



# ***Techniques d'évaluation de débit en réseau***

Sandra Isel, Docteur-Ingénieure, 3D EAU

Matthieu Dufresne, Maître de Conférence, ENGEES / 3D EAU

# DEBITMETRIE

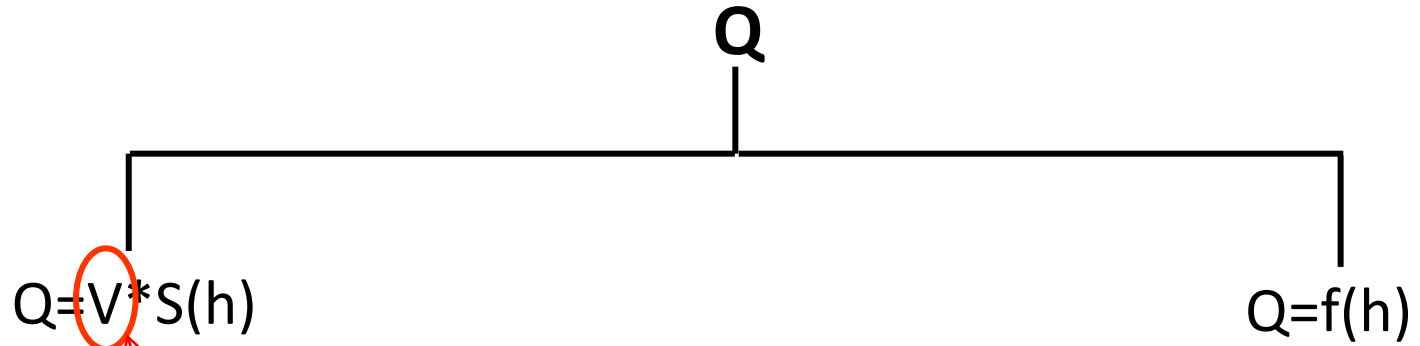
---

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion



**Attention: c'est la vitesse moyenne sur la section mouillée !!**

# TECHNOLOGIES EXISTANTES

(POUR LA MESURE DE  $V_{MOY}$ )

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

	V - Courantométrie
En charge	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Electromagnétique</li></ul>
A surface libre	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Temps de transit</li><li>✓ Doppler continu</li><li>✓ A corrélation d'échos</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Radar de surface</li></ul>

Légende: — Intrusif      — Sans contact avec le flux

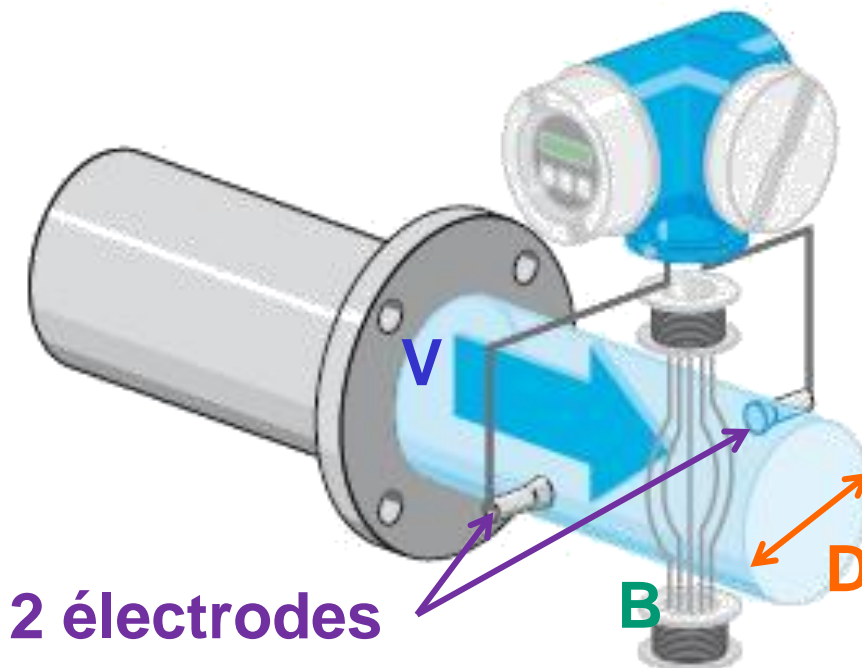
# COURANTOMETRIE (ELECTROMAGNÉTIQUE) 1/2

Introduction

## ➤ Electromagnétique



Typiquement placé après une pompe, dans un siphon



La mesure & limites

Mise en place et analyse

### Principe physique: Principe de Faraday

Un liquide conducteur animé d'une vitesse  $V$  s'écoulant perpendiculairement à un champ magnétique  $B$  induit une tension électrique. Cette tension, mesurée par 2 électrodes, est uniquement dépendante de  $D$ ,  $B$  et  $V$ .

Conclusion

# COURANTOMETRIE (ELECTROMAGNÉTIQUE) 2/2

Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

## ➤ Avantages / Inconvénients



- + Non-intrusif → aucune perte de charge
- + Large gamme de diamètre possible
- + Insensible à la corrosivité, viscosité, densité du fluide
- + Maintenance réduite sur site (nettoyage nul, et étalonnage rare)
- Utilisable uniquement pour les liquides conducteurs
- Mise en place nécessite du génie civil
- Mesure en charge uniquement



Débitmètre électromagnétique  
Proline Promag H200  
(ENDRESS-HAUSER)

# TECHNOLOGIES EXISTANTES

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

	V - Courantométrie
En charge	✓ Electromagnétique
A surface libre	✓ Temps de transit
	✓ Doppler continu
	✓ A corrélation d'échos
	✓ Radar de surface

Légende: — Intrusif — Sans contact avec le flux

# COURANTOMETRIE (CORDES DE VITESSE) 1/2

Introduction

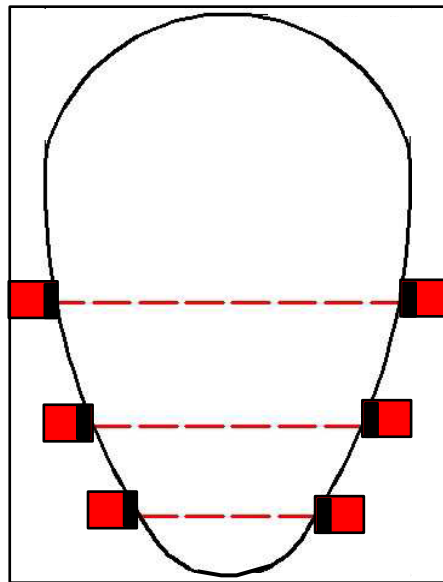
La mesure & limites

Mise en place et analyse

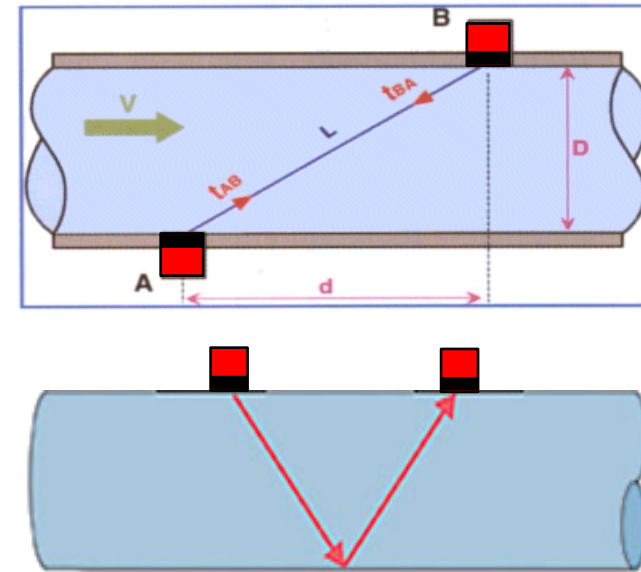
Conclusion

## ➤ Temps de transit

*Vue de face:*  
ex de mise en place dans une cana à surface libre



*Vue de profil: ex d'installation dans une cana en charge*



**Principe physique:** Corrélation entre:

- Le temps mis par l'onde ultrasonore pour traverser la canalisation (2 émetteurs-récepteurs de part en part de la section)
- et la vitesse d'écoulement du fluide

# COURANTOMETRIE (CORDES DE VITESSE) 2/2

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

## ➤ Avantages / Inconvénients



- + Mesure possible pendant une mise en charge
- + Bonne précision et plage de mesure
- + Mesure indépendante de la présence de particules
- + Peu intrusive → pas de perte de charge, maintenance réduite
- Sensibilité aux gradients de  $T^\circ$  sur la corde de mesure et à la présence de bulles
- Installation nécessite généralement du génie civil
- Vitesse moyenne sur chaque corde
- Attention au soin apporté à l'installation des capteurs (le récepteur doit se situer dans le cône d'émission de l'émetteur)



*Ex de capteur à temps de transit  
Greyline TTFM 1.0*



# TECHNOLOGIES EXISTANTES

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

	V - Courantométrie
En charge	✓ Electromagnétique
A surface libre	✓ Temps de transit
	✓ Doppler continu ✓ A corrélation d'échos
	✓ Radar de surface

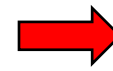
Légende: — Intrusif — Sans contact avec le flux

# COURANTOMETRIE (DOPPLER)

1/4

Introduction

## ➤ Effet Doppler continu



$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2 \cdot V_p \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha)}{c}$$

La mesure & limites

Principe physique: Corrélation entre:

-Variation de fréquence

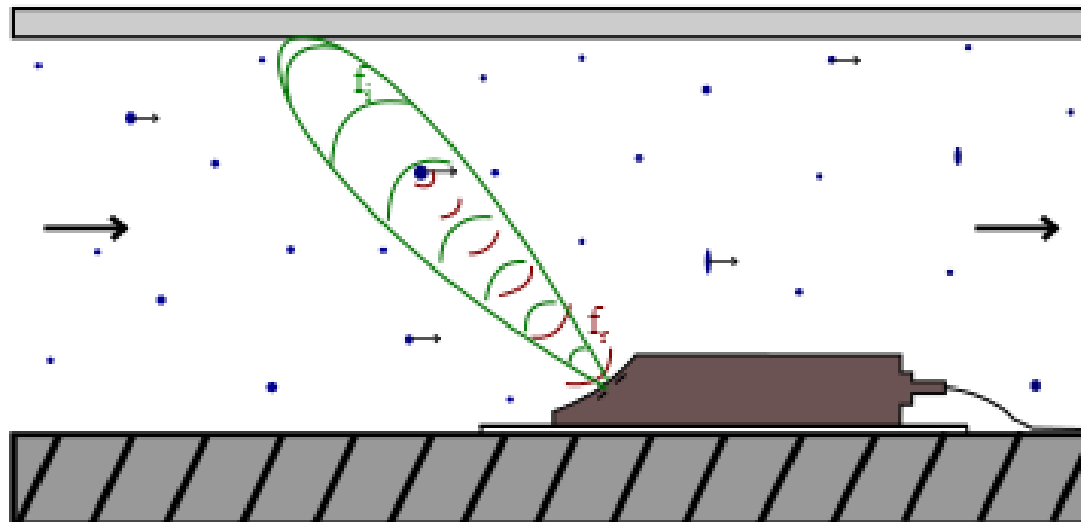
( $f_i$  onde émise,  $f_r$  onde réfléchi sur les particules ou les bulles d'air)

- et la vitesse d'écoulement du fluide



Hyp:  $V_{\text{particules}} = V_{\text{écoulement}}$

Mise en place et analyse



Légende

- particules de différentes tailles
- 🟩 cône de mesure
- ➡ sens de l'écoulement
- sens de déplacement des particules
- 🟩 ondes émises par le capteur Doppler à la fréquence  $f_i$
- 🟥 ondes réfléchies par la particule à la fréquence  $f_r$

Conclusion

## ➤ Avantages / Inconvénients de la mesure de vitesse par Doppler continu



- + Mesure possible pendant une mise en charge
- + Mise en place « facile »
- + Pas de limitations en vitesse maximale.
- + Peu de problèmes d'écho de surface ou de paroi
- + Peu sensible aux composantes verticales de vitesse et au positionnement
- Intrusif → sensible au dépôt (donc aux faibles V) → entretien régulier
- Où mesure t'on la vitesse?
- Lien entre  $V_{\text{mesurée}}$  et  $V_{\text{moyenne}}$  sur l'ensemble de la section?
- Non connaissance du profil de vitesse et des fluctuations
- Peu précis aux faibles vitesses.
  - Attention : risque de dérive difficile à identifier
  - Attention à la charge de l'écoulement (si trop: encrassement | si pas assez : pb de réflexion sur les particules)

