

PRODUCTION THERMIQUE ISSUE DE CHAUFFERIE BIOMASSE

FICHE TECHNIQUE : COMPTAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE

AIR CHAUD

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 : AIR CHAUD

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'Énergie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Économie, 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'air chaud	6
3.	Composition d'un compteur d'énergie thermique	6
4.	Grandeurs à mesurer	7
5.	Méthodes de mesure sur les circuits d'air chaud	8
1.	Générateurs d'air chaud à fumées directes (avec mesure autour de la chambre de dilution)	8
2.	Générateurs d'air chaud à fumées directes (avec mesure autour du foyer)	10
3.	Générateurs d'air chaud à fumées indirectes	12
II.	Méthodes de comptage de l'énergie thermique dans un circuit d'air chaud	14
1.	Méthodes de comptage et technologies	14
1.	Mesure du débit d'air chaud	14
2.	Mesure de la température	14
3.	Mesure de l'hygrométrie de l'air	15
2.	Principe de fonctionnement des débitmètres	15
1.	Débitmètres à pression différentielle	15
2.	Débitmètre massique à capacité thermique	17
III.	Contraintes des fluides et performances	17
1.	Gammes de température et pression d'usage	17
2.	Caractéristiques dynamiques et de la conduite	18
1.	Diamètre nominal	18
2.	Dynamique de mesure	18
3.	Perte de pression	18
4.	Longueur droite minimale recommandée	19
3.	Exactitude des mesures	19
1.	Exactitude de mesure de débit	19
2.	Exigences d'exactitude	20
3.	Détermination de l'exactitude	21
4.	Répétabilité	22
4.	Signal de sortie et télérelève des données	22
1.	Sans report d'information (indicateur local)	22
2.	Avec report impulsionnel	22
3.	Avec report M-Bus	23
IV.	Critères de sélection	24
1.	Critères de sélection d'un compteur d'énergie thermique	24
2.	Éléments relatifs aux coûts d'acquisition et maintenance	24
3.	Agrément pour transactions commerciales	24
4.	Grille d'aide à la sélection du débitmètre	25
	Références bibliographiques	26

Résumé

Cette fiche présente les méthodes et technologies adaptées au comptage de l'énergie thermique produite par une chaudière biomasse utilisant de l'air chaud comme fluide caloporteur (générateur d'air chaud).

La mesure de débit d'air chaud doit être de préférence réalisée par un système à pression différentielle à diaphragme ou équivalent, voire à tube de Pitot. D'autres technologies sont utilisables mais uniquement dans certaines conditions.

Pour la procédure de comptage de l'énergie thermique produite par l'installation, se reporter 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'air comme fluide caloporteur (air chaud).

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'air chaud

L'air peut être utilisé comme fluide caloporteur dans différents procédés. L'air chaud est alors produit par des chaudières, communément appelées générateurs d'air chaud (GAC)¹.

Les générateurs d'air chaud sont utilisés pour la production d'air chaud de process (fours, séchoirs, étuves, etc.) ou pour le chauffage de locaux. Selon le secteur d'activité, les besoins en air chaud sont différents, particulièrement en termes de température :

- **Basses températures** (entre 20 et 70°C) : activité de chauffage de bâtiments (commercial, industriel, agriculture: élevage, serres) ;
- **Moyennes températures** (entre 70 et 200°C) : activité de séchage de matériaux (tuiles et briqueteries, bois) et de certains produits destinés à l'alimentation (maïs) ;
- **Hautes températures** (supérieures à 200°C, pouvant aller jusqu'à 1 000°C) : activités de granulation et déshydratation (bois, engrais, fourrage), industrie chimique et agro-industrie.

Comme toute chaudière biomasse, les générateurs d'air chaud sont constitués d'un foyer de combustion alimenté en biomasse par des dispositifs classiques : silos de stockage, systèmes d'extraction et de transfert du combustible biomasse. Les fumées issues du foyer de combustion sont ensuite utilisées pour produire de l'air chaud.

On distingue alors deux types de générateurs d'air chaud :

- Les **générateurs à air chaud « direct »** qui utilisent directement dans le process les fumées de combustion, avec ou sans dilution ; ils trouvent principalement leur application dans les process à haute température et pour lesquels la propreté (teneur en poussières/particules) de l'air chaud n'est pas une limite pour le process ;
- Les **générateurs à air chaud « indirect »**, qui utilisent la chambre et les fumées de combustion pour réchauffer l'air à destination du process : l'air ambiant circule dans le générateur au moyen d'un ventilateur afin d'être réchauffé dans un échangeur par les fumées de combustion. Ce type de générateurs à air chaud est le plus souvent destiné aux applications nécessitant un air propre (process, chauffage).

Concernant le comptage de l'énergie produite par les GAC, un compteur d'énergie « clé en main » adapté aux gaz chauds n'existe pas sur le marché, néanmoins le suivi en continu des paramètres permettant de calculer l'énergie produite est possible. Le facteur limitant est la température, qui rend difficile la mesure de l'humidité.

