



MARSEILLE 2022  
27 MAY-3 JUNE

SHORT COURSES  
FRIDAY MAY 27 2022

ICOLD  
27<sup>TH</sup> CONGRESS  
90<sup>TH</sup> ANNUAL  
MEETING

CIGB  
27<sup>ÈME</sup> CONGRÈS  
90<sup>ÈME</sup> RÉUNION  
ANNUELLE



[www.cigb-icold2022.fr](http://www.cigb-icold2022.fr)

# Course 3: Analysis methods of dam monitoring data

*Cours n°3: Les méthodes d'analyse des mesures d'auscultation des barrages*

## 3 – Examples of monitoring systems

*3 – Exemples de dispositifs d'auscultation*

Mathieu ROY – ARTELIA



# Design of the monitoring system

## *Conception du dispositif d'auscultation*

- What is the relevant information about the dam and its foundation ?

*Quelle information veut-on connaître sur le barrage et sa fondation ?*

- Depends on the type and design of the dam :

*Cela dépend du type et de la conception du barrage:*

- Concrete gravity dam / *barrage-poids en béton*
- Arch dam / *barrage-voûte*
- Earthfill dam / *barrage en remblai*
- Rockfill dam with facing / *barrage à masque amont*

**Focus**

- Depends also on the height, the type of foundation, concrete pathologies etc.

*Dépend également de la hauteur, de la nature de la fondation, des pathologies du béton...*

