

Régulation des installations énergétiques – gestion thermique du bâtiment

En France, le secteur du bâtiment concentre 22% des émissions de CO₂ (figure 1) et représente à lui seul 45% de la consommation d'énergie (figure 2) :

- 63% de cette consommation d'énergie du secteur du bâtiment correspond à la consommation du secteur des maisons individuelles (figure 3),
- 42% de cette consommation correspond au secteur des usages (figure 4),
- près de la moitié (48%) est dédié au chauffage (figure 5).

Le chauffage représente donc l'un des premiers leviers d'actions possibles pour limiter les consommations d'énergie. Une gestion thermique optimisée peut ainsi permettre d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment et sa réponse aux exigences environnementales.

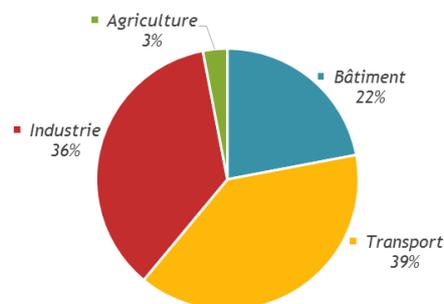


Figure 1 : Répartition des émissions de CO₂ en France, source [1]

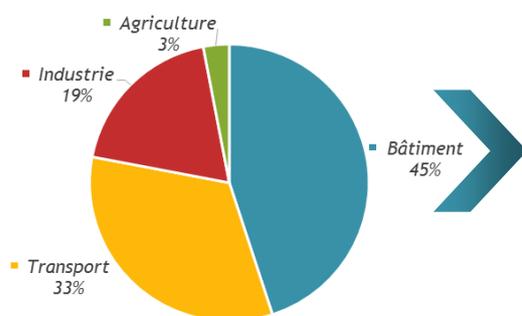


Figure 2 : Répartition de la consommation d'énergie en France, source [2]

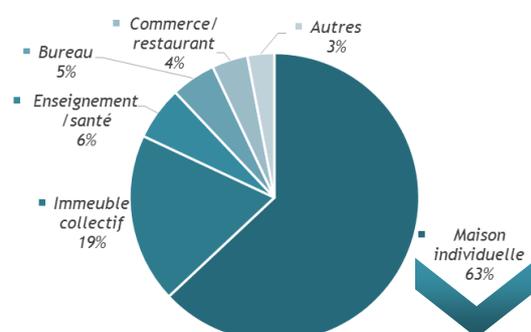


Figure 3 : Répartition de la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment, source [3]

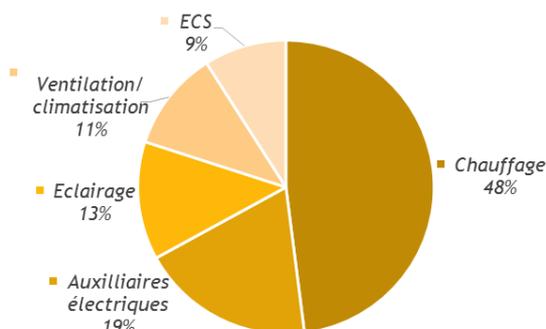


Figure 4 : Répartition de la consommation d'énergie dans le secteur usages des maisons individuelles, source [5]

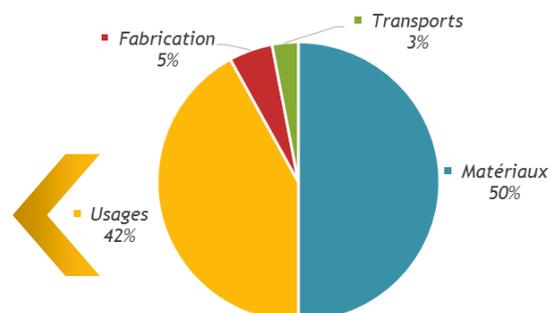


Figure 5 : Répartition de la consommation d'énergie dans le secteur maison individuelle, source [4]

La maîtrise de la consommation d'énergie dans un bâtiment passe par la régulation des installations énergétiques qui permet de régler automatiquement la puissance de l'installation pour satisfaire les besoins, d'adapter la production au besoin mais aussi de réduire les consommations. La régulation dans son rôle d'interface utilisateur/équipements assure le bon fonctionnement optimisé de l'installation thermique pour peu que les éléments de l'installation soient correctement choisis et dimensionnés.

Cette ressource présente les éléments intervenants dans la régulation de la chaîne thermo-hydraulique de la transmission de puissance, les caractéristiques des éléments intervenants dans la régulation sont exposées, et quelques résultats de simulation sont donnés.

1 – Contexte

La température intérieure d'un bâtiment muni d'un système de chauffage et de régulation (figure 6) doit être maintenue à une température ambiante donnée T_{amb} . Ce bâtiment est soumis à une température extérieure T_{ext} , il subit des déperditions à travers son enveloppe (murs, toiture, fenêtres, plancher bas), par ventilation (renouvellement d'air). Ces déperditions sont compensées par des apports internes et solaires et l'énergie calorifique apportée par l'installation de chauffage (avec un rendement supérieur à 80%)

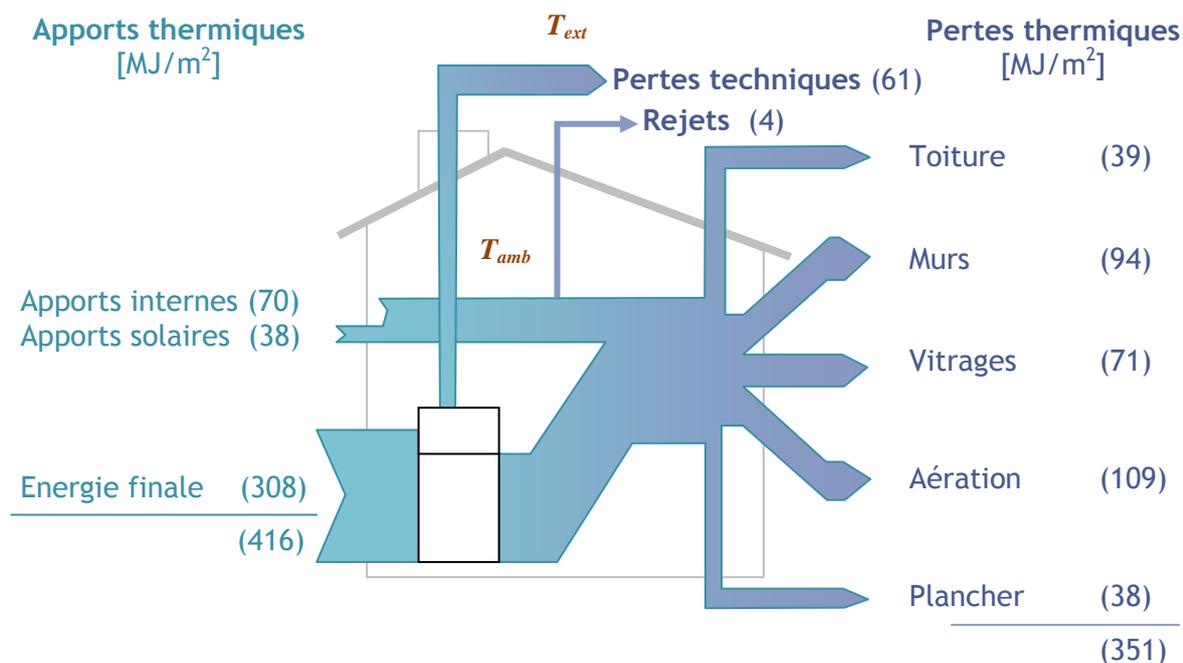


Figure 6 : Diagramme de Sankey¹ pour un logement individuel

La température extérieure varie et les apports calorifiques varient, ce qui entraîne la variation de la température ambiante. Il est donc nécessaire de réguler l'énergie fournie.

2 – Éléments d'une régulation

Le but d'une régulation est de maintenir automatiquement une grandeur physique (ici la température ambiante) à une valeur de consigne souhaitée (ici la température de consigne).

¹ Diagramme permettant de visualiser les flux énergétiques par les largeurs tracées (proportionnelles), du nom de Matthiew Henry Phineas Riall Sankey (1853-1926) qui a publié en 1898 des diagrammes de ce type sur l'efficacité énergétique d'une machine à vapeur.

