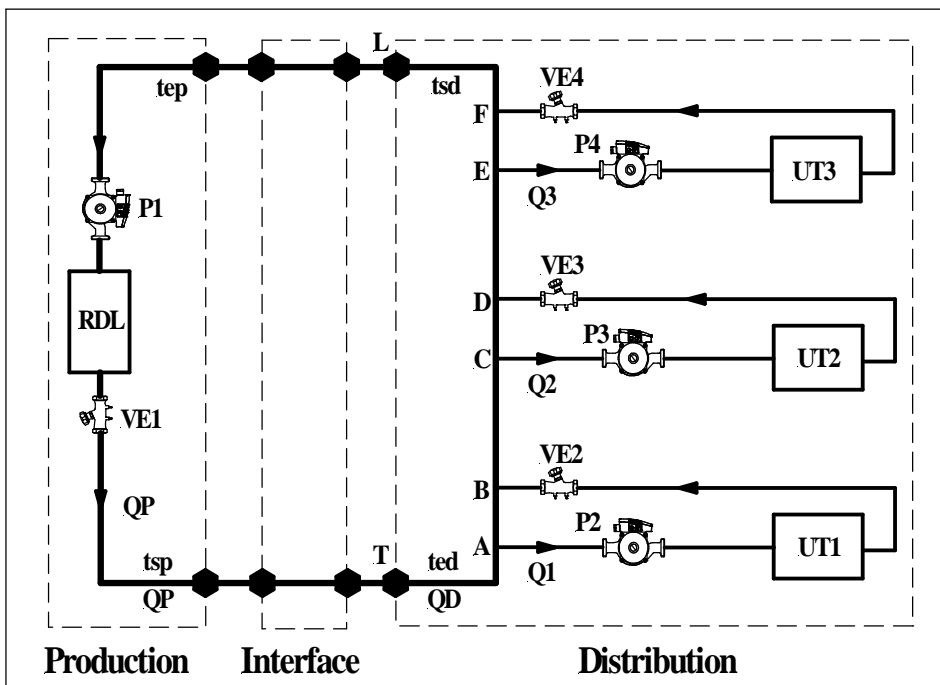


4. Circuit de distribution de type monotube dynamique

4.1. Constitution générale d'un système monotube dynamique

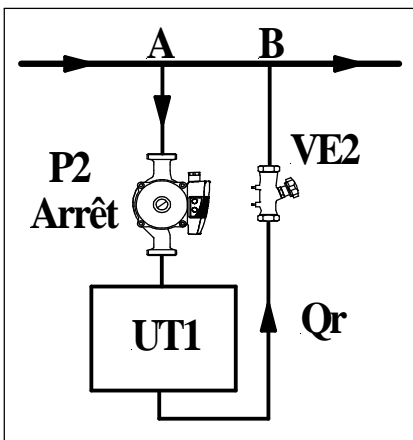
Le schéma de principe ci-après permet de distinguer les différentes parties d'une installation utilisant une distribution de type monotube dynamique. Le circuit de distribution (entre les points T et L) est constitué d'un seul tube (d'où l'appellation monotube) sur lequel les différentes unités terminales se raccordent. Entre les deux piquages sur le « monotube » d'une unité terminale (A et B, C et D, E et F), la résistance hydraulique est très faible. Les circuits respectifs des unités terminales sont donc déconnectés hydrauliquement (pas frigorifiquement) du circuit de distribution. Ce concept fait l'objet d'un brevet détenu par la société *Johnson Controls*. Il a été conçu et mis au point par *Adrien Laude-Bousquet* pour satisfaire initialement les exigences relatives à l'utilisation de fluides frigopORTEURS *biphasiques (coulis de glace)*.



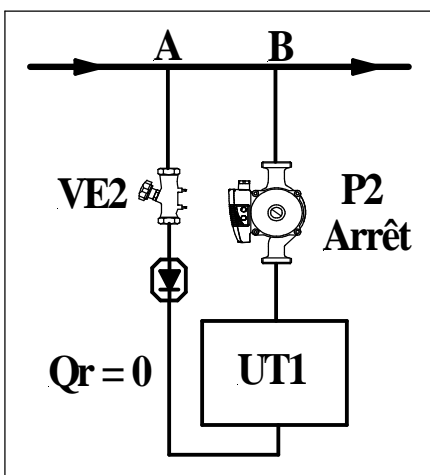
L'utilisation de fluides frigopORTEURS liquides avec un système monotube dynamique est possible mais doit faire l'objet de précautions particulières en raison de l'élévation de la température d'entrée des unités terminales. Notons qu'avec l'utilisation de coulis de glace, l'échange thermique étant latent, aucune élévation significative de température n'est alors à craindre. Les unités terminales sont généralement des échangeurs dits linéaires.