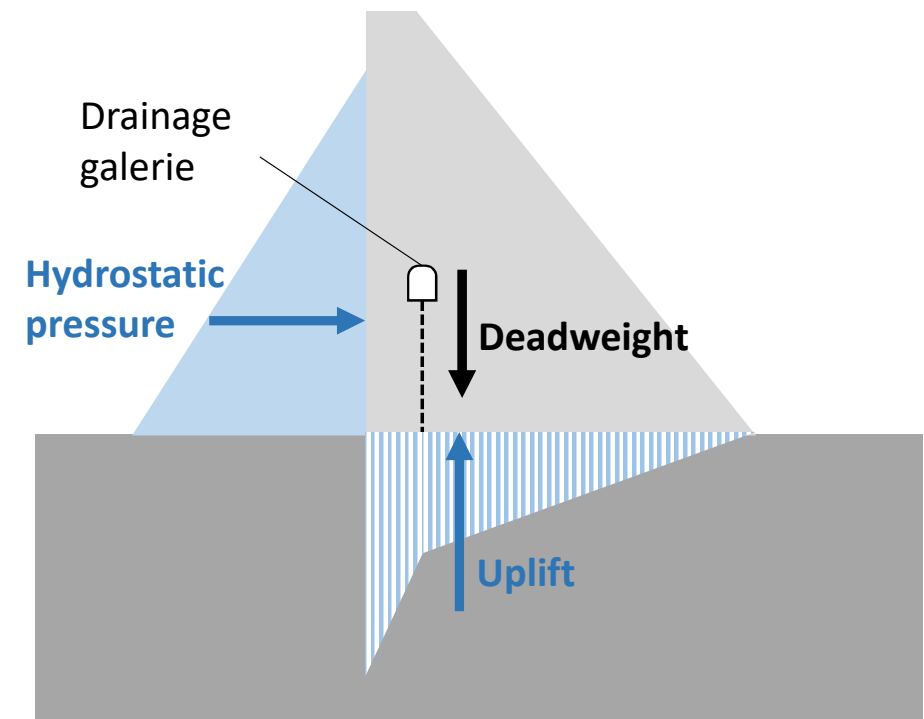
# Concrete gravity dams

## *Barrages-poids en béton*

1

**Particularity of the dam**  
*Particularité du barrage*

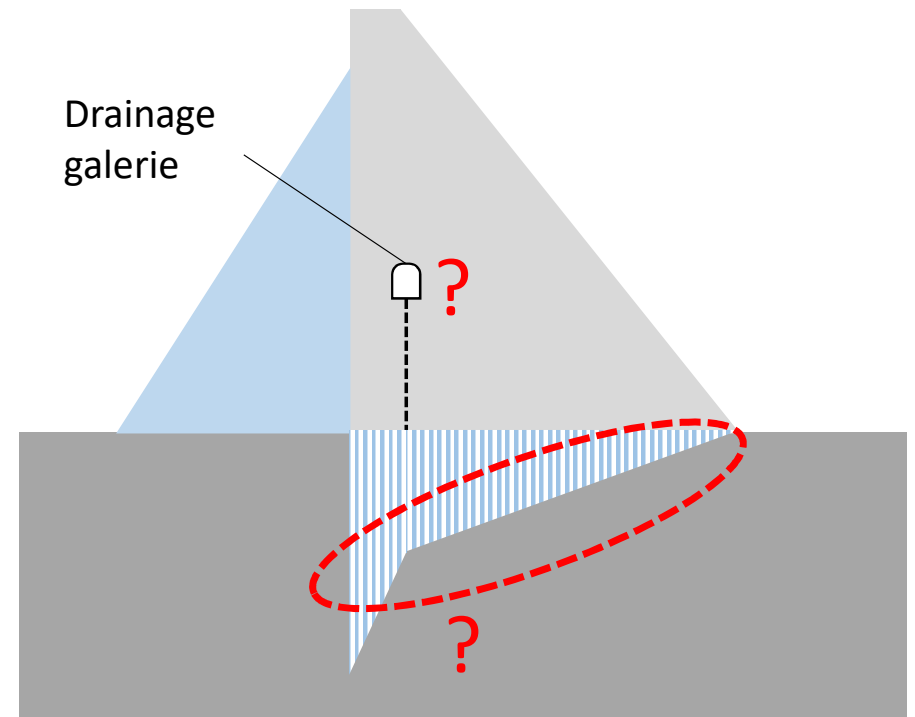
**Stability based on the deadweight**  
*Stabilité basée sur le poids-propre*



# Concrete gravity dams

## *Barrages-poids en béton*

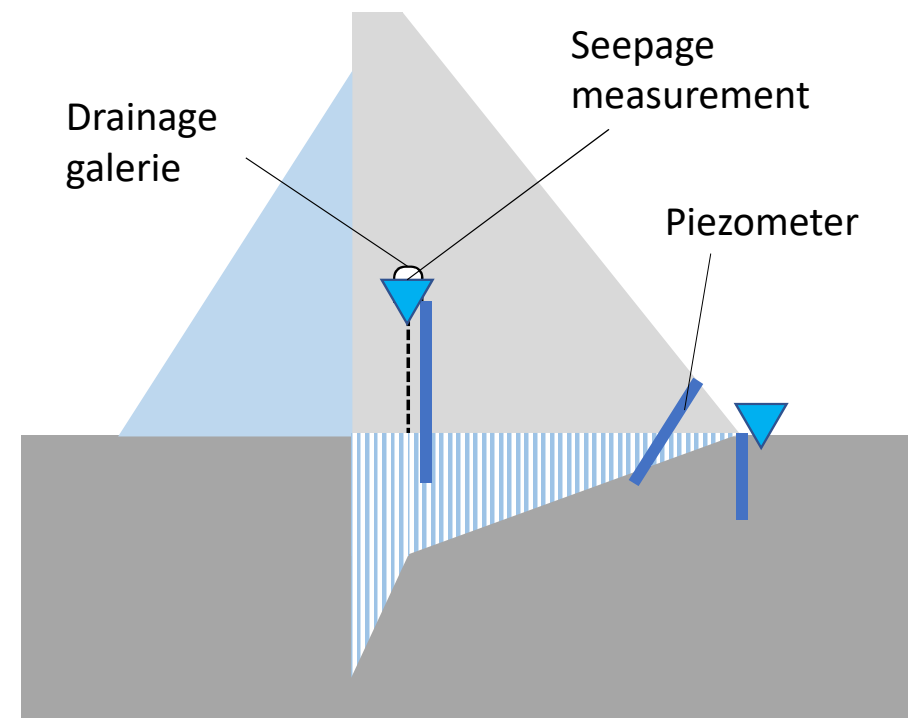
1	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Stability based on the deadweight <i>Stabilité basée sur le poids-propre</i>
	Issue <i>Problématique</i>	Uplift <i>Sous-pressions</i>