Réguler consiste à mesurer la grandeur physique à l'aide d'un capteur, comparer la grandeur physique à régler et la valeur de consigne et remédier pour diminuer l'écart (figure 7) : c'est là la fonction du régulateur.

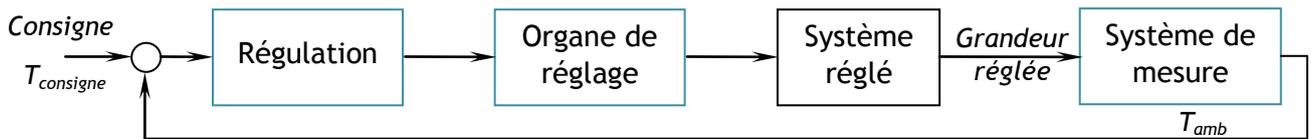


Figure 7 : Diagramme fonctionnel d'une régulation, d'après [6]

2.1 - Les boucles

Boucle ouverte (BO) : (figures 8 et 9) Après observation du paramètre perturbateur principal (ici la température extérieure et non la grandeur réglée qu'est la température ambiante) il y a action sur le système par l'opérateur sans vérification de l'effet sur la grandeur réglée.

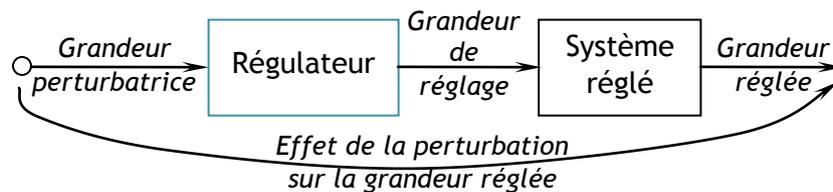


Figure 8 : Diagramme d'une boucle ouverte, d'après [6]

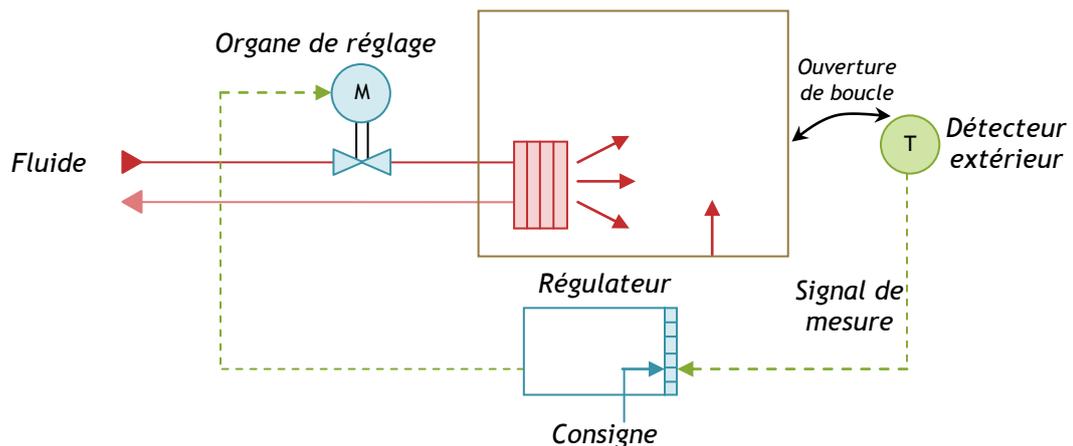


Figure 9 : Exemple de boucle ouverte, d'après [6]

Boucle fermée (BF) : (figures 10 et 11) Tient compte directement des effets de perturbation (soleil, fenêtre ouverte,...) sur la grandeur réglée (ici la température ambiante). Après observation du paramètre réglé (température ambiante), il y a correction pour agir sur le paramètre. Le régulateur compare la mesure de la grandeur réglée et la consigne (ici la température de consigne d'ambiance), puis agit en conséquence pour s'en rapprocher.

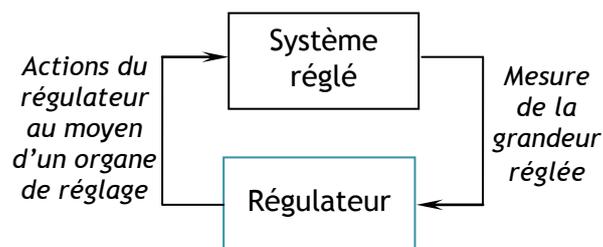


Figure 10 : Diagramme boucle fermée, d'après [6]

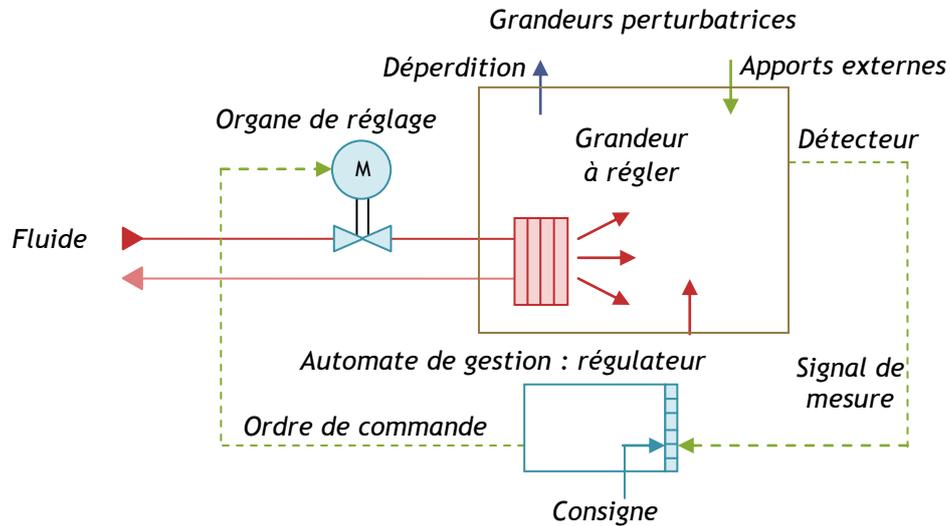


Figure 11 : Exemple de boucle fermée, d'après [6]

Avantage/inconvénient :

- Boucle ouverte : La réaction est rapide, mais le résultat plus aléatoire.
- Boucle fermée : La boucle présente une certaine inertie, mais le résultat est plus fiable et précis.

Association BO/BF : Une association boucle ouverte pour la régulation globale et boucle fermée pour la régulation locale permet d'optimiser la régulation et le confort (figure 12) :

- Régulation centrale (BO) : fournit la puissance juste nécessaire vis-à-vis de l'extérieur
- Régulation terminale (BF) : individualise les températures des zones terminales et réduit la puissance émise en tenant compte des apports gratuits

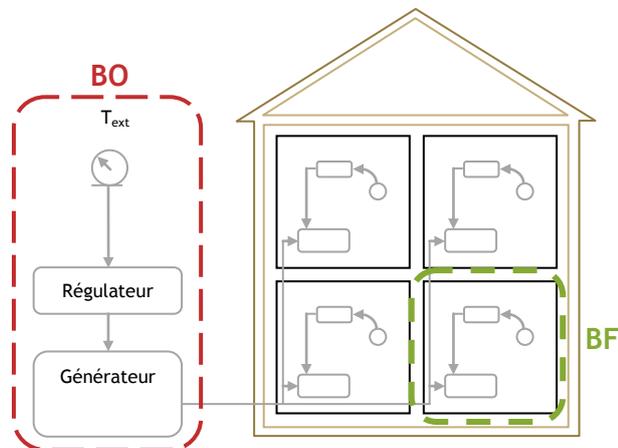


Figure 12 : Association BO/BF, d'après [6]

3 – Régulation de la chaîne thermo-hydraulique de la transmission de puissance

La chaîne d'une régulation thermique de chauffage à eau chaude comprend généralement un organe de réglage (par exemple une vanne) ouvrant plus ou moins un circuit hydraulique qui alimente un échangeur fournissant la puissance de chauffage nécessaire (figure 13). Chacun de ces éléments présentent des caractéristiques de comportement qui donneront in fine la caractéristique globale de l'installation.