# COURANTOMETRIE (DOPPLER)

3/4

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

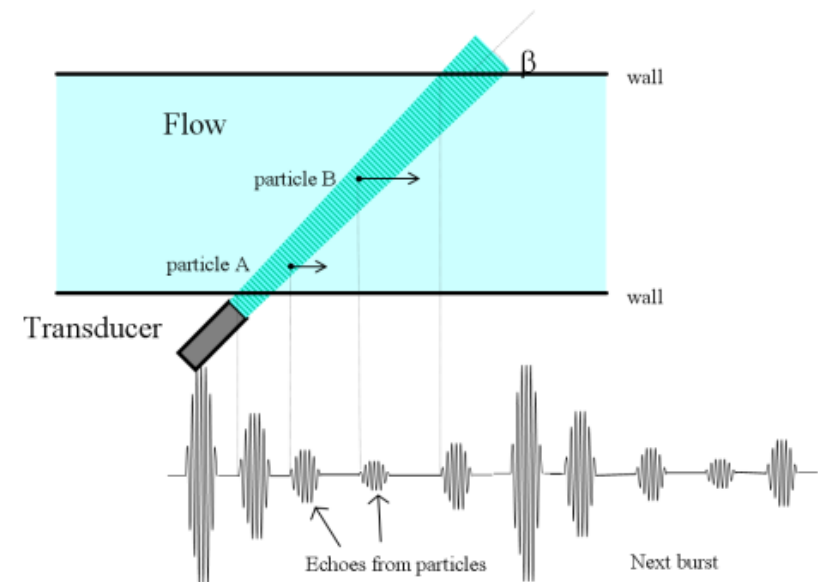
## ➤ Profilomètre

### Principe physique:

Perfectionnement du Doppler continu avec possibilité de déterminer l'emplacement des points de mesure.

### Deux méthodes d'utilisation:

- Manière cohérente (variation de phase de l'onde transmise entre 2 émissions)
- Manière non-cohérente (utilisation de la largeur du pulse pour déterminer le décalage temporel)



## ➤ Avantages / Inconvénients de la mesure de vitesse par Doppler pulsé



- + Mesure possible pendant une mise en charge
- + Mise en place « facile »
- + Précise aux faibles vitesses
- + Connaissance du profil de vitesse et des fluctuations
- Intrusif → sensible au dépôt (donc aux faibles V) → entretien régulier
- Lien entre  $V_{\text{mesurée}}$  et  $V_{\text{moyenne}}$  sur l'ensemble de la section?
- Limitation en vitesse max mesurable à hauteur donnée.
- Zones mortes en raison des échos de fond et surface
- Très sensibles aux composantes verticales de vitesse et à l'installation
- Attention : risque de dérive difficile à identifier
- Attention à la charge de l'écoulement (si trop: encrassement | si pas assez : pb de réflexion sur les particules)

# TECHNOLOGIES EXISTANTES

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

	V - Courantométrie
En charge	✓ Electromagnétique
A surface libre	✓ Temps de transit
	✓ Doppler continu
	✓ A corrélation d'échos
	✓ Radar de surface

Légende: — Intrusif — Sans contact avec le flux

# COURANTOMETRIE (RADAR)

1/2

Introduction

## ➤ Radar de surface

**Principe physique:** Corrélation entre:

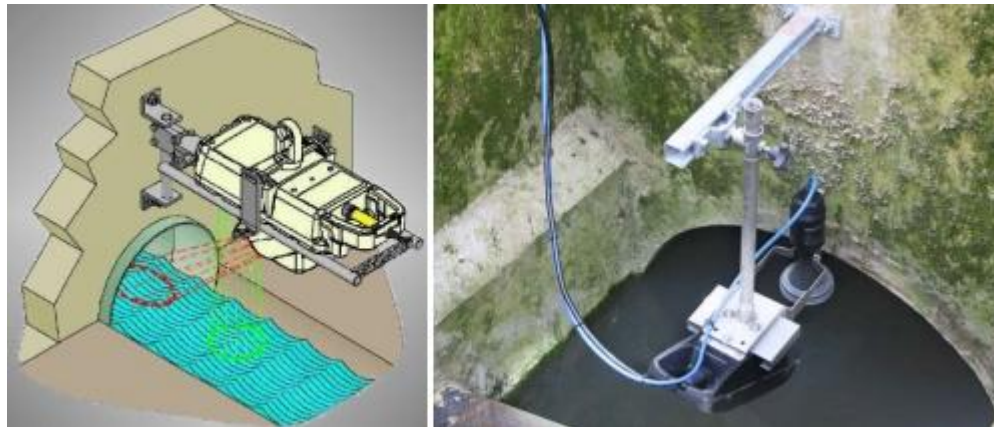
- **Vitesse de la surface libre**  
(vitesse des ondes de surface)
- **et la vitesse d'écoulement du fluide**



$$\text{Hyp: } V_{\text{écoulement}} = V_{\text{ondes\_surface}}$$

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse



*Illustration du FLO-DAR par Hach (gauche) et Raven-Eye par Flox-Tronic (à droite) (source COMETEC)*

Conclusion

- **Avantages / Inconvénients de la mesure de vitesse par radar de surface**



- + Non intrusif => entretien réduit
- + Valable en forte vitesse
- Mesure impossible en mise en charge
- Lien entre  $V_{\text{mesurée}}$  et  $V_{\text{moyenne}}$  sur l'ensemble de la section?
- Problème pour les vitesses faibles (et en particulier pour le régime fluvial pour lequel les ondes de surface n'évoluent pas à la même vitesse que l'écoulement)
- Attention : risque de dérive difficile à identifier



# COURANTOMETRIE

Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

## ➤ Comparaison des technologies de mesure de vitesse

	Principe de mesure	Caractéristiques							Incertitudes associées
		Précision	Installation	Entretien requis	Dérives	Sensibilité à l'environnement	Fonctionnement en charge	Coût d'investissement	
INTRUSIVE	Doppler	Difficile à évaluer	Installation et étalonnage à soigner	Important (≈ 1 fois / mois)	Difficiles à identifier	Importante (capteur intrusif)	Oui	Moyen	Difficiles à évaluer
	Profilomètre	Bonne							
HORS EAU	Radar	Bonne	Installation facile, étalonnage à soigner	Faible	Faible	Oui (si perturbation de la surface libre)	Non (zone morte sous le capteur)	Important	Difficiles à évaluer
	Temps de transit	Très bonne (si le nombre de cordes est adéquat)	Installation difficile (génie civil)	Minime	Faible	Sensibilité aux bulles d'air et aux vagues	Oui	Important (plusieurs dispositifs requis)	Satisfaisantes (importante pour les faibles h)

**Légende**

Avantage de la technologie

Inconvénient de la technologie



# DEBITMETRIE

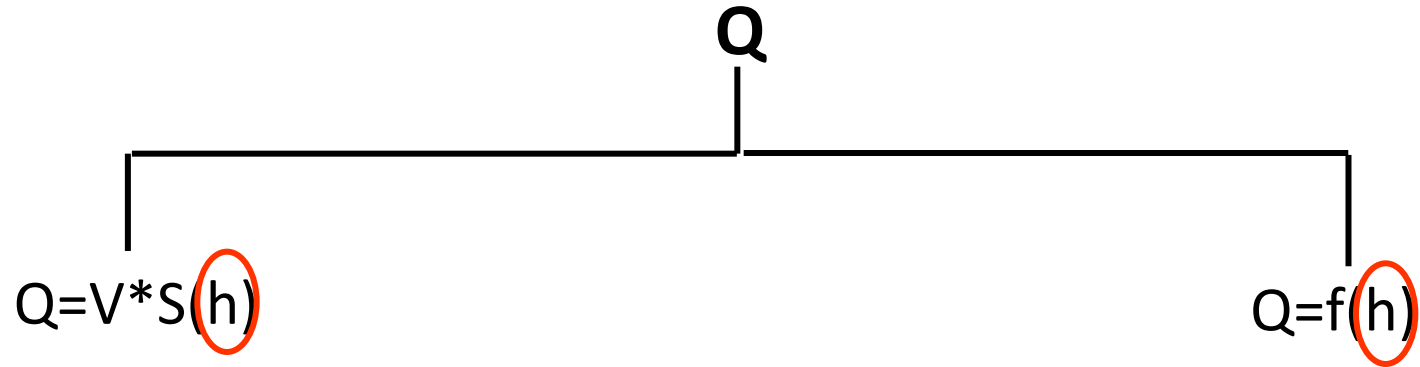
---

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion



# TECHNOLOGIES EXISTANTES

Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

	V - Courantométrie	h – Limnimétrie
En charge	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Electromagnétique</li> <li>✓ Temps de transit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pression                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bulle à bulle</li> <li>• Piézo</li> </ul> </li> </ul>
A surface libre	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Doppler continu</li> <li>✓ Doppler pulsé</li> <li>✓ A corrélation d'échos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pression                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bulle à bulle</li> <li>• Piézo</li> </ul> </li> <li>✓ Ultrasons</li> <li>✓ Radar</li> </ul>

**Légende:** — Intrusif      — Sans contact avec le flux

# NIVEAUMETRIE (PAR PRESSION)

1/4

Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

➤ **Pression** →  $P(Pa) = \frac{F(N)}{S(m^2)}$

- ✓ Technique indirecte
  - Bulle-à-bulle

## Principe physique

1.  $Q_{air}$  de 1 à 2 bulles/s envoyé par compresseur dans un tube immergé ( $\phi$  qq mm) pour compenser la pression de la colonne d'eau.
2. Mesure de cette pression par une autre technique

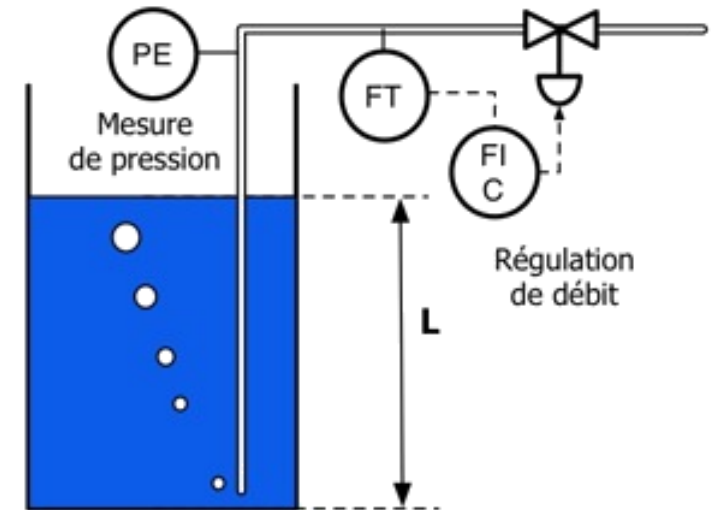


Schéma de fonctionnement d'un capteur bulle à bulle



**Temps de réaction important  
Pb pour fortes vitesses**

# NIVEAUMETRIE (PAR PRESSION)

2/4

Introduction

## ➤ Pression

✓ Technique directe

➔ Sonde piézométrique

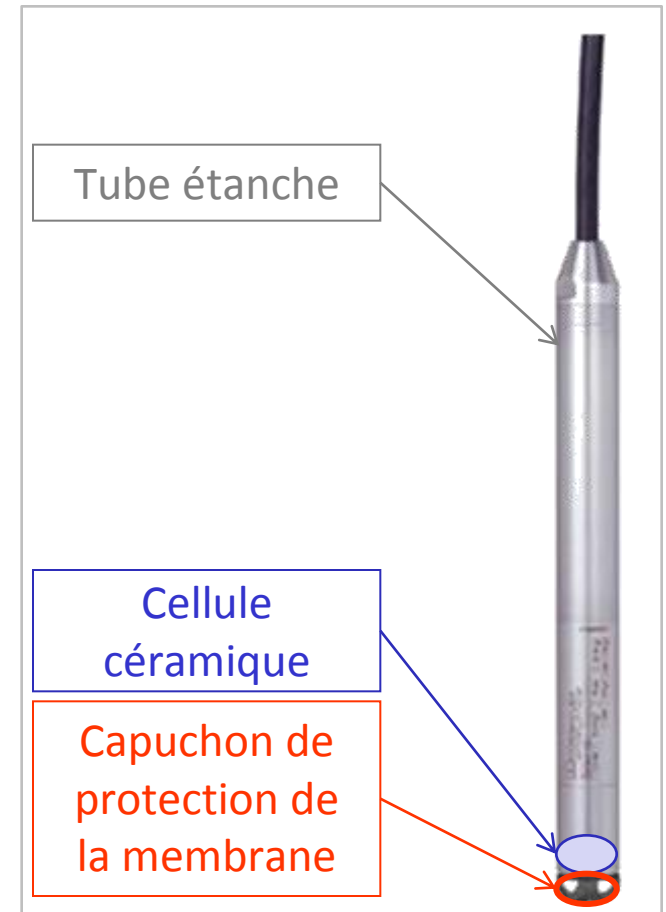
La mesure  
&  
limites

### Principe physique

Corrélation entre déformation de la membrane et la hauteur d'eau qui le surplombe.

