PRODUCTION THERMIQUE ISSUE DE CHAUFFERIE BIOMASSE

FICHE TECHNIQUE : COMPTAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE

VAPEUR

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

ADEME

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

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 la phase d'un fluide 6
3. Composition d'un compteur d'énergie thermique 6
4. Grandeurs à mesurer 7
5. Principe de calcul de la puissance thermique 7
6. Schéma de comptage et points de mesure sur le circuit de vapeur 8
   1. Production d'énergie thermique seule 8
   2. Production d'énergie par cogénération – Turbine à condensation 10
   3. Production d'énergie par cogénération – Turbine à contrepression 11

II. Méthodes de comptage de l'énergie thermique dans un circuit de vapeur 12
1. Méthodes et technologies de comptage 12
   1. Mesure du débit de vapeur 12
   2. Mesure de la température 12
   3. Mesure de la pression 13
2. Principe de fonctionnement des débitmètres 13
   1. Débitmètres à pression différentielle 13
   2. Débitmètres à vortex 15
   3. Débitmètre massique à effet Coriolis 15

III. Contraintes et performances des débitmètres 16
1. Gammes de température et pression d'usage 16
2. Caractéristiques dynamiques et de la conduite 16
   1. Diamètre nominal 16
   2. Dynamique de mesure 17
   3. Perte de pression 17
   4. Longueur droite minimale recommandée 17
3. Exactitude des mesures 18
   1. Exactitude de la mesure de débit 18
   2. Exigences d'exactitude 19
   3. Détermination de l'exactitude 20
   4. Répétabilité et reproductibilité 20
4. Signal de sortie et télérelève des données 21
   1. Sans report d'information (indicateur local) 21
   2. Avec report impulsionnel 21
   3. Avec report M-Bus 22

IV. Critères de sélection 23
1. Critères de sélection d'un compteur d'énergie thermique 23
2. Eléments relatifs au coût d'acquisition et maintenance 23
3. Agrément pour transactions commerciales 23
4. Grille d'aide à la sélection du débitmètre 24

Références bibliographiques 25

Résumé

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

La mesure de débit de vapeur 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 la vapeur.

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 :

- Connaitre 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 la phase d'un fluide

La phase du fluide est l'état dans lequel se trouve la matière à des conditions de pression et température données. Cet état évolue lorsque ces conditions varient.

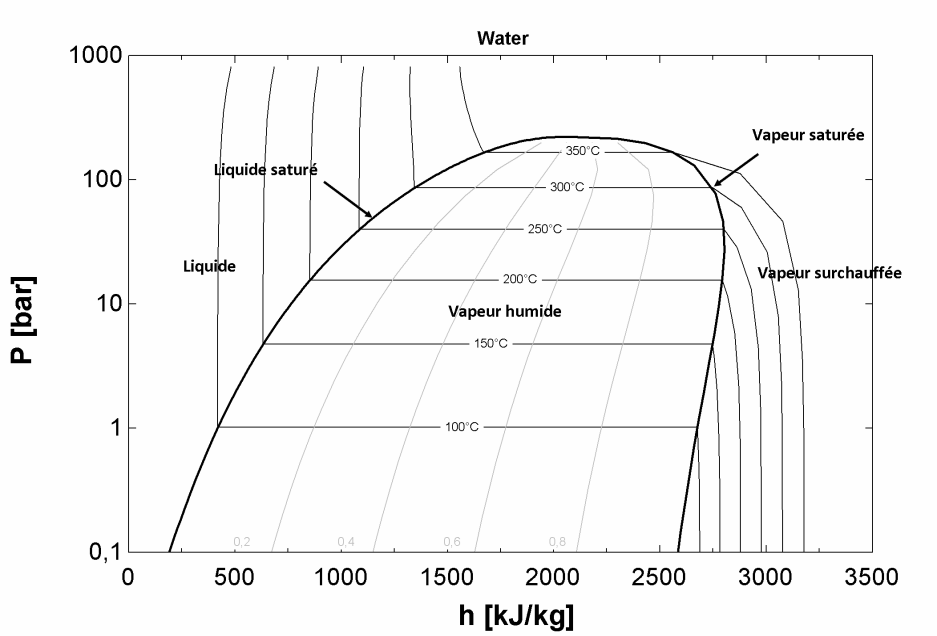


Figure 1 : Diagramme Pression/enthalpie de phase d'un fluide (ici l'eau)

Dans le cas de l'eau (diagramme pression/enthalpie ci-dessus), la vapeur est l'état dans lequel se trouve, à une pression donnée, l'eau entre sa température d'ébullition à cette pression et sa température critique. On distingue trois qualités de vapeur :

- **Vapeur saturée ou vapeur humide :** vapeur contenant ou transportant une quantité importante de particules d'eau liquide en suspension (fluide diphasique) ;
- **Vapeur saturée sèche :** vapeur à la température de saturation, mais qui ne contient pas de particules d'eau en suspension ;
- **Vapeur surchauffée :** vapeur à une température supérieure à la température de saturation (vapeur sèche). Elle est exempte de gouttes liquides, ce qui a pour intérêt l'absence de condensation dans les conduites, une limitation de l'érosion et du risque de casse des ailettes des turbines (dans le cas de la cogénération). La température d'une vapeur surchauffée est indépendante de sa pression.