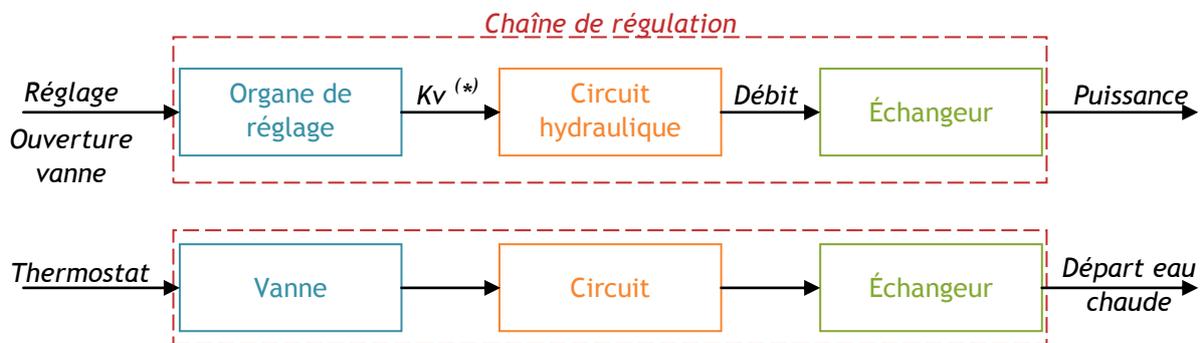


Figure 13 : Les éléments de l'installation, (*) voir paragraphe 4

Les caractéristiques de variation de la puissance de l'échangeur présentent une concavité dépendante de sa technologie et de son efficacité. Autrement dit, la relation puissance-débit est non linéaire (voir paragraphe 6). L'efficacité diminue avec une non-linéarité prononcée, et la régulation en BF devient difficile le régulateur étant réglé pour une sensibilité donnée.

Pour assurer une régulation optimale sur l'étendue de réglage possible, l'objectif est d'obtenir une caractéristique réglage-puissance linéaire. Ceci est rendu possible si la non-linéarité de la caractéristique de l'échangeur est compensée par une caractéristique de forme complémentaire assurée par la vanne dans le circuit, la caractéristique globale « vanne-circuit hydraulique-échangeur » présentant alors une allure proche d'une droite. La figure 14 donne la caractéristique globale de l'installation (en rouge) c'est-à-dire la puissance relative en fonction du réglage de la vanne. C'est la combinaison de trois caractéristiques (détaillées dans la suite de cette ressource) :

- Caractéristique de la vanne (en bleu) paragraphe 4,
- Caractéristique de comportement de la vanne sur le circuit (en orange) paragraphe 5,
- Caractéristique de l'échangeur (en vert) paragraphe 6.

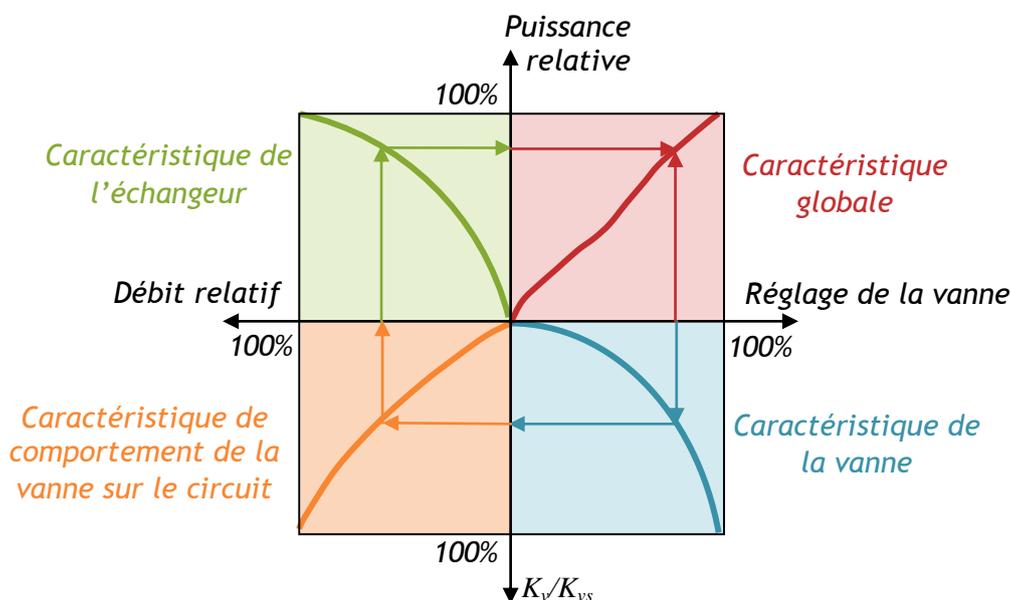


Figure 14 : Caractéristique de comportement de chauffage, d'après [6]

4 – Caractéristiques de la vanne

La vanne en modifiant la section de passage d'un fluide (via le déplacement d'un clapet) permet la variation de son débit (massique ou volumique). Pour un débit donné correspondant à une

ouverture de vanne donnée, la pression différentielle mesurée entre l'entrée et la sortie caractérise la vanne.

Le coefficient K_v , représentant le débit qui traverse une vanne soumise à une pression différentielle de référence de 1 bar, permet de caractériser une vanne indépendamment du circuit sur lequel elle est placée. Le débit volumique Q_v et la pression différentielle (ou perte de charge) à travers une vanne sont liés par la relation (dans le cas de l'eau) :

$$Q_v = K_v \sqrt{\Delta P}$$

Avec Q_v le débit en m^3/h , ΔP la pression différentielle en bar.

L'évolution du coefficient K_v en fonction de l'ouverture de la vanne constitue donc une caractéristique intrinsèque de la vanne. K_{vs} est la valeur maximale de K_v vanne totalement ouverte. Le coefficient K_v va dépendre de la technologie de conception de la vanne (de la géométrie de son clapet) :

Linéaire : $K_v = k.L$, avec L la levée du clapet

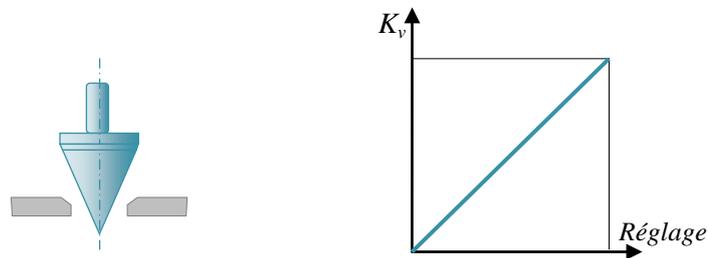


Figure 15 : Exemple de vanne de type linéaire, évolution de K_v en fonction de l'ouverture, d'après [6]

Quadratique : $K_v = k.L^2$

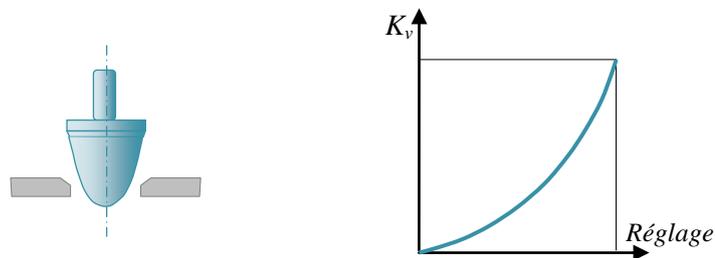


Figure 16 : Exemple de vanne de type quadratique, évolution de K_v en fonction de l'ouverture, d'après [6]

Logarithmique ou « à égal pourcentage » : $\frac{K_v}{K_{vs}} = e^{N \times (z-1)}$ variation proportionnelle au débit total précédant le changement

