

PRODUCTION THERMIQUE ISSUE DE CHAUFFERIE BIOMASSE

FICHE TECHNIQUE : COMPTAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE

EAU CHAUDE ET SURCHAUFFEE

Mai 2012

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par Enertime SAS

Coordination technique : Marina Boucher – Service Bioressources
Direction Productions et Energies Durables – ADEME (Angers)

N°contrat : 1201C0006



FICHE TECHNIQUE : EAU CHAUDE ET SURCHAUFFEE

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les membres du comité de suivi de l'étude à l'ADEME, Marina Boucher, Frédéric Streiff et Sylvain Bordebeure, pour leur disponibilité et leur confiance tout au long de ce travail.

Les auteurs adressent également leurs remerciements à Bruno Bretel (B2 Ingénierie) et Jacques Daunay (Barrault Recherche) pour leurs conseils et le partage de leur expérience dans le domaine du comptage thermique.

En français :

L'ADEME en bref :

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

www.ademe.fr.

En anglais :

About ADEME:

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry for Ecology, Sustainable Development, Transport and Housing, the Ministry for Higher Education and Research, and the Ministry for Economy, Finance and Industry. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development. ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

www.ademe.fr.

En français :

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

En anglais:

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

Sommaire

I. Introduction aux méthodes de comptage de l'énergie thermique	5
1. Pourquoi mesurer l'énergie thermique des installations biomasse-énergie	5
2. Définition de l'eau chaude et de l'eau surchauffée	6
3. Composition d'un compteur d'énergie thermique	6
4. Grandeurs à mesurer	6
5. Principe de calcul de la puissance thermique	6
6. Schéma de comptage et points de mesure sur le circuit d'eau chaude/surchauffée	8
II. Méthodes de comptage de l'énergie thermique dans un circuit d'eau chaude	8
1. Méthodes de comptage et technologies	8
1. Mesure du débit d'eau chaude/surchauffée	9
2. Mesure de la température	9
2. Principe de fonctionnement des débitmètres	10
1. Débitmètres à pression différentielle	10
2. Débitmètres à turbine	11
3. Débitmètre électromagnétique	11
4. Débitmètre à ultrasons à temps de propagation	12
5. Débitmètres à vortex	12
6. Débitmètre massique à capacité thermique	12
7. Débitmètre massique à effet Coriolis	13
III. Contraintes des fluides et performances	14
1. Gammes de température et pression d'usage	14
2. Caractéristiques dynamiques et de la conduite	14
1. Diamètre nominal	15
2. Dynamique de mesure	15
3. Perte de pression	15
4. Longueur droite minimale recommandée	15
3. Exactitude des mesures	17
1. Exactitude de la mesure de débit	17
2. Exigences d'exactitude	17
3. Détermination de l'exactitude	19
4. Répétabilité et reproductibilité	19
4. Signal de sortie et télérelève des données	19
1. Sans report d'information (indicateur local)	19
2. Avec report impulsionnel	20
3. Avec report M-Bus	21
IV. Critères de sélection	22
1. Critères de sélection d'un compteur d'énergie thermique	22
2. Éléments relatifs au coût d'acquisition et maintenance	22
3. Agrément pour transactions commerciales	23
4. Grille d'aide à la sélection du débitmètre	23
Références bibliographiques	24

Résumé

Cette fiche présente les méthodes et technologies adaptées au comptage de l'énergie thermique produite par une chaudière biomasse utilisant de l'eau chaude ou de l'eau surchauffée comme fluide caloporteur.

La mesure de débit d'eau chaude ou surchauffée doit être de préférence réalisée par un système à pression différentielle à diaphragme ou équivalent. D'autres technologies sont utilisables mais doivent être adaptées aux conditions du fluide et du circuit.

Pour la procédure de comptage de l'énergie thermique produite par l'installation, se rapporter au **Cahier des charges à destination du bénéficiaire de l'aide ADEME pour le comptage et la transmission des données.**

Les extraits des normes :

- *NF EN 1434-1 Août 2007. Compteurs d'énergie thermique - Partie 1 : prescriptions générales.*
- *NF EN 1434-3 Avril 2009. Compteurs d'énergie thermique - Partie 3 : échange de données et interfaces.*
- *NF EN 1434-6 Août 2007. Compteurs d'énergie thermique - Partie 6 : installation, mise en service, surveillance de fonctionnement et maintenance.*

sont reproduits avec l'accord d'Afnor. Seuls les textes originaux et complets des normes telles que diffusées par Afnor Editions – accessibles via le site internet www.boutique-afnor.org – ont valeur normative. "

I. Introduction aux méthodes de comptage de l'énergie thermique

Suite aux réflexions conduites dans le cadre du Grenelle Environnement, l'ADEME s'est vue confier la gestion d'un fonds « chaleur renouvelable » pour développer la biomasse-énergie, le solaire, les pompes à chaleur, la géothermie, le biogaz... dans l'habitat collectif, le tertiaire, l'agriculture et l'industrie.

Ce fonds doit permettre de répondre aux objectifs ambitieux qui ont été fixés à l'horizon 2020 pour les énergies renouvelables.

En ce qui concerne la filière biomasse énergie, le maître d'ouvrage bénéficiaire d'une aide du fonds chaleur aura à sa charge l'investissement et l'exploitation d'un compteur énergétique mesurant la production thermique de la chaudière biomasse, le versement des aides par l'ADEME étant conditionné par la production thermique réelle de l'installation nouvelle (mégawatt-heures produits).

Pour une installation produisant plus de 1 000 tep par an d'énergie thermique, le maître d'ouvrage devra transmettre quotidiennement la production thermique à l'ADEME, via une plateforme de télérelève et respecter les recommandations du cahier des charges « *Suivi à distance de la production énergétique des installations biomasse énergie : Cahier des charges à destination du bénéficiaire de l'aide ADEME pour le comptage et la transmission des données.* »

Cette fiche a pour objectif de présenter les méthodes et technologies à utiliser pour le comptage de l'énergie thermique produite par des installations biomasse-énergie utilisant de l'eau chaude ou de l'eau surchauffée.

1. Pourquoi mesurer l'énergie thermique des installations biomasse-énergie

Les chaudières biomasse sont utilisées dans l'industrie, l'agriculture, le tertiaire et dans le collectif tertiaire pour produire de l'énergie thermique, utilisée sous forme de vapeur (saturée, sèche ou surchauffée), d'eau chaude ou surchauffée, d'huile thermique ou d'air chaud. Dans le cas d'une installation aidée par l'ADEME, le versement à l'exploitant de l'aide financière est conditionné à la production d'énergie réelle, qui doit donc être mesurée de manière précise.

La mesure de l'énergie thermique dans un circuit permet de :

- Connaître les quantités d'énergie produites par la chaudière et consommées par le circuit de l'utilisateur ;
- Déterminer le rendement de l'installation, le coût de production de l'énergie thermique et la consommation d'énergie par unité de produit fini (dans le cas d'une entreprise industrielle) ;
- Adapter la production d'énergie thermique à la demande du circuit de l'utilisateur ;
- Et surtout de **valider de manière normalisée et fiable les quantités d'énergie thermique effectivement produites, dans le cadre du conditionnement d'une aide financière à la production réelle de la chaudière** et/ou de transactions commerciales.