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 ou du volume 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, il est nécessaire de mesurer :

- **Le débit massique ou volumique** du fluide caloporteur ;
- **La différence d'enthalpie** entre l'amont et l'aval du système d'échange thermique : dans le cas de la vapeur, il est alors nécessaire de mesurer la pression et la température en sortie chaudière et la température en entrée chaudière (étant indépendante de la pression en phase liquide) ;

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 la chaudière au fluide caloporteur de la chaudière (ici la vapeur) est exprimée selon la formule :

$$\mathbf{P_{th} = Q_{ms} (H_s - H_e)}$$

Avec :

P_{th} : puissance thermique exprimée en kW
Q_{ms} : débit massique du fluide en sortie chaudière en kg/s
H : enthalpie en kJ/kg

On détermine l'enthalpie H telle que : $\mathbf{H_e = f (T_e ; P_e)}$ et $\mathbf{H_s = f (T_s ; P_s)}$

Avec :

T_e : température en entrée chaudière (en °C),
T_s : température en sortie chaudière (en °C),
P_e : pression en entrée chaudière (en bar),
P_s : pression en sortie chaudière (en bar).

Dans le cas d'une chaudière vapeur, l'eau est à l'état liquide en entrée de la chaudière. Or, pour la phase liquide l'enthalpie peut être considérée comme indépendante de la pression. On a donc He = f (T_e).

L'enthalpie de la vapeur à pression et température données et de l'eau liquide à température donnée se retrouvent grâce à une table ou un diagramme de Mollier.

Certaines formules de conversion sont également utiles au comptage de l'énergie thermique produite. Elles sont rappelées ci-après.

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

$$\mathbf{Q_m = Q_v * \rho / 3\,600}$$

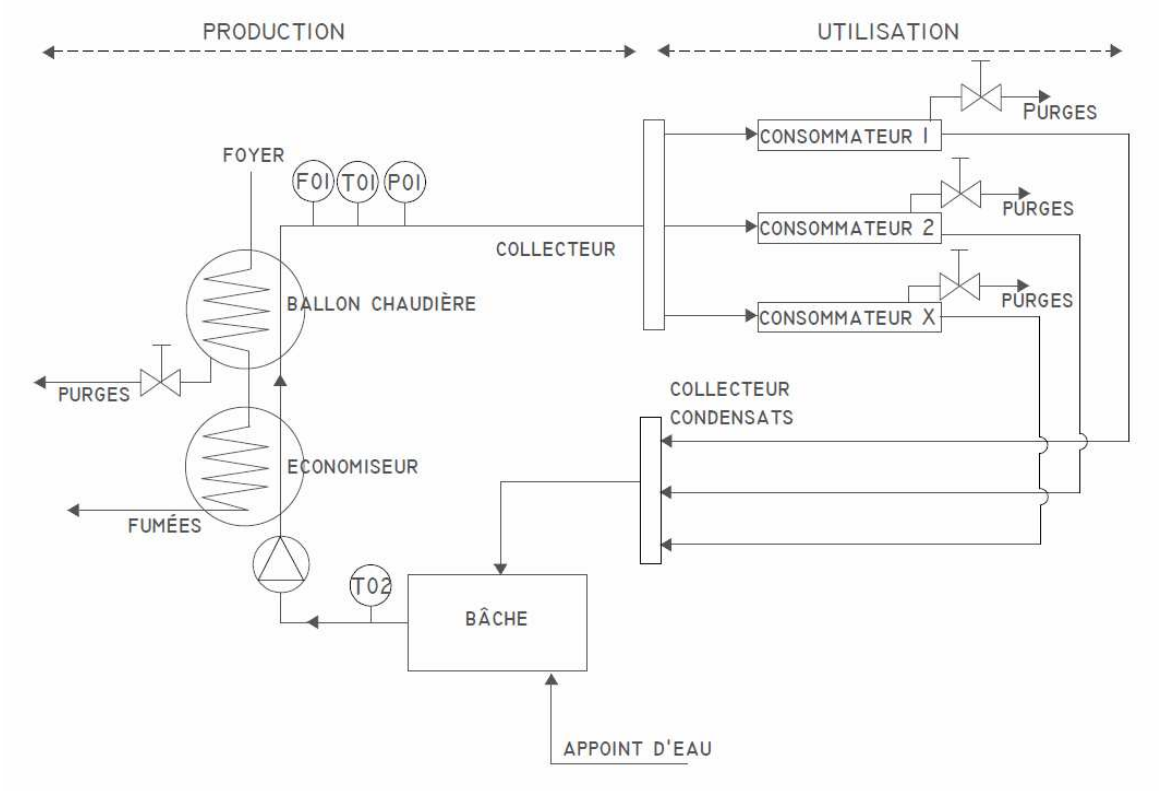
Avec :

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). ρ est variable, en fonction de la température et de la pression réelle du fluide au point de mesure. Une formule devra être créée dans le calculateur de puissance thermique.