La puissance frigorifique d'un échangeur linéaire est proportionnelle à l'écart de température entre les entrées des deux fluides en présence. Si l'unité terminale est dimensionnée pour obtenir 100 % de la puissance frigorifique avec une température d'entrée d'air $t_{ea} = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ et une température d'entrée du fluide frigoporteur de $t_{ef} = -8\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'écart à l'entrée (ϵ_e) a pour valeur $\epsilon_e = -4 - (-8) = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si l'élévation de température du fluide frigoporteur $E_l = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ soit $t_{ef} = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$, l'écart à l'entrée $\epsilon_e = -4 - (-6) = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ est alors réduit de 50 %. La puissance frigorifique étant proportionnelle à l'écart à l'entrée, elle est aussi réduite de 50 %. Pour compenser cette perte, le concepteur doit prévoir une augmentation de la surface de l'échangeur, ce qui augmente le coût d'installation ou, si c'est suffisant, augmenter le débit (réduction du Δt nominal) ce qui augmente le coût de pompage. C'est là que réside une des principales précautions à prendre dès la conception.

4.2. Suppression du débit résiduel dans les unités terminales

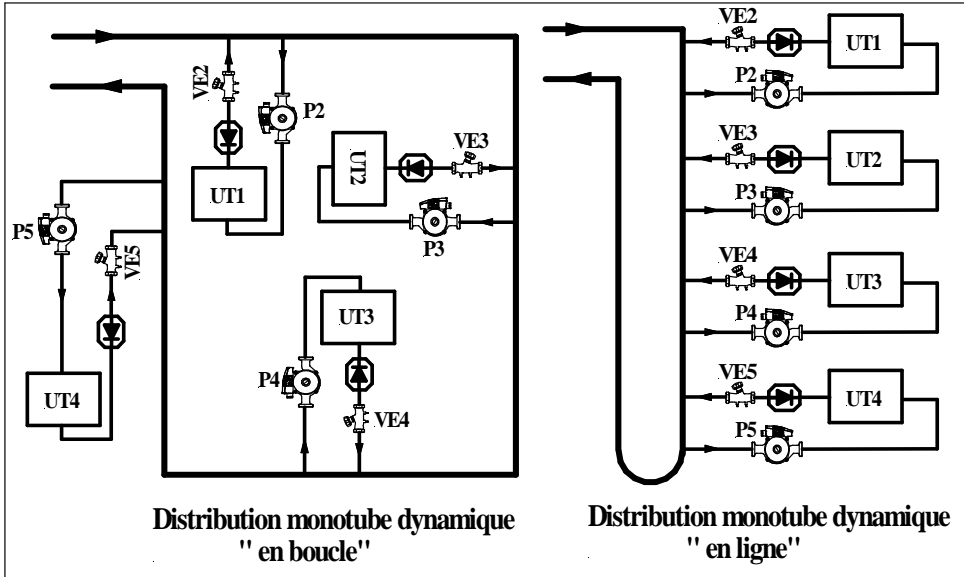


Lorsque le thermostat de régulation d'une unité terminale n'est plus en demande, la pompe P2 est à l'arrêt. La pression différentielle ΔP_{AB} entre les points A et B est très faible mais pas nulle ! La pression du point A est en réalité très légèrement supérieure à celle du point B. Un débit résiduel Q_r très faible peut alors s'établir et entraîner une baisse de température incontrôlée du procédé à réguler.



Pour ne pas s'exposer à ce problème, une des solutions consiste à inverser la position des piquages des unités terminales sur le monotube et de monter un clapet anti-retour conformément au schéma ci-contre. Le débit résiduel est alors radicalement supprimé ! En pratique, ce montage doit être systématiquement adopté.

4.3. Principe de fonctionnement d'un circuit de distribution de type monotube dynamique



Lorsqu'il est possible de configurer le circuit de telle sorte que la première et la dernière unité terminale soient proche, on obtient « une boucle ». Dans ce cas, le montage est considérablement simplifié car un seul tube est à « tirer » à proximité de l'unité terminale à raccorder. Dans le cas contraire, la distribution est dite en ligne. La difficulté de montage est alors analogue à celle d'une distribution bitube ou bitube dynamique.

Les principaux objectifs de ce système sont :

- Assurer une déconnection entre les circuits de production et de distribution à débit constant et les unités terminales à débit variable.
- Supprimer la nécessité de l'équilibrage hydraulique.
- Faciliter le montage.
- Faciliter les changements de position des unités terminales (remodeling).
- Faciliter les éventuelles extensions.