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'un télérelevage de l'énergie thermique comptée, le concentrateur comprend un **équipement de télétransmission des données** (GPRS/GSM, Ethernet, etc.) ;

¹ Pour plus d'informations sur les générateurs d'air chaud, se rapporter à l'étude [2] Etat de l'art de la technologie générateur d'air chaud à partir de biomasse réalisée en 2010 pour l'ADEME par le CRITT BOIS et l'ENSTIB.

4. Grandeurs à mesurer

Pour le comptage de l'énergie thermique produite par un générateur d'air chaud, il est nécessaire de mesurer :

- **Le débit massique ou volumique** de l'air entrant (ou de dilution) et de l'air sortant (ou dilué) ;
- **La différence de température** entre l'air entrant dans le générateur (ou la chambre de dilution) et l'air sortant ;
- **L'humidité de l'air.**

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

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

- **Calcul de la masse volumique de l'air**

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

$$\rho = 1,225 - (0,003 * T) + 0,000003 * T^2$$

Avec :

- ρ : masse volumique du fluide en kg/m³
- T : température de l'air (en °C).

- **Conversion du débit volumique en débit massique**

Dans chaque cas présenté ci-dessous (§ 1.6.), si le débit mesuré est le débit volumique (comme le font la plupart des technologies de débitmètres), il est nécessaire de le convertir en débit massique avant calcul de la puissance thermique, à l'aide de la formule suivante :

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

Avec :

- Q_m : débit massique du fluide (en kg/s),
- Q_v : débit volumique (en m³/h),
- ρ : masse volumique du fluide (en kg/m³). ρ est variable, en fonction de la température réelle du fluide au point de mesure (voir point précédent).

- **Capacité calorifique de l'air et de la vapeur d'eau**

Température (en °C)	Cp de l'air (en kJ/kg/°C)	Cp de la vapeur d'eau (en kJ/kg/°C)
200	1,020	2,010
300	1,050	2,030
400	1,070	2,080
500	1,090	2,140
600	1,120	2,210
700	1,140	2,280
800	1,150	2,350
900	1,170	2,410

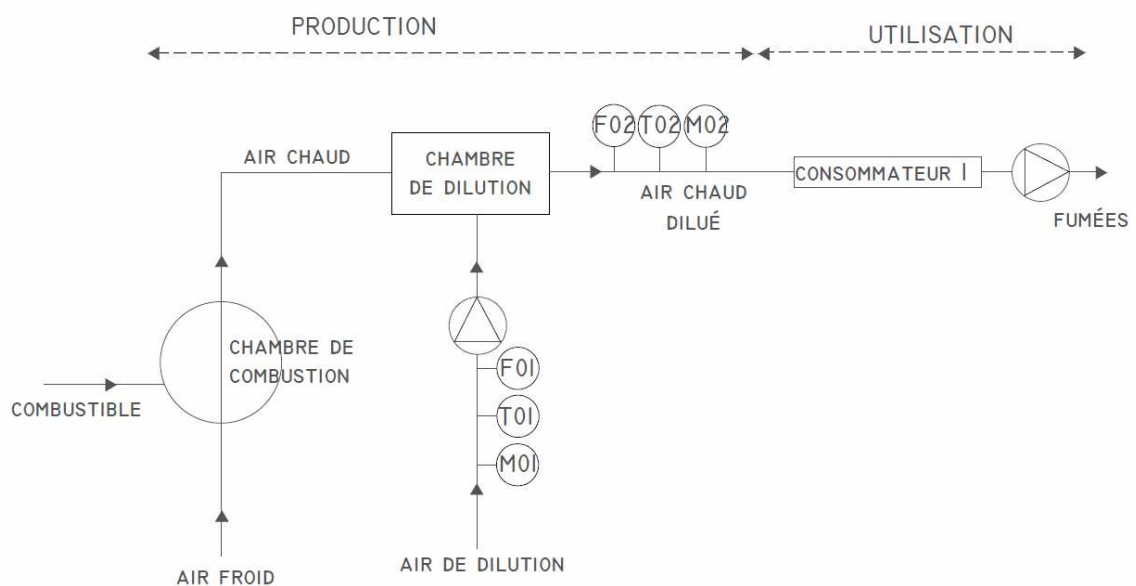
5. Méthodes de mesure sur les circuits d'air chaud

La puissance thermique transmise par le générateur à l'air est calculée selon les méthodes ci-dessous, pour chaque cas.

1. Générateurs d'air chaud à fumées directes (avec mesure autour de la chambre de dilution)

- **Schéma de comptage**

Les générateurs d'air chaud à fumées directes utilisent directement les fumées de combustion dans le process, avec ou sans dilution préalable. L'air peut alors être chargé de particules (poussières) et nécessiter une instrumentation adaptée. Dans ce cas on mesure le débit sur l'air de dilution entrant (F01) et sur l'air dilué sortant de la chambre de dilution (F02).