6. Schéma de comptage et points de mesure sur le circuit de vapeur

1. Production d'énergie thermique seule

Dans le cas de la production de vapeur pour des usages thermiques uniquement, le principe du circuit de vapeur est donné dans le schéma ci-dessous.



T0X : Point de mesure de la température
P0X : Point de mesure de la pression
F0X : Point de mesure du débit

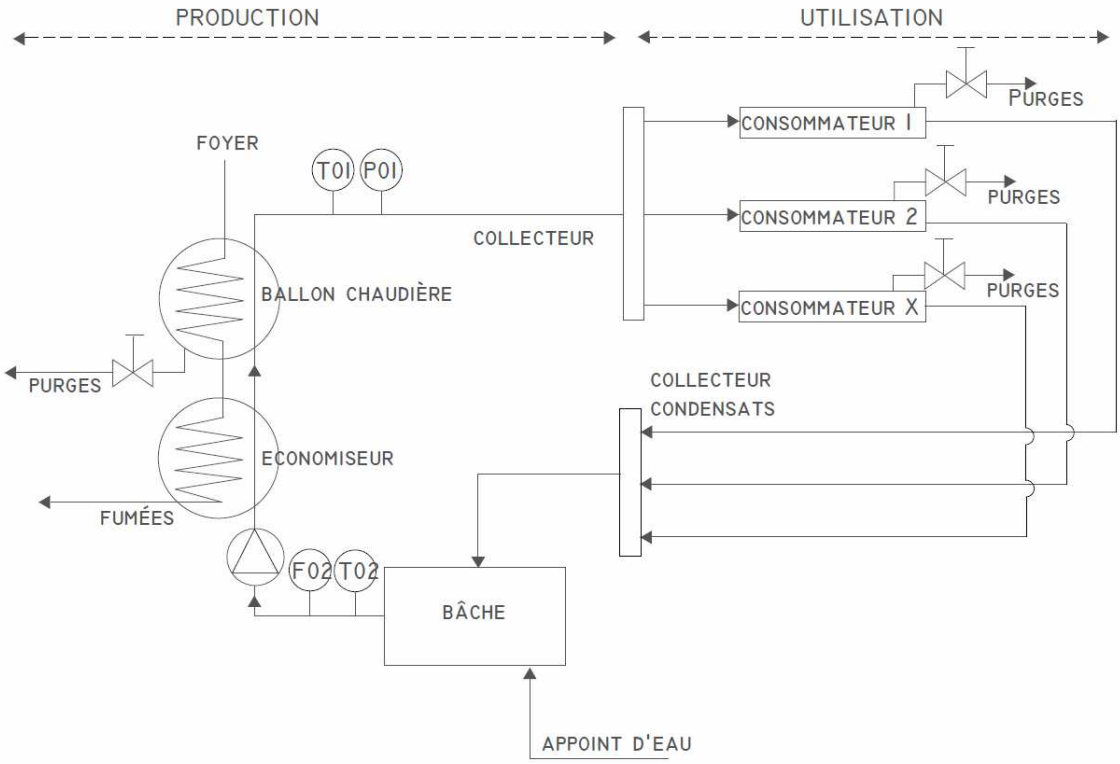
Figure 2 : Positionnement des capteurs sur le circuit de vapeur (production thermique seule)

Deux points de mesure sont nécessaires sur le circuit :

- En sortie chaudière sur le départ vapeur, doivent être mesurés **le débit (F01), la pression (P01) et la température (T01)** de la vapeur ;
- Sur le circuit d'alimentation de la chaudière, après la bâche alimentaire (entrée chaudière), doit être mesurée à nouveau **la température (T02).**

Cas particulier de la mesure du débit sur le circuit d'alimentation chaudière

Dans le cas où les caractéristiques de la vapeur (pression, température) ne permettent pas l'installation d'un débitmètre répondant aux exigences d'exactitude, la mesure du débit pourra être effectuée par un débitmètre positionné sur le circuit d'alimentation de la chaudière.



T0X : Point de mesure de la température
P0X : Point de mesure de la pression
F0X : Point de mesure du débit

Figure 3 : Positionnement des capteurs sur le circuit d'alimentation chaudière

Deux points de mesure sont nécessaires sur le circuit :

- En sortie chaudière sur le départ vapeur, doivent être mesurées **la pression (P01) et la température (T01)** de la vapeur ;
- Sur le circuit d'alimentation de la chaudière, entre la bâche alimentaire et la pompe, doivent être mesurés **le débit (F01)** et à nouveau **la température (T02).**

La formule de calcul de la puissance thermique est alors :

$$P_{th} = Q_{me} (H_s - H_e)$$

Avec :

P_{th} : puissance thermique exprimée en kW
Q_{me} : débit massique du fluide en entrée chaudière en kg/s
H : enthalpie en kJ/kg

