

Optimisation du dimensionnement de conduites de chauffage.

Ing. F. HUAUX
Dr Ir V. HANUS
PIERRARD – Virton

Cet article explicite la recherche de points économiques optimaux en ce qui concerne l'isolation des conduites de chauffage, mais également du dimensionnement des conduites. Les valeurs obtenues sont alors comparées aux recommandations émises il y a une quinzaine d'années pour voir si elles sont toujours d'actualité.

Mots-clefs : canalisations, chauffage, isolation, pertes de charge, optima.

This article explains the research of optimal economic points in regard to the insulation of heating pipes but also to the sizing of pipes. The values obtained are then compared to the recommendations published 15 years ago to see if they are still relevant today.

Keywords : pipes, heating, insulation, head loss, hydraulic, optimisation.

1. Introduction

Lors de l'étude d'une installation de chauffage, la partie dimensionnement est régie par bon nombre de normes et recommandations. Pourtant, pour les procédés industriels, trouver le point de fonctionnement optimal permet d'être compétitif sur le marché. La démarche est d'autant plus importante à répéter lorsqu'on est confronté à des coûts de la chaleur faible, en l'occurrence en cas de valorisation de biomasse ou de déchets.

Cet article présente la recherche de ce point de fonctionnement idéal au niveau de l'isolation des conduites ainsi que pour les pertes de charge. Ces points seront mis en regard du cahier des charges énergétique installation de chauffage publié par la Région Wallonne [1].

2. Isolation thermique

2.1. Introduction

La détermination des déperditions thermiques est importante pour tout projet de chauffage. En effet, non seulement cela va majorer la puissance primaire à fournir, mais également imposer une circulation minimum du fluide pour maintenir le système en température. Ainsi, en réduisant les pertes thermiques, le système consomme moins d'énergie primaire, mais également moins d'énergie électrique pour la circulation du fluide.

Ainsi, la puissance primaire à fournir suit la relation suivante :

$$P_{tot} = \Sigma P + \Sigma p_{th} \quad (1)$$

Avec P : puissance individuelle | W
 p_{th} : pertes thermiques | W

2.2. Pertes thermiques

Les pertes thermiques sont quant à elles calculées suivant les échanges au travers de parois cylindriques :

$$p_{th} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot U \cdot l \cdot (T_{int} - T_{ext}) \quad (2)$$

$$\frac{1}{r \cdot U} = \frac{1}{r_{int.tube} \cdot h_{int.tube}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{int.tube} + e_{tube}}{r_{int.tube}}\right)}{k_{tube}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ext.tube} + e_{isolant}}{r_{ext.tube}}\right)}{k_{isolant}} + \frac{1}{r_{ext.isolant} \cdot h_{ext.isolant}} \quad (3)$$

Avec	p_{th} : flux thermique	W
	U : coefficient de transfert global	W/m ² .K
	l : longueur de la conduite	m
	h : coefficient d'échange de la surface	W/m ² .K
	k : coefficient de conduction	W/m.K
	(exemple disponible au tableau 1)	
	r : rayon	m

Matériaux	Conductivité [W/m.K]
Cuivre	380
Acier doux	50
Béton	0,92
Laine de roche	0,045

Tableau 1 : Propriétés thermiques des matériaux [2]

L'isolant choisi est un isolant composé de fibres ayant une conductivité de 0,04 W/m.K : c'est un isolant couramment utilisé dans le cas de conduites. Les coefficients d'échange de parois sont fixés respectivement à 25 et 75 W/m².K pour la paroi interne pour le DN25 et DN150 et 15 W/m².K pour la surface externe. On pourrait arguer que ces coefficients sont entachés d'une grande incertitude, mais l'influence de ces coefficients d'échange est marginale dès lors que l'épaisseur d'isolant dépasse quelques centimètres, comme cela peut se déduire de l'équation (3). C'est en pratique toujours le cas avec les valeurs rencontrées dans cet article. Un calcul plus précis de ces coefficients nécessite une analyse au cas par cas (par exemple au moyen d'une analyse CFD et d'une étude du rayonnement infrarouge), apportant une précision qui ne modifie pas fondamentalement les conclusions.

Deux tailles de tubes ont été sélectionnées : un DN25 ainsi qu'un DN 150. L'un représentant la taille utilisée pour les installations domestiques, l'autre pour les installations industrielles conséquentes. Le coût de l'isolation a été répertorié pour diverses épaisseurs d'isolation (voir tableau 2).