La mesure de l'énergie thermique est réalisée à l'aide d'un compteur d'énergie thermique, instrument qui, dans un circuit d'échange thermique, mesure l'énergie transportée par un fluide caloporteur. Il existe plusieurs catégories de compteurs adaptées à différents types de fluide (eau chaude, vapeur, air chaud, huile thermique) et différentes caractéristiques du fluide (pression, température, viscosité, charge, etc.).

2. Définition de l'eau chaude et de l'eau surchauffée

L'eau chaude est utilisée pour le chauffage de locaux, la production d'eau chaude sanitaire ou encore le séchage de produits industriels ou agricoles. On parle d'eau chaude (également appelée eau chaude basse température) lorsque sa température se trouve entre 80 et 110°C. Des applications à des températures inférieures peuvent également exister.

L'eau surchauffée est utilisée pour le chauffage ou dans l'industrie (lavage, pasteurisation, etc.) On considère l'eau comme surchauffée lorsqu'elle se trouve à l'état liquide à une température supérieure à 110°C (on parle également d'eau chaude haute température). L'eau surchauffée est généralement utilisée jusqu'à 180-200°C.

3. Composition d'un compteur d'énergie thermique

Un compteur d'énergie thermique est soit un équipement complet, soit un équipement constitué d'une combinaison de sous-ensembles :

- **Un mesureur (débitmètre)** : dispositif de mesure du débit du fluide caloporteur ;
- **Deux sondes de température** : mesurent la différence de température entre les deux points de mesure ;
- **Un concentrateur** : automate qui récupère et traite les données transmises par le mesureur et les sondes. Il calcule la puissance thermique instantanée et réalise un cumul en continu ;
- Dans le cas d'une télérelève de l'énergie thermique comptée, le concentrateur comprend un **équipement de télétransmission des données** (GPRS/GSM, Ethernet, etc.).

4. Grandeurs à mesurer

Pour le comptage de l'énergie thermique sur un circuit d'eau chaude ou surchauffée, il est nécessaire de mesurer :

- **Le débit massique ou volumique** de l'eau chaude ou surchauffée ;
- **La différence de température** de l'eau entre l'entrée et la sortie de la chaudière.

Le compteur d'énergie thermique exprime la quantité d'énergie thermique en unités de mesure légales ou pratiques.

5. Principe de calcul de la puissance thermique

La puissance thermique transmise par le fluide caloporteur de la chaudière (ici l'eau) au circuit utilisateur est exprimée selon la formule :

$$P_{th} = Q_m \times \Delta T \times C_p \times 1000$$

Avec :

P_{th} : Puissance thermique exprimée en kW
 Q_m : débit massique du fluide en kg/s

ΔT : différence de température entre T_1 et T_2 aux deux points de mesure (en $^{\circ}\text{C}$).

C_p : coefficient calorifique du fluide en Joule/kg. $^{\circ}\text{C}$. C_p peut être une valeur fixe ou variable, en fonction des valeurs réelles dans la plage de fonctionnement du compteur. Le coefficient C_p peut être obtenu à partir de tables préexistantes (voir ci-dessous).

Pour rappel :

- **Relation entre débit massique et débit volumique :**

$$Q_m = Q_v * \rho / 3\,600$$

Avec :

- Q_m : débit massique du fluide (en kg/s),
- Q_v : débit volumique (en m^3/h),
- ρ : masse volumique du fluide (en kg/m^3).

- **Calcul du C_p et de la masse volumique de l'eau :**

Température de l'eau (en $^{\circ}\text{C}$)	C_p de l'eau (en $\text{J}/\text{kg}/^{\circ}\text{C}$)	Masse volumique de l'eau (en kg/m^3)
50	4 182	988
100	4 217	958
150	4 312	917
200	4 489	865
250	4 857	799
300	5 744	712

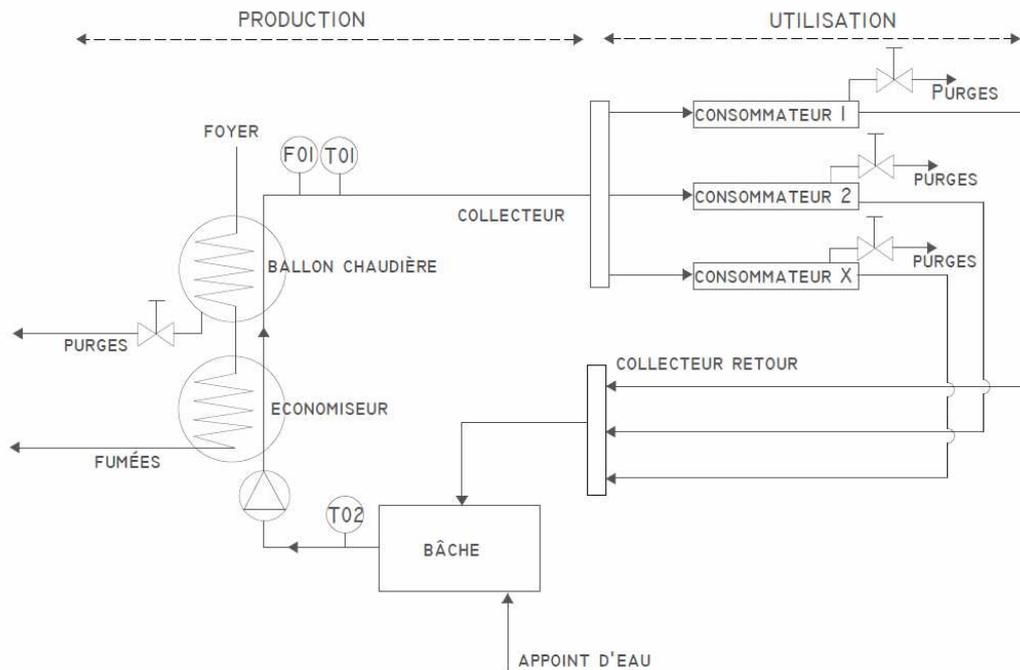
La masse volumique de l'eau peut aussi être approchée en fonction de sa température, par la formule ci-dessous.

$$\rho = 1010 - 0,637 * T + 0,00177 * T^2 - 0,0000102 * T^3$$

Avec :

- ρ : masse volumique du fluide (en kg/m^3).
- T : température de l'eau (en $^{\circ}\text{C}$).

6. Schéma de comptage et points de mesure sur le circuit d'eau chaude/surchauffée



T0X : Point de mesure de la température
 F0X : Point de mesure du débit

Figure 1 : Positionnement des capteurs sur le circuit d'eau chaude/surchauffée

Deux points de mesure sont nécessaires sur le circuit d'eau chaude (ou surchauffée) :

- En sortie chaudière et en amont du collecteur, doivent être obligatoirement mesurés **le débit (F01) et la température (T01)** de l'eau chaude ;
- Sur le circuit d'alimentation de la chaudière, après la bâche alimentaire (entrée chaudière), doit être mesurée à nouveau **la température (T02) de l'eau**.