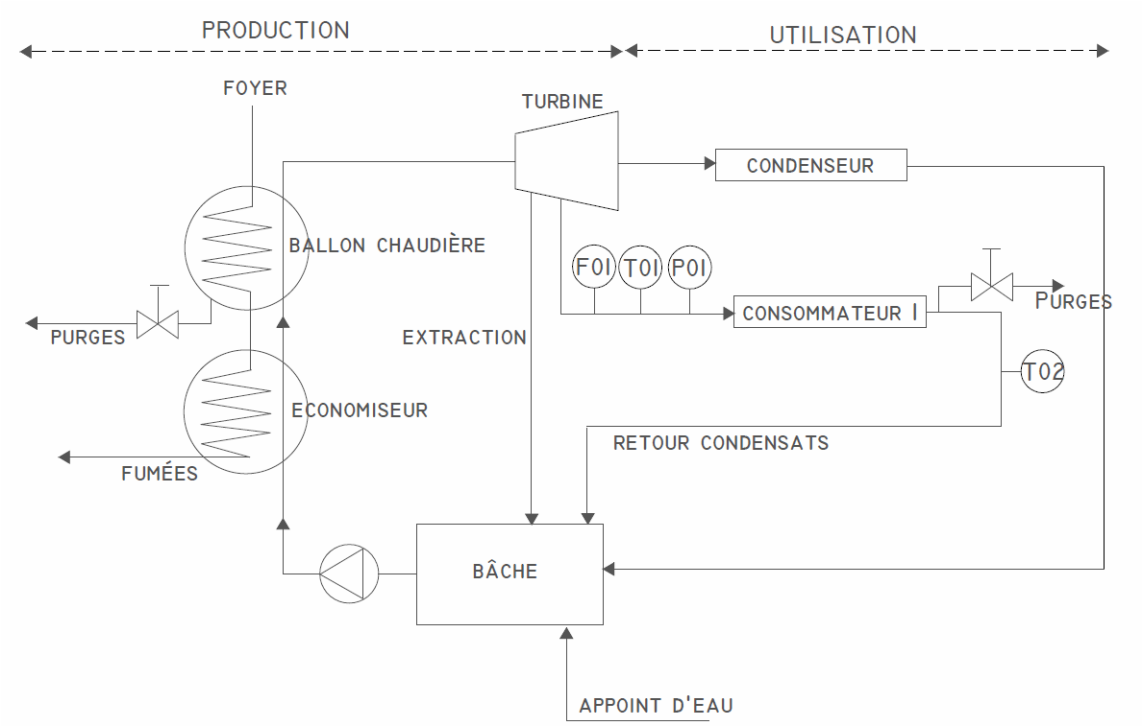
Dans ce cas, un débitmètre adapté à l'eau chaude doit être utilisé. Se rapporter à la fiche technique **ADEME, 2012, Production thermique issue de chaufferie biomasse. Fiche Technique : Comptage de l'énergie thermique – Eau chaude et surchauffée** pour les méthodes et technologies adaptées à la mesure des débits d'eau chaude.

2. Production d'énergie par cogénération – Turbine à condensation

La cogénération est la production combinée d'électricité et de chaleur. Il existe deux types de turbine à vapeur pour la cogénération : les turbines à condensation avec extraction et les turbines à contrepression.

Dans une turbine à condensation avec extraction, la quantité de vapeur requise est soutirée à un certain endroit entre l'entrée et l'échappement de la turbine au niveau de pression souhaité. Cette vapeur est envoyée au procédé pour couvrir les besoins thermiques.

Le reste de la vapeur poursuit sa détente dans la turbine jusqu'à une pression très basse (se rapprochant du vide), où la vapeur à l'échappement est alors condensée dans un condenseur. L'eau ainsi formée est pompée et renvoyée à la chaudière.



T0X : Point de mesure de la température
P0X : Point de mesure de la pression
F0X : Point de mesure du débit

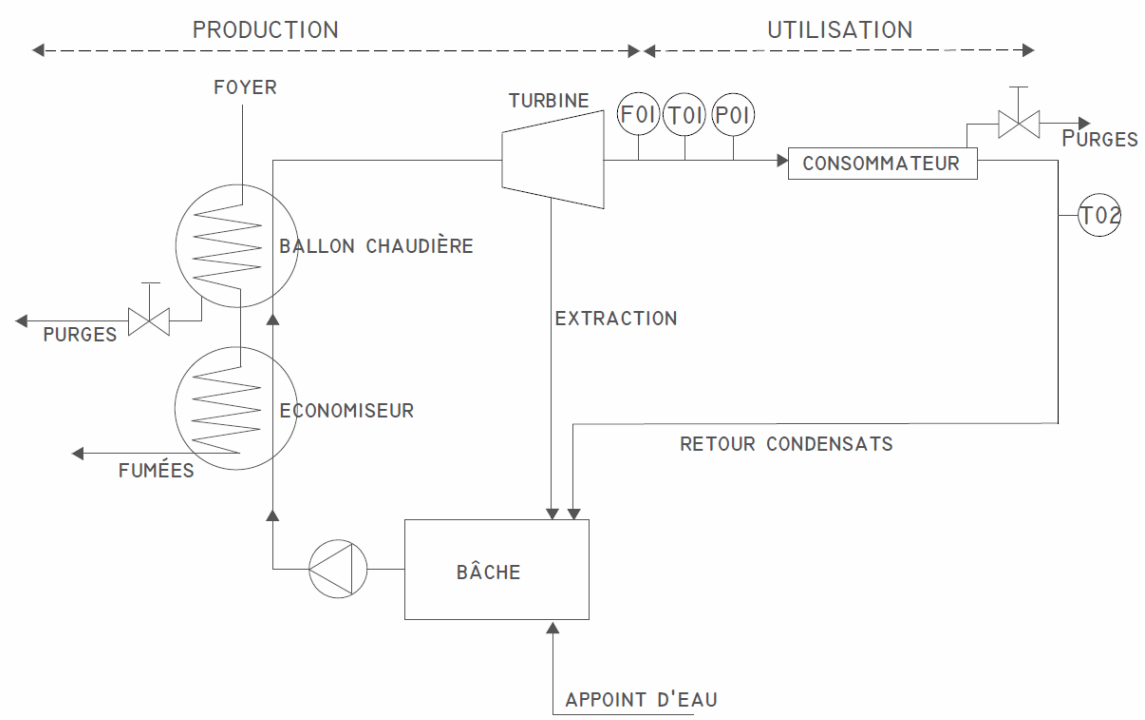
Figure 4 : Positionnement des capteurs sur le circuit de vapeur en cogénération (condensation)