Épaisseur d'isolant [m]	DN25 [€/m]	DN150 [€/m]
0,025	4,26	13,67
0,03	5,31	14,32
0,04	7,69	17,79
0,05	10,59	21,69
0,06	12,57	27,38

Tableau 2 : Coût de l'isolation en mètre courant de tubes DN25 et DN150 [3]

2.3. Coût d'isolation

Pour diverses épaisseurs d'isolation, on peut visualiser les pertes thermiques qui s'y rapportent. Le coût de ces pertes thermiques est directement proportionnel au prix de l'énergie concernée.

En cherchant simplement une équation de tendance, les résultats obtenus en dehors de l'intervalle ne sont pas satisfaisants : d'une part, on obtient des valeurs négatives, mais en plus la divergence est trop importante pour en faire une comparaison sensée.

Alors on cherche à approximer le prix de l'isolation en regard de sa composition. Le tube isolant est composé de deux éléments simples : un corps isolant pouvant être assimilé à un volume ainsi qu'une feuille d'aluminium comparable à une surface. On trouve donc que le prix du tube isolant est égal :

$$C_{isolant} = C_{fibre} \left(\frac{\pi}{4} ((D + 2e_{isolant})^2 - D^2) \right) + C_{tôle} (\pi(D + 2e_{isolant})) \quad (4)$$

$$C_{tôle} = 8.94 \text{ €/m}^2 \text{ [4]}$$

Avec	$C_{isolant}$: coût de l'isolant	€/m
	C_{fibre} : coût de la fibre	€/m ³
	$C_{tôle}$: coût de la tôle	€/m ²
	$e_{isolant}$: épaisseur d'isolant	m

Connaissant le coût de la tôle d'aluminium ainsi que le coût de l'isolant, il est possible de déterminer le coût de la fibre.

$$C_{fibre} \approx 454 \text{ €/m}^3$$

Pour chaque type d'énergie (et en fonction de son tarif, les rendements de production n'étant pas considérés), on peut donc déterminer l'épaisseur octroyant le coût de fonctionnement le plus bas. On distingue deux types d'installations : l'un rencontré dans les parcs industriels ou les réseaux de chaleur (8200 h/an de fonctionnement), l'autre à usage domestique (5800 h/an de fonctionnement), tous deux pour une période de 10 ans.

2.4. Résultats

La figure 1 illustre la recherche de l'optimum dans un cas particulier : y est représenté le coût total, subdivisé en investissement pour l'isolation et coût de fonctionnement dû aux déperditions en fonction de l'épaisseur d'isolation. Le coût d'investissement est un coût croissant avec l'épaisseur (puisque plus de matière est nécessaire), tandis que le coût de fonctionnement est décroissant avec l'épaisseur (puisque les déperditions décroissent avec l'épaisseur d'isolation, pour autant que l'on dépasse le rayon critique, ce qui est en pratique toujours le cas). Cette courbe présente donc un minimum pour chaque situation rencontrée, et lorsque les paramètres varient, celui-ci se déplace.