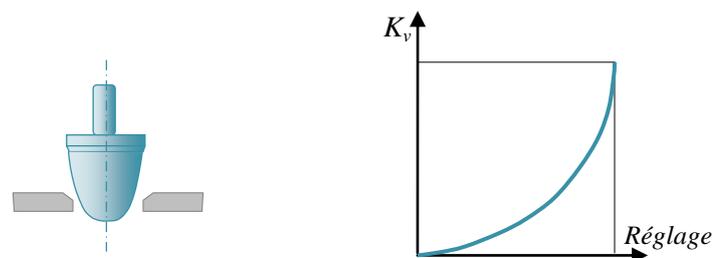
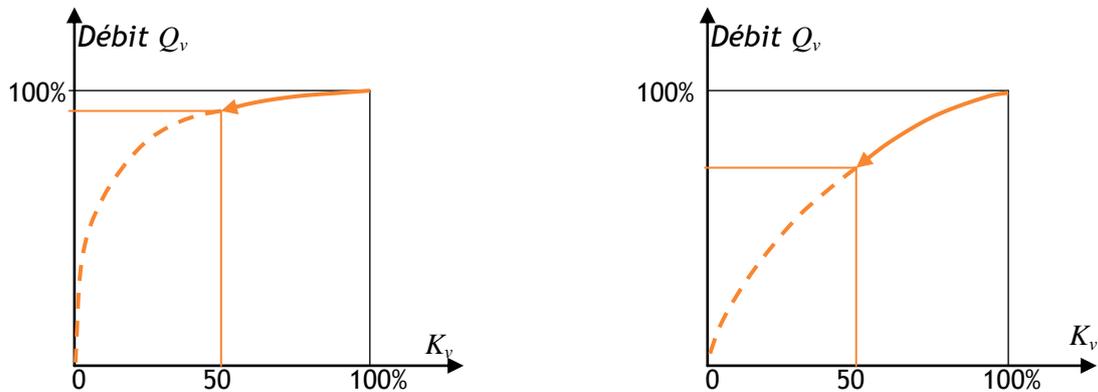


Figure 17 : Exemple de vanne de type logarithmique, évolution de K_v en fonction de l'ouverture, d'après [6]

Les vannes de type logarithmique se prêtent particulièrement à leur utilisation dans le cadre de chaîne de régulation d'installation de chauffage nécessitant une caractéristique globale linéaire.

5 – Caractéristique de comportement de la vanne sur le circuit

La résistance hydraulique de la vanne est faible si l'action de la fermeture de la vanne à partir de sa position d'ouverture totale, ne procure qu'une faible variation de débit (figure 18a). La résistance hydraulique de la vanne est élevée si l'action sur le débit présente une meilleure progressivité dans la plage de variation (figure 18b).



(a) Faible résistance hydraulique

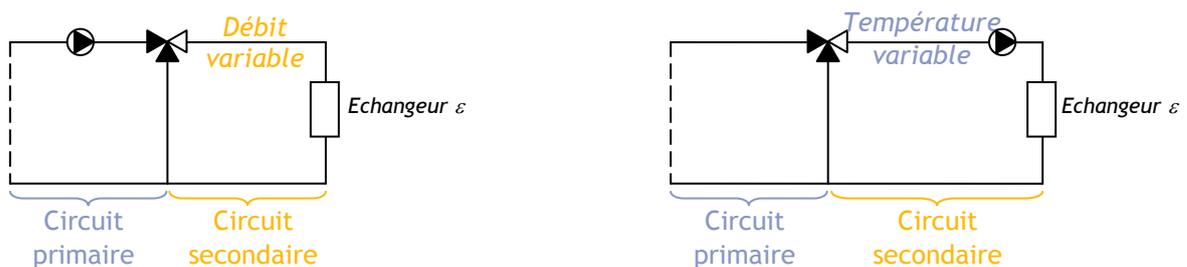
(b) Forte résistance hydraulique

Figure 18 : Illustration de l'autorité de la vanne caractérisant le rapport de résistance hydraulique d'une vanne sur celle du circuit sur lequel elle est placée, d'après [6]

(a) l'action de fermeture de la vanne depuis la position ouverture totale ne procure qu'une faible variation de débit (b) l'action de la vanne sur le débit est plus sensible, plus progressif

L'autorité a d'une vanne est définie comme le rapport de la perte de charge de la vanne ouverte (Δp_{v100}) sur la somme des pertes de charge des éléments parcourus par le débit variable (figure 19) pour la vanne ouverte (vanne incluse, soit $\Delta p_{v100} + \Delta p_{r100}$) :

$$a = \frac{\Delta p_{v100}}{\Delta p_{v100} + \Delta p_{r100}}$$



(a) Débit variable dans le circuit secondaire

(b) Température variable sur le circuit primaire

Figure 19 : Types de réglage de la puissance

L'évolution du débit en fonction du K_{vs} de la vanne dépend de l'autorité (figure 20). La vanne de réglage doit avoir une autorité adaptée pour assurer une meilleure progressivité au cœur du circuit hydraulique. La valeur préconisée de l'autorité est $a = 0,5$ donc lorsque $\Delta p_{v100} = \Delta p_{r100}$. Une valeur minimale de a est nécessaire, soit $a > 0,33$ lorsque $\Delta p_{v100} > \Delta p_{r100}/2$.

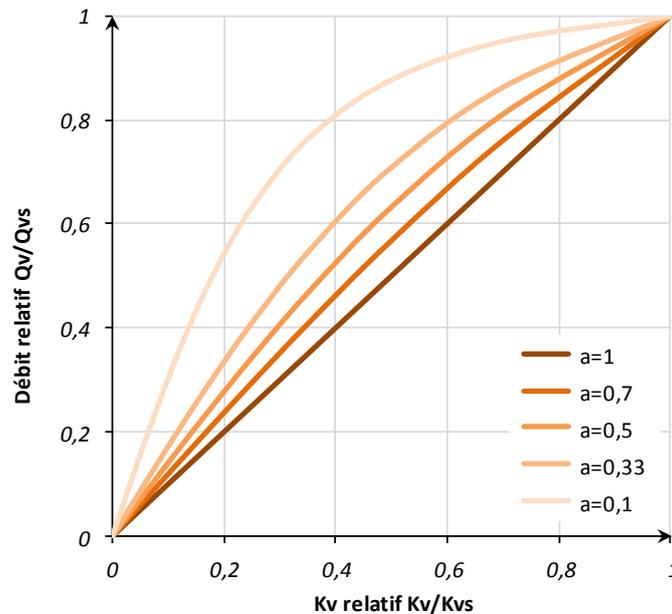


Figure 210 : Débit relatif en fonction du K_v relatif pour différentes valeurs d'autorité a (débit relatif = 1 pour la vanne entièrement ouverte)

6 – Caractéristiques de l'échangeur

Le transfert de l'énergie calorifique du circuit primaire de production au circuit secondaire de distribution de l'énergie se fait via un échangeur (figure 21). Les échangeurs sont de plusieurs types (selon leur technologie, géométrie, sens découlement des fluides), ils transmettent la chaleur (ou le froid) selon une loi d'échange ou d'émission. Modifier l'écart moyen des températures entre primaire et secondaire permet de régler la puissance échangée.

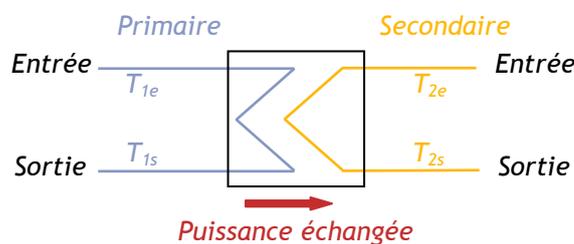


Figure 221 : Puissance échangée dépendante de l'écart de température moyen entre le primaire et le secondaire

La puissance est calculée par la loi d'échange :

$$P = k \cdot \Delta TLM \quad [\text{W}]$$

$$\Delta T_{LM} \text{ est l'écart moyen logarithmique : } \Delta TLM = \frac{Ecart_{mini} - Ecart_{maxi}}{\ln(Ecart_{mini} / Ecart_{maxi})} \quad [\text{K}]$$

L'*Ecart mini* et l'*Ecart maxi* représentent les différences de températures entre les entrées et les sorties de l'échangeur (figure 22). Lorsque les évolutions de températures au primaire et au secondaire sont faibles devant l'écart à l'entrée, l'écart moyen devient une moyenne arithmétique :

$$\Delta Tm = [(T_{1e} - T_{2e}) + (T_{1s} - T_{2s})] / 2$$

k est le coefficient global d'échange [W/K] considéré constant pour les échangeurs à convection forcée ou les planchers chauffants (figure 23). k dépend des niveaux de températures dans le cas d'échangeurs statiques comme les radiateurs et ne peut donc pas être considéré constant ; dans

la modélisation de la loi d'échange, k est maintenu constant, mais un exposant m est attribué à l'écart de température (figure 23).