=> Déformation mécanique = signal électrique par l'intermédiaire d'un transducteur de pression

Mise en  
place et  
analyse



Sonde de niveau Waterpilot  
FMX21(Endress-Hauser)

Conclusion

# NIVEAUMETRIE (PAR PRESSION)

3/4

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

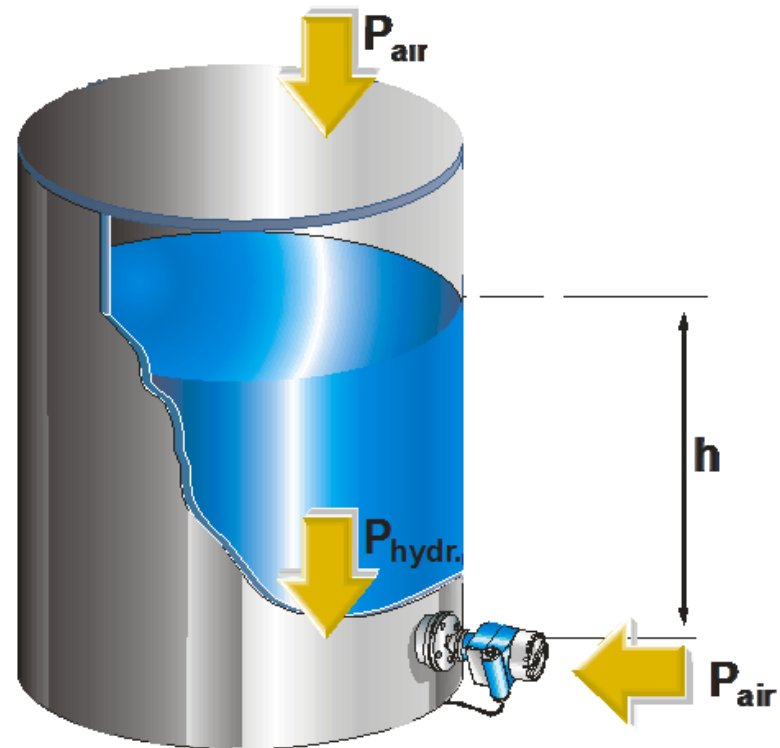
## ➤ Pression hydrostatique

= pression exercée par une hauteur de fluide

### Théorème de Pascal

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad \Rightarrow \quad h = \frac{P}{\rho \cdot g}$$

→ Hauteur du liquide [m]  
→ Constante gravitationnelle = 9,8 m/s<sup>2</sup>  
→ Densité du liquide [kg/m<sup>3</sup>]  
→ Pression hydrostatique [Pa]



# NIVEAUMETRIE (PAR PRESSION)

4/4

Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

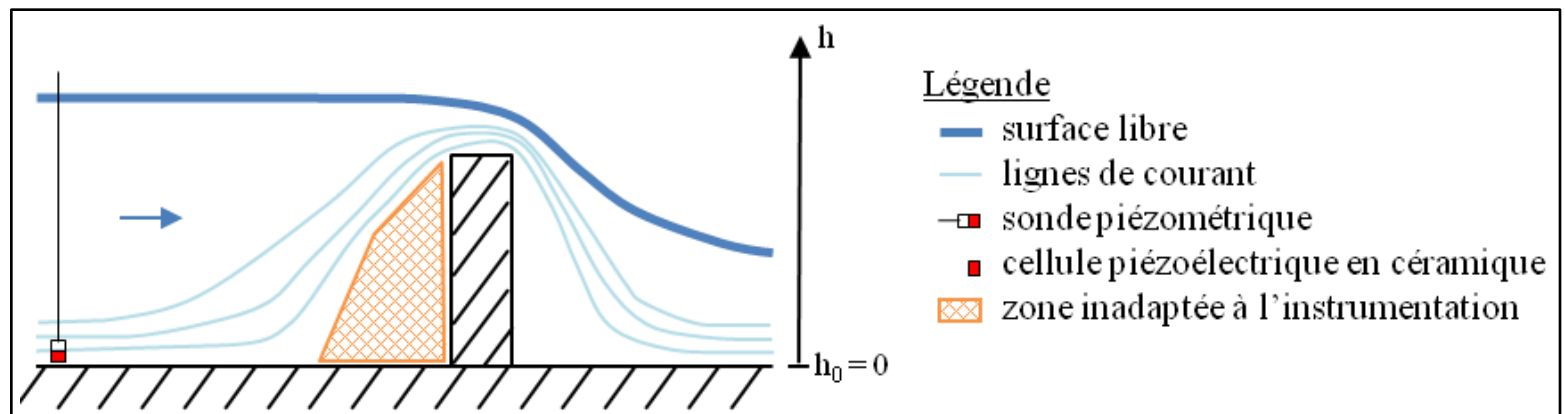
Conclusion

## ➤ Avantages / Inconvénients



+ Mesure possible pendant une mise en charge

- Intrusif → sensibilité au dépôt (donc aux vitesses faibles) → entretien régulier
- Information peu fiable si  $V$  importante ou courbure forte des lignes de courant
- Sensibilité à son environnement ( $T, \dots$ ) → risque de dérive
- Installation du capteur à soigner
- Incertitudes sur site: 0.5 – 1 cm



# TECHNOLOGIES EXISTANTES

Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

	V - Courantométrie	h – Limnimétrie
En charge	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Electromagnétique</li><li>✓ Temps de transit</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Pression<ul style="list-style-type: none"><li>• Bulle à bulle</li><li>• Piézo</li></ul></li></ul>
A surface libre	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Doppler continu</li><li>✓ Doppler pulsé</li><li>✓ A corrélation d'échos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Pression<ul style="list-style-type: none"><li>• Bulle à bulle</li><li>• Piézo</li></ul></li><li>✓ Ultrasons</li><li>✓ Radar</li></ul>

Légende: — Intrusif — Sans contact avec le flux



# NIVEAUMETRIE (PAR ULTRASON)

1/2

Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

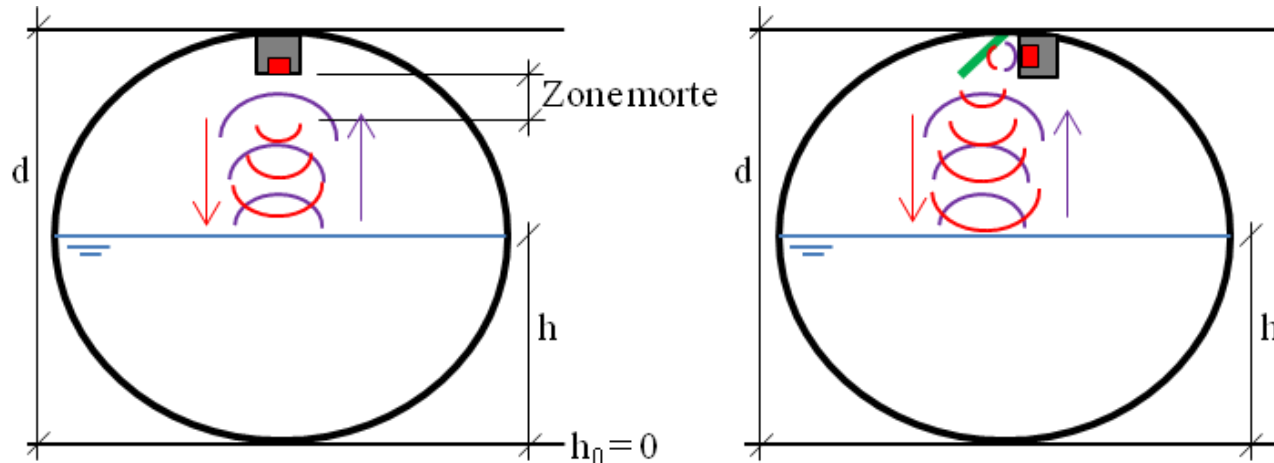
Conclusion

## ➤ Ondes ultrasonores

$$h = d - \frac{(c_{air} \cdot t)}{2}$$

Principe physique : Corrélation entre :

- la différence de temps  $t$  entre l'émission et réception d'ondes ultrasonores,
- et la distance entre récepteur et la cote de la surface libre.



Légende:

■ capteur ultrason

■ transducteur (émetteur / récepteur d'ultrasons)

☺ ondes ultrason émises

— surface libre

→ renvoi d'angle

☺ ondes réfléchies, et reçues par le capteur

# NIVEAUMETRIE (PAR ULTRASON)

2/2

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

## ➤ Avantages / Inconvénients



+ **Mesure non intrusive** → **maintenance réduite**

- **Mesure impossible en cas de mise en charge**

- **Mesure impossible en présence de mousses**

- **Sensibilité aux forts gradients de température, d'humidité de l'air** → **risque de dérive**

▪ **Attention à la stabilité de l'information sur l'ensemble de la zone de mesure**

▪ **Attention à éviter d'être trop proche des murs pour la mise en place du capteur**

▪ **Incertitudes sur site: 1 cm**



*Sonde de niveau ultrason i-Series /  
P-Series (NIVUS)*



*Sonde de niveau ultrason  
autonome LNU (IJINUS)*

# TECHNOLOGIES EXISTANTES

Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

	V - Courantométrie	h – Limnimétrie
En charge	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Electromagnétique</li> <li>✓ Temps de transit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pression                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bulle à bulle</li> <li>• Piézo</li> </ul> </li> </ul>
A surface libre	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Doppler continu</li> <li>✓ Doppler pulsé</li> <li>✓ A corrélation d'échos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pression                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bulle à bulle</li> <li>• Piézo</li> </ul> </li> <li>✓ Ultrasons</li> <li>✓ Radar</li> </ul>

**Légende:** — Intrusif      — Sans contact avec le flux

# NIVEAUMETRIE (PAR RADAR)

1/2

Introduction

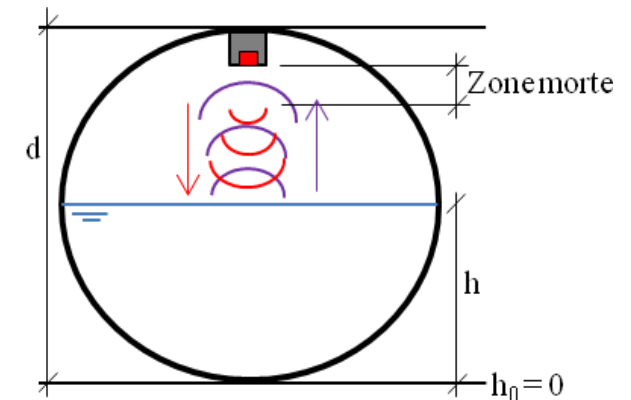
La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

## ➤ Ondes électromagnétiques

$$h = d - \frac{(c_{\text{radar}} \cdot t)}{2} = d - \frac{(\lambda \cdot f_0 \cdot t)}{2}$$



### Principe physique

Même principe que les ultrasons mais avec des ondes électromagnétiques  
=> Indépendance par rapport au milieu de propagation (T°, ...)