Il n'est pas nécessaire de mesurer la pression du fluide, qui influe peu sur le calcul de l'énergie dans un circuit d'eau liquide.

II. Méthodes de comptage de l'énergie thermique dans un circuit d'eau chaude

1. Méthodes de comptage et technologies

Le comptage de l'énergie thermique produite par l'utilisation d'eau chaude ou surchauffée doit être réalisé en mesurant :

- Le débit massique ou volumique de l'eau en sortie chaudière ;
- La température de l'eau chaude en sortie chaudière ;
- La température de l'eau au retour du réseau utilisateur.

1. Mesure du débit d'eau chaude/surchauffée

La mesure de débit d'eau chaude ou surchauffée peut être réalisée à l'aide d'équipements appartenant à plusieurs classes :

Classe d'équipement Technologies	Eau chaude jusqu'à 110°C	Eau surchauffée jusqu'à 200°C	Eau chargée
Débitmètres à pression différentielle			
Débitmètre à diaphragme	Oui	Oui	Non
Débitmètres tachymétriques			
Débitmètre à turbine	Oui	Oui	Non
Débitmètre électromagnétique	Oui ⁽¹⁾	Jusqu'à 180°C	Oui ⁽¹⁾
Débitmètre à effet vortex	Oui	Oui	Sous conditions
Débitmètre à ultrasons (propagation)	Oui	Oui	Non
Débitmètres massiques			
Débitmètre à capacité thermique	Oui	Déconseillé	Non
Débitmètre à effet Coriolis	Oui	Oui	Oui

(1) Utilisable si la conductivité électrique du liquide est supérieure à un certain seuil.

Plusieurs classes d'équipements sont adaptées à la mesure du débit d'eau chaude, parmi lesquelles les débitmètres à pression différentielle, les débitmètres tachymétriques et les débitmètres massiques.

Globalement, toutes les technologies présentées ici peuvent être utilisées pour la mesure de débit d'eau chaude, mais il faut bien prendre en compte les risques d'encrassement des appareils du fait de la présence de particules d'oxyde et de carbonate de fer.

Concernant l'eau surchauffée, les compteurs volumétriques et débitmètres électromagnétiques sont limités en température (respectivement 150 et 180°C maximum).

Dans le cas de liquides chargés, seuls les débitmètres électromagnétiques et à effet Coriolis sont réellement adaptés (sous couvert de conductivité et masse volumique suffisante). Ce cas est peu présent dans le cas d'installations d'eau surchauffée mais doit tout de même être signalé.

2. Mesure de la température

La température doit être mesurée aux deux points du schéma de comptage pour le calcul de la puissance thermique.

Les sondes de température adaptées sont les sondes résistives (de type platine Pt 100 Ω ou Pt 1000 Ω).

Des sondes de température peuvent également être intégrées directement sur certains modèles de débitmètres.

La longueur des sondes doit être adaptée au diamètre de la canalisation, de manière à ce que l'élément sensible se situe au centre de la canalisation. Cependant, dans les canalisations de grand diamètre et dans le cas de mesures en plusieurs points, il n'est pas nécessaire que les éléments sensibles pénètrent à plus de 150 mm dans la conduite.

La partie sensible de la sonde ne doit pas se trouver dans une zone morte.

Dans la mesure du possible, les couples de sondes de température doivent être appairés et avoir une longueur de câble de liaison identique.

2. Principe de fonctionnement des débitmètres

1. Débitmètres à pression différentielle

Les débitmètres à pression différentielle mesurent la chute de pression entre l'amont et l'aval d'une constriction (réduction de la section) créée par l'insertion dans la conduite d'une plaque à orifice, dont le diamètre est inférieur à celui de la conduite. La différence de pression créée est mesurée par deux sondes placées en amont et en aval de la constriction. Le débit volumique est calculé comme étant proportionnel à la racine carrée de la différence de pression entre les deux points de mesure P_1 et P_2 .

En théorie, cela revient à exploiter de la formule simplifiée suivante :

$$Q_v = v * S = S * \sqrt{2 * P_{dyn} / \rho}$$

Avec : $P_1 - P_2 = 2 * P_{dyn} = \rho * v^2$

Q_v : débit volumique en m^3/s
 P_1 et P_2 : pression aux points de mesure 1 et 2
 P_{dyn} : pression dynamique
 v : vitesse du fluide en m/s
 S : section de la conduite en m^2
 ρ : masse volumique du fluide en kg/m^3

Tous les débitmètres à pression différentielle nécessitent la connaissance préalable de certaines données pour le calcul du débit massique :

- La masse volumique du fluide aux conditions de l'écoulement en amont ;
- La viscosité du fluide.

Il est à noter que ces propriétés dépendent de la température.

- **Débitmètre à diaphragme**

Le diaphragme est le plus répandu des organes déprimogènes. Plusieurs types de diaphragmes existent avec différentes formes et position du ou des orifice(s) sur le disque.

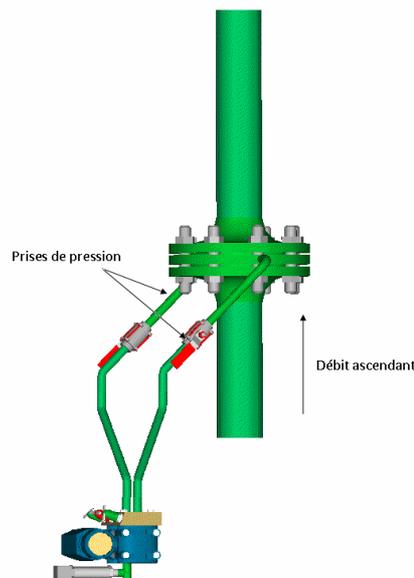


Figure 2 : Diaphragme sur tuyauterie ascendante
(Schéma Enertime)

Le **montage préconisé** consiste à poser le diaphragme sur une conduite verticale ascendante, selon la figure ci-dessus. Dans ce cas les prises de pression sont de part et d'autre de la plaque à orifice (appelée "prise dans les angles").

Un montage sur canalisation horizontale est également possible. Dans ce cas les prises de pression **doivent être au-dessous de la canalisation** pour s'assurer d'un bon remplissage des tuyauteries de raccordement du capteur de pression différentielle. On devra s'assurer de l'absence de poches d'air en partie haute (purgeurs en amont et en aval de l'orifice).

2. Débitmètres à turbine

Les débitmètres à turbine utilisent un rotor (de forme hélicoïdale, turbine ou moulinet) inséré dans la conduite. Le fluide entraîne la rotation du rotor, dont la vitesse angulaire est proportionnelle à la vitesse et au débit du fluide dans la conduite. Les débitmètres à turbine sont utilisables pour la mesure des liquides et gaz propres (non chargés), et de vapeur sous certaines conditions (usage limité aux températures inférieures à 200°C). Le compteur dit « Woltman », utilisé pour le comptage de l'eau chaude, fonctionne sur ce principe.