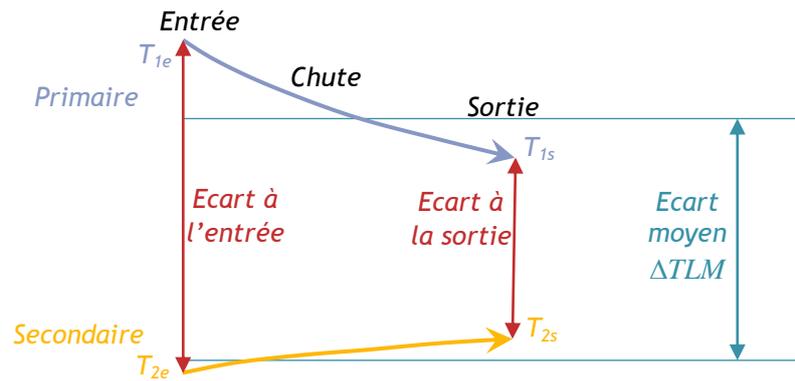


Figure 23 : Evolution des températures dans un échangeur co-courant (fluides primaire et secondaire s'écoulant dans le même sens)

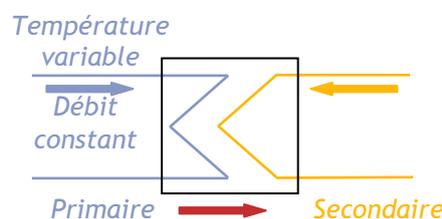
	Type d'échangeur/émetteur	Loi d'échange/d'émission
Echangeurs à convection	Echangeur eau-eau	Linéaire $P = k \cdot \Delta TLM$
	Batteries chaude ou froide en gaine Aérotherme Ventilo- ou éjecto-convecteur	
Emetteurs statiques	Plancher chauffant	Pratiquement linéaire
	Chauffage à radiateur* Chauffage à convecteur ou plinthes chauffantes**	Non linéaire $P = k \cdot (\Delta TLM)^m$ * $m \approx 1,3$ ** $1,1 \leq m \leq 1,4$

Figure 23 : La loi d'échange selon le type d'échangeur

Deux types de réglage de la puissance peuvent être utilisés (voir figure 24) :

- Par variation de la température au primaire,
- Par variation du débit au primaire.

6.1 - Réglage de la puissance d'un échangeur par variation de la température



Le réglage par variation de la température au primaire (par action sur le débit de combustible d'alimentation de la chaudière par exemple) modifie la puissance échangée de manière quasi proportionnelle à l'écart moyen de température entre primaire et secondaire (ou à la température au primaire) (figures 24 et 25).



Figure 25 : Impact de la variation de température sur la variation de la puissance échangée pour un échangeur co-courant

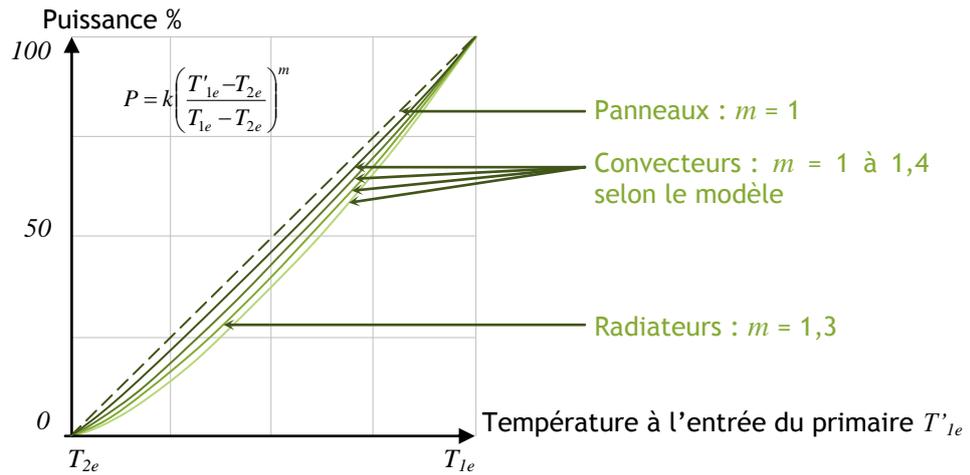
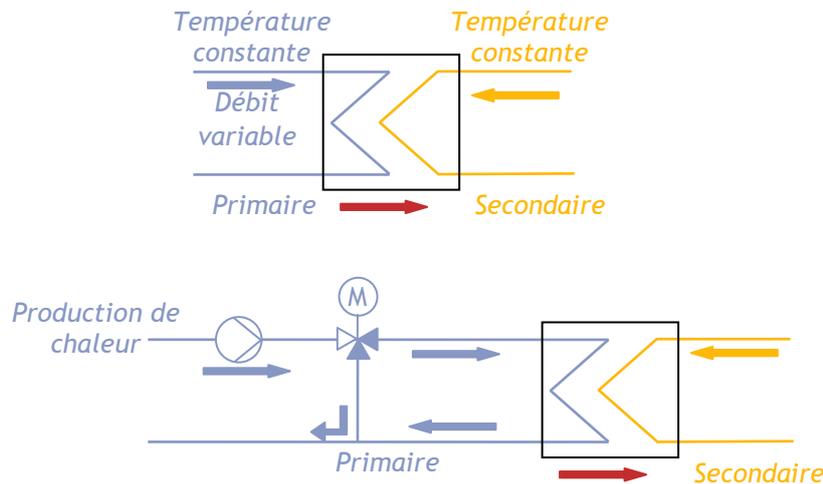


Figure 25 : Puissance échangée en fonction de la température d'entrée au primaire pour différentes valeurs de l'efficacité, d'après [6]

6.2 - Réglage de la puissance d'un échangeur par variation de débit



Le réglage par variation de débit au primaire par action sur l'ouverture progressive de vannes, modifie le facteur de déséquilibre² entre le débit au primaire et le débit au secondaire et donc la chute de température au primaire donc l'écart moyen (dont dépend la puissance échangée) :

² Le facteur de déséquilibre est le ratio : $R = \frac{(q_m C_p)_{\text{mini}}}{(q_m C_p)_{\text{maxi}}}$, lorsque $q_m C_p$ est maxi au primaire il est mini au secondaire et inversement.

- Si la chute du débit est faible en regard de l'écart moyen au débit maximal, même si la réduction du débit accentue la chute, la variation de puissance reste faible (figure 26a).
- Si la chute au primaire est importante au débit maximal, celle-ci baisse la température de sortie jusqu'au voisinage de la température du secondaire ; la variation de la puissance sera alors plus importante (figure 26b).