# NIVEAUMETRIE (PAR RADAR)

2/2

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

## ➤ Avantages / Inconvénients



- + Mesure non intrusive → maintenance réduite
- + Insensibilité à la température et à l'environnement du capteur
- Mesure impossible en cas de mise en charge
  - Attention à l'étalonnage du capteur et sa permittivité diélectrique
  - Attention à la stabilité de l'information sur l'ensemble de la zone de mesure
  - Attention à éviter d'être trop proche des murs pour la mise en place du capteur
- Incertitudes sur site: 1 cm



Sonde de niveau radar  
VEGAPULS66 (VEGA)

# NIVEAUMETRIE

Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

## ➤ Comparaison des technologies de mesure de hauteur

	Principe de mesure	Caractéristiques							Incertitudes associées sur site
		Précision intrinsèque	Facilité d'installation	Entretien requis	Sujétion aux dérives	Sensibilité à l'environnement	Fonctionnement en charge	Coût d'investissement	
INTRUSIVE	Mesure de pression	Très bonne (0.1 à 0.5 % de la plage de mesure)	Etalonnage facile mais installation à soigner	Régulier (≈ 1 fois / mois)	Importante	Moyenne (sensible aux dépôts mais pas aux mousses)	Possible	Faible	0.5 - 1 cm
HORS EAU	Mesure acoustique: ondes ultrasons	Bonne (1 % de la plage de mesure)	Installation facile	Faible (≈ 2 fois / an)	Dépendante du constructeur	Importante (mousses, flottants, vaguelettes, gradients de température importants,...)	Impossible => zone morte sous le capteur	Moyen	≥ 1 cm
	Mesure électromagnétique: ondes radar	Bonne (1 % de la plage de mesure)			Faible	Faible	Impossible => zone morte sous le capteur	Élevé	≥ 1 cm

Légende

Avantage de la technologie

Inconvénient de la technologie



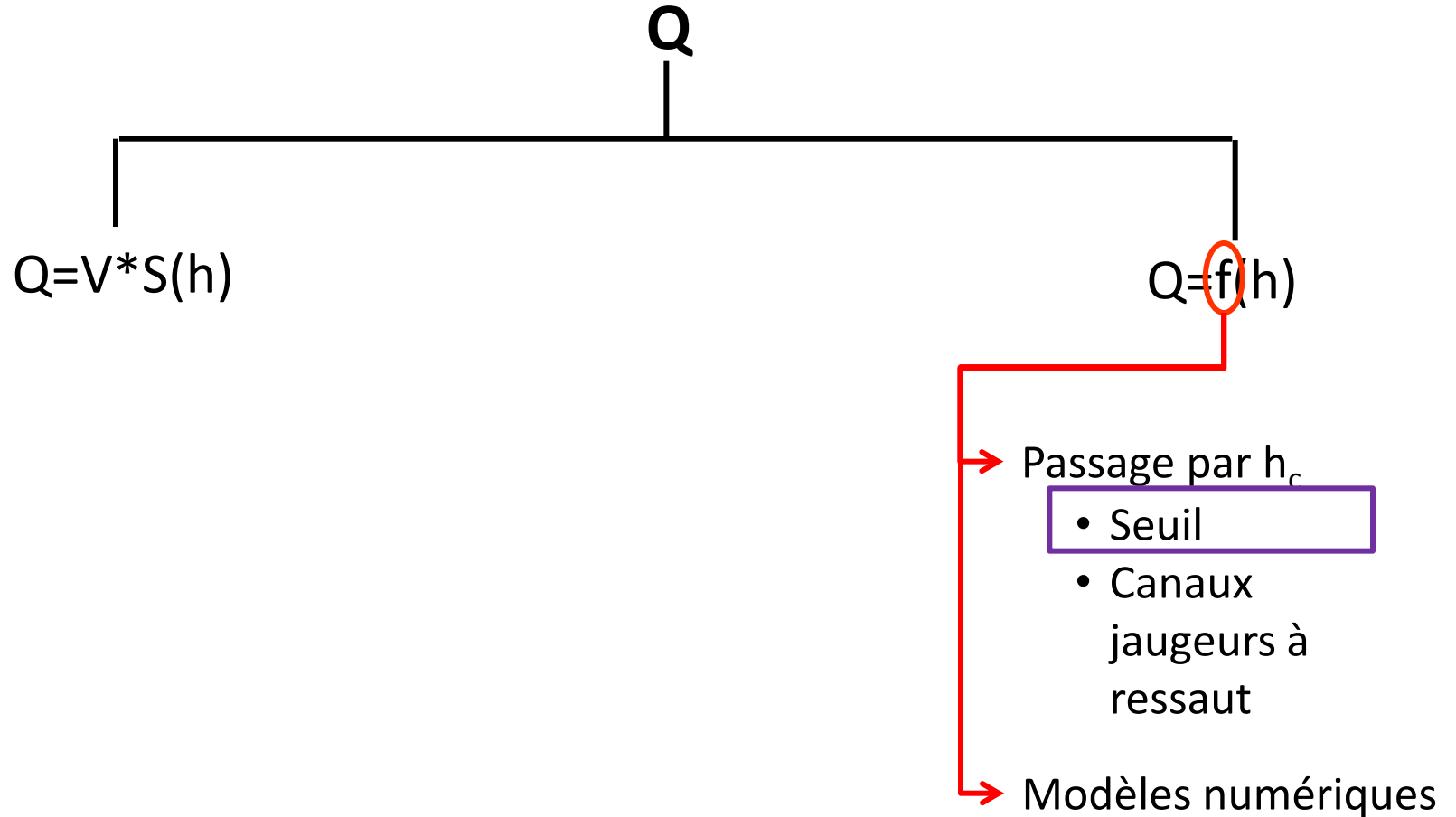
# DEBITMETRIE

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion



# DEBITMETRIE (PASSAGE PAR $h_c$ )

1/7

Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

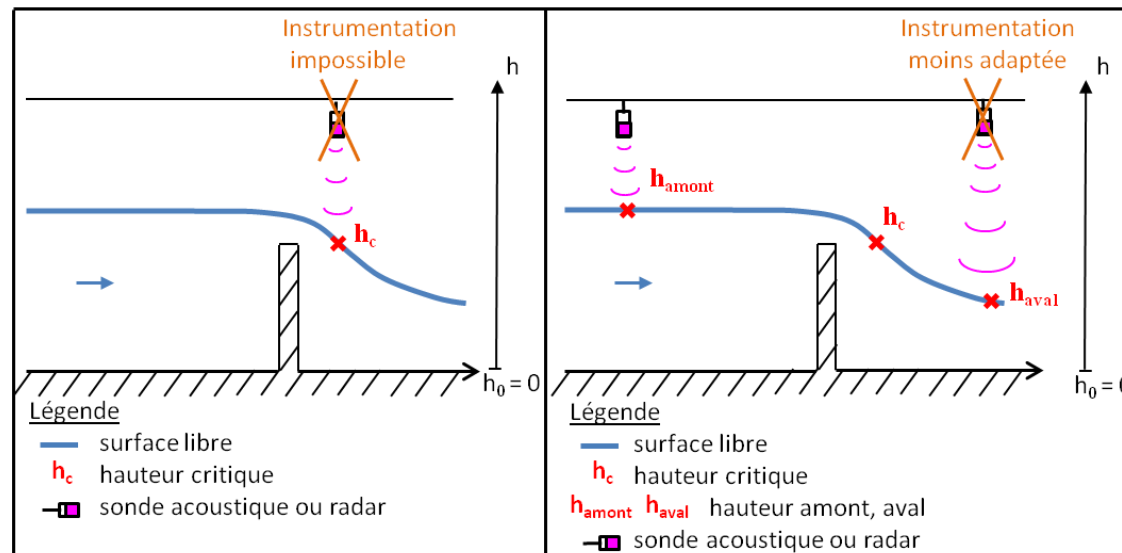
## ➤ Intérêt du passage par $h_c$

$$Fr = 1 \Rightarrow \bar{U}(x) = c(x)$$
$$\Rightarrow Q(x) = S(h_c) \cdot c(h_c)$$

### Principe physique :

Passage par  $h_c$  entraîne une relation bi-univoque entre:

- la hauteur mesurée en ce point,
- Le débit qui y transite





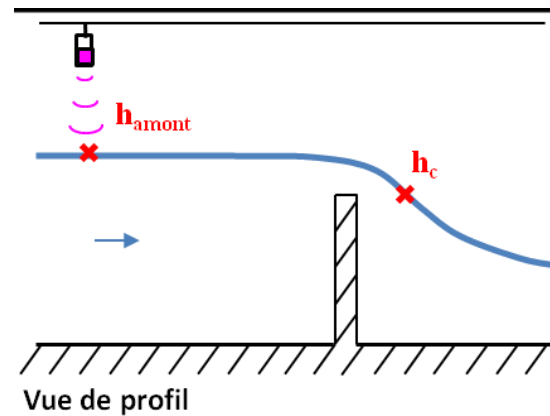
# DEBITMETRIE (PASSAGE PAR $h_c$ )

2/7

Introduction

## ➤ Dispositifs pré-étalonnés permettant le passage par $h_c$

### ✓ Les seuils



### Légende

- surface libre
- $h_c$  hauteur critique
- $h_{amont}$  hauteur amont
- sonde acoustique ou radar



**Intrusif => Risque de dépôt à l'amont  
Fonctionne en influence aval**

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

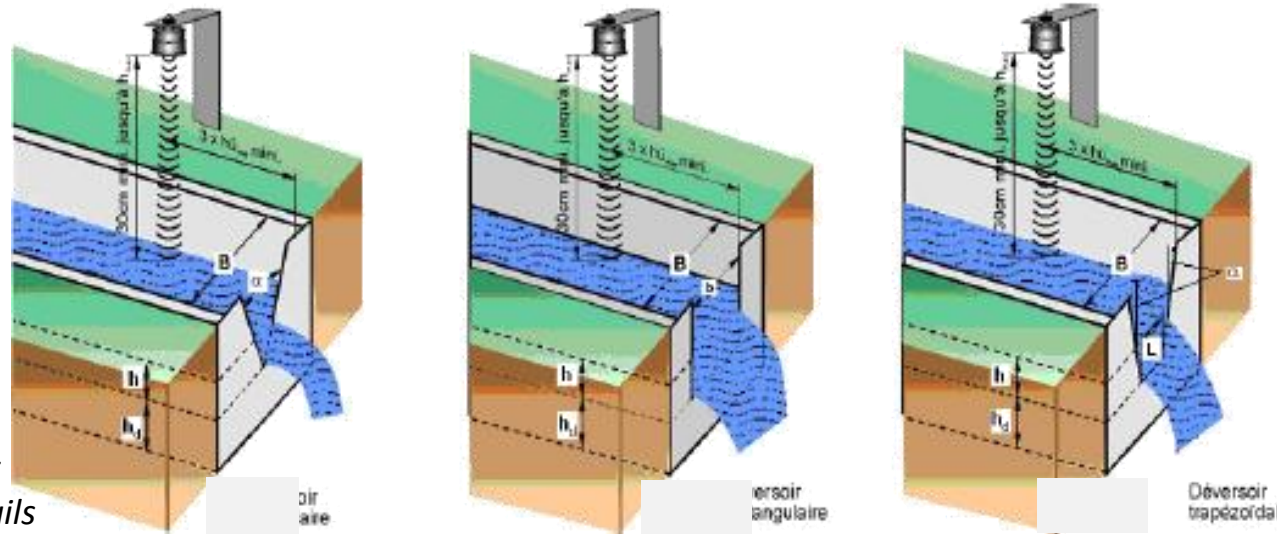
# DEBITMETRIE (PASSAGE PAR $h_c$ )

3/7

Introduction

## ➤ Dispositifs permettant le passage par $h_c$

### ✓ Les seuils



Différents types de seuils

Seuil rectangulaire	$Q_{dev} = \mu \cdot B \cdot h^{3/2} \cdot \sqrt{2g}$	(cf CETMEF 2005)
Seuil triangulaire	$Q_{dev} = \frac{8}{15} \cdot \mu \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot h^{5/2} \cdot \sqrt{2g}$	
Seuil trapézoïdal	$Q_{dev} = 1.32 \cdot h^{2.47} \cdot \tan(\alpha) + 1.69 \cdot L^{1.02} \cdot h^{1.47}$	