# Concrete gravity dams

## *Barrages-poids en béton*

1	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Stability based on the deadweight <i>Stabilité basée sur le poids-propre</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Uplift <i>Sous-pressions</i>	
<b>Relevant monitoring device</b> <i>Instrument adapté</i>	Piezometers at the dam/foundation contact <i>Piézomètres au contact barrage/fondation</i>  Seepage measurement <i>Mesure des fuites</i>	



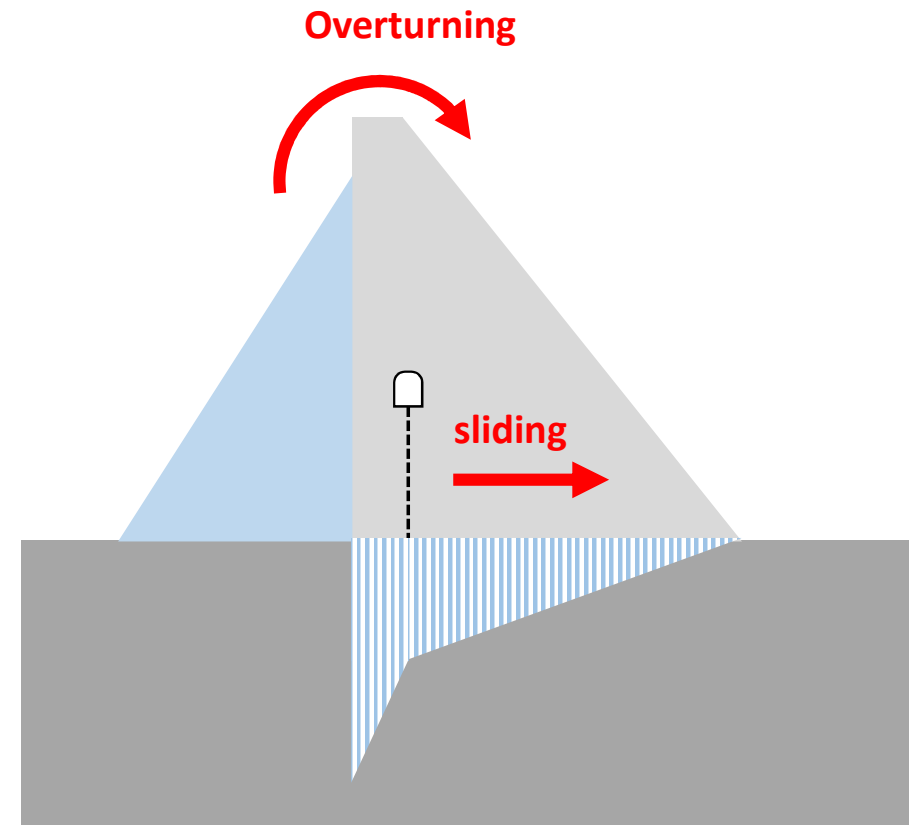