T0X : Point de mesure de la température
 F0X : Point de mesure du débit
 M0X : Point de mesure de l'humidité de l'air (hygrométrie)

Figure 1 : Positionnement des capteurs sur le circuit d'air chaud (générateur à fumées directes)

Deux points de mesure sont nécessaires sur le circuit d'air :

- Sur le circuit d'air de dilution entrant, doivent être mesurés **la température (T01), le débit (F01) et l'hygrométrie de l'air entrant (M01)** ;
- Sur le circuit d'air à la sortie de la chambre de dilution, doivent être mesurés à nouveau **la température (T02), le débit (F02) et l'hygrométrie de l'air sortant (M02)**.

- **Méthode de calcul de la puissance thermique**

La puissance thermique est définie selon la formule :

$$P_{TH} = Q_S * [(Cp_{AS} * T_S) + R_S * (Cp_V * T_S + k * Lv_0)] - Q_E * [(Cp_{AS} * T_E) + R_E * (Cp_V * T_E + k * Lv_0)]$$

Si l'énergie contenue dans les fumées n'est pas valorisée par condensation, le coefficient k=0 et la formule peut être simplifiée selon :

$$P_{TH} = Q_S * [(1,006 * T_S) + R_S * (1,84 * T_S)] - Q_E * [(1,006 * T_E) + R_E * (1,84 * T_E)]$$

Avec :

Sigle	Définition	Unité	Valeur constante	Instrumentation sur le schéma
P _{TH}	Puissance thermique exprimée	kW		
Q _E	Débit massique de l'air de dilution	kg/s		F01
Q _S	Débit massique de l'air dilué (sortie)	kg/s		F02
T _E	Température de l'air de dilution	°C		T01
T _S	Température de l'air dilué (sortie)	°C		T02
R _E	Rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec de l'air de dilution		Possible	M01
R _S	Rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec de l'air dilué (sortie)		Possible	M02
Cp _{AS}	Capacité thermique massique à pression constante de l'air sec	kJ/kg/°C	Egale à Cp _{AS} (Ts+Te)/2)*	
Cp _V	Capacité thermique massique à pression constante de la vapeur d'eau	kJ/kg/°C	Egale à Cp _V ((Ts+Te)/2)**	
k	Valorisation des fumées	0 ou 1	Si pas de condensation des fumées, k = 0	
Lv ₀	Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C	kJ/ kg/°C	2 501	

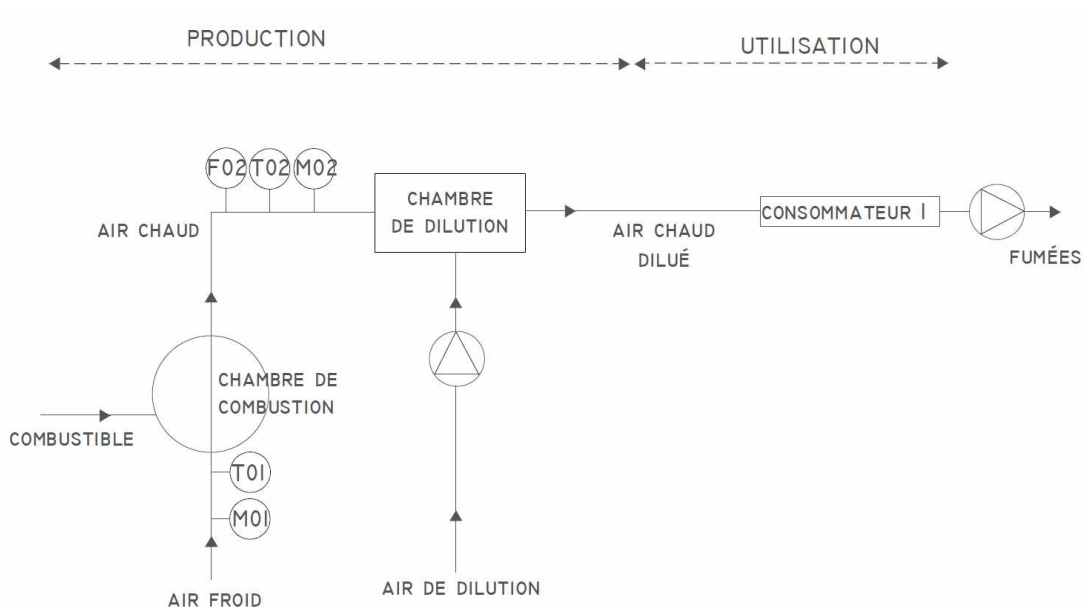
* voir tableau p7

** voir tableau p7

2. Générateurs d'air chaud à fumées directes (avec mesure autour du foyer)

- **Schéma de comptage**

Dans certains cas, il est possible de réaliser le bilan d'énergie thermique autour du générateur d'air chaud à fumées directes.