Deux points de mesure sont nécessaires sur le circuit :

- Sur l'extraction de la turbine, sur laquelle doivent être mesurés **le débit (F01), la pression (P01) et la température (T01)** de la vapeur ;
- Sur le circuit de retour des condensats, doit être mesurée à nouveau **la température (T02).**

3. Production d'énergie par cogénération – Turbine à contrepression

Dans une turbine à contre-pression, la vapeur sort de la turbine à une certaine pression, qui est imposée par le procédé en aval et est mise à la disposition de l'utilisateur final. La vapeur dans la turbine est donc détendue jusqu'à une pression supérieure à la pression atmosphérique, puis est envoyée directement au procédé (ou via un échangeur pour des besoins en eau chaude) qui sert donc de condenseur.



T0X : Point de mesure de la température
P0X : Point de mesure de la pression
F0X : Point de mesure du débit

Figure 5 : Positionnement des capteurs sur le circuit de vapeur en cogénération (contrepression)

Deux points de mesure sont nécessaires sur le circuit :

- En sortie de turbine, en amont du (des) consommateur(s) sur lequel doivent être mesurés **le débit (F01), la pression (P01) et la température (T01)** de la vapeur ;
- Sur le circuit de retour des condensats, doit être mesurée à nouveau **la température (T02).**

II. Méthodes de comptage de l'énergie thermique dans un circuit de vapeur

1. Méthodes et technologies de comptage

Le comptage de l'énergie thermique produite dans un circuit utilisant de la vapeur doit être réalisé en mesurant au minimum quatre données :

- Le débit massique ou volumique de la vapeur ;
- La température de la vapeur en sortie chaudière et de l'eau d'alimentation (entrée chaudière).
- La pression de vapeur ;

1. Mesure du débit de vapeur

La mesure de débit de vapeur peut être réalisée à l'aide d'équipements appartenant à plusieurs classes :

Classe d'équipement Technologies	Vapeur saturée	Vapeur sèche	Vapeur surchauffée
Débitmètres à pression différentielle			
Débitmètre à diaphragme	Oui	Oui	Oui
Débitmètre à tube de Pitot	Oui	Oui	Oui
Débitmètres tachymétriques			
Débitmètre à effet vortex	Oui	Oui	Limité (1)
Débitmètres massiques			
Débitmètre à effet Coriolis	Limité (1)	Limité (1)	Non

(1) Maximum 200℃ et si la masse volumique du fluid e est suffisamment élevée.

Peu de technologies de débitmètre sont réellement adaptées à la mesure du débit de vapeur, qui est un fluide difficile à mesurer.

Les débitmètres à diaphragme sont les plus utilisés pour la mesure du débit de vapeur, mais ils demandent à être bien posés et bien calculés pour couvrir une plage de débit suffisante. **Ils doivent être posés sur une conduite verticale descendante** pour évacuer l'eau véhiculée avec la vapeur.

Les tubes de Pitot sont peu utilisés du fait qu'ils mesurent une différence de pression très faible, plus difficile à mesurer sur les circuits de vapeur que sur les circuits de liquide par exemple.

L'usage **des débitmètres à effet vortex** est possible pour la mesure de vapeur saturée ou sèche, mais non recommandé pour la vapeur surchauffée (T_{max}). Ils ont une plus grande plage de mesure de débit (différence entre Q_{max} et Q_{min} mesurés) que les diaphragmes, mais sont plus fragiles, sensibles à l'encrassement et nécessitent un démontage pour contrôle.

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.

3. Mesure de la pression

Les principales technologies de sondes de pression adaptées à la vapeur sont les manomètres électroniques.

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

Les points de mesure des températures et les points de mesure des pressions doivent être aussi voisins que possible pour la détermination des enthalpies.

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 :

$$Qv = v * S = S * \sqrt{(2 * Pdyn / \rho)}$$

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 m²
P : 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 ;
- Le coefficient isentropique pour la vapeur (permettant de déterminer la variation de masse volumique liée à la variation de pression dans l'orifice) ;
- La viscosité du fluide.