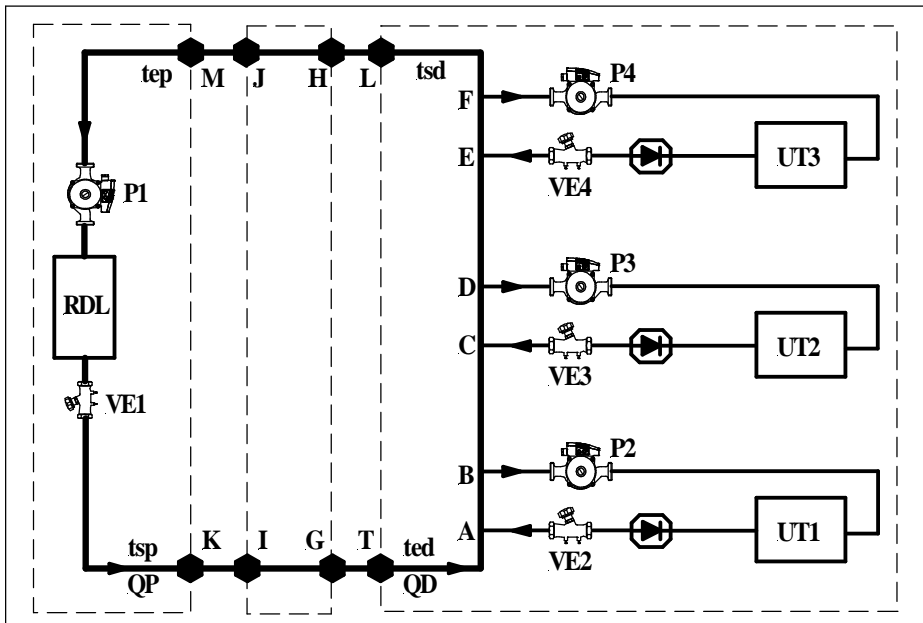
Froid Indirect Pratique de J. LA SALA

<http://www.didafrio.com>

Objectif N°1

Assurer une déconnexion entre les circuits de production et de distribution à débit constant et les unités terminales à débit variable.

La plupart des constructeurs préconisent encore un fonctionnement des refroidisseurs de liquide à débit constant. Le circuit de production est couplé à celui de distribution par une interface de type « connection directe » (points IG et HJ schéma ci-dessous). Le débit de production QP est donc obligatoirement toujours égal à celui de distribution QD. Comme le débit QD est constant quel que soit le nombre d'unités terminales en demande, le débit QP l'est aussi.

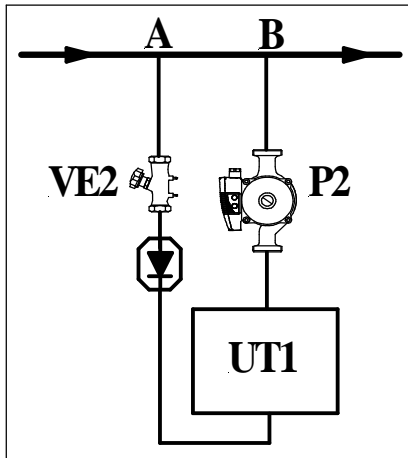


La variabilité du débit dans chaque unité terminale (régulation par mise en marche ou arrêt de la pompe associée) ne modifie en aucun cas les débits de distribution QD et de production QP. Les déconnexions hydrauliques établies aux niveaux des piquages AB, CD, EF en sont la raison. Notons que la constance du débit du circuit de distribution propre au système monotube dynamique a été motivée par les exigences d'écoulement des fluides biphasiques. En effet, la circulation de ces derniers devient très problématique si les phases liquide et solide se séparent (bouchage). Pour éviter cela, la vitesse ne doit pas être inférieure à une certaine limite.

Avec des fluides frigoporteurs liquides, la nécessité de l'optimisation de la consommation énergétique due au pompage conduit à se poser la question relative à la possibilité d'envisager la variabilité du débit du circuit de distribution (voir P 103).

Objectif N°2

Supprimer la nécessité de l'équilibrage hydraulique.



Entre les deux points (A et B) de piquage de l'unité terminale, un « court-circuit » s'établit, autrement dit la pression différentielle est très faible. Le circuit **monotube dynamique** nécessite donc une pompe (dynamique) pour assurer le débit de l'unité terminale. L'ajustement de ce dernier ne modifie en aucun cas les autres débits préalablement réglés.

Le réglage du débit respectif des unités terminales à l'aide d'une vanne d'équilibrage ou en agissant sur la vitesse de rotation de la pompe est donc extrêmement simple. **Cet ajustement n'a rien à voir avec de l'équilibrage hydraulique et ne nécessite donc aucune connaissance en la matière.** Notons que l'utilisation d'une pompe à vitesse variable n'exclut pas pour autant le montage d'une vanne d'équilibrage. Cette dernière est alors pré réglée pour une perte de charge minimale de $\Delta P_{VE} = 3 \text{ kPa}$ au débit nominal de l'unité. La présence de cette vanne constitue un outil de diagnostic pour le technicien (mesure de débit).