T0X : Point de mesure de la température

F0X : Point de mesure du débit

M0X : Point de mesure de l'humidité de l'air (hygrométrie)

Figure 2 : Positionnement des capteurs sur le circuit d'air chaud (générateur à fumées directes)

Les deux points de mesure sont alors positionnés comme suit :

- **La température (T01) et l'humidité de l'air (M01)** sont mesurées sur l'air entrant dans le générateur d'air chaud ;
- **Le débit (F02), la température (T02) et l'humidité de l'air (M02)** sont mesurés sur l'air chaud sortant du générateur, avant la chambre de dilution.

• **Méthode de calcul de la puissance thermique**

La puissance thermique est définie selon la formule :

$$P_{TH} = Q_S * [(Cp_{AS} * T_S) + R_S * (Cp_V * T_S + k * Lv_0)] - Q_E * [(Cp_{AS} * T_E) + R_E * (Cp_V * T_E + k * Lv_0)]$$

Si l'énergie contenue dans les fumées n'est pas valorisée par condensation, le coefficient k=0 et la formule peut être simplifiée selon :

$$P_{TH} = Q_S * [(1,006 * T_S) + R_S * (1,84 * T_S)] - Q_E * [(1,006 * T_E) + R_E * (1,84 * T_E)]$$

Avec :

Sigle	Définition	Unité	Valeur constante	Instrumentation sur le schéma
P _{TH}	Puissance thermique exprimée	kW		
Q _E	Débit massique de l'air froid	kg/s	= Q _S	
Q _S	Débit massique de l'air chaud (sortie GAC)	kg/s		F02
T _E	Température de l'air froid	°C		T01
T _S	Température de l'air chaud (sortie GAC)	°C		T02
R _E	Rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec de l'air froid		Possible	M01
R _S	Rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec de l'air chaud (sortie GAC)		Possible	M02
Cp _{AS}	Capacité thermique massique à pression constante de l'air sec	kJ/kg/°C	Egale à Cp _{AS} (Ts+Te)/2)*	
Cp _V	Capacité thermique massique à pression constante de la vapeur d'eau	kJ/kg/°C	Egale à Cp _V ((Ts+Te)/2)**	
k	Valorisation des fumées	0 ou 1	Si pas de condensation des fumées, k = 0	
Lv ₀	Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C	kJ/kg/°C	2 501	

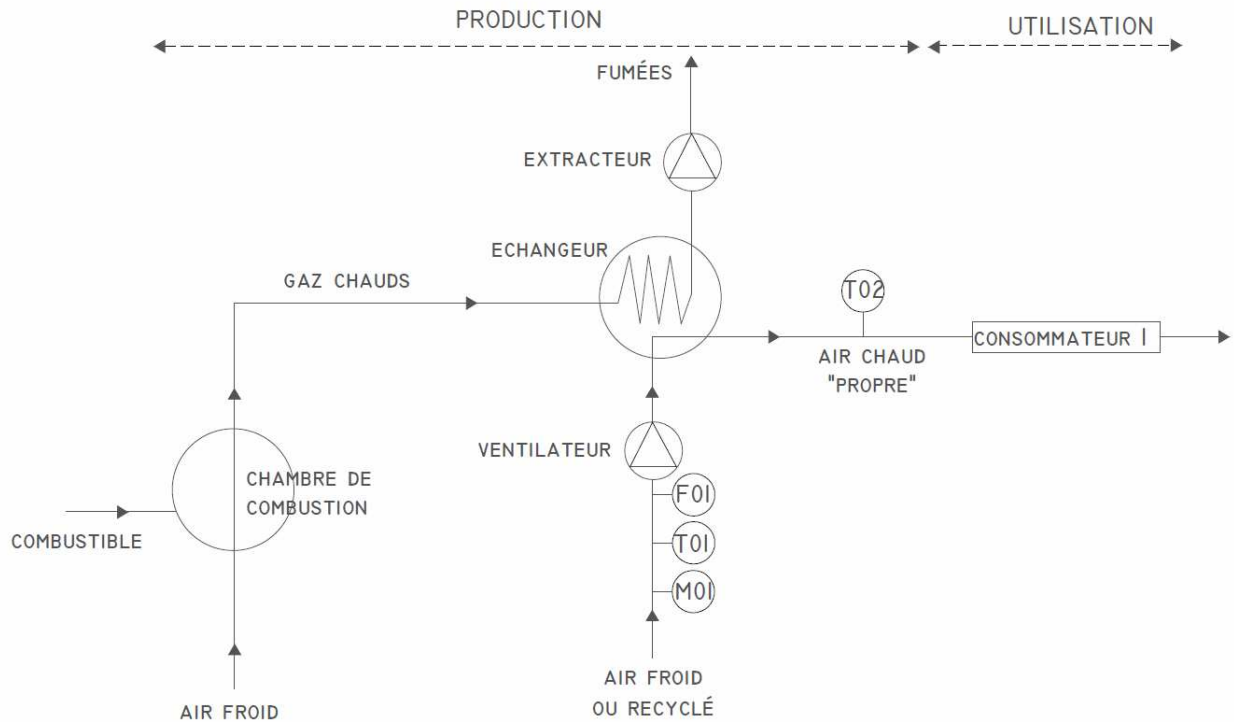
* voir tableau p7

** voir tableau p7

3. Générateurs d'air chaud à fumées indirectes

- **Schéma de comptage**

Les générateurs d'air chaud à fumées indirectes utilisent les fumées de combustion pour réchauffer, via un échangeur de chaleur, l'air « propre » qui sera envoyé au process.