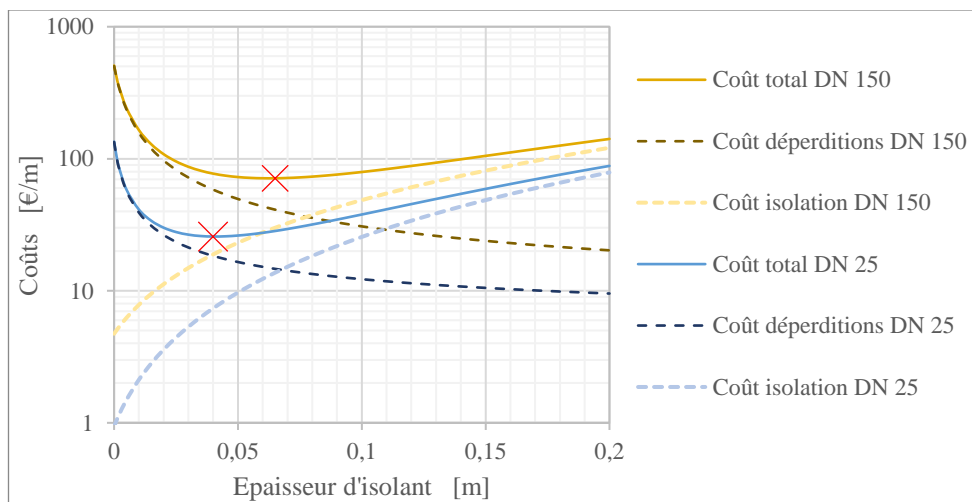


Figure 1 : Épaisseur d'isolant optimale pour un chauffage électrique

Épaisseur optimale d'isolant [mm] pour $\Delta T = 65^{\circ}\text{C}$			Industrie		Domestique	
Moyen de chauffage	Prix [c€/kWh]	Date	DN 25	DN150	DN 25	DN150
Électricité [5]	0,2	Juin-19	110	170	95	150
Propane (bout.) [6]	0,186	Sept-19	110	165	95	145
Propane (citer.) [7]	0,145	Sept-19	10	150	85	130
Mazout [8]	0,064	Sept-19	70	105	60	90
Plaquette de bois [9]	0,027	Juin-17	50	75	40	65
Épaisseur optimale d'isolant [mm] pour $\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$			Industrie		Domestique	
Moyen de chauffage	Prix [c€/kWh]	Date	DN 25	DN150	DN 25	DN150
Électricité [5]	0,2	Juin-19	80	125	70	105
Propane (bout.) [6]	0,186	Sept-19	80	120	70	105
Propane (citer.) [7]	0,145	Sept-19	70	110	60	95
Mazout [8]	0,064	Sept-19	50	75	40	65
Plaquette de bois [9]	0,027	Juin-17	35	50	30	45

Tableau 3 : Épaisseur optimale d'isolant pour différents moyens de chauffage et différents diamètres [5-9]

On peut donc étudier l'influence de nombreux paramètres : le Tableau 3 : Épaisseur optimale d'isolant pour différents moyens de chauffage et différents diamètres - tableau 3 présente le résumé des optima :

- Entre la partie inférieure et la partie supérieure, on fait varier la différence de température entre le fluide caloporteur et le milieu dans lequel il se trouve.
- Les différentes lignes présentent différents combustibles utilisés pour produire la chaleur transportées, avec leurs coûts respectifs.
- Les colonnes « industrie » et « domestique » font varier la durée de fonctionnement.
- Chaque colonne représente un diamètre nominal de conduite différent.
- Les valeurs indiquées sont les épaisseurs optimales d'isolation.

La conclusion générale qu'on en tire est qu'il faut plus d'isolant quand :

- le prix de l'énergie est plus important ;
- le diamètre est plus important ;
- le nombre d'heures d'utilisation est plus important.

On peut essayer de faire correspondre les valeurs du tableau 3 avec celles de la figure 2 (recommandations de la Région Wallonne). On peut remarquer que la couche d'isolant minimale pour de faibles diamètres de la figure 2 correspond aux calculs établis pour une utilisation domestique avec une source d'énergie primaire de très faible coût dans le tableau 3 : dans le présent cas, des plaquettes de bois (valeurs encadrées en rouge). Pour ce qui est des diamètres conséquents, les valeurs préconisées dans la figure 2 se situent entre les deux sources d'énergie les plus abordables du tableau 3.

Conduite intérieure (température ambiante : 15°C)		
Épaisseur d'isolant rapportée à un coefficient de conductibilité de 0,04 W/mK [en mm]		
Température de l'eau	45 °C (*)	80°C
DN		
10	25	30
15	25	30
20	25	40
25	25	40
32	30	40
40	30	50
50	30	50
65	40	50
80	40	60
100	40	60
125	50	60
150	50	80
200	50	80
250	60	80
300	60	80
350	60	80
400	60	80

(*) température équivalente à un fonctionnement en température glissante en fonction de la température extérieure

Figure 2 : Isolation minimale selon le cahier des charges de la RW [1]

Épaisseur optimale d'isolant [mm] pour $\Delta T = 65^\circ C$			Industrie		Domestique	
Moyen de chauffage	Prix [c€/kWh]	Date	DN 25	DN150	DN 25	DN150
Mazout [7]	0,048	Juin-04	60	90	50¹	80²
Épaisseur optimale d'isolant [mm] pour $\Delta T = 30^\circ C$			Industrie		Domestique	
Moyen de chauffage	Prix [c€/kWh]	Date	DN 25	DN150	DN 25	DN150
Mazout [7]	0,048	Juin-04	40	65	35³	55⁴

Tableau 4 : Isolation optimale pour du mazout en 2004 [10]

¹ Valeur préconisée : 50 mm

² Valeur préconisée : 80 mm

³ Valeur préconisée : 25 mm

⁴ Valeur préconisée : 40 mm

Cependant ce cahier des charges de la figure 2 a été réalisé en 2004 où le prix du mazout était 44,7% moins élevé qu'actuellement. En réitérant le calcul avec le prix de 2004, on peut constater que l'on retombe sur la norme pour les diamètres importants, avec un léger excès dans nos calculs pour le diamètre le plus faible.

On peut conclure que le cahier des charges a été rédigé à la base pour une utilisation domestique ainsi qu'avec la source d'énergie la plus répandue ; le mazout de chauffage. Du fait de l'augmentation globale du prix de l'énergie au long de ces années⁵, il serait intéressant de mettre à jour ce cahier des charges pour obtenir des valeurs représentatives de la situation actuelle.