Objectif N°3

Faciliter le montage.

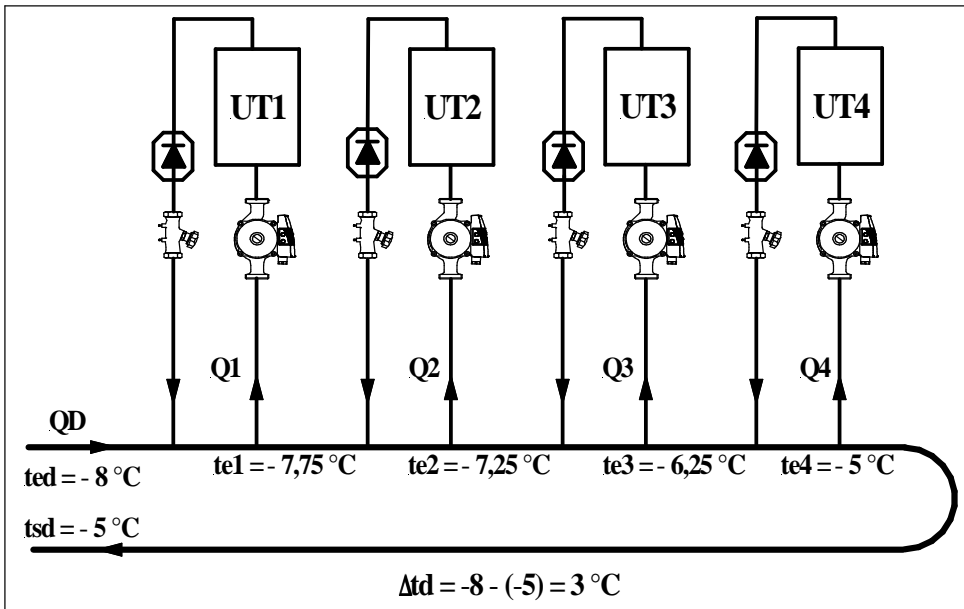
Rappelons que si, comme c'est généralement le cas, le circuit de distribution se déploie « en boucle » et non « en ligne », le montage sur le chantier est facilité car un seul tube est « à tirer » à proximité des unités terminales à raccorder.

Objectif N°4

Faciliter le changement de position des unités terminales (remodeling).

Le **débit** des unités terminales est indépendant de leur position sur la boucle. La déconnection hydraulique au niveau des piquages en est la raison.

A titre d'exemple, une vitrine réfrigérée connectée en tête de boucle peut être déplacée en queue sans que son débit ne soit modifié. Par contre, l'utilisation de fluide frigoporteur liquide entraîne une élévation de température à l'entrée des unités terminales. A titre d'exemple, le schéma ci-après montre un cas où la température d'entrée de la première unité terminale (UT1) est égale à $te1 = -7,75\text{ °C}$ alors que celle de la dernière $te4 = -5\text{ °C}$ alors que la température d'entrée du circuit de distribution est égale à $ted = -8\text{ °C}$! En pratique, lorsque un circuit de distribution monotube dynamique est utilisé avec du fluide frigoporteur liquide, les unités terminales les moins sensibles (laboratoires, chambres froides) sont toujours positionnées en « bout ». A l'inverse les unités les plus sensibles (vitrines ultra frais, etc...) sont positionnées en tête.



Le « remodeling » affecte rarement les laboratoires ou les chambres froides. Les unités terminales susceptibles d'être déplacées se situant plutôt en tête de boucle, leur changement de position ne pose généralement pas de problème particulier.