T0X : Point de mesure de la température

F0X : Point de mesure du débit

M0X : Point de mesure de l'humidité de l'air (hygrométrie)

Figure 3 : Positionnement des capteurs sur le circuit d'air chaud (générateur à fumées indirectes)

Deux points de mesure sont nécessaires sur le circuit d'air :

- Sur le circuit d'air froid en amont de l'échangeur, doivent être mesurés la **température (T01)**, le **débit (F01)** et l'**hygrométrie de l'air entrant (M01)** ;
- Sur le circuit d'air à la sortie de l'échangeur, doit être à nouveau mesurée la **température de l'air (T02)**.

- **Méthode de calcul de la puissance thermique**

La puissance thermique est définie selon la formule :

$$P_{TH} = Q_S * H_S - Q_E * H_E$$

Soit :

$$P_{TH} = Q_S * [(Cp_{AS} * T_S) + R_S * (Cp_V * T_S + Lv_0)] - Q_E * [(Cp_{AS} * T_E) + R_E * (Cp_V * T_E + Lv_0)]$$

Si le rapport de mélange de l'air humide est constant en entrée et en sortie de l'échangeur, alors la formule peut être simplifiée selon :

$$P_{TH} = Q_S * [1,006 * (T_S - T_E) + 1,84 * R_S * (T_S - T_E)]$$

Avec :

Sigle	Définition	Unité	Valeur constante	Instrumentation sur le schéma
P _{TH}	Puissance thermique exprimée	kW		
Q _E	Débit massique de l'air froid	kg/s		F01
Q _S	Débit massique de l'air chaud propre (sortie)	kg/s	= Q _E	
T _E	Température de l'air froid	°C		T01
T _S	Température de l'air chaud propre (sortie)	°C		T02
R _E	Rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec de l'air froid		Possible	M01
R _S	Rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec de l'air chaud propre (sortie)		= R _E	
Cp _{AS}	Capacité thermique massique à pression constante de l'air sec	kJ/kg/°C	Egale à Cp _{AS} (Ts+Te)/2*	
Cp _V	Capacité thermique massique à pression constante de la vapeur d'eau	kJ/kg/°C	Egale à Cp _V (Ts+Te)/2**	
Lv ₀	Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C	kJ/kg/°C	2 501	

* voir tableau p7

** voir tableau p7

II. Méthodes de comptage de l'énergie thermique dans un circuit d'air chaud

1. Méthodes de comptage et technologies

Le comptage de l'énergie thermique produite par l'utilisation d'air chaud doit être réalisé en mesurant au minimum trois données :

- Le débit massique ou volumique de l'air ;
- La température de l'air ;
- L'hygrométrie (teneur en eau) de l'air.

1. Mesure du débit d'air chaud

La mesure de débit d'air chaud (propre ou chargé en particules) peut être réalisée à l'aide d'équipements de plusieurs classes :

Classe d'équipement Technologies	Air propre	Air chargé
Débitmètres à pression différentielle		
Débitmètre à diaphragme	Oui	Oui
Débitmètre à tube de Pitot	Oui	Sous conditions
Débitmètres massiques		
Débitmètre à capacité thermique	Avec réserves	Sous conditions

Peu de débitmètres sont adaptés à la mesure du débit d'air chaud. Les diaphragmes sont encore les mieux adaptés, de même que les tubes de Pitot pour l'air non chargé en particules.

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 appariés et avoir une longueur de câble de liaison identique.

3. Mesure de l'hygrométrie de l'air

L'air chaud possède une teneur en eau différente de zéro. Cette eau contient de l'énergie, représentée par la chaleur latente de vaporisation (L_v) qu'il est important de mesurer dans le cas où la vapeur contenue dans l'air est condensée en fin de process.

La mesure de l'hygrométrie de l'air peut être réalisée par des sondes (hygromètres) de plusieurs types :

- Hygromètres capacitifs ;
- Hygromètres à oxyde métallique ;
- Hygromètres à condensation.

Se rapporter à l'étude [2] **Etat de l'art de la technologie générateur d'air chaud à partir de biomasse**, disponible sur le site de l'ADEME, pour la description des technologies d'hygromètres (page 36 et suivantes).