La mesure & limites

Mise en place et analyse

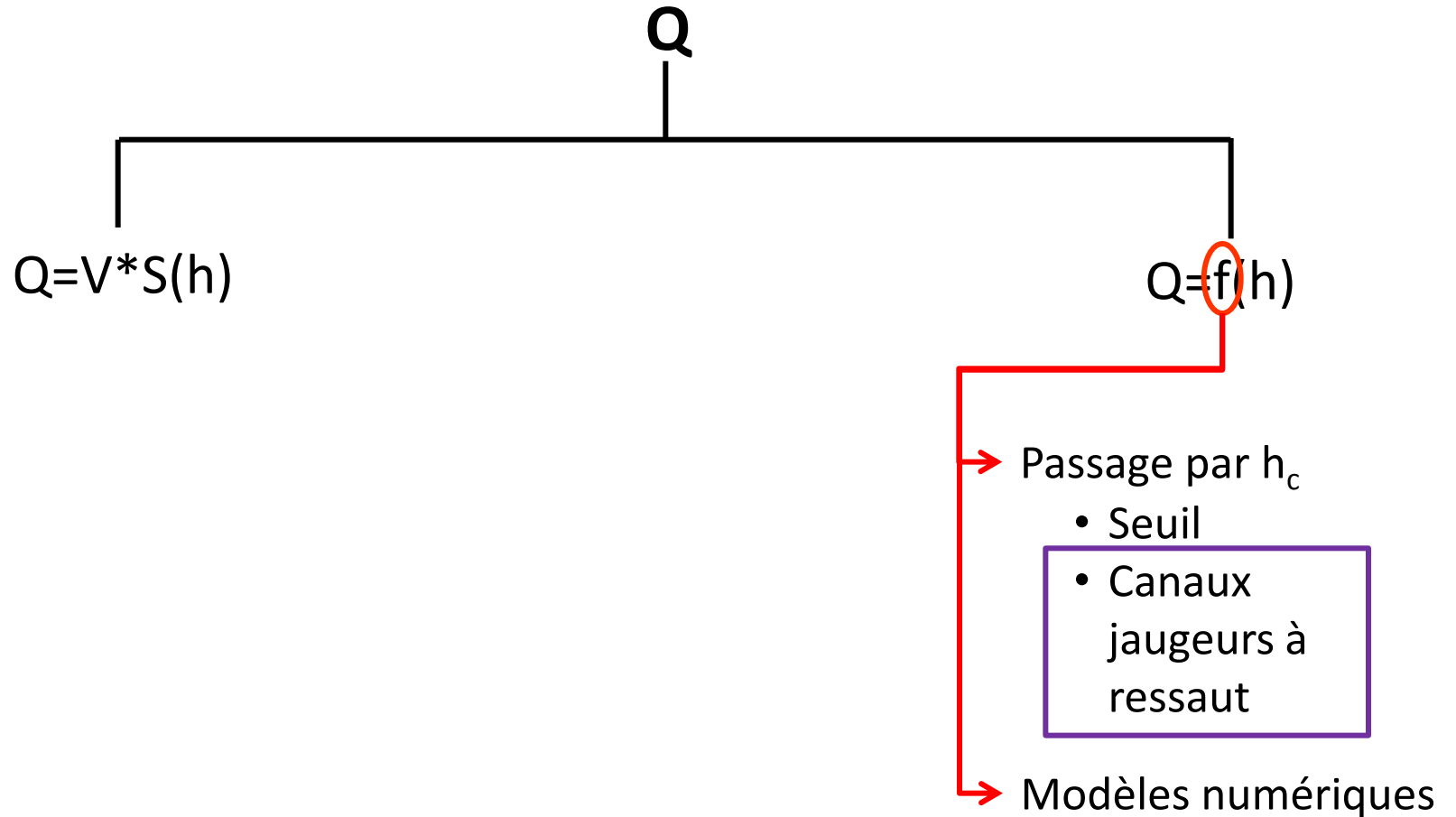
Conclusion

Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion



# DEBITMETRIE (PASSAGE PAR $h_c$ )

5/7

Introduction

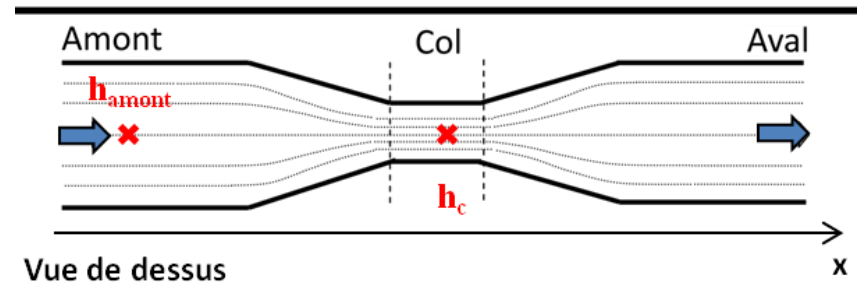
La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

## ➤ Dispositifs permettant le passage par $h_c$

- ✓ Les seuils
- ✓ Les canaux jaugeurs



### Légende

- surface libre
- $h_c$  hauteur critique
- $h_{amont}$  hauteur amont
- sonde acoustique ou radar

### Principe physique : Objectif:

Créer un ressaut hydraulique (fluvial => torrentiel) dans un canal + ou - long présentant une diminution locale de la section.

# DEBITMETRIE (PASSAGE PAR $h_c$ )

6/7

Introduction

## ➤ Dispositifs permettant le passage par $h_c$

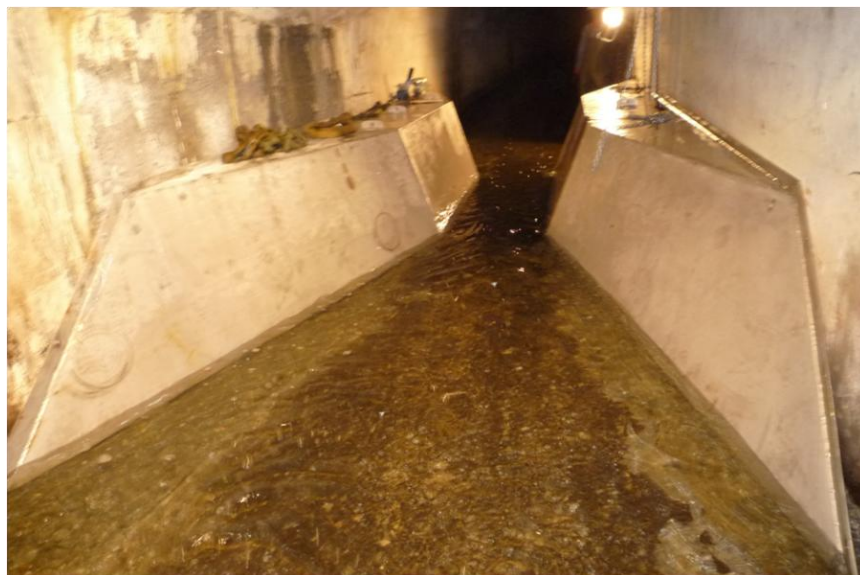
- ✓ Les seuils
- ✓ Les canaux jaugeurs



**Risque de dépôt réduit**  
**Ne fonctionne pas en influence aval**

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse



*Canal Venturi à Saint-Malo (entrée de la rivière canalisée)*



*Ex de canal Venturi à l'aval d'une STEU*

Conclusion

## ➤ Avantages / Inconvénients



+ **Méthode de mesure fiable et précise ( $\approx 5\%$ )**

- **Attention : conditions hydrauliques non perturbées à l'amont**
- **Attention: dispositif à associer à une mesure de  $h$  (piézo, US, radar,...)**
- **Attention au choix du point de mesure (éviter le risque de débordement)**
- **Dispositif nécessitant du génie civil**

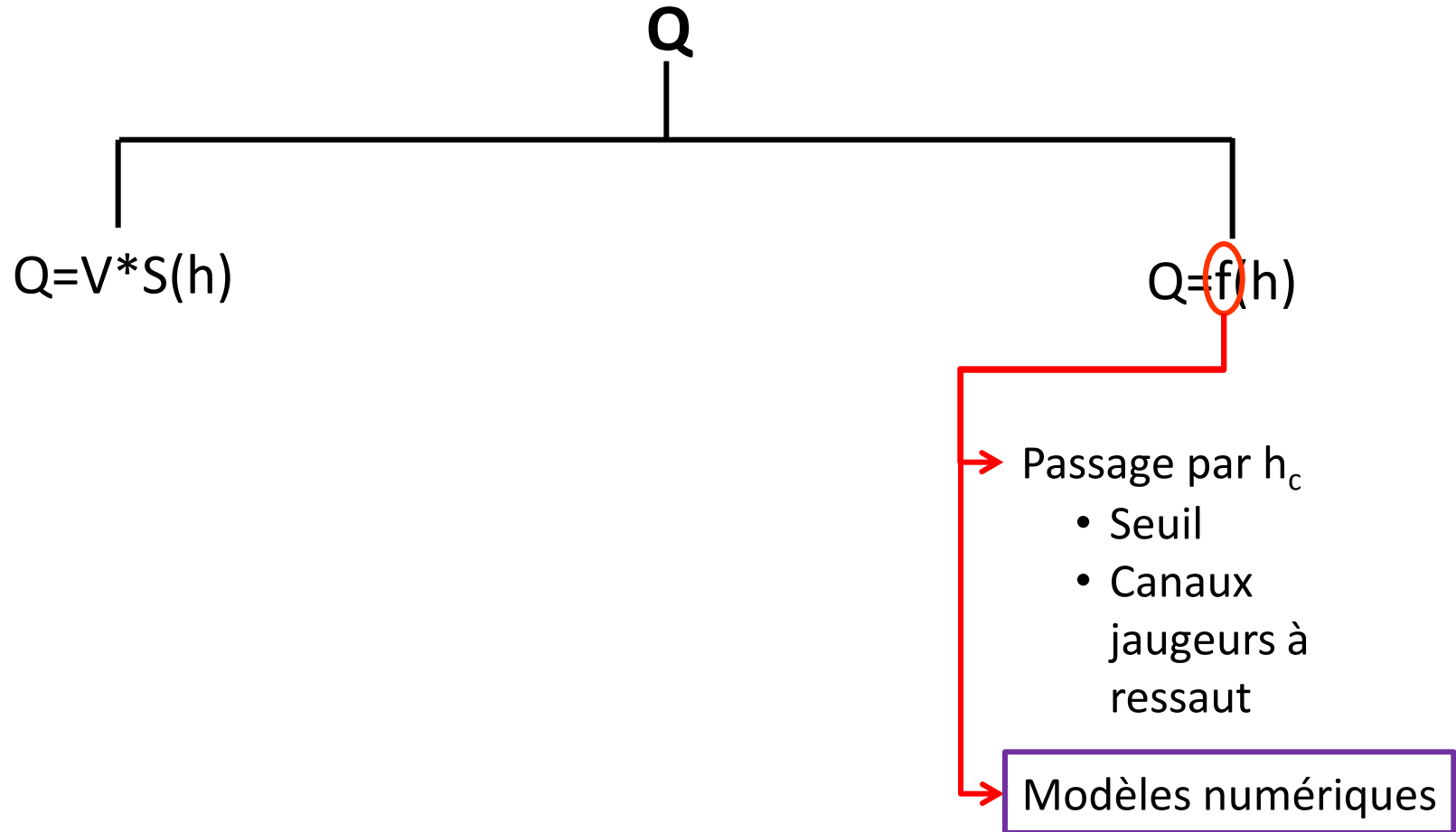
# DEBITMETRIE

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion



# MODELE NUMERIQUE ?

1/9

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

Modèles mécanistes			
0D	1D	2D	3D
<ul style="list-style-type: none"><li>• Lois de seuils</li><li>• Manning-Strickler</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Courbe de remous</li><li>• Barré de Saint-Venant (1D)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• BSV (2D)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Navier-Stokes</li></ul>

Précision des résultats

Facilité d'utilisation

Temps de calcul et puissance requise

Hypothèses simplificatrices



## ➤ Manning-Strickler

$$Q = K_s \cdot \sqrt{I} \cdot (R_h(h))^{2/3} \cdot S(h)$$

Paramètres:

Q = débit (m<sup>3</sup>/s)

K<sub>s</sub> = coef de Strickler (m<sup>1/3</sup>/s)

S = surface mouillée (m<sup>2</sup>)

R<sub>h</sub> = rayon hydraulique (m)

I = pente (m/m)



**Ecoulement uniforme et permanent sans influence aval  
Evaluation des paramètres hydrauliques difficile pour des conduites à géométrie particulière**

# MODÈLE 1D : CR

3/9

Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

## ➤ Courbe de remous

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I - J}{(1 - Fr^2)} = \frac{I - J \left( \frac{Q}{S(h)} \right)^2}{1 - \frac{Q^2}{g \cdot D_h(h) S(h)^3}}$$

Paramètres:

Q = débit (m<sup>3</sup>/s)

h = hauteur d'eau (m)

S = surface mouillée (m<sup>2</sup>)

D<sub>h</sub> = diamètre hydraulique (m)

I = pente (m/m)

J = pente énergétique (m/m)

Légende:



Données géométriques



Paramètre évalué (avec Colebrook ou MS  
ex:  $J = \frac{Q^2}{K^2 \cdot S^2 \cdot R^4}$ ) + Calibration rapide