Dans le cas de la vapeur, ces valeurs peuvent être déterminées à partir de tables préexistantes (tables de Mollier).

- **Débitmètre à diaphragme**

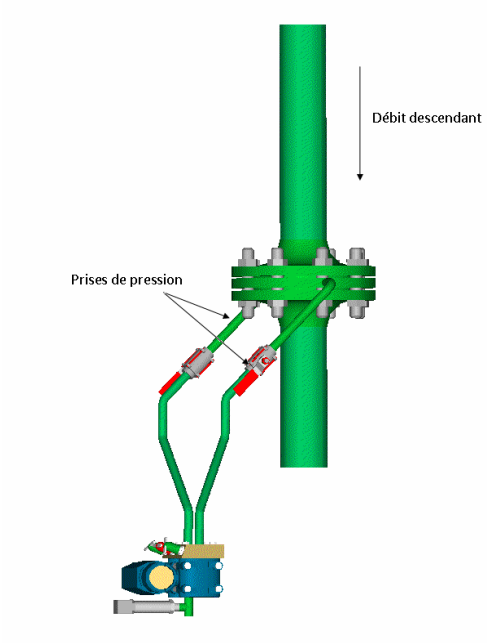


Figure 6 : Diaphragme sur tuyauterie descendante
(Schéma Barrault Recherche)

Le **montage préconisé** consiste à poser le diaphragme sur une conduite verticale descendante, 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").

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.

- **Débitmètres à tube de Pitot**

Un débitmètre à tube de Pitot mesure la différence entre la pression d'impact du fluide captée par le tube face à l'écoulement et sa pression statique mesurée latéralement.

Dans un Pitot moyenné, plusieurs prises de pression statique sont positionnées sur le tube (en rouge sur le schéma ci-dessus), permettant d'obtenir un débit moyen, représentatif de l'écoulement dans toute une longueur de conduite.

2. 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 entrainent 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 [11].

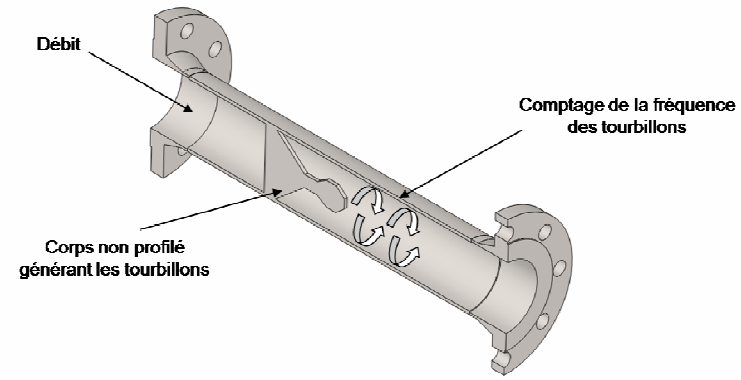


Figure 7 : Débitmètre à vortex
(Schéma Enertime)

3. 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.

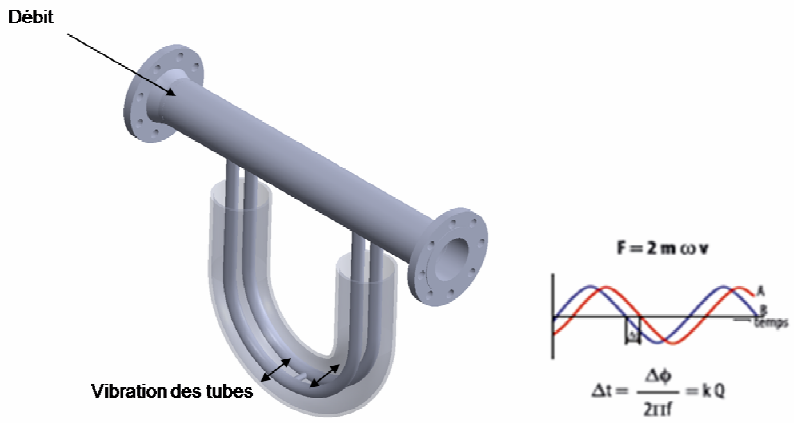


Figure 8 : Débitmètre à effet Coriolis en U (schéma de droite extrait de [9])

Les débitmètres à effet Coriolis ne peuvent être utilisés pour la mesure de vapeur qu'en deçà de 200℃ , ce qui limite leur champ d'application.