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'un organe 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.

- **Débitmètre à diaphragme**

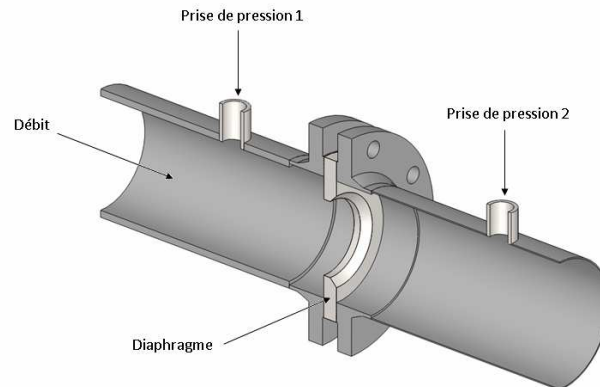


Figure 4 : Diaphragme avec prises à D et D/2
(Schéma Enertime)

Les orifices de prise de pression doivent être sur le dessus de la conduite d'air et les canalisations de liaison au capteur de pression différentielle doivent être continûment ascendantes pour éviter la présence d'eau de condensation.

- **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.

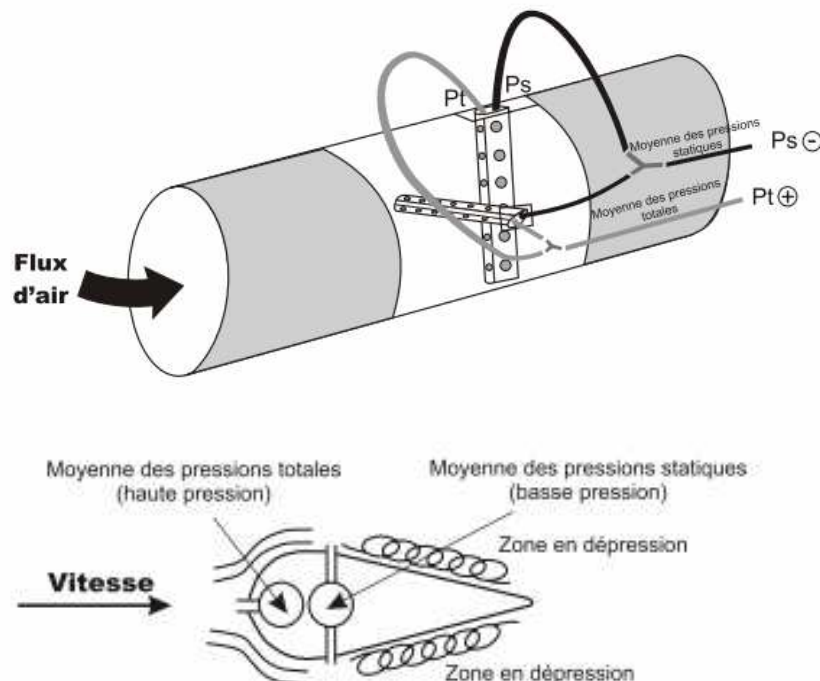


Figure 5 : Schéma d'un tube de Pitot moyenné (en haut) et schéma de principe de fonctionnement
(Source : <http://www.orificenozzleventuri.com>)

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. Débitmètre massique à capacité thermique

Un débitmètre à capacité thermique mesure le débit massique d'un fluide en lui imposant un échauffement local de quelques degrés. Il apparaît une différence de température entre la face amont et la face aval du capteur qui est en relation avec le débit massique d'air qui passe autour de l'appareil.

Cet appareil ne peut être utilisé dans de grandes gaines où les vitesses peuvent être variables d'un point à l'autre.

III. Contraintes des fluides et performances

1. Gammes de température et pression d'usage

Les gammes de température et de 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.

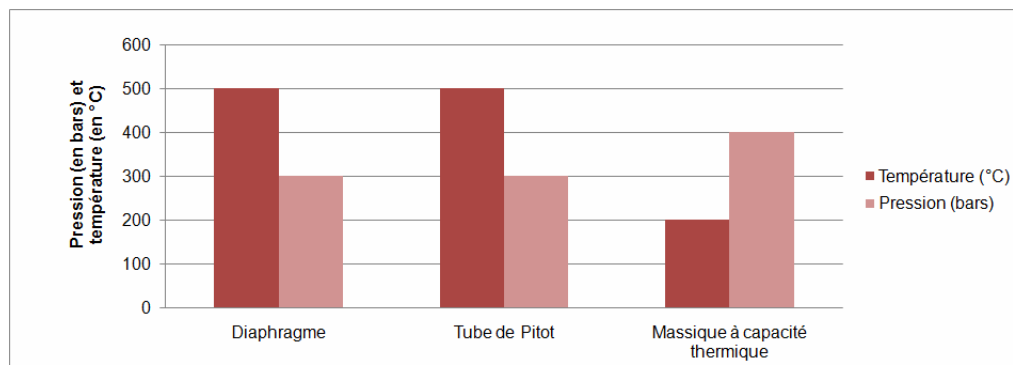


Figure 6 : Plages de pression et température d'usage des débitmètres
 (graphique adapté de [9])

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 à capacité thermique sont limités à 200°C maximum.