Données issues de la mesure



Variable recherchée



**Ecoulement quasi-permanent**

# MODÈLE 1D : CR

4/9

Introduction

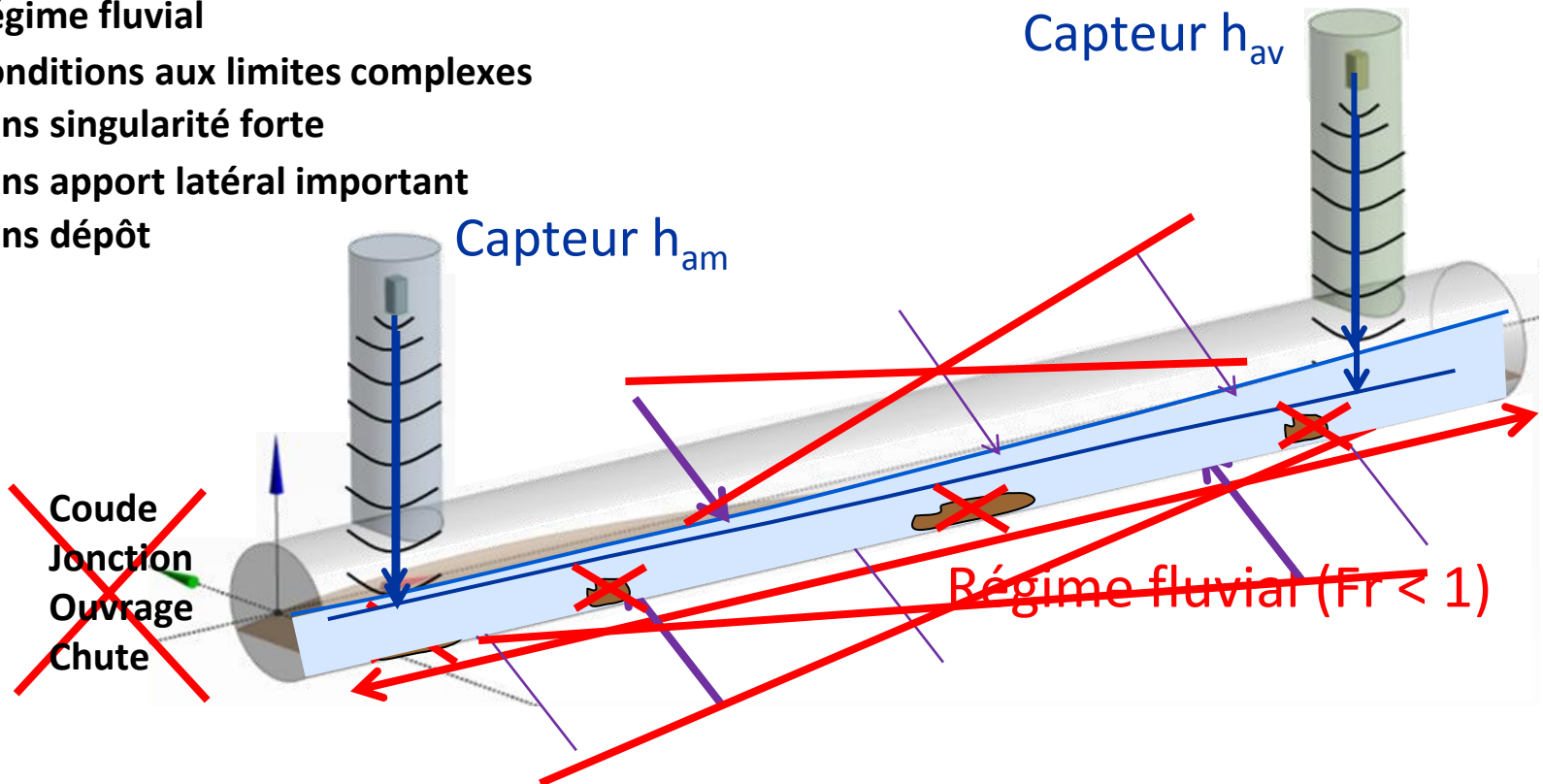
## ➤ Courbe de remous

Principe : Mesurer  $h$  dans deux sections transversales afin d'intégrer l'influence aval

La mesure & limites

- Régime fluvial
- Conditions aux limites complexes
- Sans singularité forte
- Sans apport latéral important
- Sans dépôt

Mise en place et analyse



Conclusion

# MODÈLE 1D : CR

5/9

Introduction

→ **abaque spécifique au site** permet :

La mesure & limites

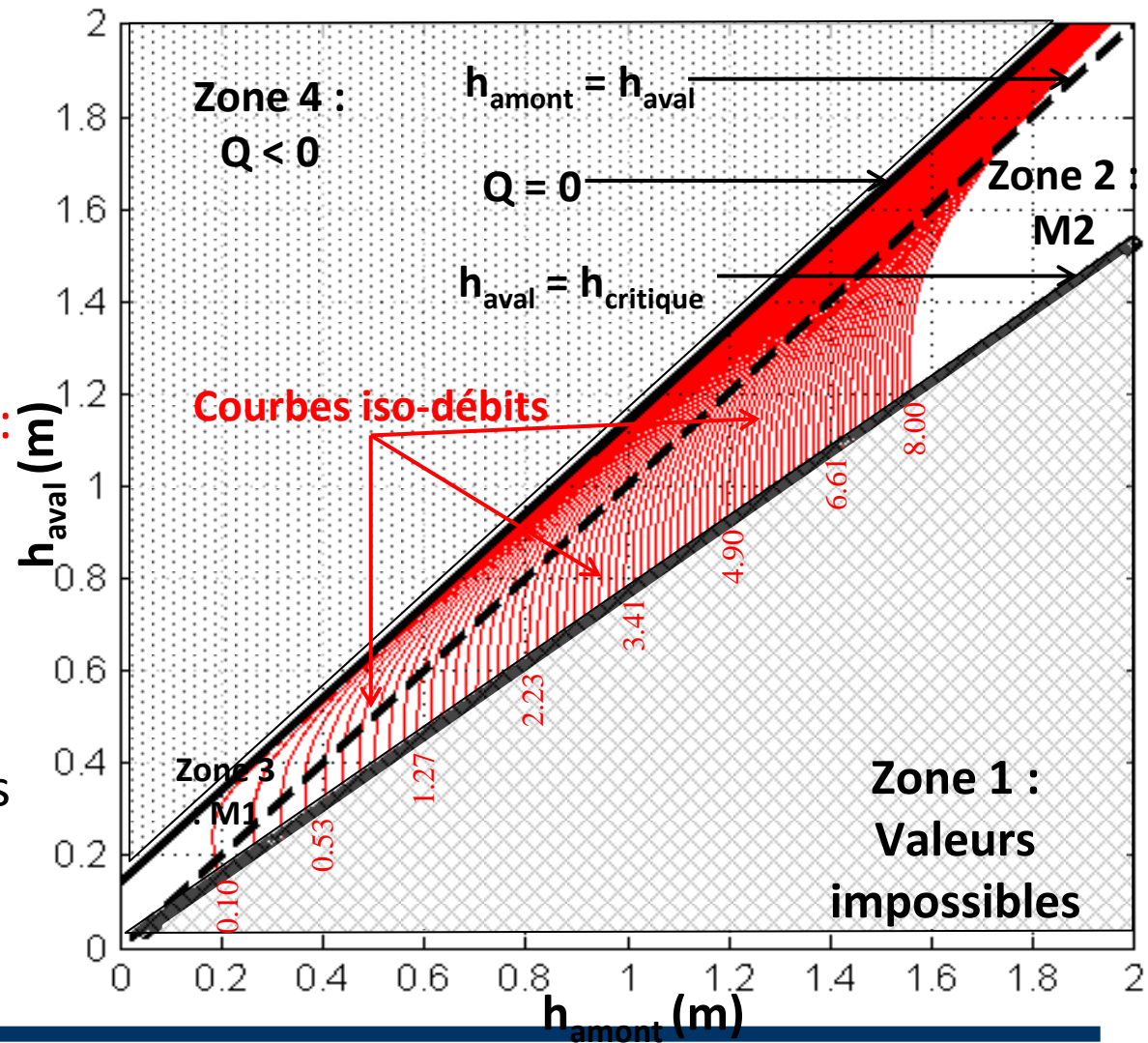
➤ D'identifier  $Q$  à partir de  $h_{\text{aval}}$  et  $h_{\text{amont}}$

➤ Analyser des données :  
Qualification hydraulique des données => 4 zones associées à des comportements hydrauliques différents

Mise en place et analyse

Conclusion

➤ Filtrer les données (points aberrants)



# MODÈLE 1D : CR

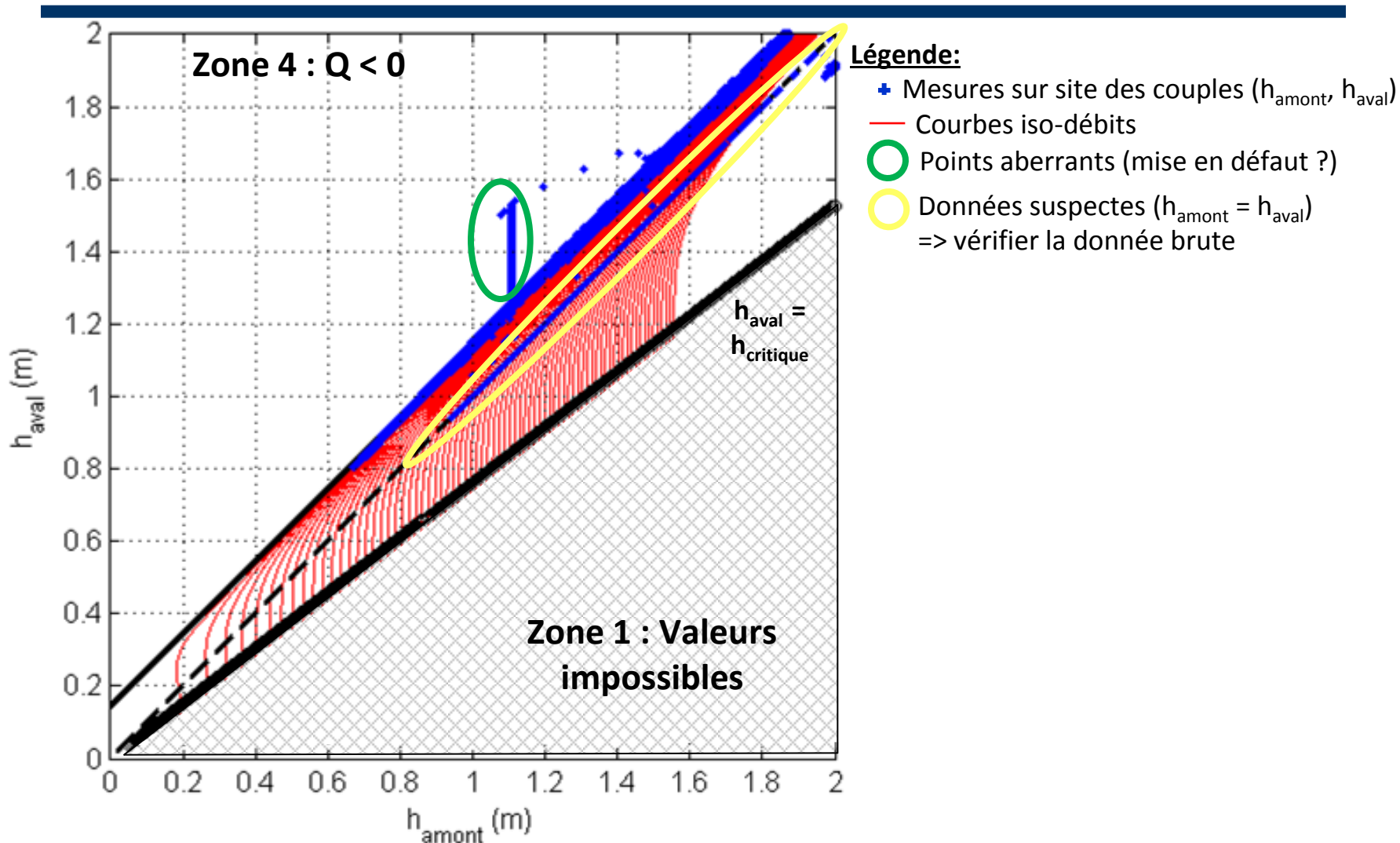
6/9

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion



# MODÈLE 1 OU 2D : BSV

5/9

Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

## ➤ Barré de Saint-Venant

$$\frac{dS}{dt} + \frac{dQ}{dx} = 0$$
$$\frac{dQ}{dt} + \frac{d}{dx} \left( \frac{Q^2}{S} \right) + g \cdot S \cdot \frac{dh}{dx} = g \cdot S \cdot (I - J)$$