III. Contraintes et performances des débitmètres

1. Gammes de température et pression d'usage

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

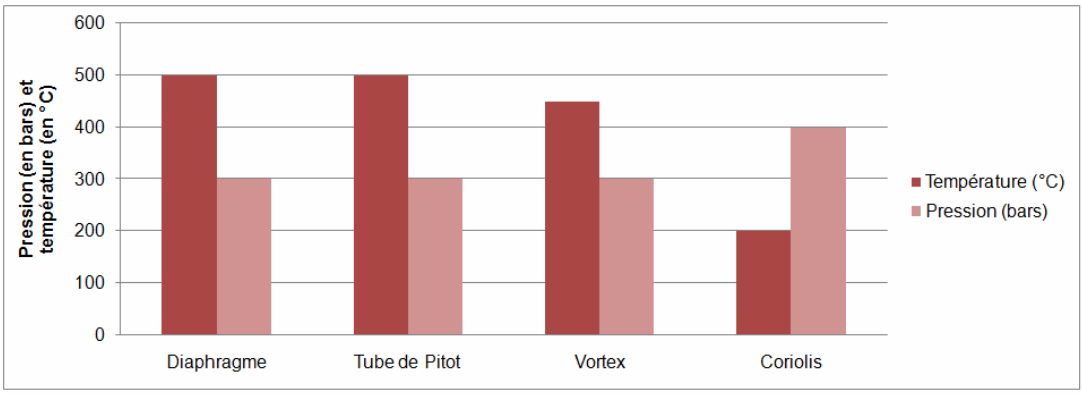


Figure 9 : Plages de pression et température d'usage des débitmètres adaptés à la vapeur
(adapté de [9])

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

Les débitmètres à Coriolis sont limités à 200℃ max imum.

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			
Diaphragme	3 à 300	1 à 5	50 à 80 %
Tube de Pitot	10 à 4 000	1 à 8	Moyenne à élevée
Débitmètres tachymétriques			
Débitmètre à effet vortex	12 à 500	1 à 20	Moyenne
Débitmètres massiques			
A effet Coriolis	1 à 350	1 à 100 min.	Négligeable

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

Figure 10 : Contraintes d'installation et performances des débitmètres
(adapté de [9])

1. Diamètre nominal

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

Les débitmètres à Coriolis sont plus limités en termes de gros diamètre, et leur coût dépend fortement de cette variable.

2. Dynamique de mesure

La dynamique de mesure[1] indique le rapport entre le débit maximal et le débit minimal à mesurer (Qmax/Qmin) 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 de vapeur dont le débit varie selon la saison, entre 10 m^3/h et 100 m^3/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, quand les autres systèmes présentent une dynamique de 2 à 5 fois supérieure (débitmètres à vortex), voire plus (débitmètres 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 correctement, de créer une différence de pression dans la conduite. La perte de pression induite (ou pratique) 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, 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 voire 500 mbars.

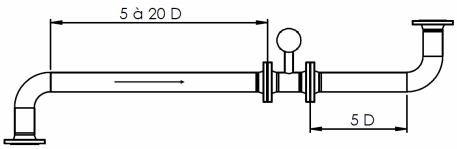
Les débitmètres à insertion entrainent une perte de pression qui peut être négligeable ou moyenne selon les modèles.

4. Longueur droite minimale recommandée

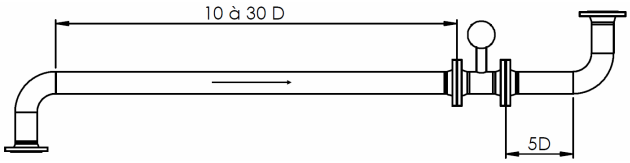
Pour fonctionner dans la plage d'exactitude de mesure annoncée par le fabricant, un débitmètre doit être installé dans certaines conditions sur la canalisation. En particulier, l'installation doit respecter une distance minimale entre le changement de direction/caractéristiques du fluide précédent et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

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.

Tube de Pitot
Vortex



Diaphragme



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

Les débitmètres massiques 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 selon la configuration du circuit, notamment :

- 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'exactitude[2] 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.

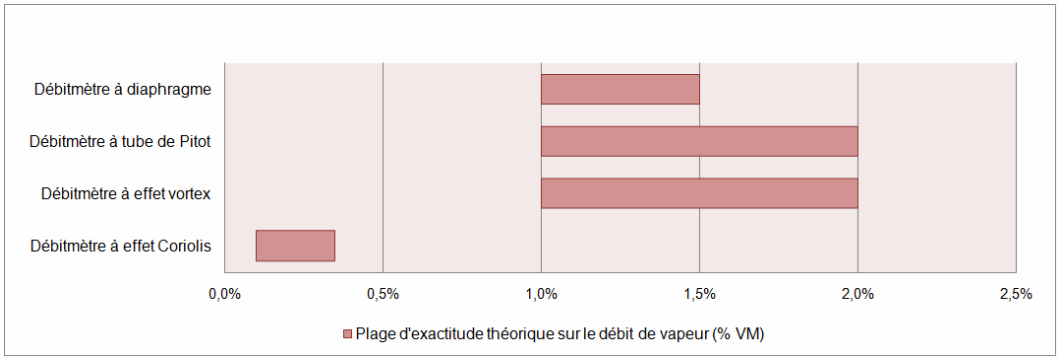


Figure 11 : Plage d'exactitude des débitmètres adaptés à la mesure de débit de vapeur
(graphique adapté de [9])

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

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

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 :