2. Caractéristiques dynamiques et de la conduite

Classe d'équipement Technologies	Diamètre nominal DN ou Ø (mm)	Dynamique de débit (Q _{max} /Q _{min})	Perte de pression (en % dP) ⁽¹⁾
Débitmètres à pression différentielle			
Diaphragmes	3 à 300	1 à 5	50 à 80 %
Tube de Pitot	10 à 4 000	1 à 8	Moyenne à élevée
Débitmètres massiques			
A capacité thermique	3 à 5 000	1 à 50	Négligeable

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

Figure 7 : Contraintes d'installation et performances des débitmètres

(adapté de [9] et [10])

1. Diamètre nominal

Pour les gros diamètres de canalisation (>2 000 mm), il est conseillé de privilégier les débitmètres à tube de Pitot, qui ont une gamme de diamètre plus large.

2. Dynamique de mesure

La dynamique de mesure² 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'air chaud dont le débit varie selon la saison, entre 10 000 m³/h et 100 000 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.

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 ayant besoin d'une différence de pression de 100 Pa entre les deux prises, et induira une perte de pression résiduelle de 50 à 80 Pa selon le rapport des diamètres de l'orifice et de la conduite.

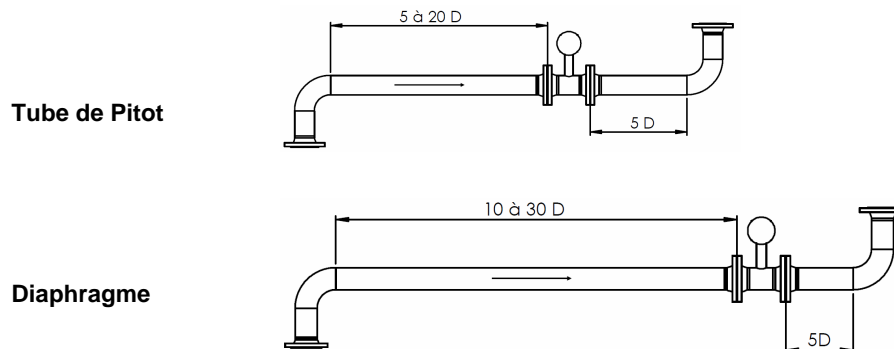
Les débitmètres à tube de Pitot moyenné entraînent une perte de pression qui est négligeable.

² Le terme de « rangeabilité » est également employé pour désigner la dynamique de mesure d'un équipement.

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 aval, exprimée en nombre de DN ou \emptyset), 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.



Les débitmètres massiques thermiques 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 mesure de débit

L'exactitude³ 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.

³ On trouve également les termes d'incertitude de mesure et de précision pour exprimer l'exactitude de la mesure fournie par un instrument.

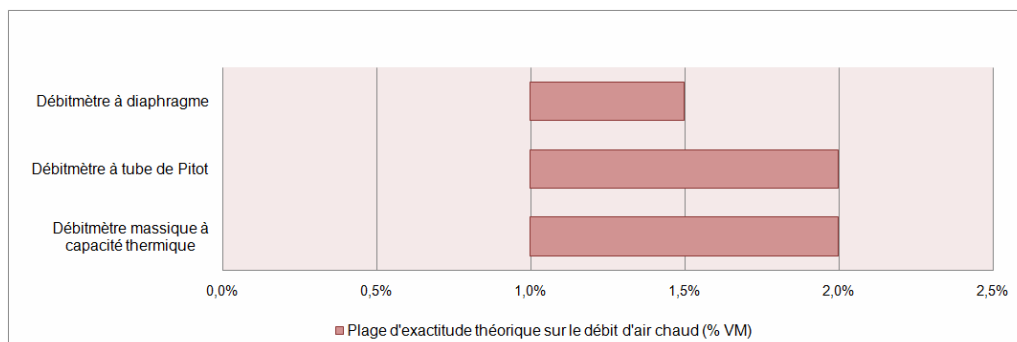


Figure 8 : Plages d'exactitude des débitmètres adaptés à la mesure de débit d'air chaud
(adapté de [9])

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

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 $\pm 3,5$ %
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 (°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)

- **Sondes hygrométriques :**

La ou les sonde(s) hygrométrique(s) installée(s) sur le circuit doivent 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 :

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

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** [4] pour la méthode de calcul des exactitudes composées.

Dans le cas de l'air chaud, ne pas oublier d'intégrer au calcul l'exactitude de la (des) mesure(s) de l'hygrométrie de l'air.