**Valable en non permanent**  
**Attention aux hyp simplificatrices**  
**pour la résolution de BSV dans les**  
**logiciels commerciaux**



Logiciel Canoë - BSV

# MODÈLE 3D: NAVIER-STOKES

6/9

Introduction

- Ouvrages complexes : ex Déversoir d'orage non-standard



La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

# MODÈLE 3D: NAVIER-STOKES

7/9

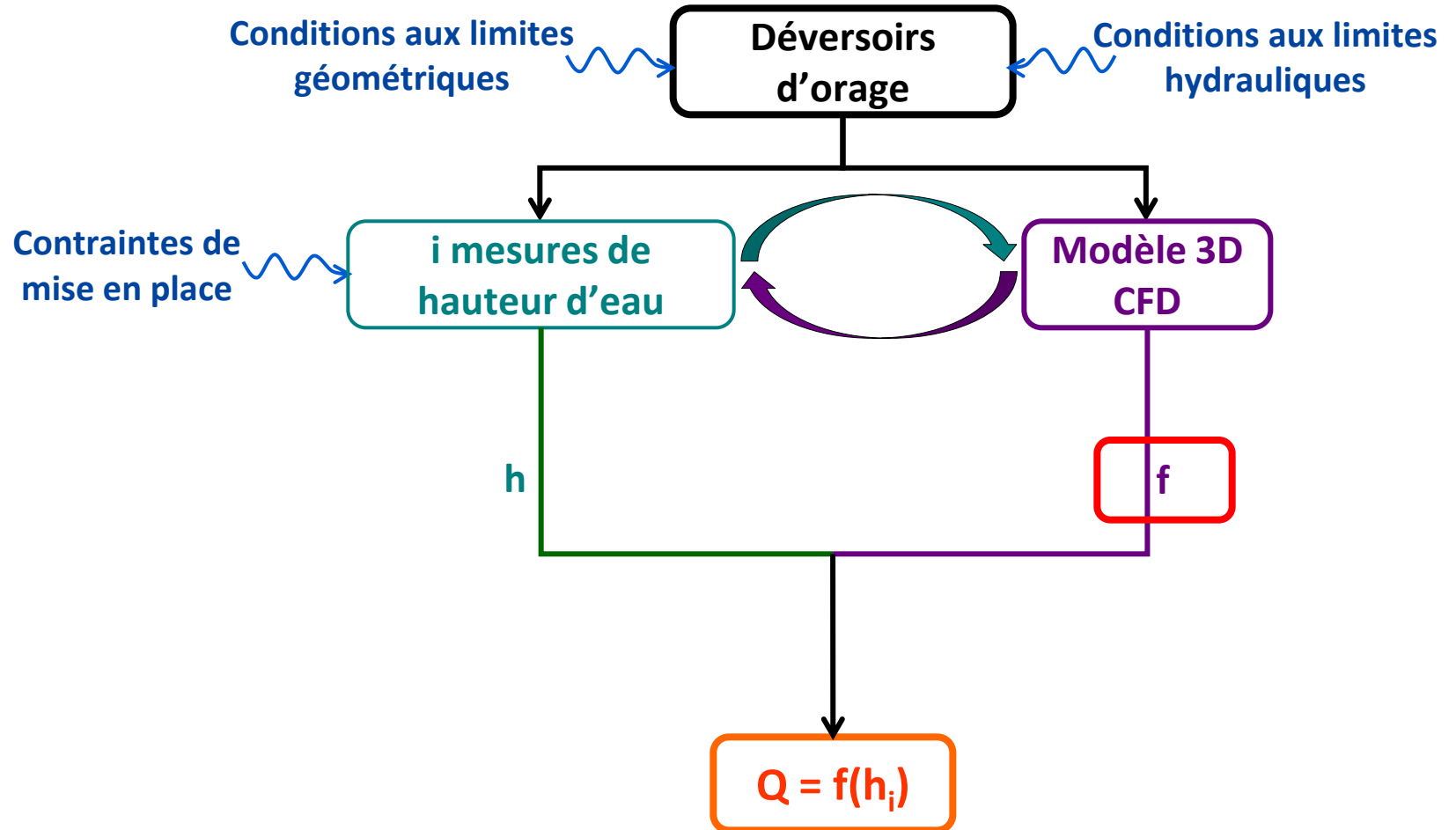
Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

## ➤ Méthodologie d'instrumentation des DO complexes avec la CFD





# MODÈLE 3D: NAVIER-STOKES

8/9

Introduction

La mesure & limites

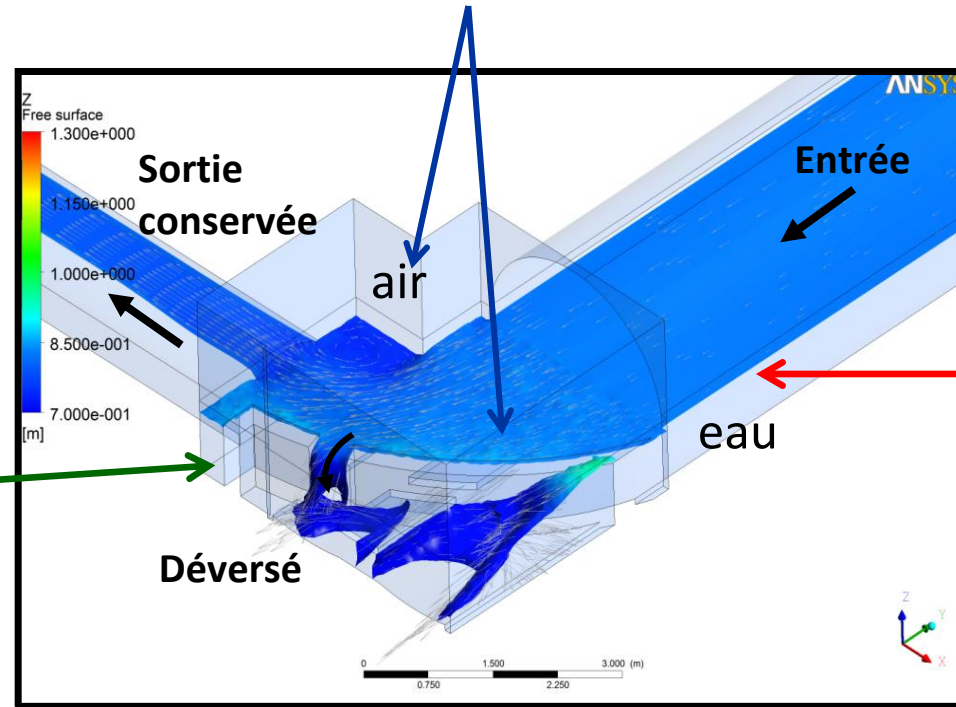
Mise en place et analyse

Conclusion

## ➤ Résultat du modèle 3D

Equations de Navier–Stokes moyennées (RANS)  
+ modèle de turbulence k-epsilon

Effets de parois:  
« Standard wall  
function »



Modèle "Volume Of Fluid" (VoF)  
+ schéma "modified HRIC"

## ➤ Avantages / Inconvénients



- + Méthode de mesure fiable et précise
- + Intègre une meilleure connaissance hydraulique dans l'instrumentation
  - Attention : au choix du modèle selon les caractéristiques de l'écoulement, conditions aux limites,...
- Dispositif indirect : mesure de h et modèle associé
- Prise en main du modèle parfois compliquée

# CONTRAINTES DE MISE EN PLACE

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

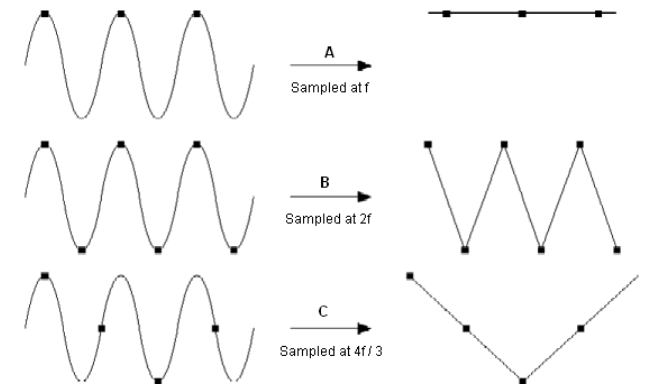
Conclusion

## ➤ Plage de mesure / valeurs maximales sur site

➤ Ex: vitesse pour un Doppler pulsé | profilomètre

- Limité en vitesse max mesurable à hauteur donnée  
=> Limite de Nyquist

$$VH < \frac{c^2}{8f_0} \tan(\beta)$$



*Ex fréquences d'échantillonnage inadaptées  
(cste, limite de Nyquist et repliement)*

➔ Conditionne la fréquence d'échantillonnage ( $> 2^*$   
composante fréquentielle (d'intérêt) la plus élevée du signal mesurée)

# CONTRAINTES DE MISE EN PLACE

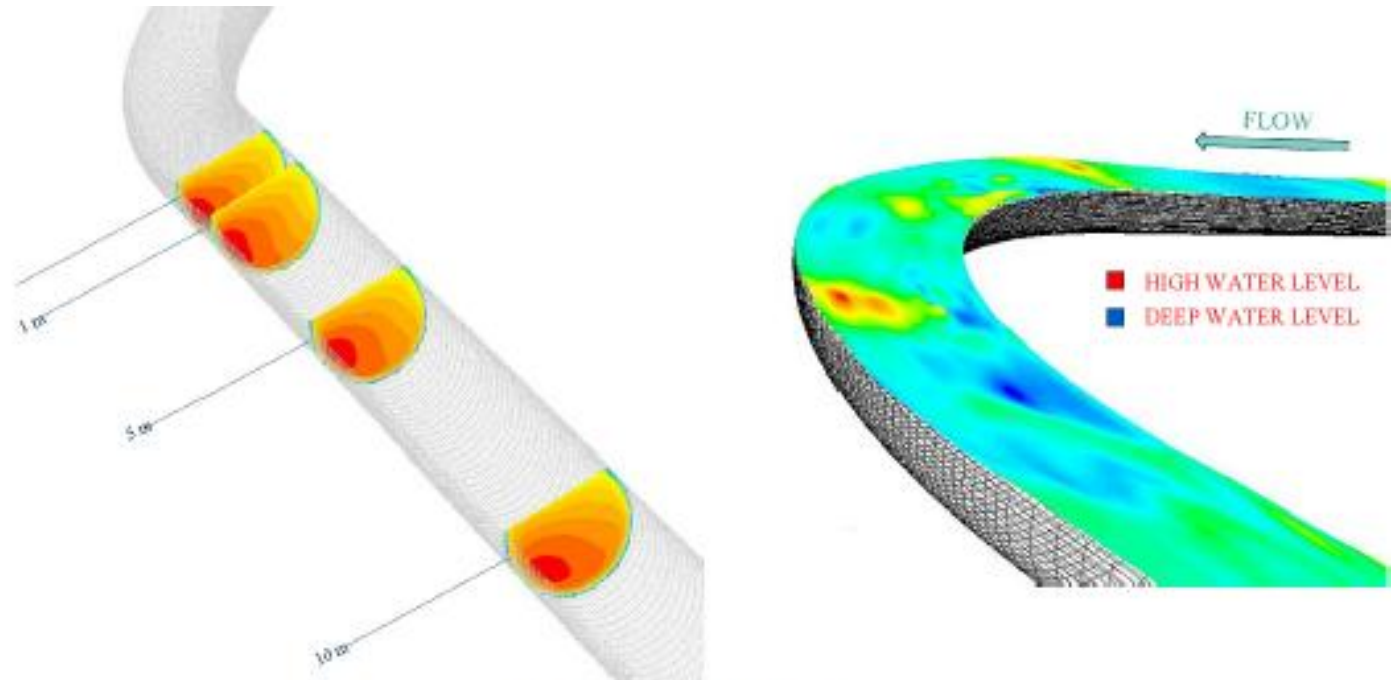
Introduction

- Singularités sur site
  - Influence d'un coude

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion



Source : Jean-Bernard BARDIAUX

## Préconisations:

➔ En écoulement chargé: dépend du Reynolds. Classiquement : 5-10 DN (ISO 9104)