3. Débitmètre électromagnétique

Un débitmètre électromagnétique fonctionne sur le principe de la loi de Faraday, selon laquelle un liquide conducteur traversant un champ magnétique induit une tension proportionnelle à sa vitesse et sa largeur.

Pour rappel, la Loi de Faraday donne : $E = k * B * D * v$

Avec :

- E : tension de sortie induite ;
- B : intensité du champ magnétique ;
- D : largeur de la section ;
- v : vitesse du fluide ;
- k : constante.

Le champ magnétique est généré par un couple de bobines d'induction positionnées de manière diamétralement opposées sur la conduite. La tension correspondante est mesurée par deux (ou plus) électrodes en contact avec le fluide. La tension du fluide est proportionnelle à sa vitesse, donc à son débit volumique.

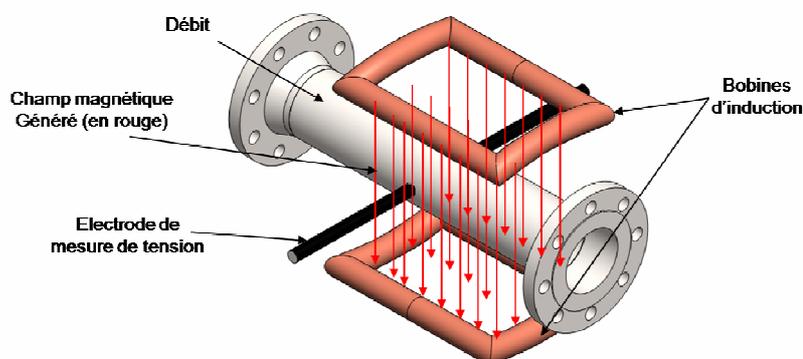


Figure 3 : Débitmètre électromagnétique
(Schéma Enertime)

Ce système est utilisable uniquement sur les fluides ayant une conductivité électrique (au minimum 0,5 $\mu\text{S/cm}$ pour certains modèles, 20 $\mu\text{S/cm}$ pour d'autres). Se rapporter aux consignes du fabricant.

4. Débitmètre à ultrasons à temps de propagation

Le principe de fonctionnement du débitmètre à temps de propagation (également appelé temps de transit) est basé sur la mesure de la vitesse de propagation d'une onde ultrasonore dans le fluide.

Deux transducteurs émetteurs et récepteurs sont montés sur la conduite avec un angle défini et génèrent une onde qui circule à la vitesse du son, à laquelle s'ajoute dans un sens la vitesse du fluide, proportionnelle au débit volumique.

Deux systèmes de débitmètres à ultrasons ont été développés, mais seuls les débitmètres à temps de propagation sont adaptés à l'eau chaude non chargée. L'autre système (utilisant l'effet Doppler) est adapté aux liquides chargés en particules.

5. Débitmètres à vortex

Les débitmètres à effet vortex mesurent la fréquence des tourbillons créés par l'introduction d'un élément dans la conduite (générateur de tourbillons). Ces tourbillons entraînent des zones de pression variable mesurée par un capteur. La fréquence de détachement des tourbillons est directement proportionnelle à la vitesse de l'écoulement du fluide, et donc au débit volumique.

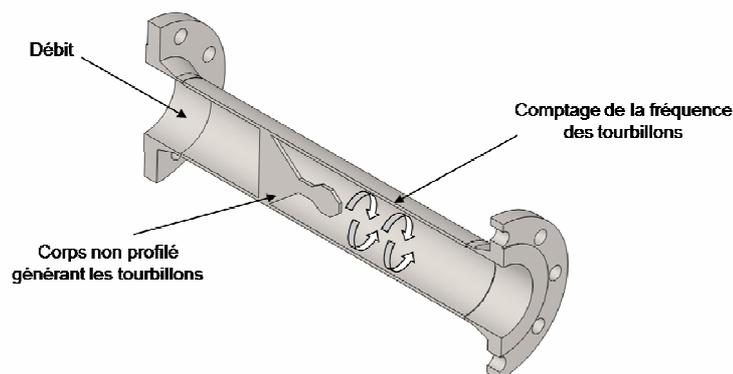


Figure 4 : Débitmètre à vortex
(Schéma Enertime)

Les débitmètres à effet vortex peuvent se révéler très précis dans la plage d'écoulement (exprimée par le nombre de Reynolds) prévue à cet effet.

6. Débitmètre massique à capacité thermique

Un débitmètre à capacité thermique mesure le débit massique d'un fluide en lui imposant un échauffement de quelques degrés. La puissance thermique nécessaire à cet échauffement et la différence de température entre les extrémités du tube sont proportionnelles au débit massique du fluide à pression constante, selon la formule :

$$P_{th} = Q_m * C_p * \Delta T$$

Avec :

- P_{th} : puissance thermique nécessaire à l'échauffement en kW
- Q_m : débit massique du fluide en kg/s
- C_p : coefficient thermique massique à pression constante

ΔT : différence de température (élévation).

7. Débitmètre massique à effet Coriolis

Les débitmètres massiques à effet Coriolis mesurent la déformation provoquée par le fluide sur :

- Soit un tube en U sans obstacle dans lequel s'écoule le fluide ;
- Soit un ou deux tubes insérés longitudinalement à la conduite.

Cette déformation, dite de Coriolis, imprime un mouvement de vibration/oscillation au(x) tube(s) dont la fréquence est connue. Le débitmètre calcule alors le **débit massique** du fluide suivant la fréquence et la différence de phase entre les oscillations au niveau de deux capteurs, placés aux deux extrémités de chaque tube. Le système mesure également la densité et la température du fluide.

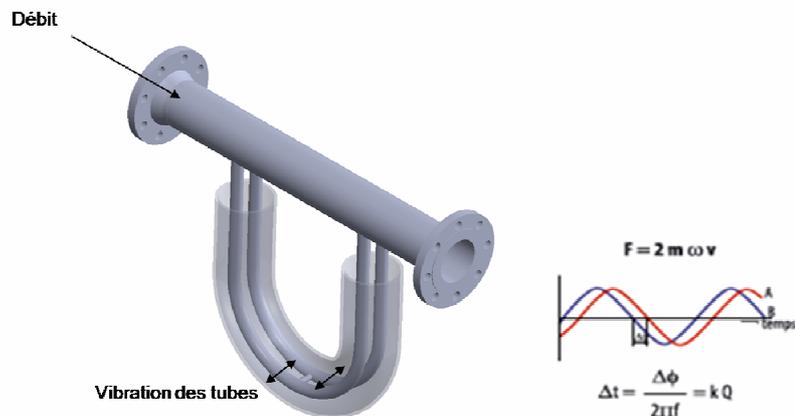


Figure 5 : Débitmètre à effet Coriolis en U (schéma de droite extrait de [9])

Les débitmètres à effet Coriolis peuvent être utilisés pour la mesure du débit d'eau chaude et d'eau surchauffée, chargées ou non de particules, jusqu'à 200°C. Ils sont néanmoins peu utilisés pour le comptage de l'énergie thermique.