3. Dimensionnement de la conduite

3.1. Introduction

Dans le cahier des charges de la Région Wallonne, il est recommandé de réaliser le dimensionnement des conduites pour 120 Pa/m. Dans le milieu professionnel, on entend régulièrement que le surdimensionnement coûte cher et qu'il faut atteindre le dimensionnement le plus juste. Dans cette section, on compare le coût d'utilisation de tuyauterie en fonction du débit à y faire passer. Ce calcul est très classique, mais son intérêt est la comparaison de son résultat avec les recommandations de la Région Wallonne.

3.2. Pertes de charge

Les pertes de charge sont les paramètres déterminants dans une étude de canalisation. En effet, non seulement elles déterminent la section de la tuyauterie, mais également la puissance de la pompe à intégrer au circuit. Pour permettre la comparaison, on établit les calculs sur un mètre de tuyauterie. On établit le calcul pour des sections allant du DN 6 au DN500, ainsi que pour des débits allant de 0.1 à 500 m³/h.

Les pertes de charge linéaires unitaires sont calculées comme suit :

$$\Delta Pu = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (5)$$

Avec	ΔPu : pertes de charge	Pa/m
	λ : coefficient de perte de charge linéaire	-
	d : diamètre	m
	ρ : masse volumique	kg/m ³

⁵ Une comparaison plus exacte tiendrait compte de l'évolution du prix des isolants, plus particulièrement de son évolution différente de celle du prix de l'énergie.

v : vitesse d'écoulement du fluide | m/s

Pour cela, d'autres équations sont nécessaires, et sont listées ci-dessous.

$$Re = d \cdot \frac{v^2}{\nu} \quad (6)$$

Avec ν : viscosité cinématique | m²/s
 Re : nombre de Reynolds | -

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (7)$$

Avec μ : viscosité dynamique | Pa.s

En régime laminaire (lorsque le nombre de Reynolds est inférieur à 2000), l'état de surface et le matériau de la conduite n'influencent pas la perte de charge. Une distinction est apportée lorsque l'écoulement est turbulent : il est dit soit lisse (lorsque le nombre de Reynolds est inférieur à 20000), ou rugueux (lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 20000). Le coefficient de perte de charge linéaire se calcule alors selon les équations (8), (9) et (10).

$$Si Re < 2000 \quad \Lambda = \frac{64}{Re} \quad (8)$$

$$Si Re > 20000 \quad \Lambda = 0,316 \cdot Re^{-0,25} \quad (9)$$

$$Si Re > 20000 \quad \Lambda = 0,79 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{d}} \quad (10)$$

Avec Re : nombre de Reynolds | -
 ε : rugosité du matériau | mm
(valeurs disponibles au Tableau 5)

Type	ε
Tuyau étiré	<0,001
Tuyau PER	0,007
Tuyau industriel en laiton	0,025
Tuyau en acier laminé neuf	0,05
Tuyau en acier laminé rouillé	0,15 à 0,25
Tuyau en acier laminé incrusté	1,5 à 3
Tuyau galvanisé	0,15 à 0,2
Tuyau de ciment brut	<3
Tuyau de béton	0,9 à 1,5

Tableau 5 : Récapitulatif rugosité [11]

Les pertes de charge singulières sont calculées suivant l'équation () :

$$\Delta P = K \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (11)$$

Avec K : coefficient de perte de charge | -

Le facteur K varie en fonction de l'instrument qu'il traverse (voir tableau 6), mais aussi en fonction de la section de l'élément. Il y a alors un coefficient de correction nommé A , repris dans le tableau 7.

Élément	$\frac{K}{A}$
Vannes	35
Clapet antiretour	40
Filtre	420
Coude	30

Tableau 6 : Coefficient de correction d'éléments [12]

Taille de tuyau	A
DN 5	0,027
DN 20	0,025
DN 25	0,023
DN 40	0,021
DN 50	0,019
DN 80	0,018
DN 100	0,017
DN 125	0,016
DN 150	0,015
DN 225	0,014
DN 300	0,013
DN 400	0,012

Tableau 7 : Coefficient de correction de section [12]0

On choisit des tuyaux en acier pour les calculs, car ils sont très largement utilisés dans les systèmes de chauffage.

3.3. Coût d'utilisation

Des pertes de charges calculées, ; on peut calculer la puissance hydraulique nécessaire pour déplacer le fluide.

$$P_{hyd} = Q_v \cdot p \quad (12)$$

P_{hyd} : puissance hydraulique	W	
Q_v : débit dans la conduite		m ³ /s
p : pression		Pa

Une fois la puissance connue, on peut alors déterminer le coût de la consommation électrique en supposant le rendement des pompes centrifuges à 60%, ainsi que le rendement du moteur électrique à 90%⁶.