# CONTRAINTES DE MISE EN PLACE

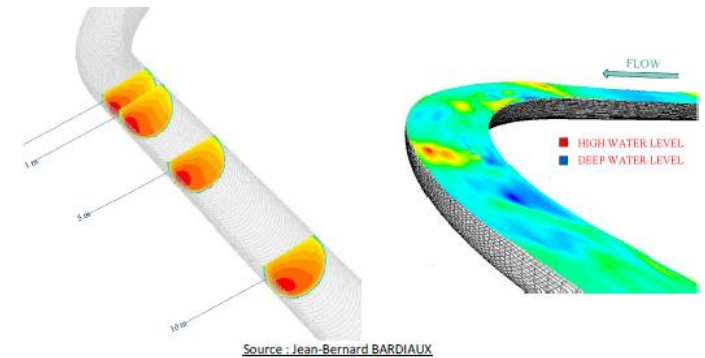
Introduction

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

- Singularités sur site
  - Influence d'un coude



**Préconisations: A surface libre**

	1 faisceau		Multi faisceaux	
	Longueur amont	Longueur Aval	Longueur amont	Longueur Aval
Coude 90°	20×B	5×B	5 à 7×B	3×B
Coude 45°	15×B	3×B	5 à 7×B	3×B
Vanne	12 à 20×B (selon la charge en amont de la vanne)	5×B	5 à 7×B (selon la charge en amont de la vanne)	5×B
Pompe	10 à 15 B (selon débit de pompe)	3×B	5 à 7×B (selon débit de pompe)	3×B
Réduction de section	10×B	3×B	5×B	3×B
Confluence en T	15×B	5×B	5×B	5×B
Ressaut hydraulique	10×B	5×B	10×B	5×B
Seuil	15×B	-	10×B	-

Source : NIVUS GmbH

# CONTRAINTES DE MISE EN PLACE

Introduction

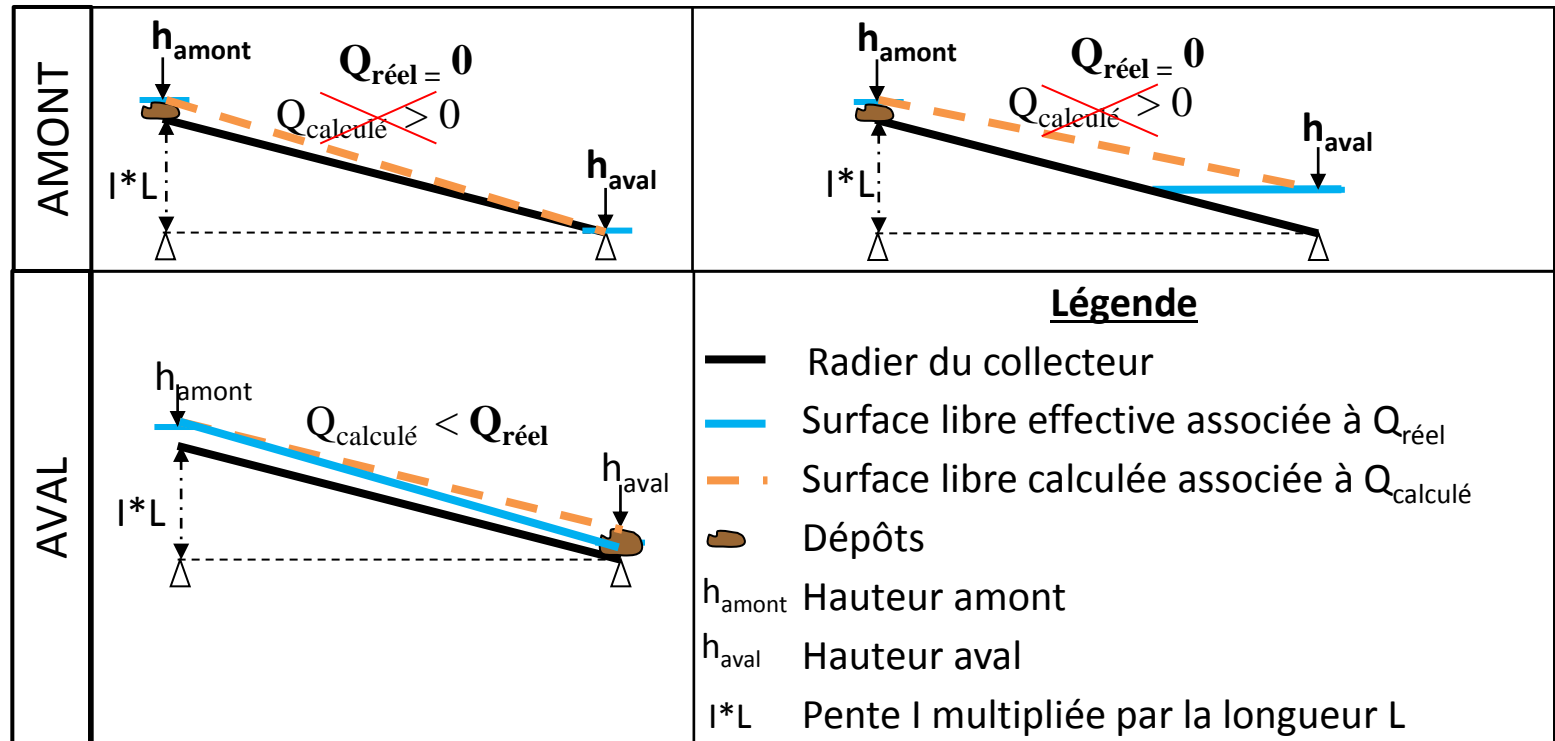
La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

## ➤ Singularités sur site

### ➤ Influence du dépôt - exemple niveaumétrie

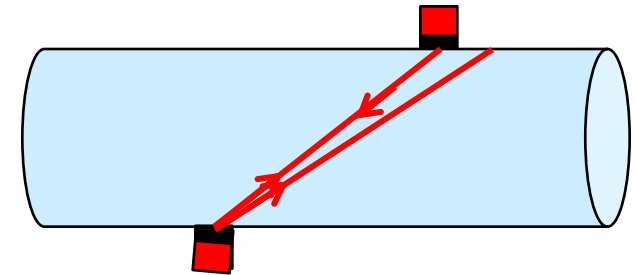


# CONTRAINTES DE MISE EN PLACE

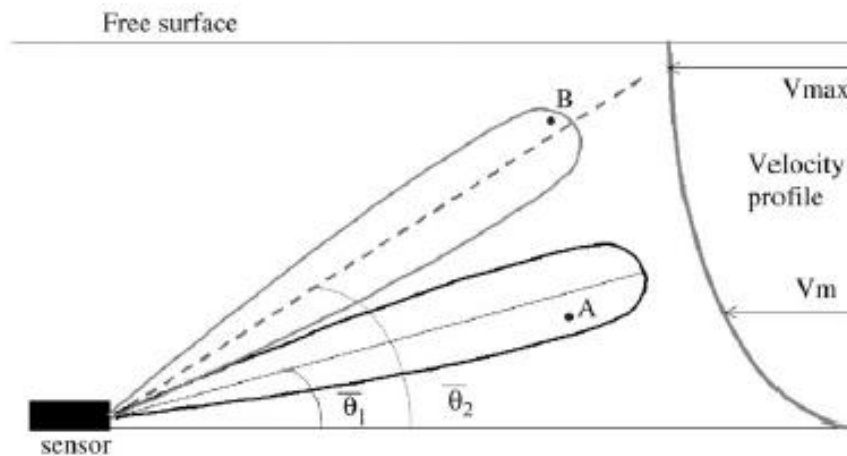
Introduction

## ➤ Installation

- Influence de l'angle de pose  
(pour les ultrasons)



*Influence de l'angle d'émission pour un temps de transit*



*Influence de l'angle d'émission pour un Doppler continu ou pulsé*

➔ Doppler pulsé (angle de tir élevé) : sensible aux composantes verticales de vitesse et donc à l'angle d'installation

La mesure & limites

Mise en place et analyse

Conclusion

# CONTRAINTES DE MISE EN PLACE

Introduction

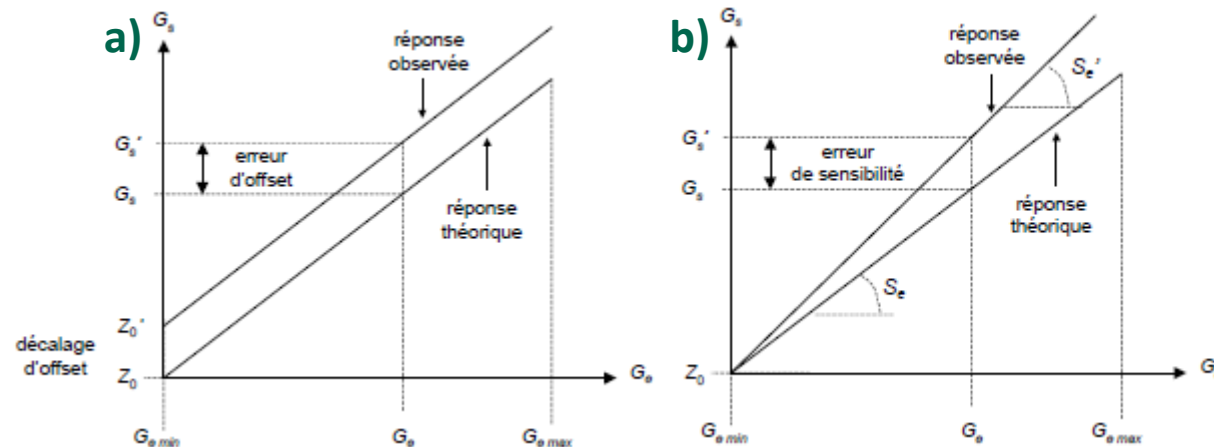
La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

## ➤ Installation – Etalonnage du capteur

- Vérifier que l'appareil de mesure fonctionne et ne présente ni d'erreur d'offset (zéro), ni de sensibilité
- Procéder au réglage de l'appareil pour corriger les éventuelles erreurs systématiques => établir une courbe / relation d'étalonnage



Ex: erreur d'offset (a) et de sensibilité (b) (cf. JLBK 2000)



# ANALYSE DES DONNEES & VALIDATION

Introduction

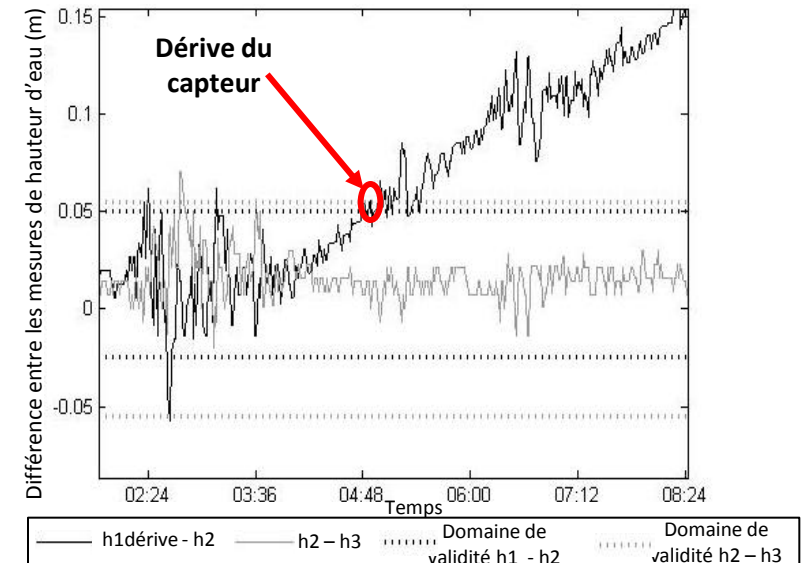
La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

Conclusion

## ➤ Dérive de capteur

- ✓ Répétabilité du temps sec
- ✓ Intérêt de la sécurisation de la mesure | redondance
- ✓ Etalonnage régulier



## ➤ Perte de données

- ✓ Reconstruction par répétabilité des données ?
- ✓ Valeur précédent le dysfonctionnement sur toute la période manquante
- ✓ NaN | 0 partout

# CONCLUSION

---

Introduction

La mesure  
&  
limites

Mise en  
place et  
analyse

**Conclusion**

- **Choix de la technologie et installation = compromis entre**
  - ✓ **Etendue de mesure,**
  - ✓ **Contraintes de site,**
  - ✓ **Incertitude,**
  - ✓ **Coût,**
  - ✓ **Fiabilité,**
  - ✓ **Maintenance.**