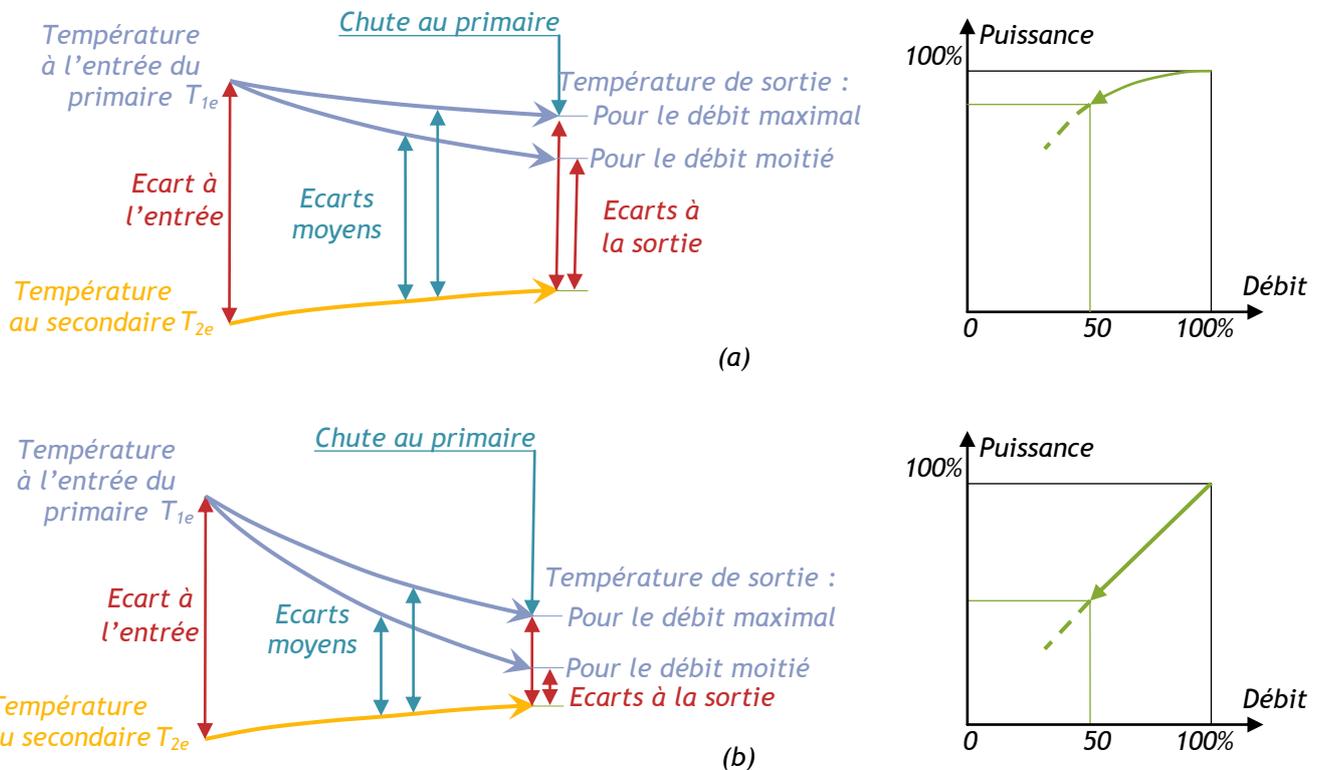


Figure 266 : Impact de la variation de débit sur la variation de la puissance échangée, d'après [6]

L'efficacité ε de l'échangeur conditionne l'évolution de la puissance échangée. ε doit assurer le réglage de l'échangeur et la progressivité : en dessous de 0,1 le réglage progressif est impossible. Lorsque la progressivité est une qualité souhaitée, ε pris à 0,2 ou plus est conseillé (figure 277).

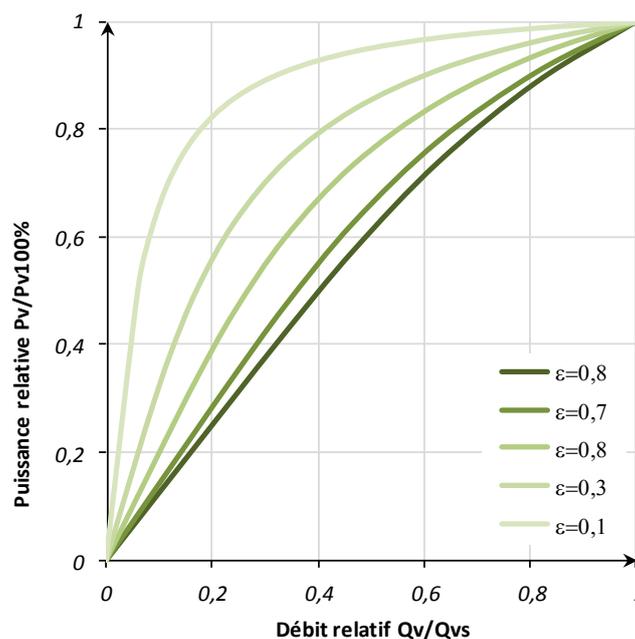


Figure 2728 : Puissance échangée en fonction du débit au primaire pour différentes valeurs de l'efficacité (pour des échangeurs à contre-courant), d'après [6]

6.3 - Réglage de la puissance d'un échangeur par variation de la température au moyen d'un mélange

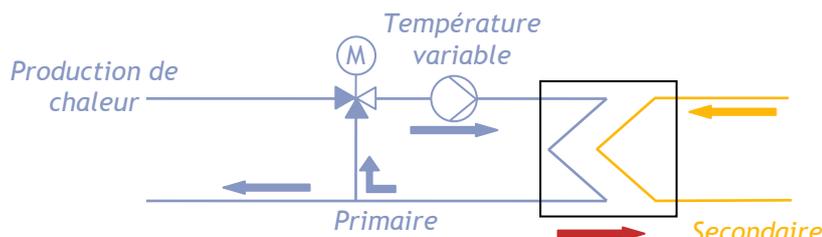


Figure 28 : Exemple de réglage de la température d'entrée de l'échangeur par une vanne à 3 voies

Le réglage de la température à l'entrée de l'échangeur est généralement réalisé par mélange en proportions établies de l'eau à température de production et de l'eau de sortie du primaire (figure 28). La température de l'eau à l'entrée de l'échangeur est réglée par un rapport de débit entre l'eau arrivant de la production de chaleur et celui de l'eau sortant du primaire. Il s'agit donc de régler deux débits, or celui du circulateur est a priori constant ; le cas se réduit à régler un seul débit. On retrouve la caractéristique d'efficacité ε dans le réglage de la puissance par variation de température par mélange variable, la concavité est cependant moins accentuée (figure 29). Le débit au primaire n'est pas seul pris en compte mais le rapport des débits (débit de la production/débit allant à l'échangeur).

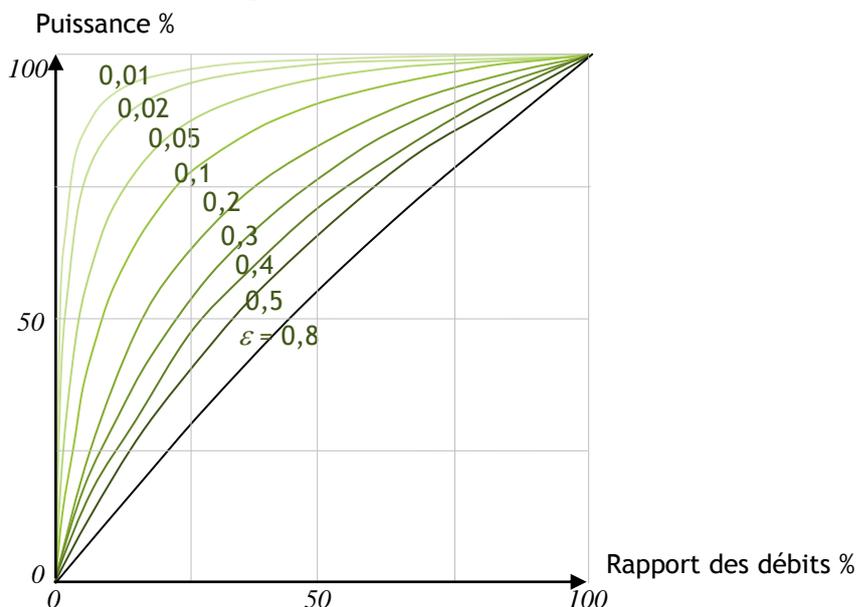


Figure 29 : Puissance échangée en fonction du rapport des débits au primaire pour différentes valeurs de l'efficacité, d'après [6]

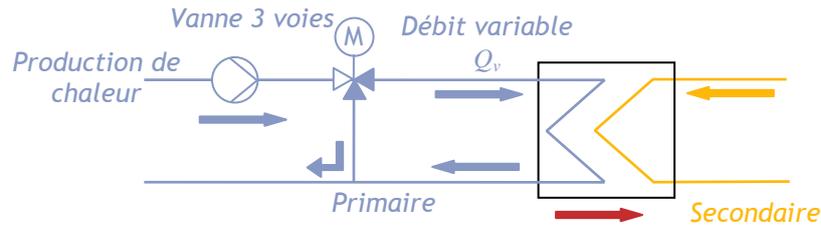
Le coefficient d'efficacité de l'échangeur ε conditionne l'évolution de la puissance échangée. La progressivité est possible pour ε supérieur à 0,2.

7 – Quelques résultats de simulations

Le comportement global d'une installation de chauffage peut être simulé pour observer l'influence des différentes lois de comportement de chacun des composants de la chaîne de transmission de puissance sur le comportement global : puissance-ouverture de vanne, dans le cas d'un réglage par variation de débit.

Prenons comme exemple d'application une installation de production de chaleur alimentant un échangeur de chaleur avec un débit variable par régulation par une vanne 3 voies. Cet échangeur

de chaleur permettant de transférer la puissance calorifique au fluide secondaire de manière régulée selon les conditions de régulation.



L'indice « s » correspond aux données relatives à l'ouverture totale de la vanne 3 voies.