4. Répétabilité

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

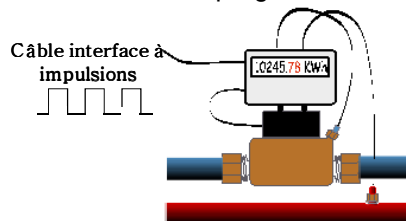
Un compteur d'énergie thermique communique les valeurs mesurées par un signal qui peut être :

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.

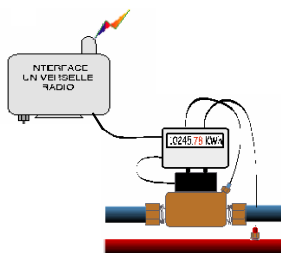


La télérelève d'un compteur impulsionnel peut être réalisée :

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

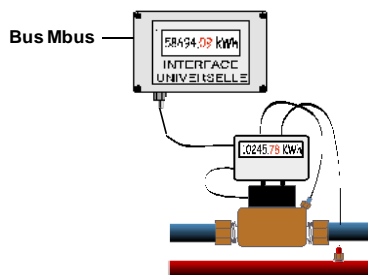
Ce dernier permet de compter le nombre d'impulsions émises par le compteur et de les envoyer vers un concentrateur radio compatible. La liaison compteur / interface radio peut également inclure une détection d'absence de connexion (détection de fraude). Les fréquences radio utilisées peuvent être différentes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



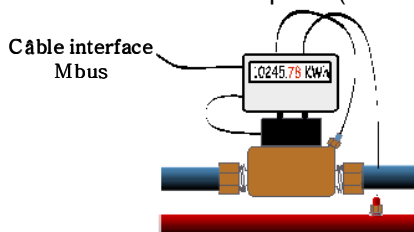
- **En équipant le compteur d'un transmetteur capable de dialoguer sur un bus M-Bus.**

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 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 aux coûts d'acquisition et maintenance

Classe d'équipement Technologies	Coût d'acquisition	Coût de maintenance	
Débitmètres à pression différentielle			1 : coût faible
Débitmètre à diaphragme	1	1 à 2	2 : coût moyen
Débitmètre à tube de Pitot	1	1 à 2	3 : coût élevé
Débitmètres massiques			
Débitmètre à capacité thermique	2	1	

Figure 9 : Indications de coût d'acquisition et de maintenance des différentes technologies de débitmètres (données tirées de [9], [10] et [15])

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	Tube de Pitot	Massique thermique
Contraintes du fluide	Mesurer un débit d'air chaud jusqu'à 200°C	X	X	X
	Mesurer un débit d'air chaud au-delà de 200°C	X	(I)	
	Mesurer un débit d'air chargé en particules	X	(I)	(I)
	Mesurer un débit dans large dynamique ($Q_{max}/Q_{min} > 10$)			X
	Conservier des pertes de charge faibles	X		X
Contraintes de conduite	Mesurer le débit sur une conduite de diamètre <75 mm	X	X	X
	Mesurer le débit sur une conduite de diamètre >75 mm	X	X	X
	Une longueur droite amont courte (< 10 ØN)		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
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 air chaud	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'air chaud, chargé ou non :

- Compteurs volumétriques ;
- Débitmètres à turbine ;
- Débitmètres électromagnétiques ;
- Débitmètres à effet vortex ;
- Débitmètres à ultrasons ;
- Débitmètres massiques à convection thermique ;
- Débitmètres massiques à effet Coriolis.

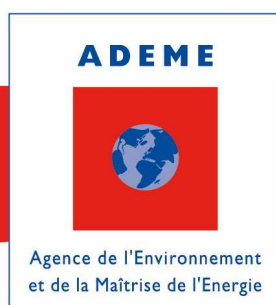
Références bibliographiques

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, 2010. Etat de l'art de la technologie générateur d'air chaud à partir de biomasse. 60 pp.
3. 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.
4. BIPM, 2008. Evaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. JCGM 100:2008 (F). Première édition septembre 2008.
5. BS 7405 August 1991. Guide to selection and application of flowmeters for the measurement of fluid flow in closed conduits.
6. 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>.
7. Gailledreau, C., Débitmètres massiques. Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle. R 2 300. 14 pp.
8. Gailledreau, C., Débitmètres à pression différentielle. Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle. R 2 220. 17 pp.
9. Guide d'achat. Mesures physiques. Les mesures de débit. Dans MESURES n°755 Mai 2003 p62 à 73.
10. 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.
11. NF EN 1434-1 Août 2007. Compteurs d'énergie thermique - Partie 1 : prescriptions générales.
12. NF EN 1434-3 Avril 2009. Compteurs d'énergie thermique - Partie 3 : échange de données et interfaces.
13. NF EN 1434-6 Août 2007. Compteurs d'énergie thermique - Partie 6 : installation, mise en service, surveillance de fonctionnement et maintenance.
14. Rosemount, 1997. Principes fondamentaux de mesure du débit. Nov. 1997. 10 pp.
15. Sigonze, 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