III. Contraintes des fluides et performances

1. Gammes de température et pression d'usage

Les gammes de température et pression admissibles par les différentes technologies de mesure de débit peuvent varier d'un fournisseur à l'autre, selon la taille des canalisations (diamètre nominal) et d'un fluide à l'autre. Elles sont données ci-dessous (figure 10) de manière indicative.

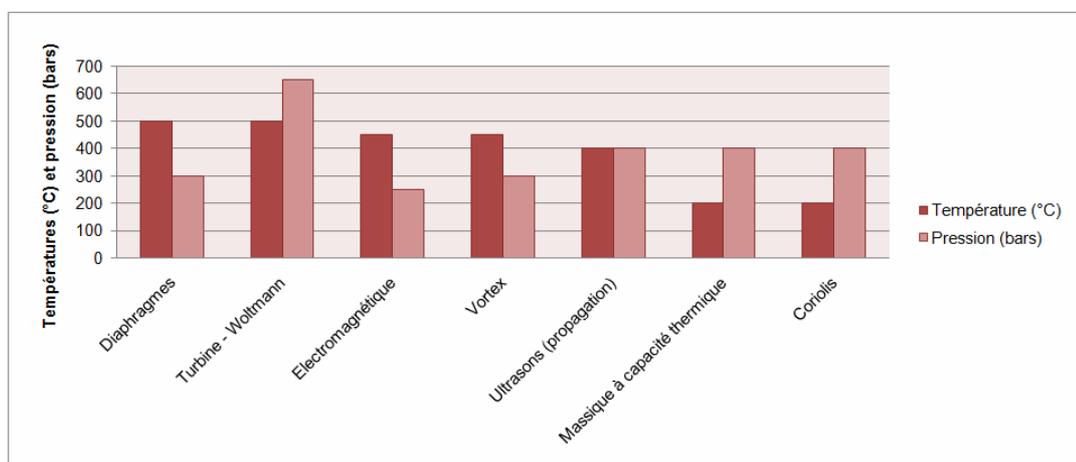


Figure 6 : Plages de pression et température d'usage des débitmètres
(adapté de [9])

Les débitmètres à pression différentielle fonctionnent dans des plages de température allant jusqu'à 500°C et 300 bars de pression. Certains modèles peuvent fonctionner à des pressions supérieures.

Les débitmètres à turbines peuvent fonctionner en théorie jusqu'à 650 bars.

Les débitmètres massiques (thermique et à Coriolis) sont limités à 200°C maximum et déconseillés sur les circuits d'eau surchauffée.

2. Caractéristiques dynamiques et de la conduite

Classe d'équipement Technologies	Diamètre nominal DN ou Ø (mm)	Dynamique de débit (Qmax/Qmin)	Perte de pression (en % dP) ⁽¹⁾
Débitmètres à pression différentielle			
Diaphragmes	3 à 300	1 à 5	50 à 80 %
Débitmètres tachymétriques			
Débitmètre électromagnétique	1 à 3 000	1 à 100	Négligeable
Débitmètre à turbine	10 à 1 200	1 à 50	Moyenne
Débitmètre à effet vortex	12 à 500	1 à 20	Moyenne
Débitmètre à ultrasons (propagation)	25 à 5 000	1 à 200	Négligeable
Débitmètres massiques			
A capacité thermique	3 à 5 000	1 à 50	Négligeable
A effet Coriolis	1 à 350	1 à 100 min.	Négligeable

(1) en pourcentage de la pression différentielle utilisable pour la mesure

Figure 7 : Contraintes d'installation et performances des débitmètres
(adapté de [9])

1. Diamètre nominal

Les technologies de débitmètres sont dans l'ensemble adaptées à une large gamme de diamètres de conduite.

2. Dynamique de mesure

La dynamique de mesure¹ indique le rapport entre le débit maximal et le débit minimal à mesurer (Q_{max}/Q_{min}) en un même point de mesure. L'intérêt d'une dynamique élevée est de garantir l'exactitude des mesures dans une gamme plus large de débits.

Exemple : un circuit d'eau chaude dont le débit varie selon la saison, entre 10 m³/h et 100 m³/h, nécessitera l'installation d'un débitmètre dont la dynamique de mesure sera au minimum de 1 à 10.

Les débitmètres à pression différentielle ont une dynamique moyenne, de l'ordre de 1 à 8 ou 1 à 10, quand les autres systèmes présentent une dynamique de 2 à 5 fois supérieure (débitmètres à turbine ou vortex), voire plus (débitmètres à ultrasons, électromagnétiques et à Coriolis). Certains fabricants proposent des modèles de débitmètre à Coriolis dont la dynamique de mesure peut approcher 1 à 1 000.

3. Perte de pression

Certains débitmètres nécessitent, pour fonctionner, de créer une différence de pression dans la conduite. La perte de pression induite est exprimée en pourcentage de la pression différentielle utilisable pour la mesure.

Exemple : un débitmètre à diaphragme qui fonctionne avec une différence de pression de 1 bar entre les deux prises, et induit une perte de pression réelle de 0,6 à 0,8 bar, selon les caractéristiques de l'orifice.

Pour élargir la plage de mesure du diaphragme, il est recommandé de le calculer pour 1 bar au débit nominal de la chaudière, afin d'obtenir une mesure correcte à faible charge. Si la chaudière ne fonctionne jamais en dessous de 30% de sa charge nominale, on peut réduire le delta P maxi à 800 ou 500 mbar.

Les débitmètres à insertion entraînent une perte de pression qui peut être négligeable ou moyenne selon les modèles.

Les débitmètres à ultrasons et électromagnétiques entraînent des pertes de pression négligeables étant donné l'absence d'élément inséré dans la conduite.

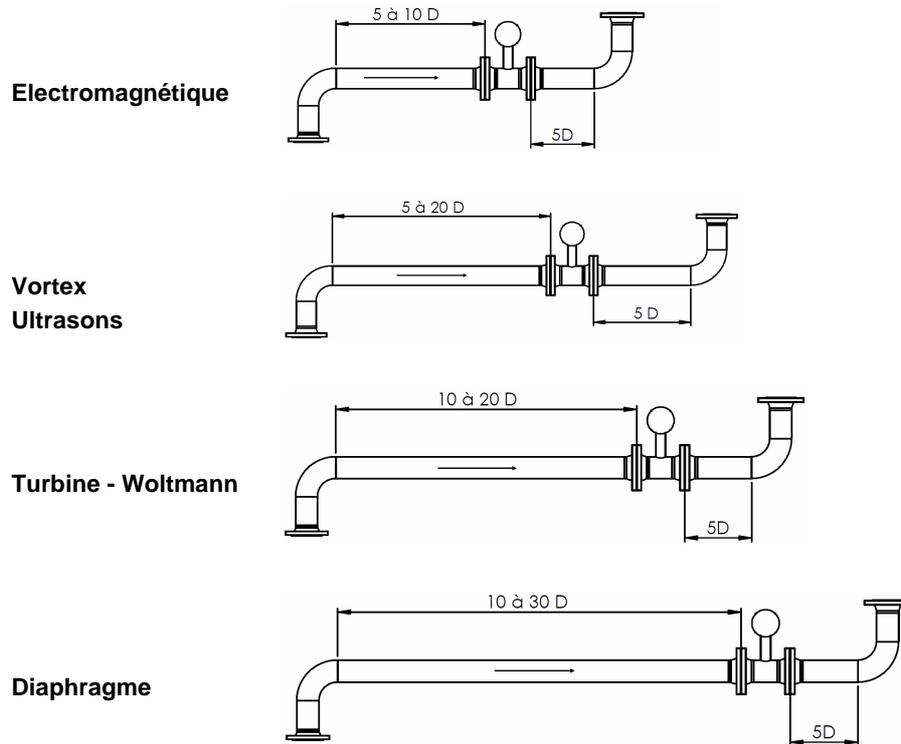
Les débitmètres à effet Vortex créent une perte de charge liée au rétrécissement de la conduite imposée par la nécessité d'une vitesse minimale autour du capteur (environ 0,5 m/s).