Données relatives aux caractéristiques de l'échangeur :

- Coefficient d'échange : $U_s = 50$ [W/K]
- Débit thermique unitaire minimum³ à débit maximal $Q_{vs} : (q_m C_p)_{mins} = 232,3$ [W/K]
- Facteur de déséquilibre⁴ : $R_s = 0,64$
- Nombre d'unités de transfert⁵ : $NUT_s = 0,22$

7.1 - Relations utilisées

Quatre relations sont à déterminer :

1. Entre l'ouverture de vanne z et K_v/K_{vs}

Cette relation est déduite du type de caractéristique de la vanne étudiée ; e.g. pour la vanne à égal pourcentage, $K_v/K_{vs} = e^{3,5(z-1)}$.

2. Entre K_v/K_{vs} et Q_v/Q_{vs}

$$\frac{Q_v}{Q_{vs}} = \frac{1}{\sqrt{1 + a \left[\left(\frac{K_{vs}}{K_v} \right)^2 - 1 \right]}}$$

Cette relation est déduite d'une étude des pertes de charge dans le réseau. La démonstration est à retrouver dans l'« Annexe : Etude des pertes de charge dans le réseau ».

3. Entre Q_v/Q_{vs} et la puissance de l'échangeur P/P_{100}

Cette relation est déduite de l'étude du bilan de puissance de l'échangeur compte tenu de la connaissance de l'expression de son efficacité selon le type d'échangeur. Un échangeur contre-courant est considéré ici, l'expression de son efficacité est la suivante :

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp(-NUT(1-R))}{1 - R \exp(-NUT(1-R))}$$

La démonstration est à retrouver dans l'« Annexe : Etude du bilan de puissance de l'échangeur ».

4. Entre l'ouverture de la vanne z et la puissance de l'échangeur P/P_{100}

³ Le débit thermique unitaire minimum correspond à la valeur minimum entre les deux produits débit massique par capacité calorifique pour chacun des fluides de l'échangeur (primaire et secondaire).

⁴ Le facteur de déséquilibre correspond au rapport du débit thermique unitaire minimum sur le débit thermique unitaire maximum.

⁵ Le nombre d'unités de transfert correspond au rapport du coefficient d'échange par le débit thermique unitaire minimum.

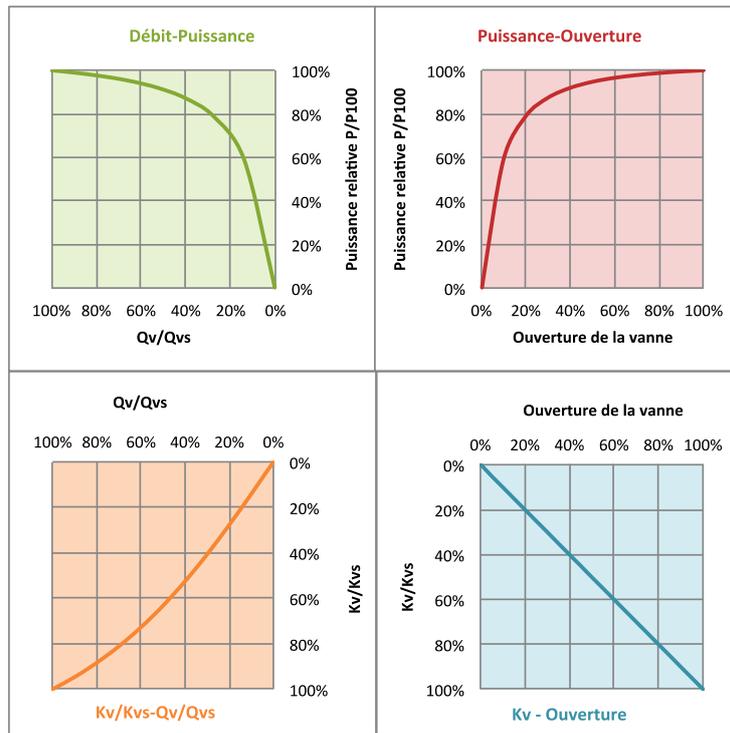
Cette dernière relation est déduite de la combinaison des trois précédentes. Chacune de ces relations peut être représentée graphiquement pour observer le comportement de l'installation.

7.2 - Analyse des résultats

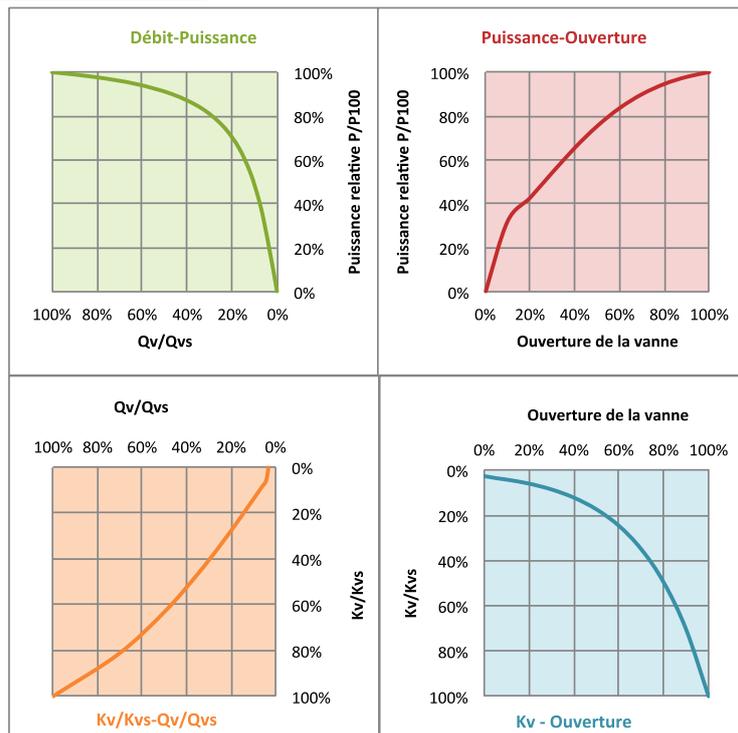
Influence du type de vanne 3 voies

Voici comme exemple les réponses globales apportées pour deux types de vannes, linéaire et égale pourcentage, les autres conditions étant identiques. On peut observer la réponse plus linéaire puissance-Ouverture permise par la caractéristiques à égal pourcentage de la vanne.

Caractéristique linéaire :



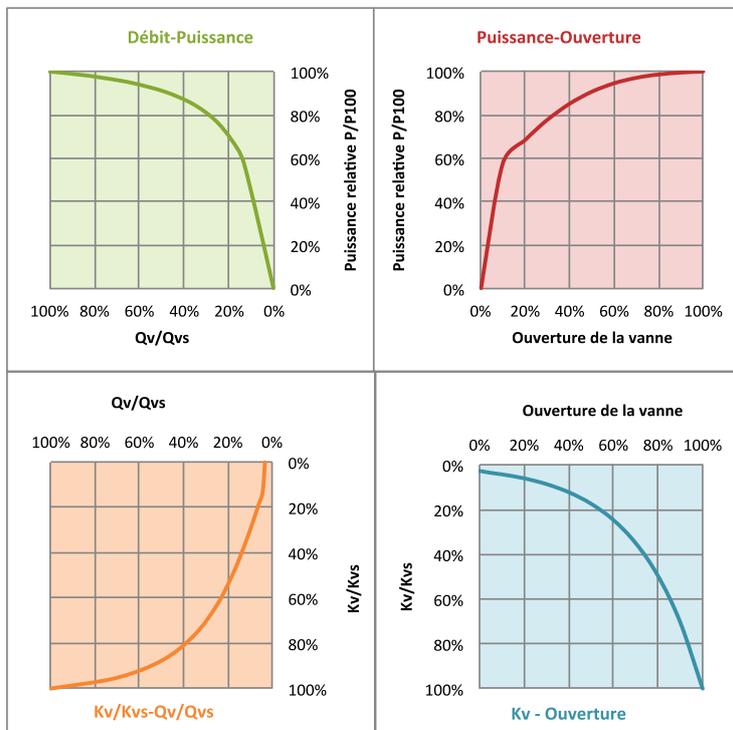
Caractéristique à égal pourcentage :