D'autres coûts rentrent en considération pour une installation de chauffage, le prix du tuyau en lui-même ainsi que celui de son isolation [13]. Le coût de l'isolation a été déterminé pour des épaisseurs recommandées par la Région Wallonne, car ce sont celles encore appliquées à l'heure actuelle.

Le prix du placement de ces tuyauteries est à prendre en considération également. Le temps de pose du mètre est supposé égal pour chaque section à 12 minutes. La charge maximale transportable par un plombier est de 30 kg sur une échelle. Le coût horaire moyen d'un plombier est égal à 50 €/h [14].

La durée de vie théorique des tuyaux de chauffage est estimée à 25 ans [15]. La durée de vie de l'isolation est estimée à 10 ans, cependant on ne prévoit qu'un seul remplacement sur la période de calcul.

3.4. Résultats

Le calcul de ces coûts permet de trouver une surface représentant toutes les combinaisons de débit et de section de tuyauterie, visible à la figure 3 au niveau des axes horizontaux. L'axe vertical représente le coût total, somme de l'investissement et du coût de fonctionnement. Pour un débit fixé, le coût d'investissement croît avec le diamètre, et le coût de fonctionnement décroît avec celui-ci (vu que les pertes de charge décroissent) : il en résulte donc un minimum. Ces optima sont identifiés et rassemblés dans les graphiques suivants.

⁶ Ces valeurs sont dans la fourchette basse de ce que la technologie offre actuellement, ce qui tend à augmenter légèrement le diamètre optimal.

Pour une application domestique⁷ (figure 4), on observe une moyenne pour tout débit de 80 Pa/m. En réalité, pour une application domestique la gamme de débit varie entre 0.1 à 2 m³/h, ce qui donne une perte de charge idéale de 178 Pa/m. Si l'on néglige la première valeur, la moyenne est alors de 147 Pa/m ce qui n'est pas si éloigné de ce qui est recommandé : 120 Pa/m.

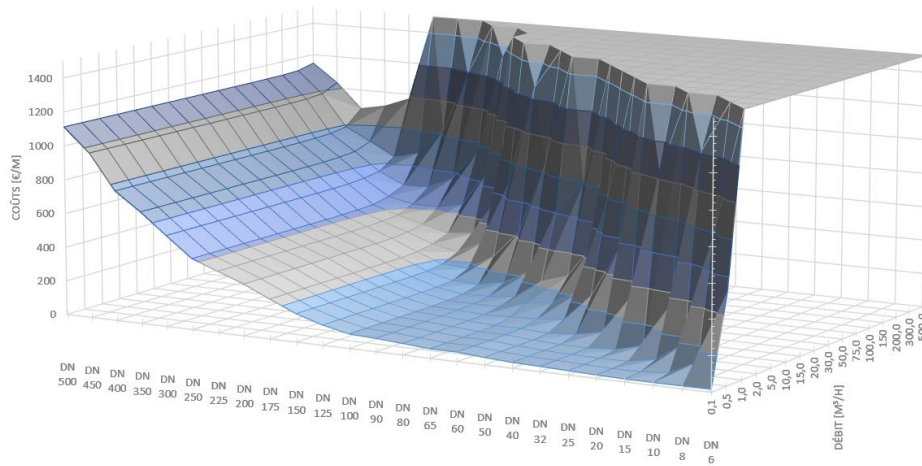


Figure 3 : Coût total pour différentes combinaisons de débit et de section

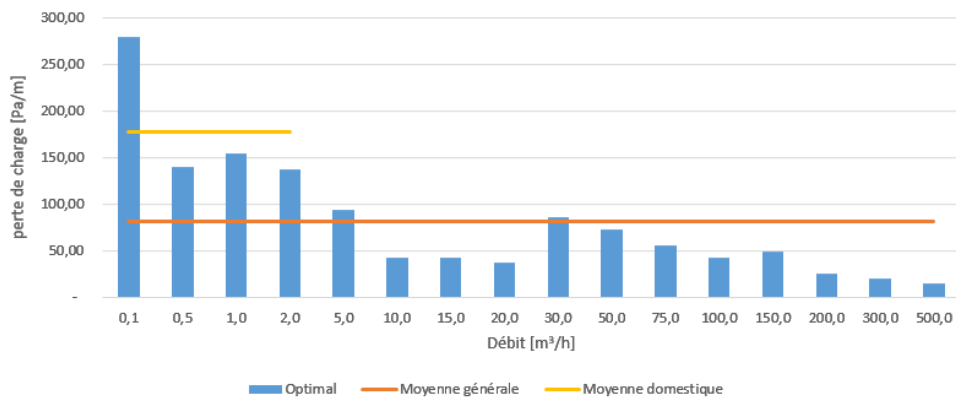


Figure 4 : Pertes de charge optimales pour une utilisation domestique

Dans le cadre d'une utilisation industrielle⁸ (figure 5), on remarque que les pertes de charge idéales sont bien plus basses en raison du temps de fonctionnement plus conséquent, surtout quand il s'agit de débit important (supérieur à 10 m³/h).