4. Longueur droite minimale recommandée

Pour fonctionner dans la plage d'exactitude de mesure annoncée par le fabricant, un débitmètre doit être installé dans certaines conditions sur la canalisation. En particulier, l'installation doit respecter une distance minimale entre le changement de direction/caractéristiques du fluide précédent et le capteur (dite longueur droite amont ou avale, exprimée en nombre de DN ou \emptyset), afin de garantir que le débit du fluide soit homogène et non perturbé.

¹ Le terme de « rangeabilité » est également employé pour désigner la dynamique de mesure d'un équipement.

Cette longueur minimale varie d'un système de comptage à l'autre. Les plages de longueur droite amont minimale fréquemment admises sont données ci-dessous pour information.



Les débitmètres massiques thermiques et à effet Coriolis ne nécessitent pas, en théorie, de longueur droite amont minimale. Respecter néanmoins les recommandations du fabricant à ce sujet.

Des longueurs droites amont et aval différentes peuvent être préconisées :

- Après un convergent ;
- Après un divergent ;
- Après un ou plusieurs coudes successifs, en particulier non coplanaires (jusqu'à 80 DN) ;
- Après une vanne.

Se rapporter aux spécifications du fabricant dans chaque cas.

3. Exactitude des mesures

1. Exactitude de la mesure de débit

L'exactitude² d'un débitmètre est exprimée en % de la valeur mesurée (% VM).

L'exactitude théorique du débitmètre annoncée par un fabricant se comprend dans des conditions optimales d'installation et d'utilisation, qui respectent les consignes du fabricant. Dans tous les cas, l'étalonnage du système dans des conditions normalisées est nécessaire pour garantir une exactitude mesurée proche de l'exactitude théorique.

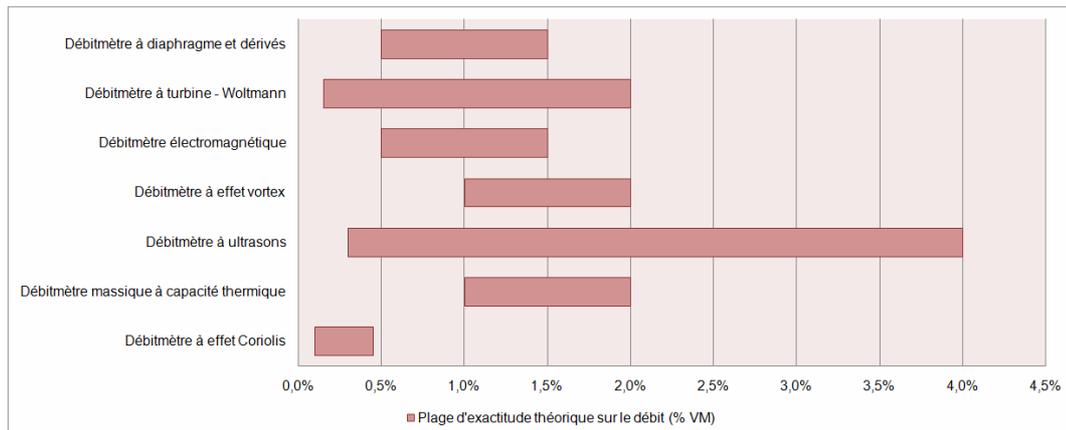


Figure 8 : Plages d'exactitude sur les mesures de débit d'eau chaude
(graphique adapté de [9])

Les plages d'exactitude des principales technologies de débitmètres adaptées à l'eau chaude, données dans le graphique ci-dessus, dépendent des propriétés du fluide utilisé et sont données à titre indicatif.

Les débitmètres à turbine et à vortex ont une incertitude moyenne, qui peut varier entre 0,15 % et 2 %.

L'exactitude des débitmètres à ultrasons peut être très variable. Ce sont des instruments très sensibles dont le strict respect de l'étalonnage et du positionnement sont nécessaires pour garantir l'exactitude affichée.

Les débitmètres à Coriolis ont la meilleure exactitude (entre 0,1 et 0,35 %) en raison notamment d'une mesure de débit massique indépendante des propriétés du fluide (viscosité, densité, pression, température), contrairement aux autres classes d'instruments.

2. Exigences d'exactitude

L'exactitude composée du calcul de la production d'énergie thermique doit être évaluée en fonction de l'exactitude individuelle de chaque sous-ensemble qui compose le compteur.

- **Débitmètre (capteur hydraulique) :**

Conformément à la norme européenne EN 1434-1, les capteurs hydrauliques (débitmètres) des compteurs d'énergie thermique doivent respecter les exigences associées à l'une des trois classes d'exactitude suivantes :

² On trouve également les termes d'incertitude de mesure et de précision pour exprimer l'exactitude de la mesure fournie par un instrument.

Classe d'exactitude	Exactitude E_F (en l/s)	Exactitude E_F maximale tolérée (%)
Classe 1	$E_F = \pm (1 + 0,01 Q_r/Q)$	pas plus de $\pm 3,5$ %
Classe 2	$E_F = \pm (2 + 0,02 Q_r/Q)$	pas plus de ± 5 %
Classe 3	$E_F = \pm (3 + 0,05 Q_r/Q)$	pas plus de ± 5 %

Avec :

Q_n : débit nominal auquel peut fonctionner le capteur hydraulique 24/24 (en l/s)

Q : débit réel de l'installation (en l/s)

L'erreur E_F relie la valeur indiquée à la valeur vraie conventionnelle de la relation entre le signal de sortie du capteur hydraulique et la masse ou le volume.

- **Sondes de température :**

Les sondes de température doivent respecter les exigences d'exactitude de la norme NF EN 60751, à savoir pour **les sondes Pt 100 et Pt 1000** :

Température nominale de fonctionnement (°C)	Classe d'exactitude (tolérance) des sondes (selon NF EN 60751)	Erreur maximale tolérée E_T correspondante (%)
Entre 100 et 600°C	Classe A	Soit au maximum 0,35 % sur la mesure de température
Entre 100 et 850°C	Classe B	Soit au maximum 0,80 % sur la mesure de température

Les classes correspondent aux erreurs maximales calculées (en °C) selon les formules suivantes :

$$\text{Classe A : } dT = \pm (0,15 + 0,002 * T)$$

$$\text{Classe B : } dT = \pm (0,3 + 0,005 * T)$$

Avec :

T : valeur de la température mesurée (°C)

dT : exactitude sur la mesure de température (°C)

- **Calculateur (intégrateur) :**

Conformément à la norme européenne EN 1434-1, le calculateur utilisé doit respecter les exigences d'erreur relative maximale calculées selon :

$$E_c = \pm (0,5 + \Delta T \text{ min} / \Delta T)$$

Avec :

$\Delta T \text{ min}$: limite minimale de l'étendue de la différence de température des sondes (°C)

ΔT : étendue réelle de la différence de température des sondes (°C)

L'erreur E_c relie la valeur indiquée de l'énergie thermique à la valeur vraie conventionnelle de cette énergie.