Classe d'exactitude	Exactitude E_F (en l/s)	Exactitude E_F maximale tolérée (%)
Classe 1	$E_F = \pm (1 + 0{,}01\ Q_n/Q)$	**pas plus de ± 3,5 %**
Classe 2	$E_F = \pm (2 + 0{,}02\ Q_n/Q)$	**pas plus de ± 5 %**
Classe 3	$E_F = \pm (3 + 0{,}05\ Q_n/Q)$	**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 (℃)	Classe d'exactitude (tolérance) des sondes (selon NF EN 60751)	Erreur maximale tolérée E_T correspondante (%)
Entre 100 et 600℃	Classe A	Soit au maximum **0,35 % sur la mesure de température**
Entre 100 et 850℃	Classe B	Soit au maximum **0,80 % sur la mesure de température**

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

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

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

Avec :

T : valeur de la température mesurée (℃)
dT : exactitude sur la mesure de température (℃)

- **Sonde de pression :**

La sonde de pression installée sur le circuit doit respecter les exigences d'exactitude de la norme correspondant à la technologie utilisée.

- **Calculateur (intégrateur) :**

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

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

Avec :

ΔT 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 Ec 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 :

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

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 1ère, 2ème et ième 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 :

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

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

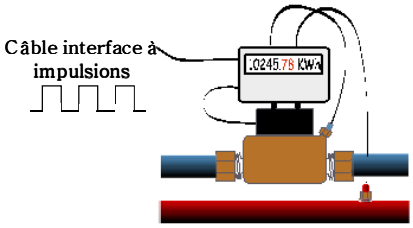
Un compteur d'énergie thermique communique les valeurs mesurées par un signal qui peut être :

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 impulsionnel

Il s'agit de compteurs pour lesquels il existe une interface – dite impulsionnelle – 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.

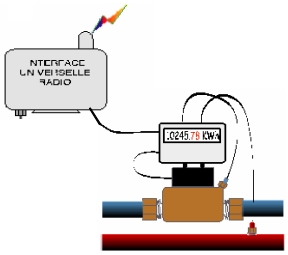


La télérelève d'un compteur impulsionnel peut être réalisée :

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

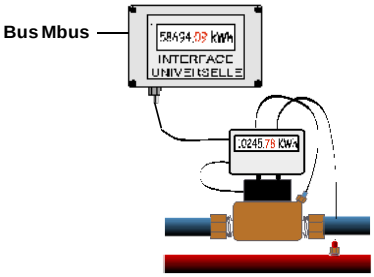
Ce dernier permet de compter le nombre d'impulsions émises par le compteur et de les envoyer vers un concentrateur radio compatible. La liaison compteur / interface radio peut également inclure une détection d'absence de connexion (détection de fraude). Les fréquences radio utilisées peuvent être différentes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



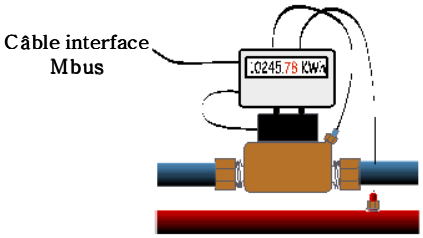
- **En équipant le compteur d'un transmetteur capable de dialoguer sur un bus M-Bus :**

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 télérelever 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 la norme NF EN1434-6 Compteurs d'énergie thermique – Partie 6 : Installation, mise en service, surveillance de fonctionnement et maintenance. Annexe A2. *[13]*

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) Etendues 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. Eléments relatifs au coût d'acquisition et maintenance

Classe d'équipement Technologies	Coût d'acquisition	Coût de maintenance
Débitmètres à pression différentielle		
Débitmètre à diaphragme	1	1 à 2
Débitmètre à tube de Pitot	1	1 à 2
Débitmètres tachymétriques		
Débitmètre à effet vortex	2	1
Débitmètres massiques		
Débitmètre à effet Coriolis	3	1

1 : coût faible
2 : coût moyen
3 : coût élevé

Figure 12 : 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	Diaphragme	Tube de Pitot	Vortex	Coriolis
Contraintes du fluide	Mesurer de la vapeur saturée ou sèche	X	X	X	(I)
	Mesurer de la vapeur surchauffée	X			
	Mesurer un débit dans large dynamique (Qmax/Qmin >10)			X	X
	Conserver des pertes de charge faibles	X	(I)	X	X
Contraintes de conduite	Mesurer le débit sur une conduite de diamètre < 75 mm	X	X	X	X
	Mesurer le débit sur une conduite de diamètre > 75 mm	X	X	X	X
	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			
Exactitude	Une bonne exactitude de mesure (0,5 à 2% VM)	X	X	X	
	Une très bonne exactitude de mesure (< 0,5% VM)				X
Paramètres mesurés	Mesurer directement la température, le débit volumique, la densité (et pour certains modèles la viscosité) du fluide				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	X	
Expérience	Un bon retour d'expérience sur les applications vapeur	X			

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

Les instruments suivants ne sont pas adaptés à la mesure du débit sur les circuits de vapeur :

- Débitmètres à turbine ;
- Débitmètres électromagnétiques ;
- Débitmètres à ultrasons ;
- Débitmètres massiques thermiques (à capacité comme à convection) selon [11] ;
- Les Venturis à montage horizontal.

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. Sigonnez, 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

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE

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

www.ademe.fr