⁷ Soit un temps de fonctionnement lié à la saison, choisi ici égal à 5800 h/an.

⁸ Soit un temps de fonctionnement plus élevé, choisi ici égal à 8200 h/an.

On peut conclure que les recommandations du cahier des charges ne sont pas adaptées pour des applications industrielles. Il est important de dire que tous les coûts ne sont pas inclus. Par exemple le coût des accessoires augmente fortement avec la section. Cependant leur nombre dépend de l'application de la boucle ainsi que de la disposition du site, ce qui rend leur intégration dans ces calculs difficile.

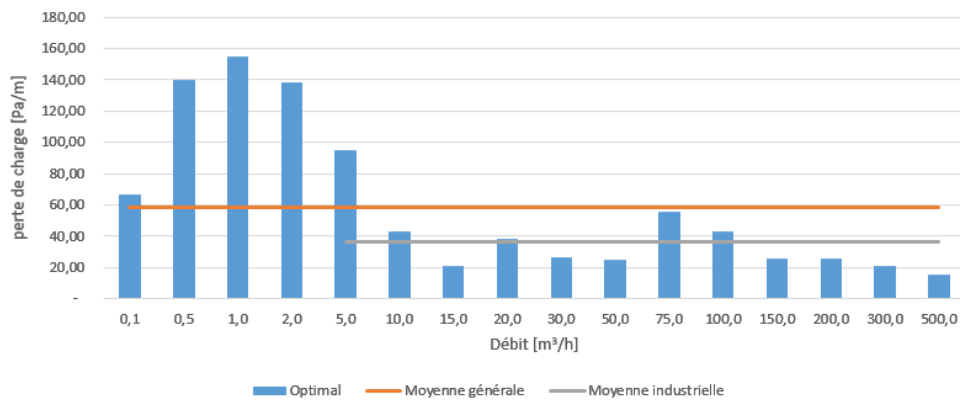


Figure 5 : Pertes de charge optimales pour une utilisation industrielle

Dans la pratique, d'autres paramètres influencent le choix de la section du tuyau. L'un d'entre eux, est la vitesse d'écoulement du fluide, il y a donc une limite basse ainsi qu'une limite haute.

La limite basse est fixée à 0.3 m/s afin d'éviter la formation de dépôt dans le fond de la conduite. Ce dépôt engendre un effet de corrosion par aération différentielle. Le matériau étant exposé à un milieu en teneur d'oxydant différent, il apparait un potentiel électrochimique qui accélère la corrosion de la conduite et qui par conséquent diminue sa durée de vie.

La limite haute est variable selon la section de la conduite. Elle a surtout pour but de limiter les nuisances sonores. Ce paramètre à un intérêt surtout pour les installations domestiques et est parfois négligé dans le milieu industriel. Or, à des vitesses trop élevées, les particules présentes dans l'eau usent prématurément les conduites de chauffage, c'est ce que l'on appelle l'abrasion. À cela se rajoute le phénomène de corrosion naturelle d'un acier en présence d'eau une fois la couche protectrice enlevée. C'est pour cette raison qu'il est aussi important de déterminer une limite haute pour la vitesse de circulation dans le cadre de l'industrie.

La relation empirique de Croquelois définit la vitesse d'écoulement silencieuse en fonction du diamètre intérieur de conduite.

$$V_{silence} = \sqrt{\left(\frac{d}{0,05}\right)} \quad (13)$$

Avec $V_{silence}$: vitesse silencieuse | m/s
 d : diamètre intérieur de la conduite | m

Une seconde relation permet de déterminer un diamètre de conduite en relation avec le débit.

$$D_{silence} = 0,0229 \cdot Q_v^{0,4} \quad (14)$$

Avec $D_{silence}$: diamètre minimal pour atteindre la vitesse silencieuse | m
 Q_v : débit dans la conduite | m³/h