3. Détermination de l'exactitude

L'exactitude composée du calcul de la production d'énergie thermique doit être évaluée en fonction de l'exactitude individuelle de chacune des grandeurs mesurées, selon la formule ci-dessous.

L'exactitude composée du résultat d'une mesure, lorsque ce résultat est obtenu à partir d'autres grandeurs (débit, température, etc.), est égale à la racine carrée de la somme des variances de ces autres grandeurs.

Formule type :

$$E_{\text{tot}} = \sqrt{(E_1^2 + E_2^2 + E_i^2)}$$

Avec :

E_{tot} : l'exactitude composée du résultat de la mesure.

E_1 , E_2 et E_i : les tolérances sur les mesures respectives des 1^{ère}, 2^{ème} et i^{ème} grandeurs mesurées.

Exemple : Pour un calcul de production d'énergie thermique, l'exactitude totale E_{tot} dépend des mesures de débit F ($E_F = 2\%$), de l'exactitude des deux sondes de température T01 ($E_{T01} = 0,5\%$) et T02 ($E_{T02} = 0,5\%$) et de celle du calculateur/intégrateur ($E_C = 1\%$). L'exactitude totale composée sera :

$$E_{\text{tot}} = \sqrt{(E_F^2 + E_{T01}^2 + E_{T02}^2 + E_C^2)} = \sqrt{(0,04\% + 0,0025\% + 0,0025\% + 0,01\%)} = 2,35\%$$

Se référer également au **Guide des incertitudes de mesure** [3] pour la méthode de calcul des exactitudes composées.

4. Répétabilité et reproductibilité

La répétabilité (ou fidélité) des mesures pour chaque catégorie de débitmètre est la différence entre les résultats mesurés dans les mêmes conditions de mesure.

La reproductibilité des mesures (différence entre les résultats mesurés, dans les mêmes conditions de mesure, dans un lieu différent ou par un utilisateur différent) est donnée de la même manière par le fabricant.

Répétabilité et reproductibilité des instruments de mesure sont des indicateurs de leur bon fonctionnement, et doivent être en accord avec les exigences des normes en vigueur.

4. Signal de sortie et télérelève des données

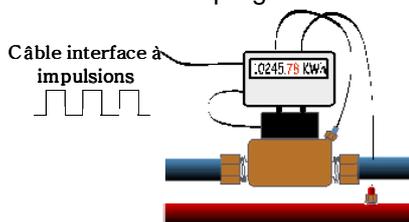
Un compteur d'énergie thermique communique les valeurs mesurées par un signal qui peut être :

1. Sans report d'information (indicateur local)

Il s'agit de compteurs pour lesquels aucune interface n'est disponible pour reporter l'information de comptage (à minima l'index du compteur). Ces compteurs sont à proscrire dans le cadre d'un subventionnement soumis au comptage de la production d'énergie thermique de l'installation biomasse-énergie.

2. Avec report impulsif

Il s'agit de compteurs pour lesquels il existe une interface – dite impulsif – qui reporte une information « tout ou rien » (équivalent à un contact tantôt ouvert, tantôt fermé) pour chaque quantité de chaleur calculée, cette quantité étant fixée par construction ou programmation.

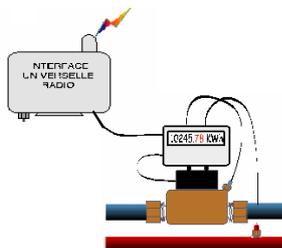


La télérelève d'un compteur impulsif peut être réalisée :

- **En équipant le compteur d'un transmetteur radio.**

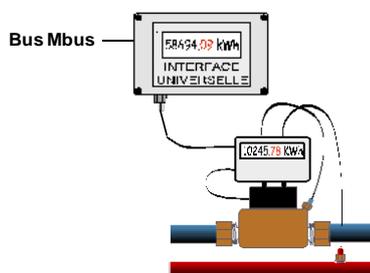
Ce dernier permet de compter le nombre d'impulsions émises par le compteur et de les envoyer vers un concentrateur radio compatible. La liaison compteur / interface radio peut également inclure une détection d'absence de connexion (détection de fraude). Les fréquences radio utilisées peuvent être différentes et dépendent principalement de l'environnement du compteur et de la distance entre l'émetteur et le concentrateur radio.

Remarque : Le transmetteur radio est soit déporté, c'est-à-dire qu'il est relié par un fil à l'émetteur d'impulsion, soit intégré, l'émetteur d'impulsion étant dans ce cas intégré avec le transmetteur radio. Les transmetteurs déportés sont utilisés dans des endroits où les propagations radio sont difficiles (caves profondes, etc.).



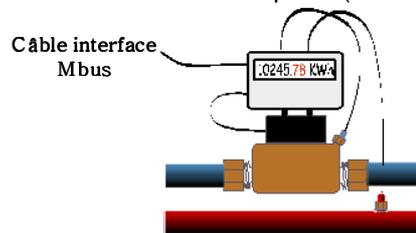
- **En équipant le compteur d'un transmetteur capable de dialoguer sur un bus M-Bus.**

Ce dernier permet de compter le nombre d'impulsions émises par le compteur et de les transmettre à un dispositif maître (concentrateur) lors d'un dialogue sur le bus M-Bus. Cette solution impose le raccordement du bus par câble entre le transmetteur et le dispositif maître. Elle doit donc être limitée aux cas de distances faibles.



3. Avec report M-Bus

Il s'agit de compteurs pour lesquels il existe une interface de type M-Bus permettant, par adressage, d'obtenir depuis un équipement maître une trame contenant les informations issues du compteur. Après décodage, la trame permet d'obtenir le ou les index du compteur (notion d'historique), les états d'erreur, etc.



La télérelève d'un compteur à liaison M-Bus peut être **réalisée directement via un dialogue sur le bus M-Bus**. Cette solution permet de téléreléver l'ensemble des informations relatives au compteur comme ses historiques ou ses états d'erreur. Cette solution impose le raccordement du bus par câble entre le compteur et le dispositif maître (concentrateur). Elle doit donc être limitée aux cas de distances faibles.

IV. Critères de sélection

1. Critères de sélection d'un compteur d'énergie thermique

Cette partie est extraite de [13] NF EN1434-6 Compteurs d'énergie thermique – Partie 6 : Installation, mise en service, surveillance de fonctionnement et maintenance. Annexe A2.