Froid Indirect Pratique de J. LA SALA

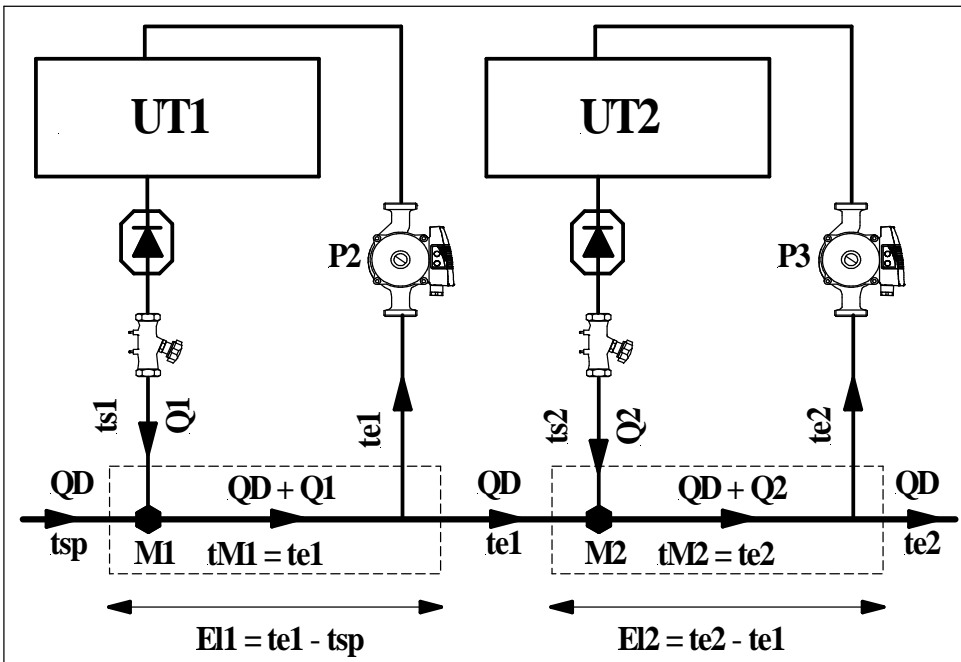
<http://www.didafrio.com>

Objectif N°5

Faciliter les éventuelles extensions.

Lors d'une extension, la puissance frigorifique installée peut s'avérer insuffisante. Sans modifier le débit de la boucle, il est possible d'augmenter sa puissance frigorifique globale en raccordant les refroidisseurs de liquide supplémentaires en série ou en série latéral (Voir P43).

4.4. Calcul de l'élévation de température à l'entrée des unités terminales lors de l'utilisation d'un fluide frigoporteur liquide



La présence d'une unité terminale en demande sur le tube du circuit de distribution entraîne une élévation de température ($E1x$) du débit QD . La chaleur absorbée par une unité terminale est restituée dans le monotube. La présence de l'UT1 élève la température du débit QD d'une valeur égale à $E11 = te1 - tsp$. Si la régulation de cette unité n'est pas en demande, la pompe P2 est arrêtée, annulant ainsi $Q1$ et l'élévation de température ($E11 = 0$).

Si toutes les unités terminales sont en demande, leur température d'entrée respective est donc supérieure à celle de sortie du circuit de production (tsp).

Pour dimensionner la surface d'échange d'une unité terminale à partir d'une puissance frigorifique, le concepteur doit connaître son régime de fonctionnement, autrement dit, entre autre, sa température d'entrée du fluide frigoroporteur. Pour ce faire, le calcul de l'élévation due à la présence de chaque unité terminale doit être réalisé.

Calcul de l'élévation de température due à la présence d'une unité terminale :

L'élévation de température El_x du débit de distribution QD due à la présence de l'unité terminale N^o_x a pour valeur :

$$El_x = \frac{Q_x}{QD} \cdot \Delta t_x$$

Q_x : débit dans l'unité terminale N^o_x .

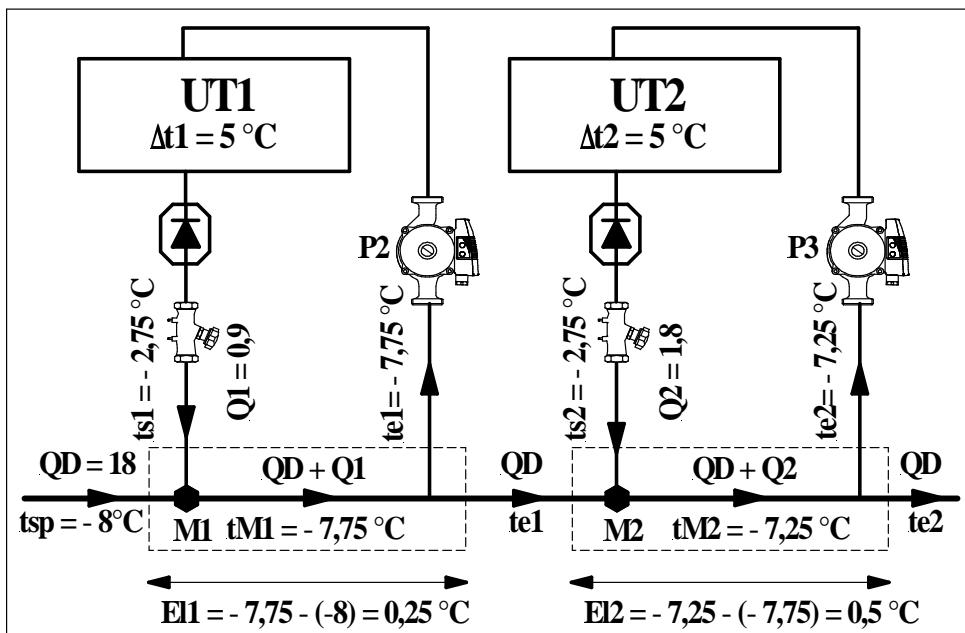
Δt_x : différence de température nominale de l'unité terminale N^o_x .