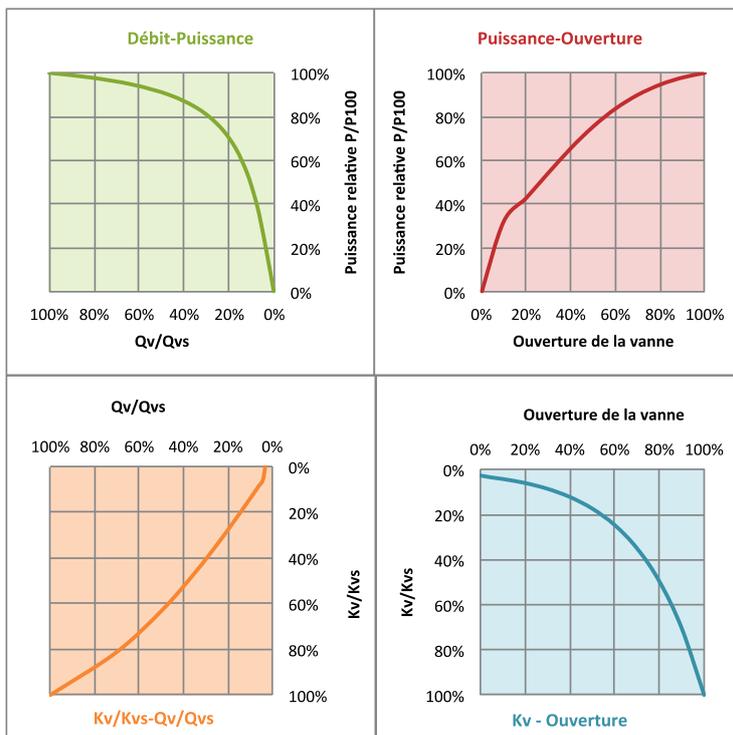
Influence de l'autorité de la vanne

Voici comme exemple les réponses globales apportées pour deux valeurs d'autorité de vannes, pour une caractéristique à égal pourcentage et les conditions identiques. On peut observer la réponse plus linéaire Puissance-Ouverture permise par la plus haute valeur d'autorité de la vanne 3 voies ($a=0,5$). Néanmoins, l'influence est moins importante que pour la caractéristique de la vanne.

Autorité de 0,1 :



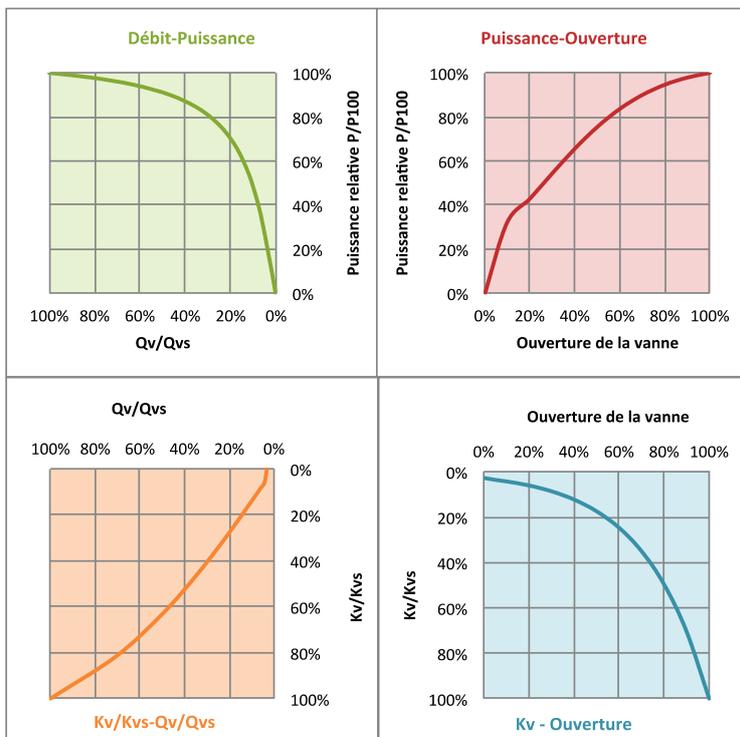
Autorité de 0,5 :



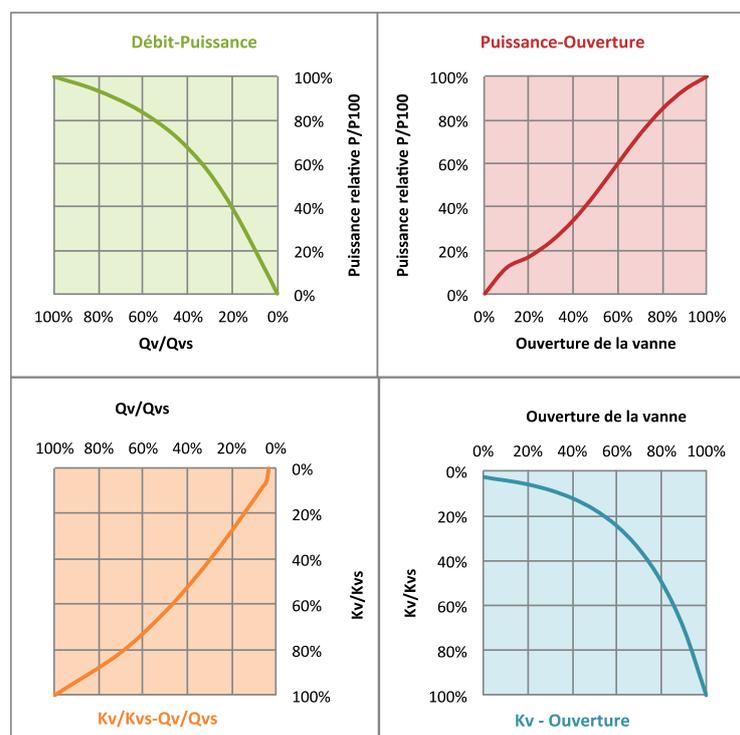
Influence de l'efficacité de l'échangeur

Voici comme exemple les réponses globales apportées pour deux valeurs d'efficacité, les autres conditions identiques. On peut observer une réponse plus linéaire Puissance-Ouverture pour l'efficacité de 0,5 par rapport à celle de 0,18. On peut voir par contre qu'augmenter davantage l'efficacité amène ensuite de nouveau à une caractéristique moins bonne (alors que ceci correspond à une réponse par contre débit-puissance beaucoup plus linéaire).

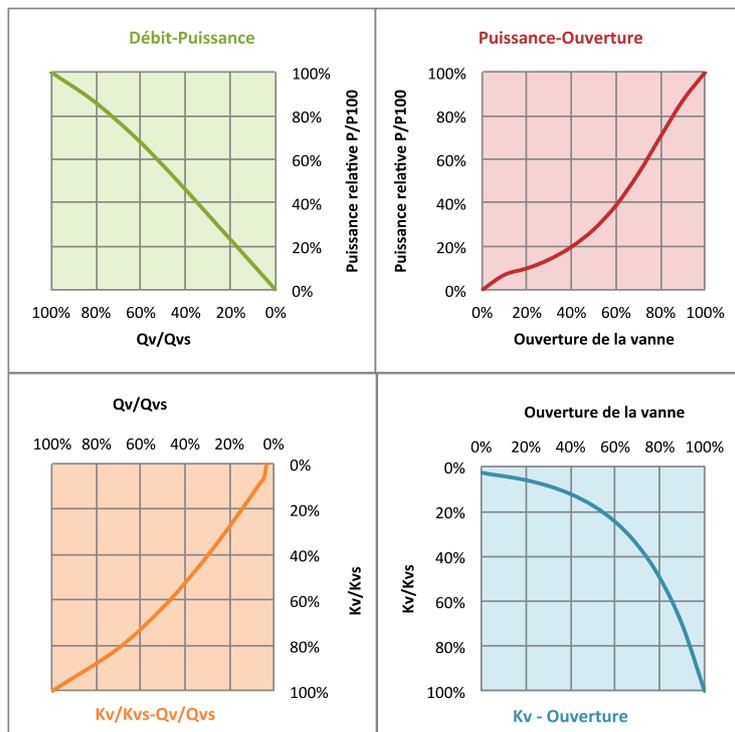
Efficacité de 0,18 :



Efficacité de 0,50 :



Efficacité de 0,87 :



Références :

- [1]: Centre Interprofessionnel Techniques d'Etudes de la Pollution Atmosphérique-CITEPA-2014]
- [2]: Service de l'Observation et des Statistiques-SOeS-2016
- [3]: conférence ENS Paris-Saclay, source Tchang bureau d'étude Tribu Energie 2011
- [4]: <http://www.smartlivinglab.ch/index.php/fr/>
- [5]: <http://www.ademe.fr/>
- [6]: Manuel de la régulation, René Cyssau, SEDIT éditeur

Ressource publiée sur EDUSCOL-STI : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>