Le type, la taille, l'exactitude et la classe d'environnement d'un compteur d'énergie thermique sont définis en fonction des conditions de fonctionnement et des conditions environnementales de l'installation, compte tenu des particularités suivantes :

- a) Pression du liquide caloporteur ;
- b) Caractéristiques physiques et chimiques du liquide caloporteur ;
- c) Perte de pression acceptable dans le compteur d'énergie thermique ;
- d) Exigences d'exactitude ;
- e) Étendues de température dans les canalisations entrée et sortie du système de chauffage et étendue des différences de température ;
- f) Valeurs maximale et minimale prévues pour le débit du liquide caloporteur ;
- g) Puissance thermique requise du système de chauffage ;
- h) Caractéristiques du débit dans le compteur d'énergie thermique, constant, variable ou intermittent ;
- i) Alimentation électrique requise par le compteur d'énergie thermique ;
- j) Exigences particulières relatives à l'espace requis autour du compteur d'énergie thermique pour permettre une lecture facile et garantir la sécurité de l'installation ainsi que l'entretien du compteur ;
- k) Exigences requises pour les raccordements, c'est-à-dire brides, supports et dimensions du compteur.

2. Éléments relatifs au coût d'acquisition et maintenance

Classe d'équipement Technologies	Coût d'acquisition	Coût de maintenance	
Débitmètres à pression différentielle			1 : coût faible 2 : coût moyen 3 : coût élevé
Débitmètre à diaphragme	1	1 à 2	
Débitmètres tachymétriques			
Débitmètre à turbine	2	2 à 3	
Débitmètre électromagnétique	2	1	
Débitmètre à effet vortex	2	1	
Débitmètre à ultrasons (propagation)	3	1	
Débitmètres massiques			
Débitmètre à capacité thermique	2	1	
Débitmètre à effet Coriolis	3	1	

Figure 9 : Indications de coût d'acquisition et de maintenance des différentes technologies de débitmètres (données tirées de [9], [11] et [16])

Les indications de coût ci-dessus n'ont qu'une valeur informative et peuvent varier fortement au sein d'une même catégorie de débitmètres, et en fonction des contraintes du circuit sur lequel sera installé l'équipement et de celles du fluide utilisé.

3. Agrément pour transactions commerciales

Dans la mesure du possible, préférer un système agréé ou homologué pour un usage dans le cadre de transactions commerciales.

4. Grille d'aide à la sélection du débitmètre

	Débitmètre	Diaphragmes	Turbine - Woltmann	Electromagnétique	Vortex	Ultrasons (propagation)	Massique thermique	Coriolis
Contraintes du fluide	Mesurer un débit d'eau chaude (jusqu'à 110°C)	X	X	(I)	X	X	X	X
	Mesurer un débit d'eau surchauffée (jusqu'à 200°C)	X	X	(I)	X	X		X
	Mesurer un débit d'eau chargée en particules			(I)	(I)			X
	Mesurer un débit dans large dynamique ($Q_{max}/Q_{min} > 10$)		X	X	X	X	X	
	Conserver des pertes de charge faibles	X	(I)	X	X	X	X	X
Contraintes de conduite	Mesurer le débit sur une conduite de diamètre <75 mm	X	(I)	X	(I)	X	X	X
	Mesurer le débit sur une conduite de diamètre >75 mm	X	X	X	X	X	X	(I)
	Une longueur droite amont courte (< 10 ØN)	X	X	X		X		
	Un capteur indifférent aux vibrations de la conduite et aux pulsations de l'écoulement	X		X		X		
Exactitude	Une bonne exactitude de mesure (0,5 à 2% VM)		X	X	X	(I)	X	
	Une très bonne exactitude de mesure (< 0,5% VM)							X
	Une exactitude indépendante des caractéristiques du fluide		X					
Paramètres mesurés	Mesurer directement la température, le débit volumique, la densité (et pour certains modèles la viscosité) du fluide						X	X
Durée de vie	Un capteur robuste et résistant à l'érosion et l'usure mécanique	X						
	Un capteur sans pièce en mouvement dans la conduite	X			X			
Expérience	Un bon retour d'expérience sur les applications eau chaude / eau surchauffée	X	X		X			

(X) Adapté ou recommandé
(I) Limité ou déconseillé

Les instruments suivants ne sont pas adaptés à la mesure du débit sur les circuits d'eau chaude et surchauffée :

- Débitmètres à tube de Pitot ;
- Compteurs volumétriques ;
- Débitmètres à ultrasons à effet Doppler (pour liquides et gaz chargés) ;
- Débitmètres massiques à convection thermique qui sont réservés aux gaz (selon [11]).

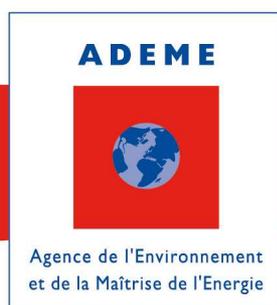
Références bibliographiques

1. ADEME, 2009. Suivi à distance de la production énergétique des installations biomasse-énergie – Etat de l'art des systèmes de comptage de chaleur et de télérelevage – Evaluation technique et économique. 29 pp.
2. ADEME, 2012. Suivi à distance de la production énergétique des installations biomasse-énergie – Cahier des charges à destination du bénéficiaire de l'aide ADEME pour le comptage et la transmission des données. 18 pp.
3. BIPM, 2008. Evaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. JCGM 100:2008 (F). Première édition septembre 2008.
4. BS 7405 August 1991. Guide to selection and application of flowmeters for the measurement of fluid flow in closed conduits.
5. Canteach. Principes de science et de fonctionnement des réacteurs – Instrumentation et contrôle. La débitmétrie p21 à 33. 126 pp. disponible sur <https://canteach.candu.org/library/20070200.pdf>.
6. Gailledreau, C., Débitmètres massiques. Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle. R 2 300. 14 pp.
7. Gailledreau, C., Débitmètres à pression différentielle. Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle. R 2 220. 17 pp.
8. Gailledreau, C., Débitmètres à vortex. Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle. R 2 285. 17 pp.
9. Guide d'achat. Mesures physiques. Les mesures de débit. Dans MESURES n°755 Mai 2003 p62 à 73.
10. Métivier, D., Débitmètres à turbine pour liquides. Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle. R 2 280. 20 pp.
11. Molin, C., Ossard, S. & Guillet, 2010. Maîtrise de l'Énergie dans l'Industrie des Pâtes, Papiers et Cartons. ADEME-Centre Technique du Papier. 168 pp.
12. NF EN 1434-1 Août 2007. Compteurs d'énergie thermique - Partie 1 : prescriptions générales.
13. NF EN 1434-3 Avril 2009. Compteurs d'énergie thermique - Partie 3 : échange de données et interfaces.
14. NF EN 1434-6 Août 2007. Compteurs d'énergie thermique - Partie 6 : installation, mise en service, surveillance de fonctionnement et maintenance.
15. Rosemount, 1997. Principes fondamentaux de mesure du débit. Nov. 1997. 10 pp.
16. Sigonnes, P., Choix d'un débitmètre. Techniques de l'Ingénieur. R 2 200v2. 20 pp.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr