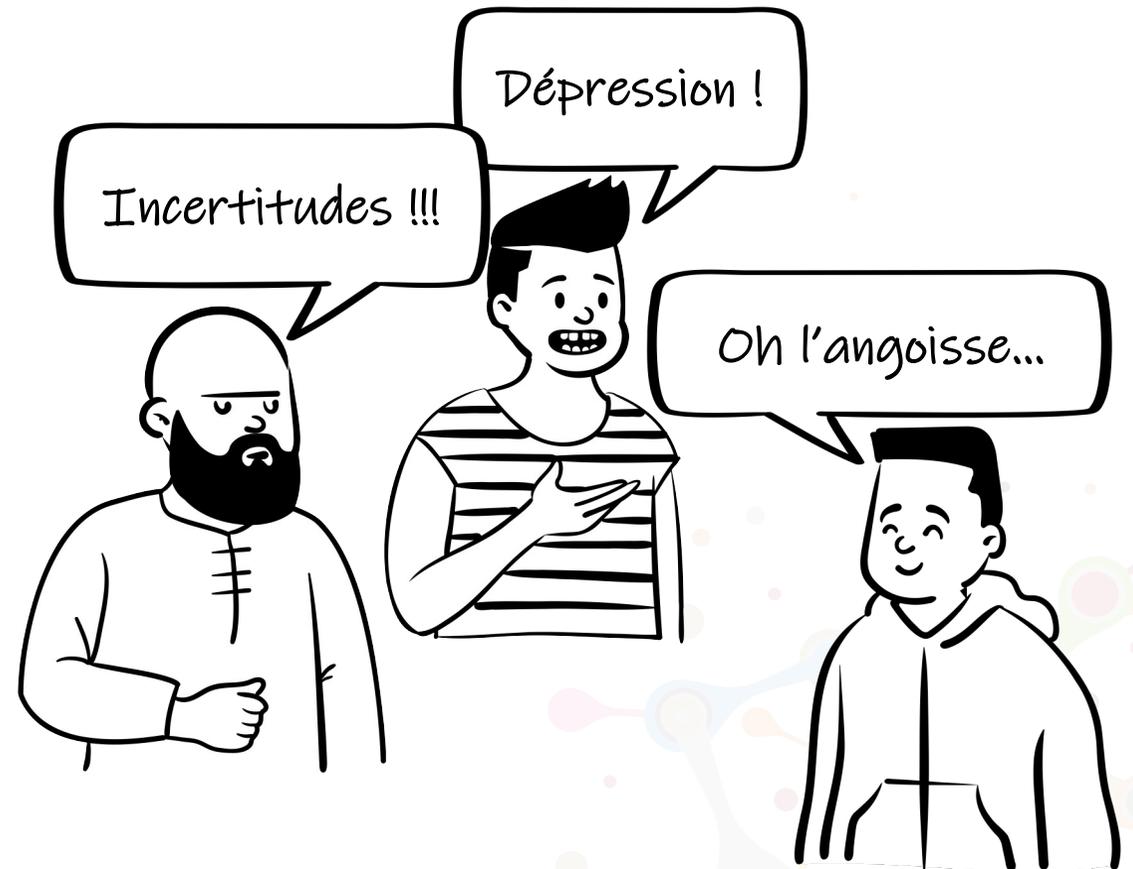


Journée d'échanges sur le programme de **physique** du cycle terminal de la voie générale

MÉCANIQUE DES FLUIDES ET MÉTROLOGIE

Frédéric TRON - 11 avril 2022

Le tube de Venturi



1. CONTEXTE



**Le programme de
terminale**



**Contexte de la séquence
pédagogique présentée**

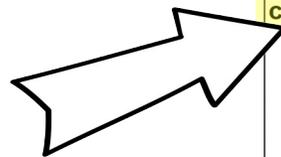
Mécanique des fluides



3. Modéliser l'écoulement d'un fluide

Poussée d'Archimède.	Expliquer qualitativement l'origine de la poussée d'Archimède. Utiliser l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède. <i>Mettre en œuvre un dispositif permettant de tester ou d'exploiter l'expression de la poussée d'Archimède.</i>
Écoulement d'un fluide en régime permanent.	Exploiter la conservation du débit volumique pour déterminer la vitesse d'un fluide incompressible.
Débit volumique d'un fluide incompressible. Relation de Bernoulli. Effet Venturi.	Exploiter la relation de Bernoulli, celle-ci étant fournie, pour étudier qualitativement puis quantitativement l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent. <i>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'écoulement permanent d'un fluide et pour tester la relation de Bernoulli.</i>

Incertitudes-types composées.



Métrologie

Écriture du résultat. Valeur de référence.

Capacités exigibles

Exploiter une série de mesures indépendantes d'une grandeur physique : histogramme, moyenne et écart-type. Discuter de l'influence de l'instrument de mesure et du protocole.

Évaluer qualitativement la dispersion d'une série de mesures indépendantes.

Capacité numérique : Représenter l'histogramme associé à une série de mesures à l'aide d'un tableur ou d'un langage de programmation.

Définir qualitativement une incertitude-type.

Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une approche statistique (évaluation de type A).

Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une autre approche que statistique (évaluation de type B).

Évaluer, à l'aide d'une formule fournie, l'incertitude-type d'une grandeur s'exprimant en fonction d'autres grandeurs dont les incertitudes-types associées sont connues.

Capacité numérique : Simuler, à l'aide d'un langage de programmation, un processus aléatoire illustrant la détermination de la valeur d'une grandeur avec incertitudes-types composées.

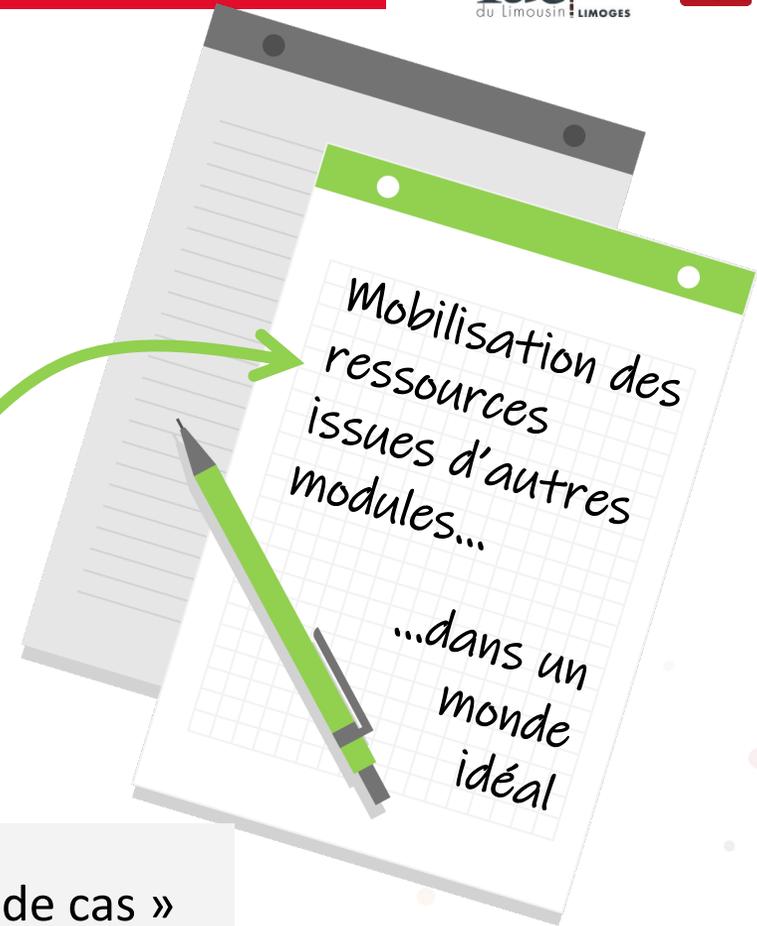
Écrire, avec un nombre adapté de chiffres significatifs, le résultat d'une mesure.

Comparer, le cas échéant, le résultat d'une mesure m_{mes} à une valeur de référence m_{ref} en utilisant le quotient $\frac{|m_{mes}-m_{ref}|}{u(m)}$

où $u(m)$ est l'incertitude-type associée au résultat.

Cette séquence intervient en BUT2
dans le module (tronc commun) de :

- ⇒ ~~Mécanique des fluides~~
- ⇒ ~~Métrologie~~
- ⇒ **Chaînes de mesure**



Modalités pédagogiques : travaux dirigés



- Exercice du type « étude de cas »
- Sur table (pas de PC)
- Groupe de 25 étudiants
- Séance de 2h (x1,5)

1 Mesure du débit avec un tube de Venturi

On souhaite réaliser un débitmètre DEB afin de mesurer les valeurs du débit volume de l'air q_v entre 50 et 350 m³/h. Étudiez les caractéristiques de la chaîne de mesure constituée des éléments suivants :

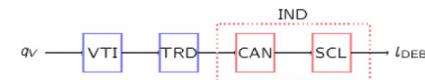


Figure 1 – Débitmètre

- VTI : tube de Venturi ELECTRONA DN 160 (0,5% pleine échelle)
- TRD : transmetteur de pression différentielle SIEMENS QBM65.2-1 (0-10 V)
- IND : indicateur de process Omega DP25B-E

2. OBJECTIFS

Savoir-faire



Étudier une chaîne de mesure complète :

- Décoder les spécifications du matériel
- Établir les principales caractéristiques de la chaîne
- S'assurer de la concordance avec le cahier des charges

Savoirs



S'assurer de la compréhension des éléments

→ gagner en assurance, solidifier les connaissances :

- Mécanique des fluides : conservation du débit et de la charge
- Métrologie : évaluation des incertitudes et propagation

3. CHAÎNE DE MESURE



Définition générale



Caractéristiques



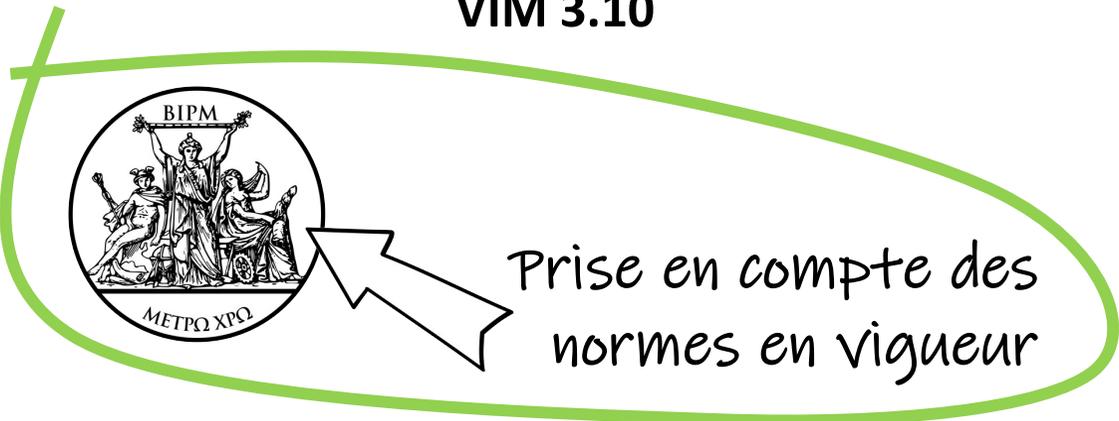
Cas étudié



« Grandeur que l'on veut mesurer »
VIM* 2.3

« Suite d'éléments d'un système de mesure qui constitue un seul chemin du signal depuis le capteur jusqu'à l'élément de sortie »
VIM 3.10

« valeur fournie par un instrument de mesure ou un système de mesure »
VIM 4.1



(*) JCGM 200:2012 Vocabulaire International de Métrologie



En réalité, l'indication de la chaîne subit des limitations :

Étendue de mesure*

Valeurs pour lesquelles la chaîne donne des indications (maîtrisées)

Résolution*

Plus petite variation perceptible (\neq incertitudes)

Nb pts de mesure

Nombre de valeurs $\neq 0$ affichées exactement

Incertitude*

Estimation de la dispersion des mesures

(*) Définitions « allégées » dans le cadre de cette présentation ; ces termes sont définis exactement dans le VIM

1 Mesure du débit avec un tube de Venturi

On souhaite réaliser un débitmètre DEB afin de mesurer les valeurs du débit volume de l'air q_v entre 50 et 350 m³/h. Étudiez les caractéristiques de la chaîne de mesure constituée des éléments suivants :

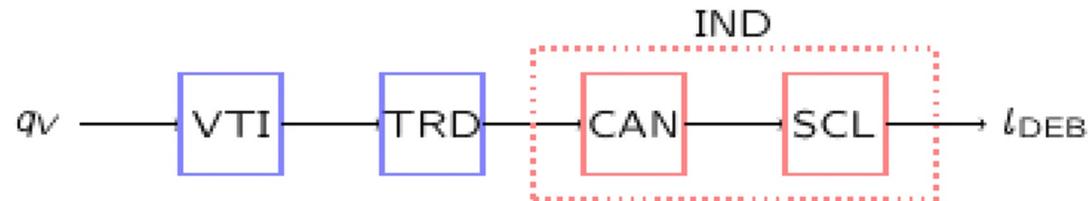


Figure 1 – Débitmètre

- VTI : tube de Venturi ELECTRONA DN 160 (0,5 % pleine échelle)
- TRD : transmetteur de pression différentielle SIEMENS QBM65.2-1 (0-10 V)
- IND : indicateur de process Omega DP25B-E

Le texte est accompagné des spécifications de chaque élément...
... que les étudiants vont apprendre à décoder.

Élément par élément, les étudiants vont :



Définir les grandeurs d'entrée et de sortie



Établir la relation entre ces grandeurs



Établir les valeurs limites

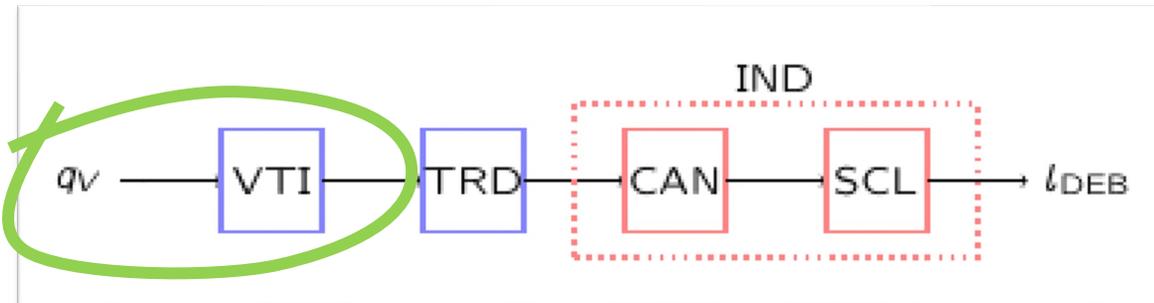


Faire le bilan des erreurs liées à cet élément

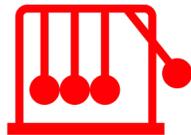


En déduire les principales caractéristiques

4. ÉTUDE DU VENTURI



Conservation du débit



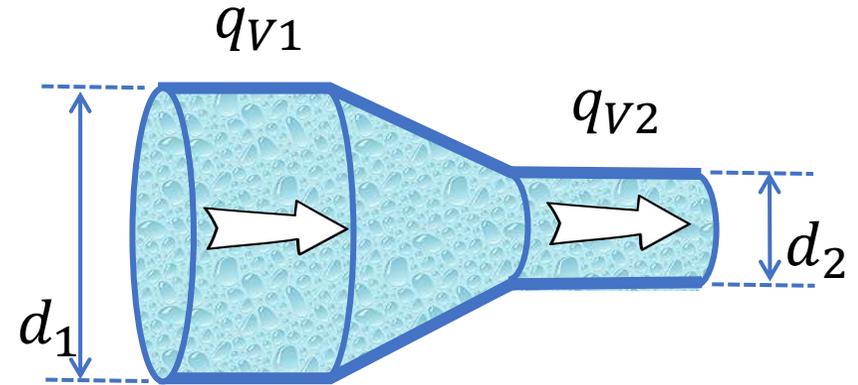
Conservation de la charge



Application à la mesure
du débit

Fluide incompressible : le volume de fluide qui entre dans une conduite fermée par unité de temps en ressort forcément :

$$q_{V1} = q_{V2}$$



Écoulement « simple » on peut exprimer le débit volume en fonction de la vitesse moyenne du fluide :

$$q_V = S \cdot v$$

$$q_V = q_{V1} = S_1 \cdot v_1 = \pi \frac{d_1^2}{4} \cdot v_1$$

$$v_1 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{q_V}{d_1^2}$$

$$q_V = q_{V2} = S_2 \cdot v_2 = \pi \frac{d_2^2}{4} \cdot v_2$$

$$v_2 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{q_V}{d_2^2}$$

La pression totale d'un fluide est liée à son énergie par unité de volume. Elle résulte du cumul de 3 termes :

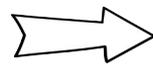
$$p_t = p + \rho g z + \frac{1}{2} \rho v^2$$

pression statique pression potentielle pression cinétique

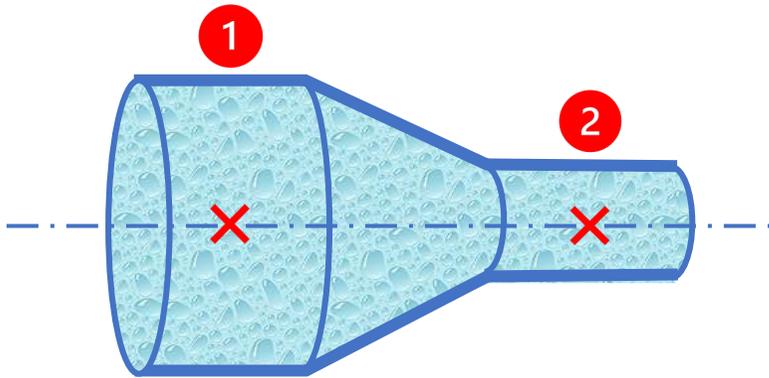
Théorème de Bernoulli : pour un fluide parfait (non visqueux) et incompressible, la pression totale est constante.

$$p + \rho g z + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{cste}$$

La charge ou « quantité de Bernoulli » correspond à : p/ρ



$$\frac{p}{\rho} + g z + \frac{1}{2} v^2 = \text{cste}$$



$$p_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Conduite horizontale : $z_1 = z_2$

$$\Rightarrow p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

Conservation du débit :

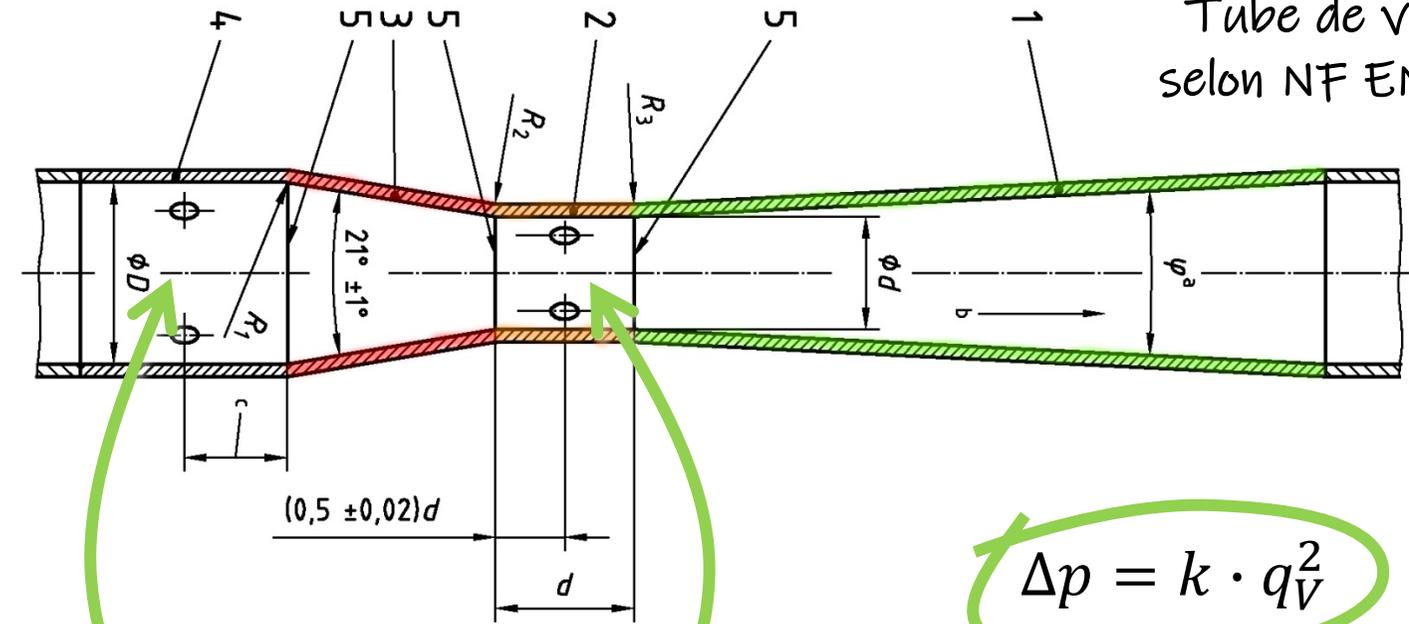
$$v_2 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{q_V}{d_2^2} \quad v_1 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{q_V}{d_1^2}$$

$$\Delta p = \frac{8}{\pi^2} \rho \left(\frac{1}{d_2^4} - \frac{1}{d_1^4} \right) q_V^2$$

$$k \geq 0 \quad \text{avec} \quad d_1 \geq d_2$$

$$\Delta p = k \cdot q_V^2$$

Tube de venturi « normalisé »
selon NF EN ISO 5167-4:2003

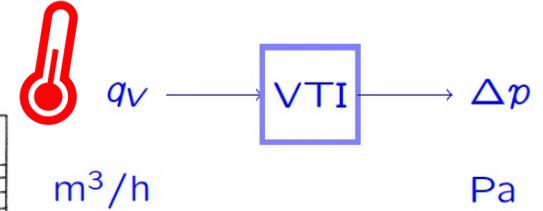
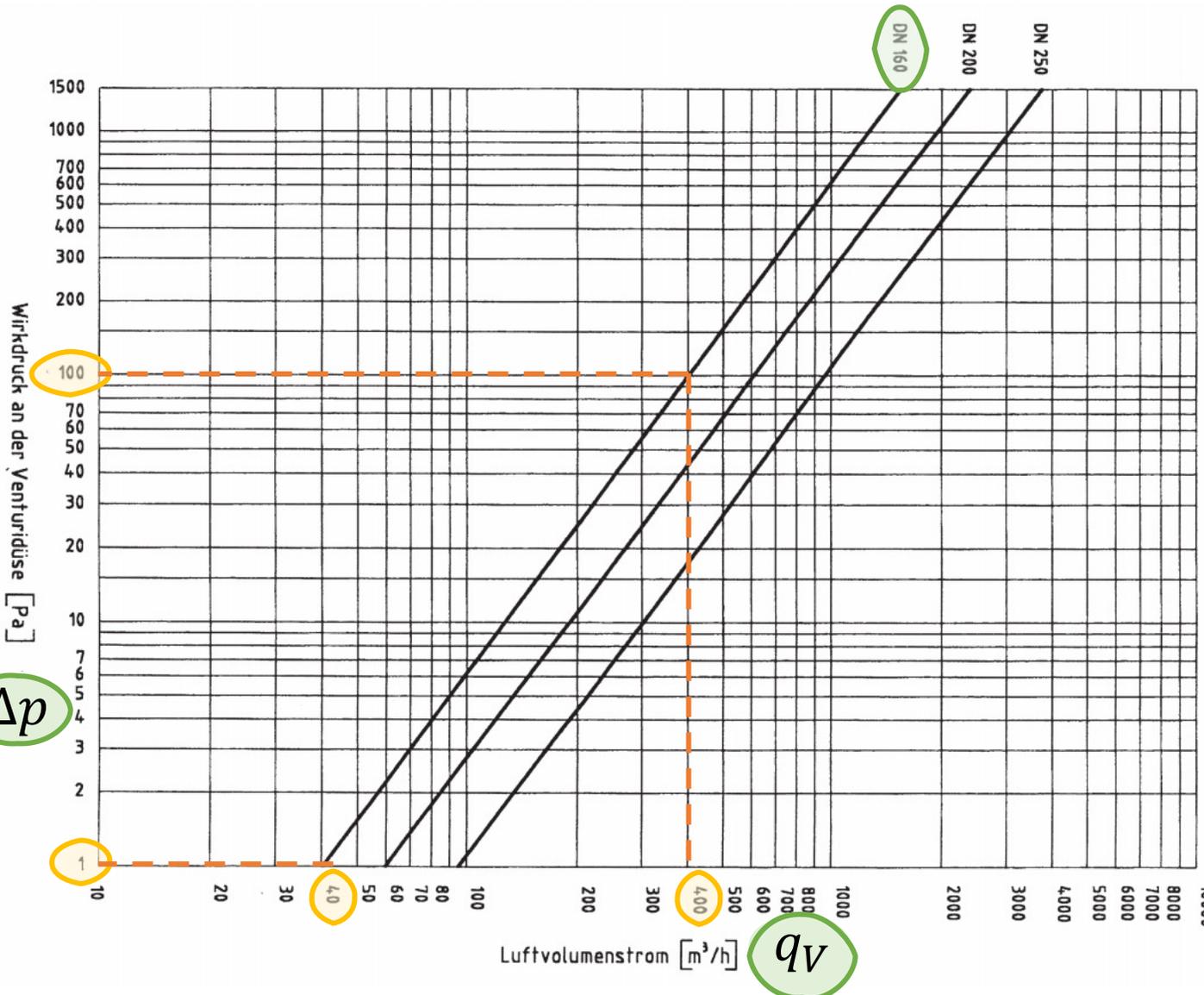


$$\Delta p = k \cdot q_V^2 \quad k \geq 0$$

La différence de pression entre
l'amont et l'aval est proportionnelle
au carré du débit volume

En mesurant Δp on peut calculer q_V

Venturi utilisé : ELECTRONA DN160



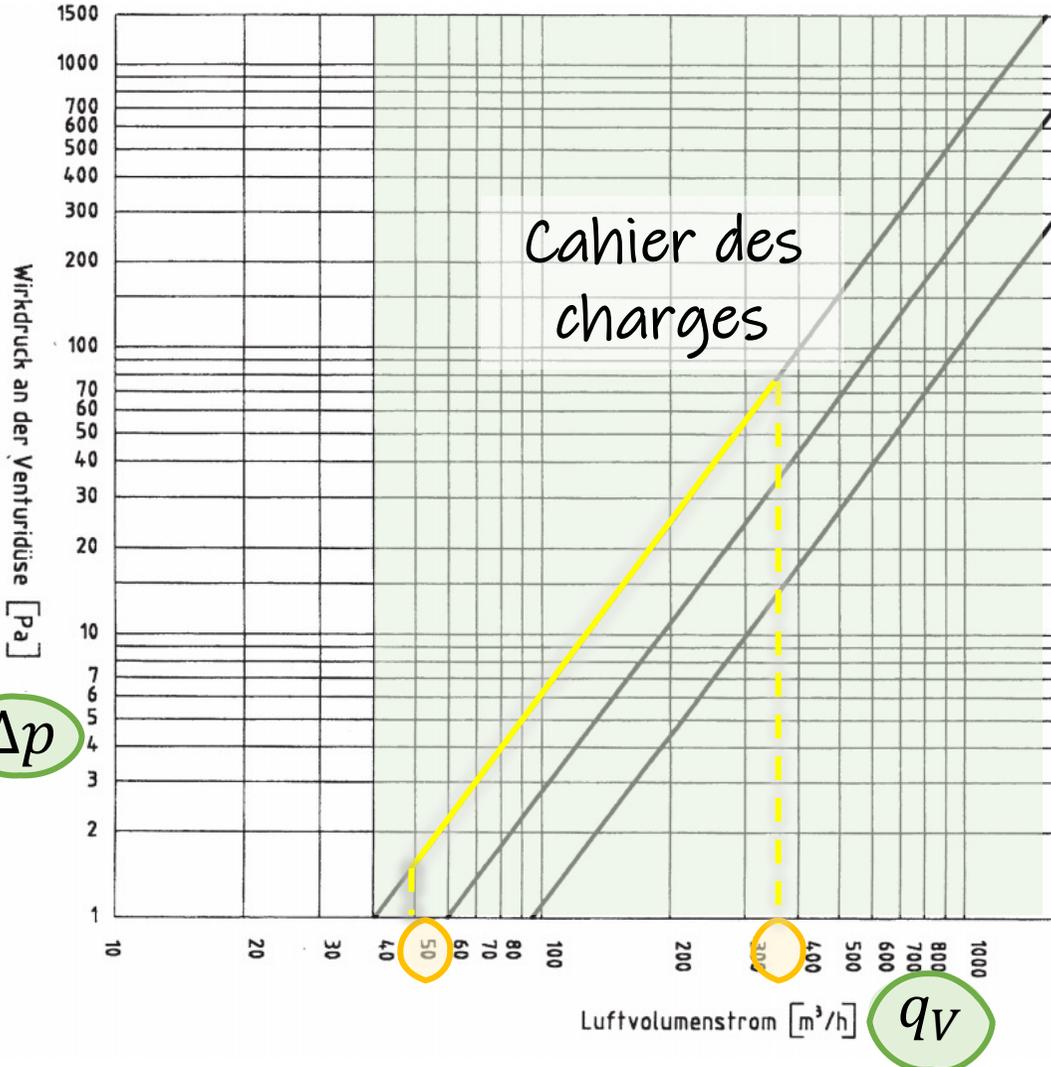

$$\Delta p = k \cdot q_v^2$$

- Vu avec l'étude théorique
- Confirmé par l'abaque

Lecture sur l'abaque

$$k = \frac{1 \text{ Pa}}{(40 \text{ m}^3/\text{h})^2}$$

Spécifications Venturi



q_v m ³ /h	Δp Pa
40	1
50	1,563
350	76,56
1 549	1 500

Cahier des charges
✓ respecté



Pour cette chaîne
 $\Delta p \in [1,6 ; 76,56] \text{ Pa}$

5. MÉTROLOGIE

ε

Bilan des erreurs



Erreur d'étalonnage et EMT



Incertitude

Le Venturi ne fait pas intervenir de CNA*, ni d'afficheur.
Toute variation du débit, aussi petite soit-elle, est traduite en variation de la pression.

⇒ ~~Erreur de résolution~~

En revanche il présente une erreur, par comparaison à un étalon, qui résulte de :

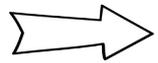
- Tolérances d'usinage
- État de surface
- Défauts de « linéarité »
- ...

Erreur majeure : s'il n'en reste qu'une, c'est celle-ci !

⇒ Erreur d'étalonnage

(*) Convertisseur Analogique Numérique

Faute de certificat d'étalonnage (coûteux)
la valeur de l'erreur n'est pas connue.

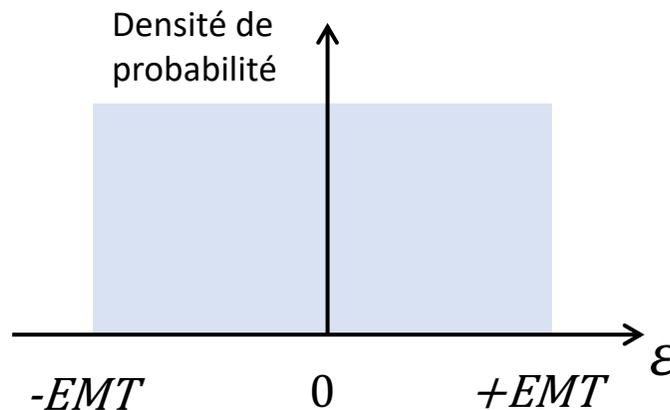


L'erreur d'étalonnage est encadrée par l'EMT2

- VTI : tube de Venturi ELECTRONA DN 160 (0,5 % pleine échelle)
- TRD : transmetteur de pression différentielle SIEMENS QIM05.2-1 (0-10 V)
- IND : indicateur de process Omega DP25B-E

Valeur maximale

$$EMT_{VTI} = 0,5\% \times 1\,549 \text{ m}^3/\text{h} = \underline{7,746 \text{ m}^3/\text{h}}$$



$$\bar{\epsilon} = 0$$

$$\sigma(\epsilon) = \frac{EMT}{\sqrt{3}}$$

$$\bar{\varepsilon} = 0 \quad \Rightarrow \quad C = 0 \text{ m}^3/\text{h}$$

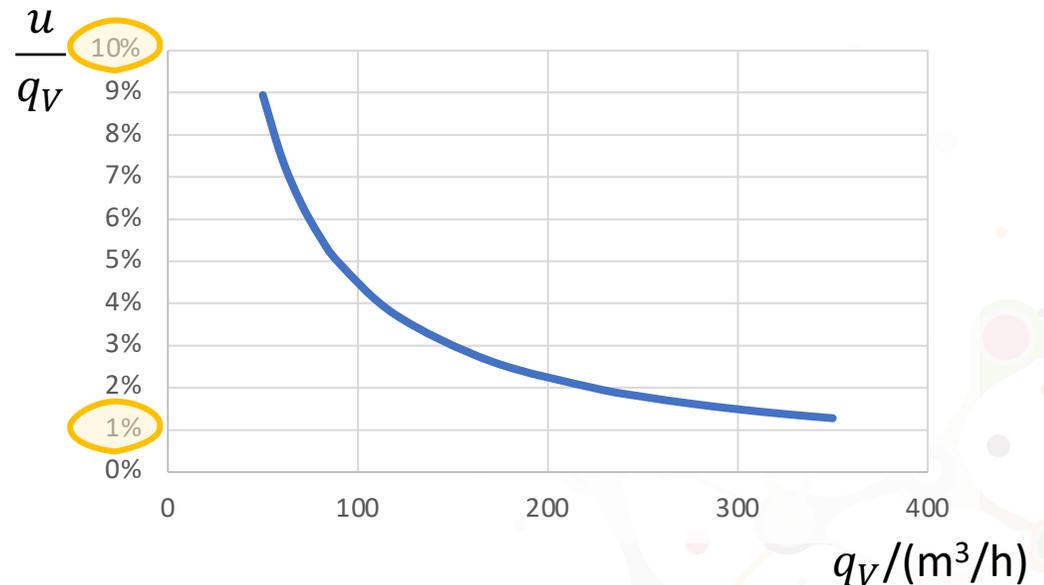
Correction

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{EMT}{\sqrt{3}} \quad \Rightarrow \quad u = \frac{EMT}{\sqrt{3}} = 4,472 \text{ m}^3/\text{h}$$

Incertitude

4 chiffres significatifs*

La méconnaissance des valeurs de l'erreur d'étalonnage se traduit par une incertitude constante \rightarrow l'incertitude relative peut-être très importante.

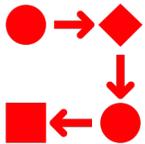


(*) On souhaite obtenir 2 chiffres significatifs à la fin du calcul, on en prend donc 4 pour les calculs intermédiaires

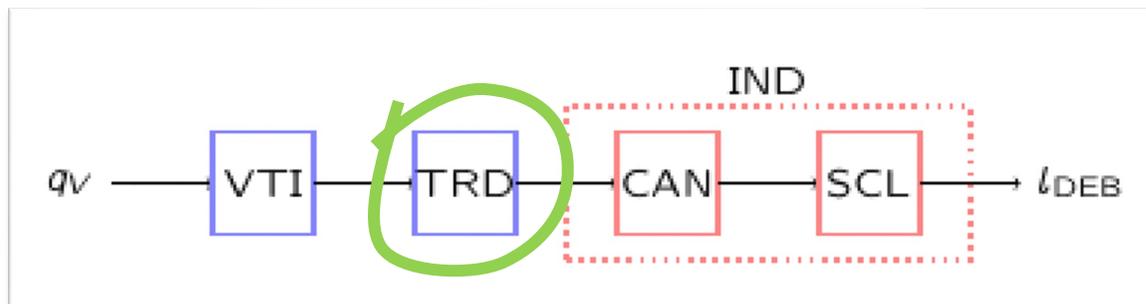
6. CHAÎNE COMPLÈTE



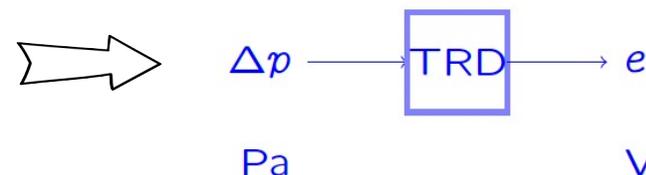
Le transmetteur de pression



Et ainsi de suite...



Son rôle est de traduire la différence de pression issue du Venturi en une tension



Caractéristique obtenue par extraction de la racine carrée, sans affichage	Référence	Plage de mesure de pression		Plage de surcharge
		Standard	Valeur en fin d'échelle réglable	
	QBM65.2-1	0...100 Pa	40...100 Pa	5000 Pa
	QBM65.2-3	0...300 Pa	120...300 Pa	5000 Pa
	QBM65.2-5	0...500 Pa	200...500 Pa	10000 Pa
	QBM65.2-10	0...1000 Pa	400...1000 Pa	10000 Pa
	QBM65.2-25	0...2500 Pa	1000...2500 Pa	20000 Pa

(*) Capteur muni d'une électronique permettant la transmission du signal sur des distances importantes

A priori, l'erreur majeure qui intervient ici est l'erreur d'étalonnage, encadrée par l'EMT :

pour **QBM65.2-1**

- erreur absolue
(2...100 % de la plage de pression)

$$\leq \pm 0,6 \sqrt{\frac{pFS}{p}} + 1,5 [\% VF]$$

Soit 100 Pa

Soit de 2 à 100 Pa

→ Cahier des charges pas entièrement respecté

Contrairement au Venturi, l'EMT du transmetteur dépend de Δp donc de q_v



Exemple de calcul

q_v m ³ /h	Δp Pa
350	76,56

$$EMT_{TRD} = \left(0,6\% \sqrt{\frac{100 \text{ Pa}}{76,56 \text{ Pa}}} + 1,5\% \right) 100 \text{ Pa}$$

$$= 2,186 \text{ Pa}$$

$$u = \frac{EMT}{\sqrt{3}} = 1,262 \text{ Pa}$$

ESSY, célèbre dans l'univers des grandeurs, dimensions et unités

La chaîne est conçue pour mesurer le débit en m^3/h

- On souhaite obtenir les incertitudes dans cette unité
- L'incertitude est ici exprimée en Pa : $u(\Delta p)$



C'est un problème de propagation des incertitudes

Grâce au théorème de Bernoulli, on a établi : $\Delta p = k \cdot q_V^2$

Mesurande **1** $q_V = f(\Delta p) = \sqrt{\frac{\Delta p}{k}}$ **3** Modèle de mesure

Grandeur(s) d'entrée **2**

4 Dérivée (partielle) $\frac{\partial f}{\partial \Delta p} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{k\Delta p}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{q_V}{\Delta p}$

5

Contribution

La contribution est une incertitude causée par une grandeur sur une autre grandeur :

$$u_{\Delta p}(q_V) = \left| \frac{\partial f}{\partial \Delta p} \right| u(\Delta p) = \frac{1}{2} \cdot \frac{u(\Delta p)}{\Delta p} q_V$$

Homogénéité ok

$$u(\Delta p) = 1,262 \text{ Pa}$$

$$u_{\Delta p}(q_V) = \frac{1}{2} \frac{1,262 \text{ Pa}}{76,56 \text{ Pa}} 350 \text{ m}^3/\text{h} = 2,884 \text{ m}^3/\text{h}$$

L'étude systématique de chaque élément de la chaîne de mesure va permettre d'étudier les principales caractéristiques.

Étendue de mesure

Chaque élément peut être limitant :
l'étendue de mesure est plus petite
intersection de tous les domaines

Résolution
Nb pts de mesure

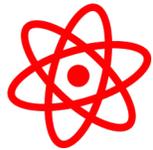
Dépendent essentiellement
du CAN et de l'indicateur

Incertitude

Les erreurs de chaque éléments étant
indépendantes, on fait la somme quadratique
de toutes les incertitudes

$$u = \sqrt{u_{VTI}^2 + u_{TRD}^2 + u_{IND}^2}$$

7. BILAN



Physique

- Un peu...

Mathématiques

- Un peu de calcul littéral
- Un peu de calcul numérique



Métrologie



- Pas mal...



Autre



- Décodage des spécifications
- Décodage des notations
- Confrontation avec le réel :
→ le cahier des charges

Merci !
À vos
questions !

 frederic.tron@unilim.fr