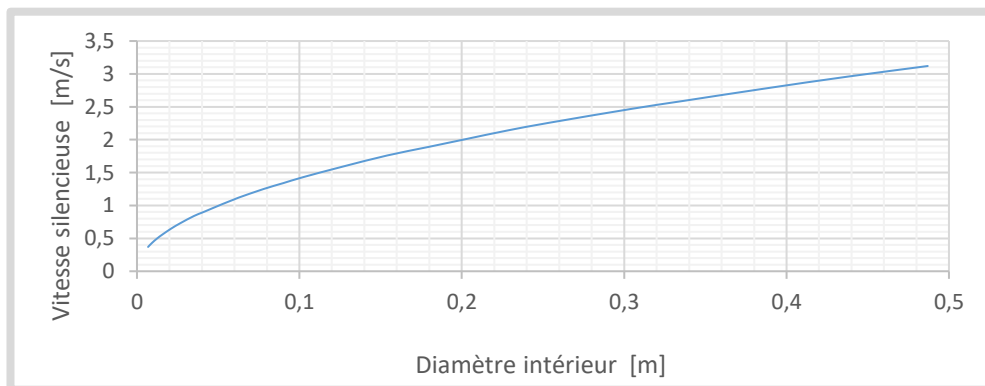


Figure 6 : Relation de Croquelois

Lorsque l'on restreint le domaine de calcul avec les limites de vitesse (figure 7), peu de combinaisons sont alors possibles. Cependant lorsque l'on regarde aux optima, ils restent inchangés, à l'exception du débit égal à 0,1 m³/h en utilisation industrielle (figure 8). En effet, l'optimal économique se trouve en dehors de la plage de vitesse. Cependant, on a du mal à imaginer un débit aussi faible pour une application industrielle.

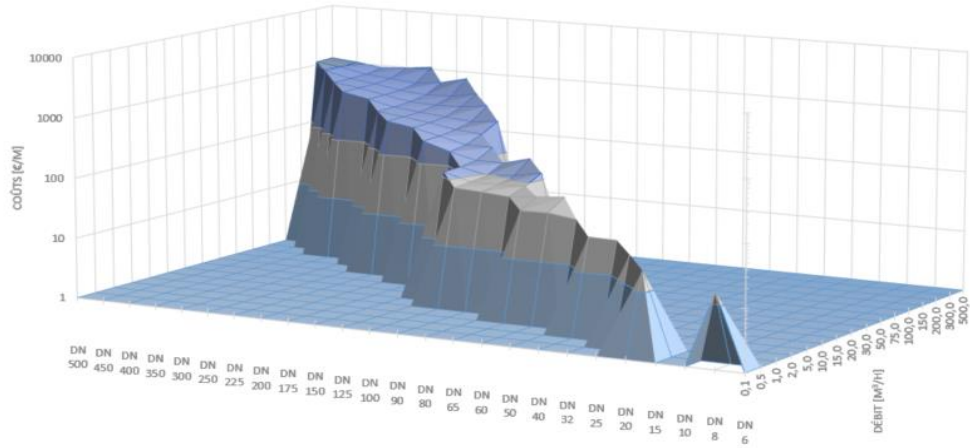


Figure 7 : Combinaison de débit et de section en domaine restreint

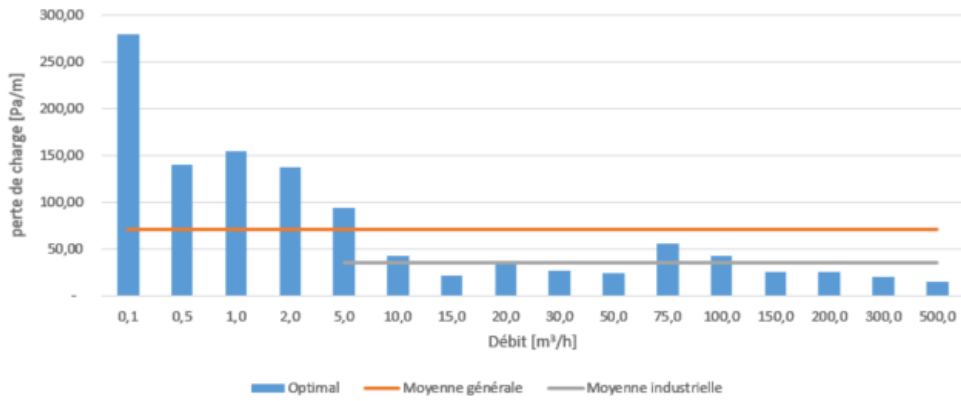


Figure 8 : Pertes de charge optimales pour une utilisation industrielle en domaine restreint

Cette analyse tiendrait à être approfondie pour chaque cas particulier rencontré, mais elle permet déjà de dégager une recommandation de prudence vis-à-vis des recommandations de la Région Wallonne dans le cas des applications industrielles.

4. Conclusion

Le calcul du diamètre optimal et de son isolation pour minimiser les coûts pour une tuyauterie dépend d'un nombre limité de paramètres. Une analyse économique permet de déterminer, pour un débit donné, le diamètre optimal et son épaisseur d'isolation. Les résultats obtenus le sont pour différents combustibles et un régime de température de chauffage courant pour l'eau chaude. Ces résultats peuvent évidemment varier en fonction des tarifs des énergies (variables dans le temps) et de l'évolution technologique des moyens utilisés pour produire l'eau chaude.

Force est de constater que le cahier des charges de la Région Wallonne [1] présente des valeurs adaptées à l'époque de sa rédaction, mais que ces optima se sont depuis modifiés dans le sens d'une plus grande épaisseur d'isolation. Concernant le diamètre des conduites (pour un débit donné), les valeurs recommandées divergent de l'optimum pour des diamètres rencontrés dans les installations industrielles.

Cet article incite donc à la prudence face à des valeurs par défaut. Pour des installations particulières telles que des installations industrielles, une optimisation sur mesure est préférable.

5. Sources

- [1] *Cahier des charges énergétique – Installation de chauffage*, Architecture et Climat – UCL, Louvain-la-Neuve, juin 2004, 32 p.
Adresse URL : https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/buretudes_chauffage_juin04.pdf?ID=1781
- [2] ARCHITECTURE ET CLIMAT, (mis en ligne le 26 octobre 2007), *La conductivité thermique des matériaux (λ) – Energie Plus Le Site*.
Adresse URL : https://energieplus-lesite.be/donnees/transferts-hygrothermiques/enveloppe2/la-conductivite-thermique-des-materiaux/#Les_metaux
- [3] *Liste de prix isolation des installations techniques et protection incendie 2019*, Rockwool, Wijnegem (Belgique), juillet 2019, 40 p.
Adresse URL : <https://cdn01-fr.rockwool.be/siteassets/rw-bnl/downloads-fr/downloads/liste-de-prix/lisolation-technique/liste-de-prix-hvac-fp-fr.pdf?f=20190903024651>

- [4] LEBOUTTE, (consulté le 15 septembre 2019), *Tôle plane aluminium. Achat en ligne ou dans notre magasin.*
Adresse URL : https://www.leboutte.be/catalogue_fr_metaux_aluminium_tole_standard_tole-plane-aluminium.html
- [5] *Prix de l'électricité et du gaz naturel en Belgique, dans les 3 régions et les pays voisins*, CREG, Bruxelles, 28 juin 2019, 14 p.
Adresse URL : <https://www.creg.be/sites/default/files/assets/Prices/BelEnergy-PriceCompFR.pdf>
- [6] PICBLEU, (mis en ligne le 25 mai 2019), *Achat des bouteilles de gaz des grandes surfaces et supermarchés.*
Adresse URL : <https://www.picbleu.fr/page/bouteille-de-gaz-grandes-surfaces-supermarches-grande-distribution>
- [7] TARIFGAZ, (mis en ligne le 28 novembre 2018), *Tarif du gaz propane : environ 1,75 € par kg.*
Adresse URL : <https://tarifgaz.com/faq-unite/tarif-propane-kg>
- [8] CARBU.COM, (consulté le 15 septembre 2019), *Prix maximum du mazout en Belgique.*
Adresse URL : <https://carbu.com/belgique/prixOfficielMazout>
- [9] APERE, (mis en ligne le 11 septembre 2017), *Les prix de détails de l'énergie en 2017 sont stables.*
Adresse URL : <https://www.renouvelle.be/fr/statistiques/les-prix-de-detaills-de-lenergie-en-2017-sont-stables>
- [10] DH.BE, (mis en ligne le 12 avril 2008), *Prix du diesel et du mazout depuis 1970.*
Adresse URL : <https://www.dhnet.be/archive/prix-du-diesel-et-du-mazout-depuis-1970-51b7eea2e4b0de6db999abe1>
- [11] PIERRET, M., *Mécanique des fluides : chapitre 5 : hydrodynamique des fluides visqueux*, Notes de cours, Virton, Belgique : Haute École de Namur-Liège-Luxembourg, septembre 2018.
- [12] THERMEXCEL (consulté le 26 février 2019), *Pertes de charge singulières.*
Adresse URL : https://www.thermexcel.com/french/resourc/perte_de_charge_singuliere_pression_dynamique.htm

- [13] *TARIF 2016 – 2016 PRICE LIST*, P. Saint-germain – SOCOMEX, Fornex, mars 2016, 23p.
Adresse URL : <http://www.socomex-distribution.com/media/pdf/2016-socomex-tarifs-v4.pdf>
- [14] TRAVAUX .COM (consulté le 22 septembre 2019), *Guide des prix plomberie*.
Adresse URL : <https://www.travaux.com/guide-des-prix/plomberie>
- [15] AYCATEKNIK (consulté le 27 septembre 2019), *La durée de vie des tubes en acier pour le chauffage*.
Adresse URL : <https://fre.aycateknik.com/srok-sluzhby-sistemy-otopenija-iz-metallicheskih>