La température de mélange tM_x ou d'entrée de l'unité terminale N^o_x a pour valeur :

$$tM_x = t_{ex} = t_{e(x-1)} + El_x$$

$t_{e(x-1)}$: température du débit QD en amont de l'unité N^o_x .

Exemple :



Élévation de température due à la présence de l'unité terminale UT1 :

$$E1 = \frac{Q1}{QD} \cdot \Delta t1 = \frac{0,9}{18} \cdot 5 = 0,25 \text{ °C}$$

La température à l'entrée de l'unité terminale UT1 a pour valeur :

$$te1 = tM1 = tsp + E1 = - 8 + 0,25 = - 7,75 \text{ °C}$$

Élévation de température due à la présence de l'unité terminale UT2 :

$$E2 = \frac{Q2}{QD} \cdot \Delta t2 = \frac{1,8}{18} \cdot 5 = 0,5 \text{ °C}$$

La température à l'entrée de l'unité terminale UT2 a pour valeur :

$$te2 = tM2 = te1 + E2 = - 7,75 + 0,5 = - 7,25 \text{ °C}$$

Comme le montre cet exemple, l'élévation de température, pour un débit de distribution constant, est proportionnelle à la puissance frigorifique de l'unité terminale en présence, soit :

$\frac{P_{tho1}}{P_{tho2}} = \frac{Q1 \cdot \Delta t1}{Q2 \cdot \Delta t2} = \frac{E1}{E2}$	Dans l'exemple précédent, l'unité terminale UT2 est deux fois plus puissante que l'UT1.
---	---

En effet, l'expression de la puissance frigorifique d'une unité terminale UT_x étant : $P_{thox} = \rho \cdot C \cdot Q_x \cdot \Delta t_x$ avec ρ et C sensiblement constants, le rapport des produits ($Q_x \cdot \Delta t_x$) est donc bien égal à celui des puissances frigorifiques.

$E_{lx} = \frac{Q_x \cdot \Delta t_x}{QD}$
--

Pour un débit QD du circuit de distribution *constant*, l'élévation de température est proportionnelle au produit ($Q_x \cdot \Delta t_x$) et par suite à la puissance frigorifique de l'unité terminale UT_x.

La somme de toutes les élévations de température El du circuit de distribution a pour valeur :

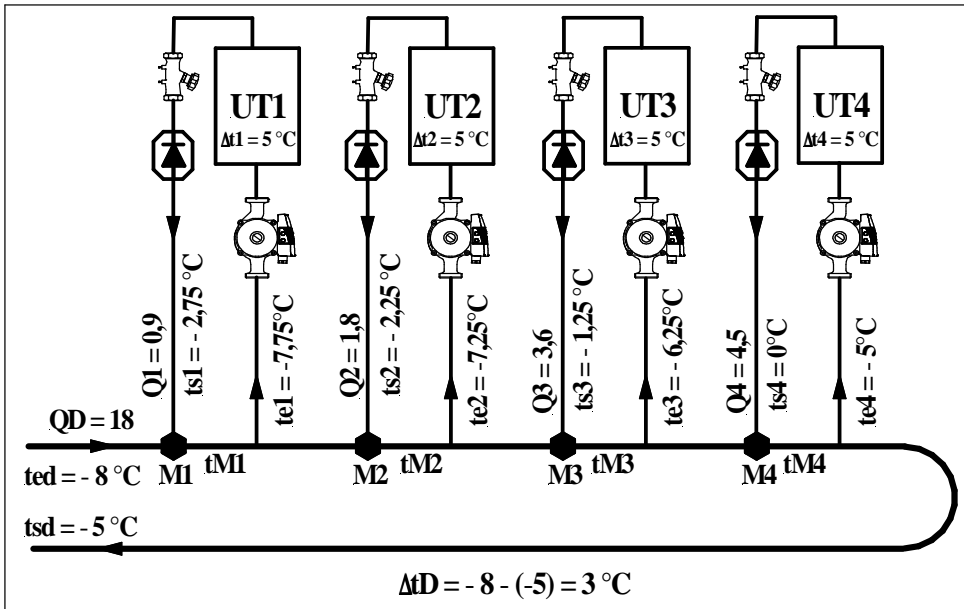
$\Sigma El = \Delta tD$

Avec :

ΣEl : somme des élévations de température aux entrées.

ΔtD : Ecart de température nominal du circuit de distribution.

