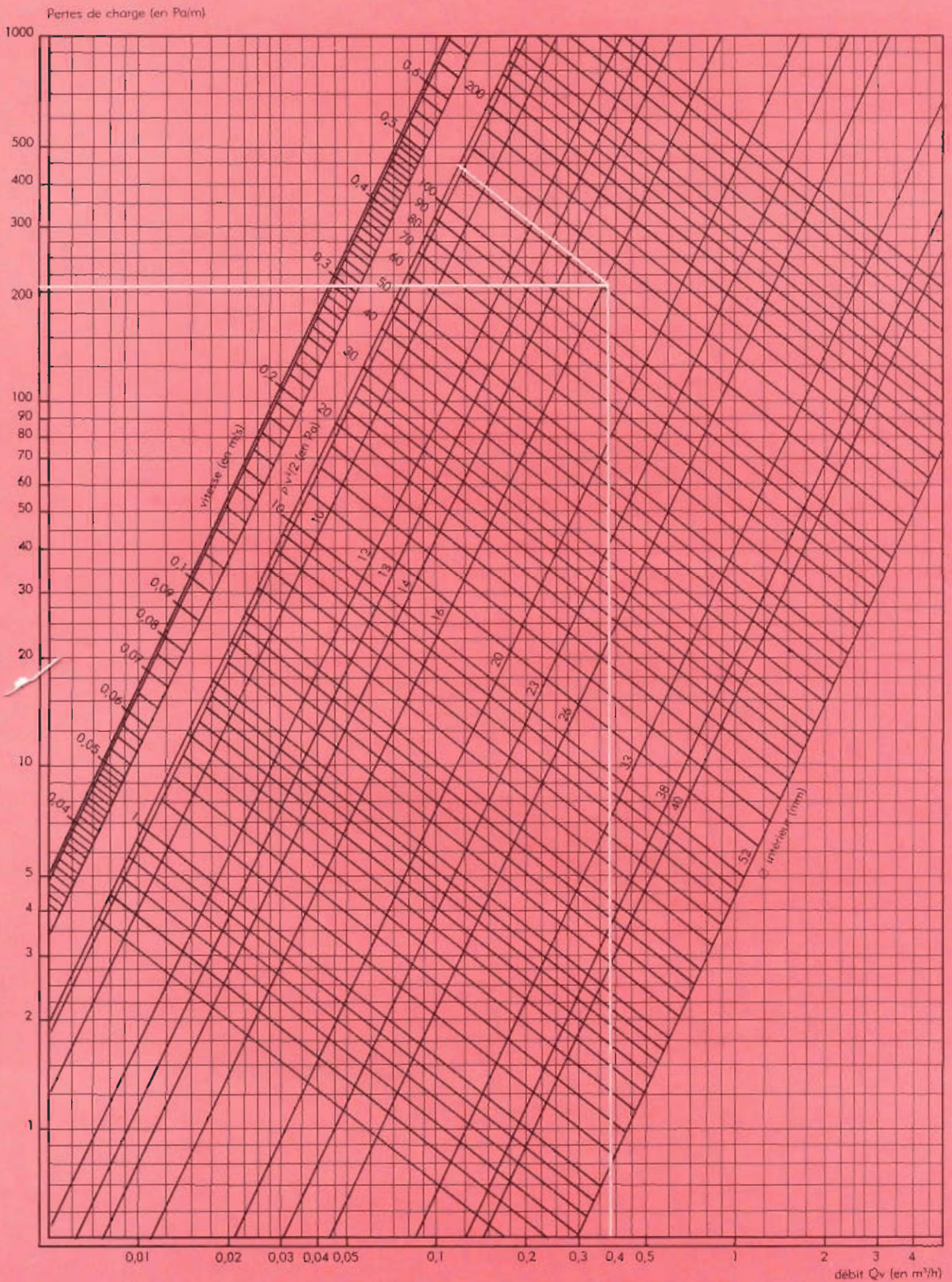
- Q_v est le débit en m³/h

- k_v est le coefficient de débit fourni par le fabricant. C'est le débit (m³/h) qui passe dans la vanne, pour une perte de charge de 1 bar (10⁵ Pa).

Les caractéristiques des vannes peuvent être également fournies sous la forme de diagrammes débit/pertes de charge à lecture directe.

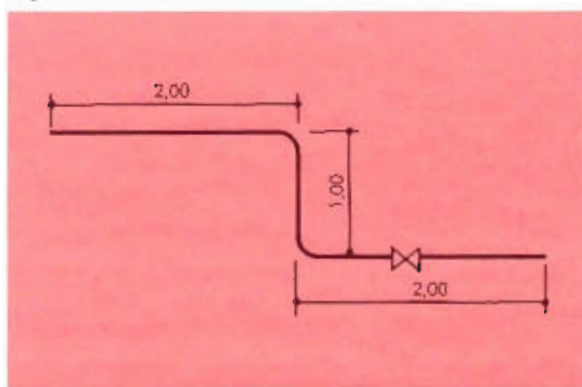
Figure 8.

Abaque des pertes de charge par frottement



► 4.1.4. EXEMPLE DE CALCUL DE PERTES DE CHARGE

Figure 9.



La figure 9 montre une canalisation de diamètre intérieur 16 mm comprenant deux coudes et une vanne à passage direct ; elle véhicule un débit de 378 l/h. Le calcul des pertes de charge est le suivant :

- Pertes de charge par frottement : sur l'abaque 8, on lit, pour un débit de 0,378 m³/h et un diamètre intérieur de 16 mm, une perte de charge de 210 Pa/m.

Le circuit ayant une longueur totale de 5 m, les pertes de charge par frottement sont de : $5 \times 210 = 1\,050$ Pa.

- Pertes de charge singulières : elles sont provoquées par les deux coudes et par la vanne. Les coefficients ζ sont lus sur le tableau 13 :

1 coude	0,5
1 coude	0,5
1 vanne à passage direct	1,0
Total des coefficients ζ^*	2,0

On lit sur l'abaque 8 pour un diamètre intérieur de 16 mm et un débit de 0,378 m³/h

$$\rho \frac{v^2}{2} = 130 \text{ Pa}$$

Les pertes de charge singulières sont donc égales à $2 \times 130 = 260$ Pa.

- Les pertes de charge totales de la canalisation s'élèvent à $1\,050 + 260 = 1\,310$ Pa.

Tableau 13.

Pertes de charge singulières			
Désignation	Schéma	Repère	ζ
Coude		r/d	
		1	0,5
		2	0,3
		4	0,25
Té-départ		A B	0 1,5
Té-amenée		A B	0,5 2
Té-séparation		A B	3 3
Té-convergence		A B	3 3
Té-oblique		A B	0 0,5
Vanne à passage direct			1
Vanne 3 voies			4
Robinet thermostatique			4
Radiateur			3
Convecteur			1,5
Chaudière			3

► 4.1.5. CAS D'UNE INSTALLATION AVEC CHAUFFERIE EN TERRASSE

Dans le cas d'une chaufferie en terrasse, c'est-à-dire placée au point le plus haut de l'installation, il faut tenir compte, pour le calcul des pertes de charge, de la contre-force hydromotrice due à la différence de densité entre l'eau chaude qui descend dans les étages et l'eau refroidie qui remonte. Cette force est prise en compte sous la forme d'une perte de charge supplémentaire estimée à 125 Pa par mètre de dénivellation.

4.2. MÉTHODE DE CALCUL DU RÉSEAU

Le cas traité ici est relatif au cas le plus souvent rencontré dans les petites installations du type pavillon ou petit collectif : l'installation bi-tube avec pompe.

Le tracé du réseau, la puissance et la position des radiateurs étant déterminés, le calcul du réseau va consister à calculer de proche en proche les diamètres des différents tronçons en respectant les règles suivantes :

- la hauteur de charge de la pompe doit être égale à la perte de charge du circuit le plus défavorisé défini en 4.4 ;
- les pertes de charge des différents circuits alimentant chaque radiateur, doivent être aussi

voisines que possible. Cette valeur est celle du circuit le plus défavorisé qui sert de référence à toute l'installation. Les autres circuits à moindre perte de charge intrinsèque seront dimensionnés de façon à ce que leur perte de charge soit égale à cette perte de charge de référence.

- les diamètres résultant des colculs doivent éventuellement être corrigés de façon à ce que la vitesse de circulation du fluide ne soit pas supérieure à la vitesse maximale définie en 1.2.2.

Pratiquement, le colcul va se dérouler de la manière suivante :

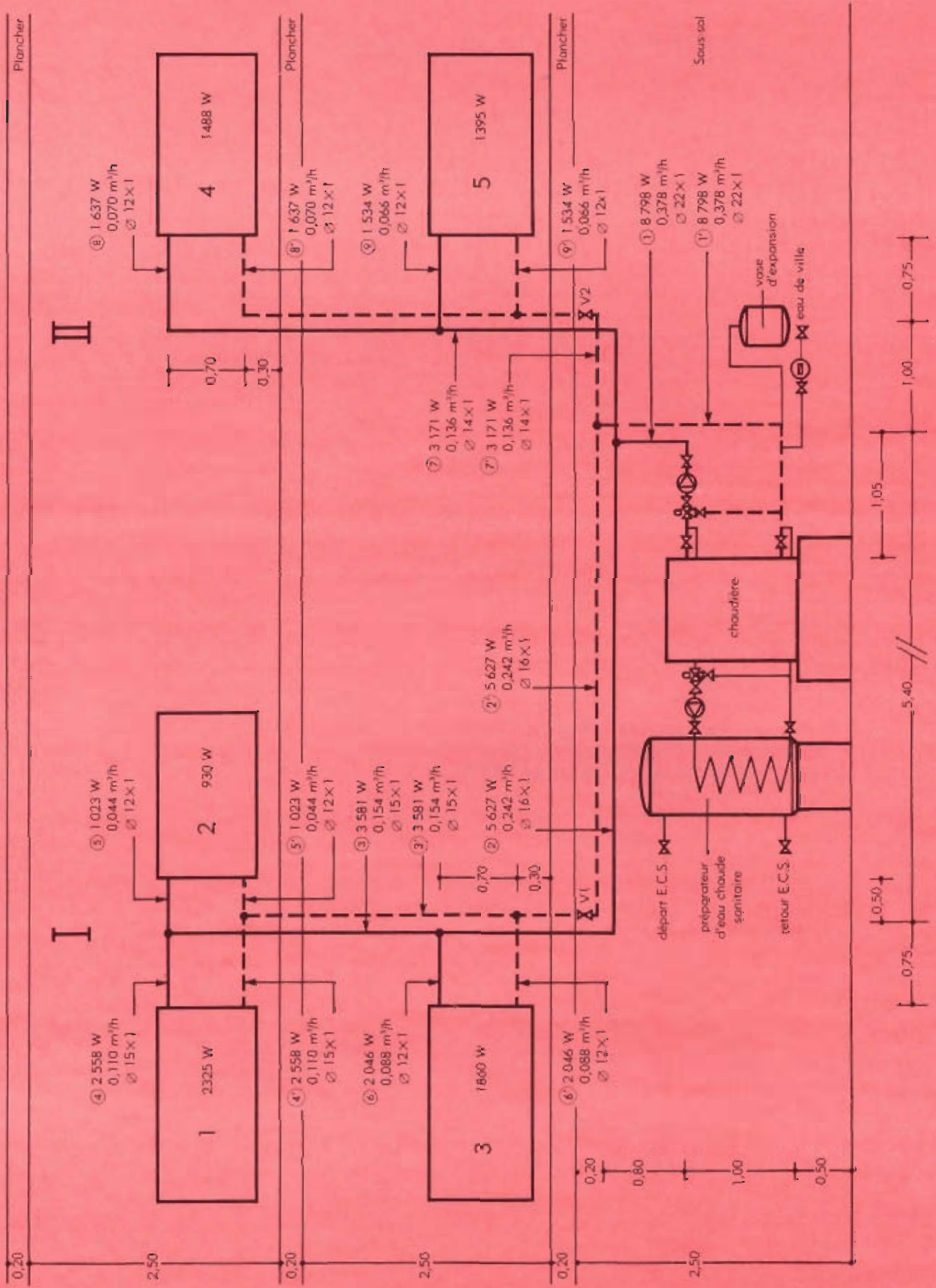
Repérage de différents tronçons Calcul des puissances et débits dans chaque tronçon	Paragraphe 4.3
Recherche du circuit le plus défavorisé Choix de la pompe	Paragraphe 4.4
Calcul des diamètres Pour chaque circuit, en commençant par le plus défavorisé : <ul style="list-style-type: none">• Estimation des pertes de charge par frottement J• Détermination des diamètres provisoires des tronçons en fonction de J• Calcul des pertes de charge totales réelles, les vannes de régulation et vannes d'équilibrage étant grandes ouvertes• Calcul définitif d'exécution : correction des diamètres en fonction des pertes de charge totales réelles• Equilibrage : Pour chaque vanne du circuit, en commençant par le plus proche de la chaufferie :<ul style="list-style-type: none">– calcul de la différence entre la hauteur de charge disponible et la perte de charge du circuit– détermination du réglage de la vanne pour créer une perte de charge s'approchant de cette différence sans la dépasser	Paragraphe 4.5

L'illustration de cette méthode est donnée à travers un exemple d'installation simplifiée comprenant cinq radiateurs répartis sur deux

colonnes et un système de production d'eau chaude intégré. Le schéma d'installation est représenté en figure 10.

Figure 10.

Schéma d'installation



4.3. CALCUL DES PUISSANCES ET DES DÉBITS

Sur la figure 10 sont repérés chaque tronçon, chaque vanne et chaque corps de chauffe ; les tronçons allers sont numérotés de 1 à 9 et les retours de 1' à 9' ; les vannes de réglage sont désignées V1 et V2, les radiateurs, enfin, sont repérés de 1 à 5, ils sont munis de tés de réglage T1 à T5 (non représentés sur la figure).

Dans chaque tronçon, la puissance a été calculée conformément au mode de calcul décrit au chapitre 2.

La puissance P d'un tronçon donné est égale à la puissance des corps de chauffe desservis augmentée des pertes thermiques dans les canalisations telles qu'estimées au paragraphe 2.4 ; dans l'exemple, la chaudière et une partie de la distribution étant hors du volume chauffé, les pertes sont estimées à 10 % de la puissance. Elles seront calculées exactement, ultérieurement (§ 4.7).

On calcule ensuite le débit dans chaque tronçon.

Le débit d'eau Q_v est calculé à partir de la puissance P en Watt à véhiculer et l'écart de température δt entre le départ et le retour de l'eau dans les radiateurs d'après la formule :

$$Q_v = \frac{P}{\rho \cdot C_p \cdot \delta t} \quad (\text{en m}^3/\text{s})$$

Formule dans laquelle :

- ρ est la masse volumique du fluide
- C_p est la capacité thermique massique pour l'eau $\rho C_p = 4\,185\,000 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$.

Dans la pratique, les calculs sont faits en m^3/h . Il faut choisir l'écart de température δt de façon optimale. Trop élevé, cet écart conduirait à des températures de départ trop hautes ($\geq 100 \text{ }^\circ\text{C}$) ou à des corps de chauffe plus importants.

Trop faible, il imposerait des débits très élevés conduisant à des diamètres de tubes plus grands et à un surdimensionnement de la pompe.

La moyenne entre la température de départ et celle du retour est environ égale à la température maximale des corps de chauffe déterminée au paragraphe 2.2.2.

En général, on choisit un écart de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($90/70 \text{ }^\circ\text{C}$, par exemple) qui convient fort bien dans les installations de petite ou moyenne puissance.

Le tableau 14 donne les débits en fonction de la puissance transportée dans un tronçon donné.

Dans l'exemple cité en figure 10, le tronçon 5 véhicule une puissance de $1\,023 \text{ W}$ égale à la puissance du radiateur 2 majorée de 10 % pour tenir compte des pertes dans les canalisations. Pour une chute de température δt de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, cela correspond à un débit de $0,044 \text{ m}^3/\text{h}$.

Comme pour les puissances, le débit d'un tronçon amont est égal à la somme des débits de chaque tronçon qui en est issu.

Ainsi, de proche en proche, on a déterminé le débit global en sortie de chaudière et la puissance totale correspondante relative à l'ensemble de l'installation.

Ces deux paramètres caractérisent le tronçon 1 dont la puissance est de $8\,798 \text{ W}$ et le débit est de $0,378 \text{ m}^3/\text{h}$.

Ces chiffres ne concernent que le réseau de chauffage et ne prennent donc pas en compte la puissance nécessaire à la production d'eau chaude.

Tableau 14.

Puissance (W)	Débits (m ³ /h)				
	$\delta t = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\delta t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\delta t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\delta t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\delta t = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$
200	0,017	0,011	0,009	0,006	0,004
300	0,026	0,017	0,013	0,009	0,006
400	0,034	0,023	0,017	0,011	0,008
500	0,043	0,029	0,022	0,014	0,010
750	0,065	0,043	0,032	0,022	0,014
1 000	0,086	0,057	0,043	0,029	0,019
1 250	0,108	0,072	0,054	0,036	0,024
1 500	0,129	0,086	0,065	0,043	0,029
1 750	0,151	0,100	0,075	0,050	0,033
2 000	0,172	0,115	0,086	0,057	0,038
2 250	0,194	0,129	0,097	0,065	0,043
2 500	0,215	0,143	0,108	0,072	0,048
2 750	0,237	0,158	0,118	0,079	0,053
3 000	0,258	0,172	0,129	0,086	0,057
3 500	0,301	0,201	0,151	0,100	0,067
4 000	0,344	0,229	0,172	0,115	0,076
4 500	0,387	0,258	0,194	0,129	0,086
5 000	0,430	0,287	0,215	0,143	0,096
6 000	0,516	0,344	0,258	0,172	0,115
7 000	0,602	0,401	0,301	0,201	0,134
8 000	0,688	0,459	0,344	0,229	0,153
9 000	0,774	0,516	0,387	0,258	0,172
10 000	0,860	0,573	0,430	0,287	0,191
12 500	1,075	0,717	0,538	0,358	0,239
15 000	1,290	0,860	0,645	0,430	0,287
17 500	1,505	1,004	0,753	0,502	0,335
20 000	1,720	1,147	0,860	0,573	0,382
25 000	2,151	1,434	1,075	0,717	0,478
30 000	2,581	1,720	1,290	0,860	0,573
35 000	3,011	2,007	1,505	1,004	0,669
40 000	3,441	2,294	1,720	1,147	0,765
45 000	3,871	2,581	1,935	1,290	0,860
50 000	4,301	2,867	2,151	1,434	0,956
60 000	5,161	3,441	2,581	1,720	1,147
70 000	6,022	4,014	3,011	2,007	1,338
80 000	6,882	4,588	3,441	2,294	1,529
100 000	8,602	5,735	4,301	2,867	1,912
125 000	10,753	7,168	5,376	3,584	2,389
150 000	12,903	8,602	6,452	4,301	2,867
200 000	17,204	11,470	8,602	5,735	3,823

4.4. CHOIX DE LA POMPE

Le rôle de la pompe consiste à fournir au fluide la hauteur de charge nécessaire pour assurer le débit voulu et pour vaincre la résistance du circuit. Le choix d'une pompe se fait donc en fonction de la perte de charge du réseau qui est lui-même dimensionné par référence à la hauteur de charge fournie par la pompe.

On sort de cette impasse en fixant, à l'estime, la perte de charge du circuit le plus défavorisé du réseau à une valeur jugée raisonnable qui permettra de dimensionner la pompe.

Les valeurs couramment admises se situent entre 200 et 400 Pa/m.

"Plus défavorisé" signifie "dont les pertes de charge sont les plus élevées". Ne connaissant pas encore ces dernières, on comprendra "dont la longueur est la plus grande".

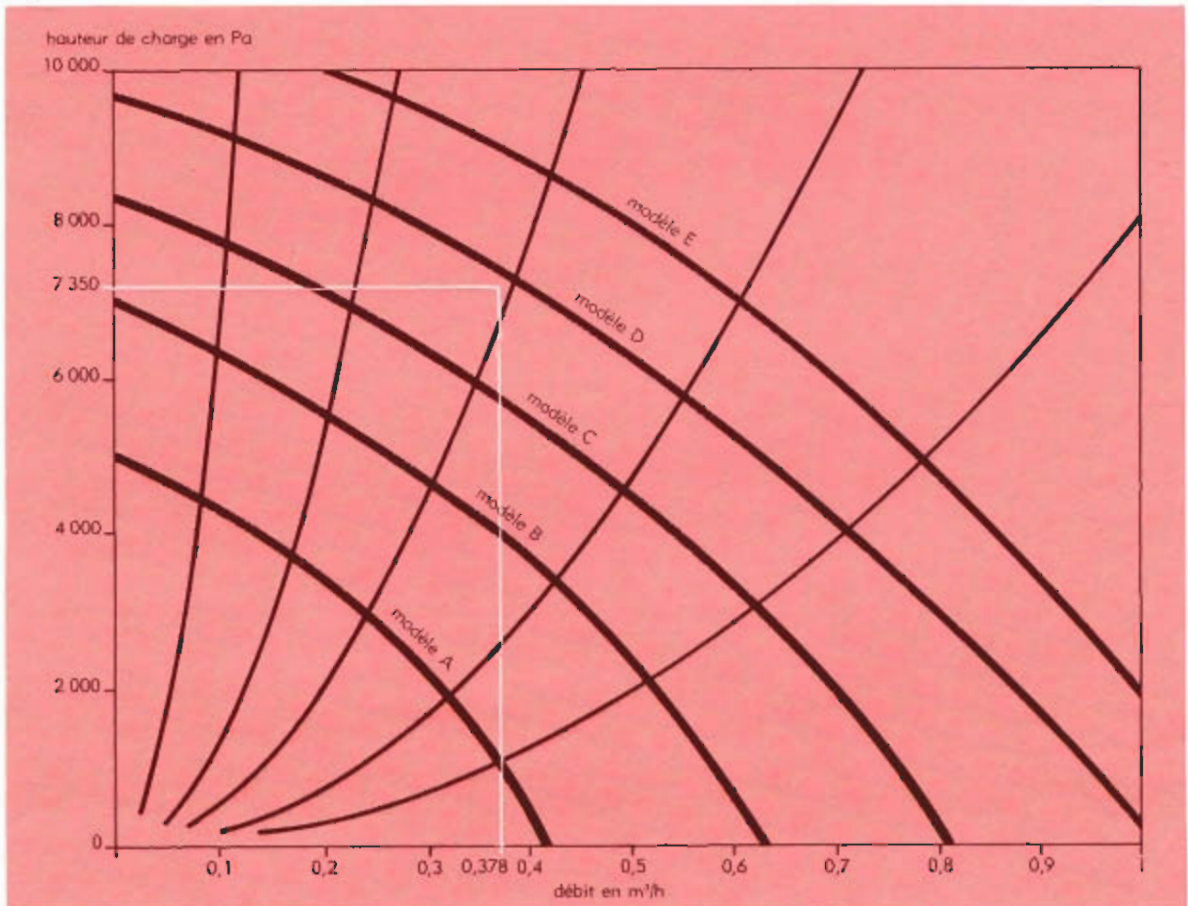
Dans l'exemple de la figure 10, le circuit le plus long est celui qui alimente le radiateur 1, il comprend les tronçons 1, 2, 3, 4, 4', 3', 2', 1' et mesure 24,5 mètres de long. Si l'on choisit une

perte de charge moyenne de 300 Pa/m, la perte de charge estimée correspondant au circuit le plus défavorisé sera de $300 \times 24,5 = 7\,350$ Pa. On choisit sur le catalogue du constructeur une pompe dont la courbe débit/pression passe le plus près possible ou-dessus du point $0,378$ m³/h, 7 350 Pa, comme illustré sur la figure 11. Dans l'exemple cité on retiendra le modèle D.

Il n'est pas judicieux de surdimensionner la pompe qui risquerait alors d'être la source de nuisances acoustiques et d'une usure prématurée des différents organes de réglage. Pour choisir définitivement la pompe, il peut être intéressant d'attendre d'avoir calculé exactement les pertes de charge du circuit le plus défavorisé.

Dans certaines chaudières compactes, cependant, la pompe de circulation est incluse, on utilisera dans ce cas la hauteur de charge propre à cette pompe.

Figure 11.



4.5. CALCUL DES DIAMÈTRES

► 4.5.1. CIRCUIT LE PLUS DÉFAVORISÉ

Le calcul commence par le circuit le plus défavorisé (tronçons 1, 2, 3, 4, 4', 3', 2', 1') et se poursuit de proche en proche par les circuits ou dérivations de moins en moins "défavorisés".

La hauteur de charge, exprimée en Pascal, disponible sur ce circuit, est la hauteur de charge de la pompe précédemment calculée en 4.4, soit 7 350 Pa. Cette hauteur de charge va servir à vaincre l'ensemble des pertes de charge par frottement et singulières de ce circuit dont la longueur est de 24,5 m.

• Diamètres provisoires

On admet, dans un premier temps, que les pertes de charge par frottement représentent 2/3 des pertes de charge totales.

On fait le calcul sur les seules pertes de charge par frottement puisque l'on ne connaît pas les pertes de charge singulières.

On évalue donc les pertes de charge par frottement moyennes par mètre J du circuit le plus défavorisé :

$$J = \frac{\text{Hauteur de charge} \times 2/3}{\text{longueur du circuit}} \quad (\text{en Pa/m})$$

Soit, dans l'exemple :

$$J = \frac{2}{3} \times \frac{7\,350}{24,5} = 200 \text{ Pa/m}$$

Le diamètre de chaque tronçon est évalué grâce à l'abaque figurant à la figure 8. Connaissant J et Q_v (le débit), on lit sur l'abaque le diamètre dont la courbe passe le plus près du point dont l'abscisse est Q_v et l'ordonnée J .

Par exemple pour les tronçons 1 et 1', on a :
perte de charge par frottement : $J = 200 \text{ Pa/m}$;
débit : $Q_v = 0,378 \text{ m}^3/\text{h}$.

Sur l'abaque 8, à l'intersection de l'axe vertical passant par $0,378 \text{ m}^3/\text{h}$ et de l'axe horizontal passant par 200 Pa/m , on se trouve à proximité de la courbe du diamètre intérieur 16 mm.

On procède de même pour les autres tronçons du circuit. Les diamètres provisoires sont portés dans un tableau tel que le tableau 15a.

Les pertes de charge exactes correspondant aux diamètres provisoires, par frottement et singulières, sont ensuite calculées, comme décrit en 4.1, pour vérifier les hypothèses de base. Elles sont portées au tableau 15a.

– Pertes de charge par frottement exactes :

Exemple : tronçons 1 et 1' :

On se réfère à l'abaque 8 pour un diamètre intérieur de 16 mm et un débit de $0,378 \text{ m}^3/\text{h}$ on trouve : $J = 210 \text{ Pa/m}$.

La perte de charge par frottement totale pour ce tronçon d'une longueur de 4,70 m est donc de : $210 \times 4,7 = 987 \text{ Pa}$.

– Pertes de charge singulières exactes :

On se réfère au tableau 13 pour le calcul des coefficients ζ des pertes de charge singulières ordinaires qui sont obtenues conformément au calcul du paragraphe 4.1.3.

Exemple : tronçons 1 et 1' :

deux coudes	1,0
quatre vannes	4,0
la chaudière	3,0
une vanne 3 voies	4,0
Total des coefficients ζ	12,0

Le module $pv^2/2$, pour le débit et le diamètre considérés, lu sur l'abaque 8 étant de 130, les pertes de charge singulières exactes sont donc de $130 \times 12 = 1\,560 \text{ Pa}$.

Les principes de calcul qui ont été retenus sont les suivants :

- Les pertes de charge singulières dues aux changements de direction (tés) sont comptées au départ sur les tronçons aller, à l'arrivée sur les tronçons retour.

- Les parties de circuit comprenant un radiateur ont été calculées avec un coefficient ζ de 8,5 (radiateur : 3, robinet thermostatique : 4, trois coudes : 1,5).

- Les pertes de charge singulières dues aux vannes et tés de réglage sont trouvées en lecture directe sur les abaques fournies par les fabricants, les vannes étant toujours considérées comme grandes ouvertes. Ainsi, dans le tronçon 2', les pertes de charge singulières dues à la vanne V1 sont égales à 1 464 Pa.

— **Pertes de charge totales exactes :**

Après avoir fait le calcul de proche en proche pour chaque tronçon du circuit le plus défavorisé, on arrive à une perte de charge totale (par frottement + singulière) pour ce circuit le plus défavorisé de 10 100 Pa (tableau 15a).

• **Diamètres définitifs**

Si, comme c'est le cas ici, des écarts importants sont constatés entre la hauteur de charge disponible et les pertes de charge d'un circuit, on procède à des corrections de diamètre sur un ou plusieurs tronçons.

Ainsi la valeur de 10 100 Pa est bien trop grande par rapport au 7 350 Pa fournis par la pompe qui a été choisie. Il faut, par conséquent, modifier les diamètres de certains

tronçons et recommencer le calcul. En général, on augmente les diamètres des tronçons qui ont les pertes de charge les plus importantes. Ces valeurs sont reportées dans le tableau 15b.

Le nouveau calcul aboutit à des pertes de charges totales de 7 330 Pa qui est une valeur très proche de celle qui avait été initialement projetée de 7 350 Pa. En conséquence, on ne changera pas la pompe dans cet exemple.

Mais, dans certains cas, les calculs définitifs amènent à modifier les paramètres de la pompe pour les ajuster aux nouvelles valeurs trouvées. Par ailleurs, aucun réglage complémentaire des vannes V1 ou T1 n'est nécessaire, la différence entre la hauteur de charge disponible (7 350 Pa) et la perte de charge du circuit (7 330 Pa) étant très faible.

Tableau 15 a.

Circuit défavorisé radiateur 1 : Calcul des diamètres provisoires													
Tronçon ou vanne	Longueur (m)	Puissance (W)	Débit (m ³ /h)	Diamètre intérieur (mm)	Vitesse (m/s)	$\rho \frac{v^2}{2}$ (Pa)	Pertes de charge						Réglage des vannes
							Par frottement		Singulières		Totales		
							(Pa/m)	(Pa)	ζ	(Pa)	(Pa)	(Pa/m)	
1 et 1'	4,7	8 798	0,378	16	0,52	130	210	987	12,0	1 560	2 547	542	
2 et 2'	12,9	5 627	0,242	14	0,44	100	190	2 451	7,0	700	3 151	244	
V1		5 627	0,242							1 464	1 464		ouverte
3 et 3'	5,4	3 581	0,154	12	0,38	70	170	918	0,5	35	953	176	
4 et 4'	1,5	2 558	0,110	10	0,39	75	240	360	14,5	1 087	1 447	965	
T1		2 558	0,110							538	538		ouverte
Total	24,5							4 716		5 384	10 100	412	

Tableau 15 b.

Circuit défavorisé radiateur 1 : Calcul des diamètres définitifs													
1 et 1'	4,7	8 798	0,378	20	0,33	55	75	352	12,0	660	1 012	215	
2 et 2'	12,9	5 627	0,242	14	0,44	100	190	2 451	7,0	700	3 151	244	
V1		5 627	0,242							1 464	1 464		ouverte
3 et 3'	5,4	3 581	0,154	13	0,32	50	120	648	0,5	25	673	125	
4 et 4'	1,5	2 558	0,110	13	0,23	27	67	100	14,5	392	492	328	
T1		2 558	0,110							538	538		ouverte
Total	24,5							3 551		3 779	7 330	299	

► 4.5.2. AUTRES CIRCUITS

On poursuit le calcul par le circuit immédiatement moins défavorisé ; dans l'exemple choisi, il s'agit de celui qui alimente le radiateur 2.

Lorsqu'un circuit, comme c'est le cas ici, a des tronçons communs avec un autre circuit précédemment calculé, on connaît déjà les diamètres et les pertes de charges des parties communes.

On calcule les diamètres des autres tronçons du circuit de la même façon que pour le circuit le plus défavorisé en tenant compte d'une hauteur de charge disponible pour ces tronçons égale à la hauteur de charge de la pompe diminuée des pertes de charge des parties communes.

Exemple : circuit alimentant le radiateur 2. Ce circuit comprend les tronçons 1, 2, 3, 5, 5', 3', 2', 1'. Les tronçons 1, 1', 2, 2', 3, 3' ont déjà été calculés. On reporte simplement les pertes de charge de ces tronçons communs dans le tableau 16a première ligne.

Ces tronçons communs ont une perte de charge totale de 6 300 Pa. Il reste donc pour les autres tronçons (5 et 5') une hauteur de charge disponible de $7\,350 - 6\,300 = 1\,050$ Pa pour

une longueur de 1 mètre.

On adapte donc un J moyen de :

$$\frac{2}{3} \times \frac{1\,050}{1} = 700 \text{ Pa/m.}$$

Ceci conduirait à choisir, d'après l'abaque 8, un tube d'un diamètre intérieur inférieur à 10 mm, ce qui est proscrit (§ 1.2.2). C'est donc ce diamètre de 10 mm qui sera retenu malgré sa perte de charge réduite.

Les pertes de charge totales du circuit sont alors de 6 608 Pa (tableau 16a), inférieures aux 7 350 Pa disponibles. Il faudra donc procéder à un réglage avec le té de réglage T2 si l'on ne veut pas que trop d'eau circule dans le radiateur 2 au détriment du 1 (§ 4.6).

On continue le calcul de proche en proche, comme décrit précédemment.

Lorsque l'on calcule une nouvelle dérivation, il est important de commencer par le circuit le plus défavorisé de cette dérivation. Par exemple, après avoir calculé la colonne I, on doit commencer le calcul de la colonne II par le circuit alimentant le radiateur 4 et non le 5.

4.6. ÉQUILIBRAGE

L'équilibrage hydraulique consiste à s'assurer que chaque corps de chauffe reçoit le débit d'eau dont il a besoin, c'est-à-dire que l'eau de chauffage ne passe pas préférentiellement dans certains radiateurs au détriment des autres.

Cette opération, qui intervient en fin de travaux, ne doit pas être négligée car un mauvais équilibrage est une cause importante de malfaçon.

Les organes permettant l'équilibrage sont les tés de réglage posés sur chaque corps de chauffe et les vanes de réglage placées en certains points du réseau : origine du réseau, pied de colonne, embranchements principaux. Les organes d'équilibrage sont placés sur les retours.

Une fois effectué, l'équilibrage ne doit plus pouvoir être dérégulé accidentellement. Notamment, il doit être possible d'isoler les corps de chauffe ou les différents circuits sans modifier le réglage, soit en doublant les organes d'équilibrage par des vanes d'arrêt, soit en utilisant des tés à double réglage. Pour que les débits calculés soient respectés, il faut que tous les circuits alimentant chaque radiateur aient une même perte de charge égale à la hauteur de charge de la pompe. Pour cela, on ajuste la perte de charge des circuits en agissant sur les organes de réglage qu'ils comportent.

Dans l'exemple cité, la perte de charge du circuit alimentant le radiateur 2 (tableau 16a) est insuffisante, il manque à ce réseau une perte de charge de $7\,350 - 6\,608 = 742$ Pa. On dispose, sur ce radiateur, d'un té de réglage (T2) dont la perte de charge à pleine ouverture d'après le fabricant est de 86 Pa.

Pour équilibrer le circuit, il faut augmenter la perte de charge du té de 742 Pa, qui aura alors une perte de charge de $742 + 86 = 828$ Pa.

Le débit dans le té étant de $0,044$ m³/h, on a d'après les caractéristiques données par le fabricant :

- pour une ouverture de la vanne de 4 tours, une perte de charge de 556 Pa,
- pour une ouverture de la vanne de 3,5 tours, une perte de charge de 1 152 Pa.

On choisit, par conséquent, l'ouverture de 4 tours qui provoque la perte de charge la plus proche de 828 Pa que l'on souhaite obtenir (tableau 16b).

Lorsque le circuit comporte plusieurs vannes à régler, on règle d'abord la vanne la plus proche de la chaudière et l'on continue jusqu'à la plus éloignée.

Il est bien sûr possible de retoucher le réglage d'une installation existante en donnant un tour ou deux de vis sur les tés de réglage des radiateurs qui posent des problèmes (pièces trop chaudes ou trop froides). Ces interventions ne peuvent être que très ponctuelles ; il n'existe pas de méthode sûre pour effectuer un équilibrage complet par réglages successifs des corps de chauffe. En effet, le réglage du té d'un corps de chauffe modifie le débit, non seulement de celui-ci, mais également de tous les autres ; une fois que toute l'installation a été visitée, il faut tout recommencer depuis le début.

Certains constructeurs proposent des organes de réglage (vannes et tés) munis de prise de pression différentielle qui permettent d'obtenir une mesure directe du débit et qui facilitent les opérations d'affinage de l'équilibrage.

On trouvera, au tableau 17, un autre exemple de calcul de circuit pour le radiateur 4 avec les équilibrages successifs des vannes et tés de réglage. Le tableau 18 récapitule l'ensemble des calculs et réglages définitifs pour toute l'installation.

Tableau 16 a.

Circuit du radiateur n° 2 : Calcul des diamètres														
Tronçon ou vanne	Longueur (m)	Puissance (W)	Débit (m ³ /h)	Diamètre intérieur (mm)	Vitesse (m/s)	$\rho \frac{v^3}{2}$ (Pa)	Pertes de charge				Réglage des vannes			
							Par frottement		Singulières	Totales				
							(Pa/m)	(Pa)	ζ	(Pa)	(Pa)	(Pa/m)		
1, 2, 3, 3', 2', 1' 5 et 5'	23,0	1 023	0,044	10	0,16	12	48	3 451	48	14,5	2 849	6 300	274	
T2		1 023	0,044								86	86		ouverte
Total	24							3 499		3 109	6 608	275		

Tableau 16 b.

Circuit du radiateur n° 2 : Réglages définitifs														
Tronçon ou vanne	Longueur (m)	Puissance (W)	Débit (m ³ /h)	Diamètre intérieur (mm)	Vitesse (m/s)	$\rho \frac{v^3}{2}$ (Pa)	Pertes de charge				Réglage des vannes			
							Par frottement		Singulières	Totales				
							(Pa/m)	(Pa)	ζ	(Pa)	(Pa)	(Pa/m)		
1, 2, 3, 3', 2', 1' 5 et 5'	23,0	1 023	0,044	10	0,16	12	48	3 451	48	14,5	2 849	6 300	274	
T2		1 023	0,044								556	556		4 tours
Total	24							3 499		3 579	7 078	295		

Tableau 17 a.

Circuit du radiateur n° 4 : Calcul des diamètres													
Tronçon ou vanne	Longueur (m)	Puissance (W)	Débit (m³/h)	Diamètre intérieur (mm)	Vitesse (m/s)	$\rho \frac{v^2}{2}$ (Pa)	Pertes de charge						Réglage des vannes
							Par frottement		Singulières		Totales		
							(Pa/m)	(Pa)	ζ	(Pa)	(Pa)	(Pa/m)	
1 et 1'	4,7							352		660	1 012	215	
7 et 7'	4,1	3 171	0,136	12*	0,33	55	140	574	7,0	385	959	234	
V2		3 171	0,136							465	465		ouverte
8 et 8'	6,9	1 637	0,07	10	0,25	32	110	759	10	320	1 079	156	
T4		1 637	0,07							220	220		ouverte
Total	15,7							1 685		2 050	3 735	238	

Tableau 17 b.

Circuit du radiateur n° 4 : Réglage de la vanne V2													
1 et 1'	4,7							352		660	1 012	215	
7 et 7'	4,1	3 171	0,136	12*	0,33	55	140	574	7,0	385	959	234	
V2		3 171	0,136							3 796	3 796		1 tour
8 et 8'	6,9	1 637	0,07	10	0,25	32	110	759	10	320	1 079	156	
T4		1 637	0,07							220	220		ouverte
Total	15,7							1 685		5 381	7 066	450	

Tableau 17 c.

Circuit du radiateur n° 4 : Réglage du té T4													
1 et 1'	4,7							352		660	1 012	215	
7 et 7'	4,1	3 171	0,136	12*	0,33	55	140	574	7,0	385	959	234	
V2		3 171	0,136							3 796	3 796		1 tour
8 et 8'	6,9	1 637	0,07	10	0,25	32	110	759	10	320	1 079	156	
T4		1 637	0,07							467	467		5,5 tours
Total	15,7							1 685		5 628	7 313	466	

* Le calcul aboutit à un diamètre intérieur de 10 mm qui n'a pas été retenu parce que conduisant à une vitesse trop importante (paragraphe 1.2.2).

Tableau 18.

Calculs et réglages définitifs de l'ensemble du circuit													
Alimentation du radiateur 1													
Tronçon ou vanne	Longueur (m)	Puissance (W)	Débit (m ³ /h)	Diamètre intérieur (mm)	Vitesse (m/s)	$\rho \frac{v^2}{2}$ (Pa)	Pertes de charge						Réglage des vannes
							Par frottement		Singulières		Totales		
							(Pa/m)	(Pa)	ξ	(Pa)	(Pa)	(Pa/m)	
1 et 1'	4,7	8 798	0,378	20	0,33	55	75	352	12,0	660	1 012	215	
2 et 2'	12,9	5 627	0,242	14	0,44	100	190	2 451	7,0	700	3 151	244	
V1		5 627	0,242							1 464	1 464		ouverte
3 et 3'	5,4	3 581	0,154	13	0,32	50	120	648	0,5	25	673	125	
4 et 4'	1,5	2 558	0,110	13	0,23	27	67	100	14,5	392	492	328	
T1		2 558	0,110							538	538		ouverte
Total	24,5							3 551		3 779	7 330	299	
Alimentation du radiateur 2													
1,2,3,3',2'1'	23,0							3 451		2 849	6 300	274	
5 et 5'	1	1 023	0,044	10	0,16	12	48	48	14,5	174	6 300	222	
T2		1 023	0,044							556	556		4 tours
Total	24							3 499		3 579	7 078	295	
Alimentation du radiateur 3													
1, 2, 2', 1'	17,6							2 803		2 824	5 627	320	
6 et 6'	1,5	2 046	0,088	10	0,31	48	160	240	12	576	816	544	
T3		2 046	0,088							730	730		5,5 tours
Total	19,1							3 043		4 130	7 173	376	
Alimentation du radiateur 4													
1 et 1'	4,7							352		660	1 012	215	
7 et 7'	4,1	3 171	0,136	12	0,33	55	140	574	7,0	385	959	234	
V2		3 171	0,136							3 796	3 796		1 tour
8 et 8'	6,9	1 637	0,07	10	0,25	32	110	759	10	320	1 079	156	
T4		1 637	0,07							467	467		5,5 tours
Total	15,7							1 685		5 628	7 313	466	
Alimentation du radiateur 5													
1, 7, 7', 1'	8,8							926		4 841	5 767	655	
9 et 9'	1,5	1 534	0,066	10	0,23	27	100	150	12,0	324	474	316	
T5		1 534	0,066							1 032	1 032		4,5 tours
Total	10,3							1 076		6 197	7 273	706	

4.7. PERTES THERMIQUES DANS LES CANALISATIONS

Jusqu'à présent, les pertes thermiques dans les canalisations ont été estimées. Il convient de vérifier la validité de cette estimation et éventuellement d'apporter des corrections, soit à l'installation, soit au calorifugeage. Les pertes thermiques des canalisations dépendent de la température moyenne du fluide transporté, de la température ambiante, du diamètre et de la longueur de la canalisation, de l'épaisseur et du type de l'isolant. Elles sont données par la formule :

$$P_t = k.L.\Delta t$$

Formule dans laquelle :

- k est le coefficient de déperdition linéique des tubes de cuivre,
- L est la longueur des canalisations à prendre en compte,
- Δt est la différence entre la température moyenne de l'eau des radiateurs et la température du local.

Seules les canalisations situées hors du volume chauffé, c'est-à-dire dans les pertes ne contribuent pas au chauffage, sont à prendre en considération.

Les coefficients de déperdition linéique des tubes en cuivre isolés ou nus sont donnés au tableau 19 pour un isolant ayant une conductivité thermique de 0,041 W/(m.K).

A titre d'exemple : un tube de 12 mètres de long, de diamètre extérieur 25 mm avec 20 mm d'isolant, contenant de l'eau à 80 degrés dans un milieu à 10 degrés perdra :

$$0,222 \times 12 \times (80 - 10) = 186,5 \text{ W.}$$

Afin de tenir compte des discontinuités d'isolation (vannes et coudes), on multipliera le résultat par un coefficient 1,10. Le tableau 20 donne les calculs qui concernent l'exemple de la figure 10 pour une température moyenne des radiateurs de 80 °C et une température du sous-sol de 5 °C. Les résultats montrent que les pertes thermiques sont de 580 W. Ce chiffre est à rapporter aux puissances cumulées de tous les radiateurs à partir desquels ont été établies les estimations de pertes thermiques (§ 4.3), soit :

$$2\,325 + 930 + 1\,860 + 1\,488 + 1\,395 = 7\,998 \text{ W.}$$

On trouve ainsi un rendement de distribution de 7,25 %, ce qui est inférieur aux 10 % estimés. Les calculs pourraient être corrigés, mais la différence est relativement minime et ne justifie pas cette correction.

Tableau 19.

Coefficient de déperdition linéique des tubes de cuivre en W/(m.K)							
Désignation	Diamètre intérieur (mm)	tube nu	Epaisseur d'isolant (mm)				
			10	20	30	40	50
12 × 1	10	0,443	0,199	0,153	0,131	0,118	0,109
14 × 1	12	0,494	0,217	0,164	0,140	0,125	0,116
15 × 1	13	0,519	0,225	0,170	0,144	0,129	0,119
16 × 1	14	0,543	0,233	0,175	0,148	0,133	0,122
18 × 1	16	0,591	0,250	0,186	0,157	0,140	0,128
22 × 1	20	0,684	0,282	0,207	0,173	0,153	0,140
25 × 1	23	0,750	0,305	0,222	0,185	0,163	0,148
28 × 1	26	0,815	0,328	0,237	0,196	0,172	0,156
35 × 1	33	0,959	0,381	0,271	0,222	0,193	0,174
40 × 1	38	1,059	0,417	0,295	0,240	0,208	0,187
42 × 1	40	1,097	0,432	0,304	0,247	0,214	0,192
54 × 1	52	1,321	0,517	0,359	0,289	0,248	0,220

Tableau 20.

Calcul des pertes thermiques de l'installation						
Tronçon hors du volume chauffé	Longueur (m)	Diamètre intérieur (mm)	Isolation (mm)	Coefficient de déperdition linéique W/(m.K)	Δt (°C)	Pertes thermiques (W)
1 et 1'	4,7	20	nu	0,684	75	241
By-pass	1,0	20	nu	0,684	75	51
2 et 2'	11,2	14	10	0,233	75	196
7 et 7'	2,4	12	10	0,217	75	39
Total	19,3					527
Discontinuités d'isolation						53
Pertes thermiques totales						580