Application numérique :



Élévation de température due à la présence de l'unité terminale UT1 :

$$EI_1 = \frac{Q_1}{Q_D} \cdot \Delta t_1 = \frac{0,9}{18} \cdot 5 = 0,25^{\circ}\text{C}$$

La température à l'entrée de l'unité terminale UT1 a pour valeur :

$$t_{e1} = t_{M1} = t_{ed} + EI_1 = -8 + 0,25 = -7,75^{\circ}\text{C}$$

Élévation de température due à la présence de l'unité terminale UT2 :

$$EI_2 = \frac{Q_2}{Q_D} \cdot \Delta t_2 = \frac{1,8}{18} \cdot 5 = 0,5^{\circ}\text{C}$$

La température à l'entrée de l'unité terminale UT2 a pour valeur :

$$t_{e2} = t_{M2} = t_{e1} + EI_2 = -7,75 + 0,5 = -7,25^{\circ}\text{C}$$

Élévation de température due à la présence de l'unité terminale UT3 :

$$EI_3 = \frac{Q_3}{Q_D} \cdot \Delta t_3 = \frac{3,6}{18} \cdot 5 = 1^{\circ}\text{C}$$

La température à l'entrée de l'unité terminale UT3 a pour valeur :

$$te3 = tM3 = te2 + EI3 = - 7,25 + 1 = - 6,25 \text{ °C}$$

Élévation de température due à la présence de l'unité terminale UT4 :

$$EI4 = \frac{Q4}{QD} \cdot \Delta t4 = \frac{4,5}{18} \cdot 5 = 1,25 \text{ °C}$$

La température à l'entrée de l'unité terminale UT4 a pour valeur :

$$te4 = tM4 = te3 + EI4 = - 6,25 + 1,25 = - 5 \text{ °C}$$

La somme de toutes les élévations de température du circuit de distribution a pour valeur :

$$\Sigma EI = (EI1 + EI2 + EI3 + EI4) = (0,25 + 0,5 + 1 + 1,25) = 3 \text{ °C} = \Delta tD$$

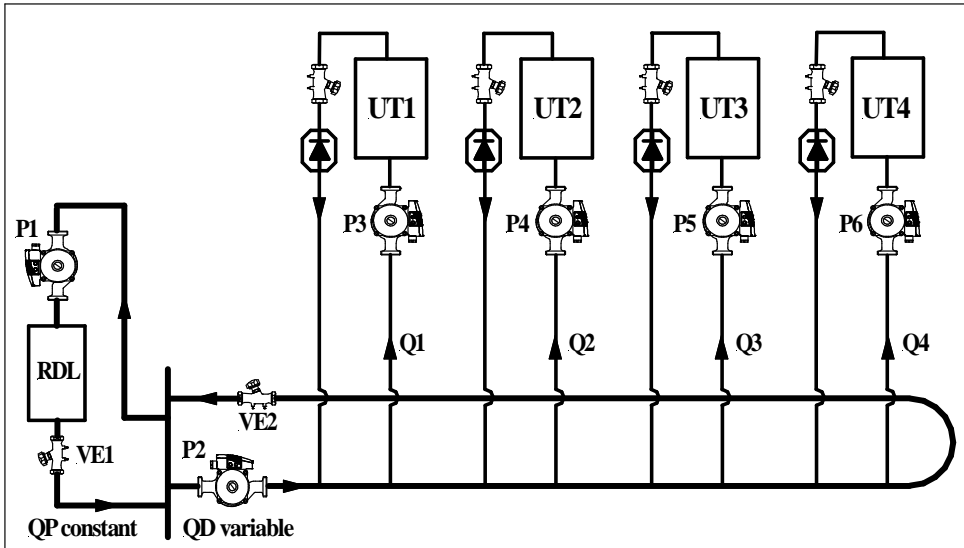
4.5. Comment peut-on réduire les élévations de température ?

La somme des élévations de température étant égale à l'écart de température nominal du circuit de distribution ($\Sigma EI = \Delta tD$), la seule possibilité, pour une puissance frigorifique donnée, de diminuer l'élévation totale de température c'est donc de réduire le ΔtD . L'expression de la puissance frigorifique du circuit de distribution étant : $P_{thoD} = \rho \cdot QD \cdot C \cdot \Delta tD$ avec ρ et C sensiblement constants, réduire ΔtD c'est inévitablement augmenter QD ! Cependant, l'augmentation du débit QD pénalise le bilan énergétique de l'installation en raison de la hausse de la consommation électrique due au pompage. Un compromis doit donc être trouvé. En pratique, ce compromis conduit généralement à des valeurs de ΔtD d'environ 2 à 4 °C.

Le seul moyen de réduire l'élévation de température propre à une distribution de type monotube dynamique c'est d'augmenter son débit.

Même si la résistance hydraulique équivalente du circuit de distribution ne résulte que du groupement en série d'un tube avec ses « accidents » (coudes, piquages, etc...), l'important débit qui la traverse nécessite une puissance de pompage qui peut dépasser 50 % de la puissance de pompage totale (somme des puissances de pompage des unités terminales, du circuit de distribution et de production). L'impérative nécessité en froid indirect d'optimiser la consommation d'énergie due au pompage conduit tout naturellement à vérifier la faisabilité d'une conversion de constant à variable du débit QD du circuit de distribution (Voir P 103).

Peut-on envisager un circuit de distribution à *débit variable* conformément au schéma de principe ci-dessous ?



La pompe P2 à *vitesse variable* électronique pourrait ajuster son débit QD en fonction du nombre d'unités terminales en demande, autrement dit, en fonction du nombre de pompes terminales (P3, P4, P5, P6) en fonctionnement.

$$El_x = \frac{Q_x \cdot \Delta t_x}{QD}$$

Ci-contre, le rappel de la formule de calcul de l'élévation de température due à la présence d'une unité terminale.

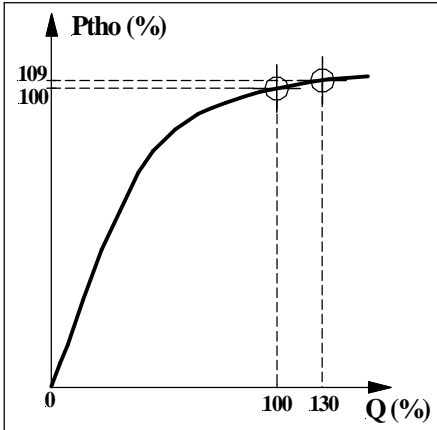
Rappelons aussi que pour une unité terminale UT_x d'une puissance frigorifique donnée, à la conception, le produit ($Q_x \cdot \Delta t_x$) est constant. Le choix du Δt_x effectué, la surface d'échange est définie. Il suffit dès lors d'ajuster in situ le débit Q_x et d'assurer une température d'entrée conforme au calcul pour obtenir la puissance frigorifique nominale. La relation ci-dessus montre qu'une baisse du débit QD du circuit de distribution entraîne une augmentation inévitable de l'élévation de température. Envisager à charge frigorifique partielle de réduire le débit QD, c'est donc accepter une réduction de puissance des unités terminales en demande (augmentation leur température d'entrée).

Un fonctionnement à débit variable d'un circuit de distribution de type monotube dynamique est à proscrire.

L'incompatibilité fonctionnelle avec un débit QD variable et la gestion des élévations de température constituent un handicap face à une distribution de type bitube ou bitube dynamique à débit *variable*.

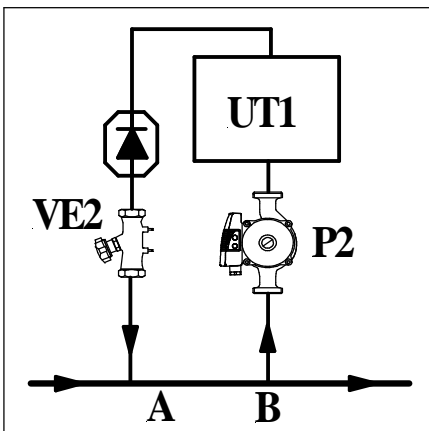
4.6. Conséquences d'un surdébit d'une unité terminale

Notons que pour une puissance frigorifique donnée, le produit ($Q_x \cdot \Delta t_x$) est constant. Au stade de l'étude, libre au concepteur de choisir les valeurs respectives de Q_x et Δt_x , pour peu que leur produit soit égal à la constante désirée. Une fois ce choix fait, la surface d'échange est définie. Sur le terrain, le technicien n'a par contre pas le choix du débit à ajuster, seule la valeur de calcul est correcte.



Ci- contre l'allure *indicative* de la courbe représentant la relation entre la puissance frigorifique (P_{tho}) d'une unité terminale et son débit (Q). Même si généralement un surdébit n'entraîne qu'une faible augmentation de la puissance frigorifique, cette dernière n'est pas nulle. Dans l'exemple ci-contre, pour un surdébit de 30 %, la surpuissance est de 9 %. Le produit ($Q_x \cdot \Delta t_x$) d'une unité terminale augmente alors, ainsi que l'élévation de température (E_{lx}).

Notons qu'un surdébit provoque une baisse du Δt de l'unité terminale et par suite, celle de la température équivalente de surface de l'échangeur. La part de puissance frigorifique latente augmente entraînant celle des pertes de masse des denrées non emballées. De plus, en froid indirect, l'optimisation de la consommation énergétique de pompage étant un combat permanent, tout surdébit doit être détecté pour être supprimé !



La présence de la vanne VE2 constitue pour le technicien un « œil » dans le circuit. La mesure et l'ajustement si nécessaire du débit de l'unité terminale est alors possible. Cette vanne d'équilibrage, comme son nom ne l'indique pas, n'a dans ce cas aucune fonction d'équilibrage mais juste de réglage du débit de calcul. Rappelons que la procédure de réglage est extrêmement simple en raison de la déconnection entre les points A et B.