# Concrete gravity dams

## *Barrages-poids en béton*

2

**Particularity of the dam**  
*Particularité du barrage*

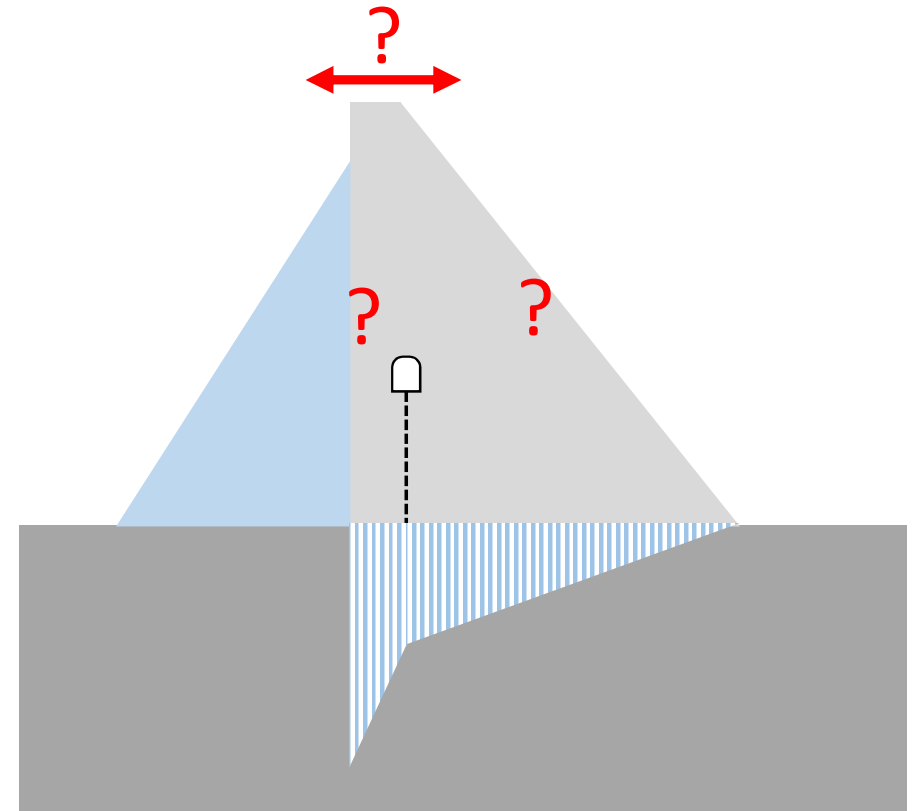
Failure mode : sliding or overturning  
*Mécanisme de rupture : glissement ou basculement*



# Concrete gravity dams

## *Barrages-poids en béton*

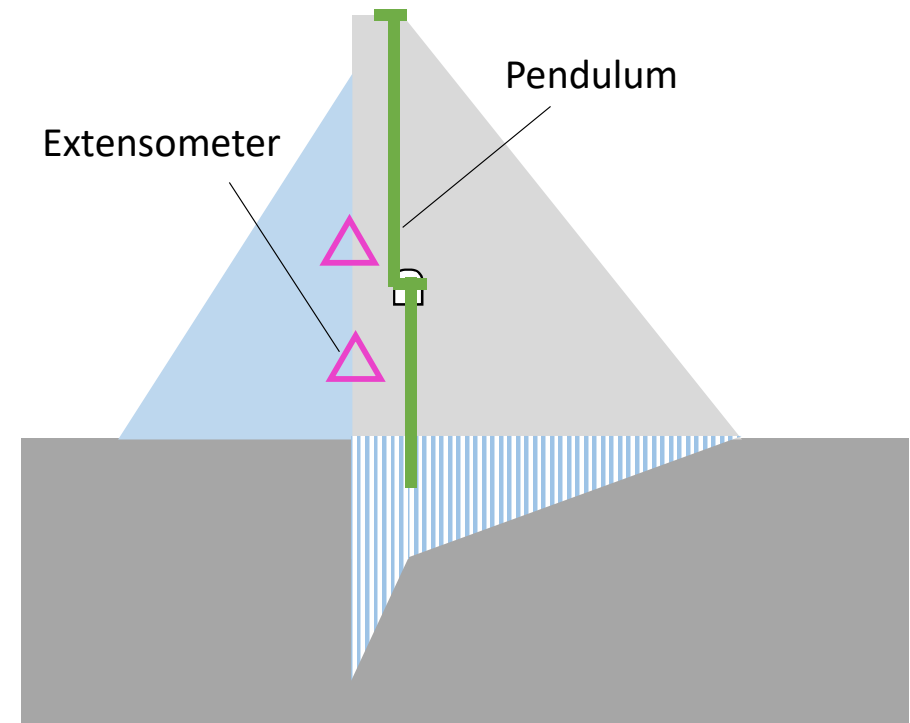
2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Failure mode : sliding or overturning <i>Mécanisme de rupture : glissement ou basculement</i>
	Issue <i>Problématique</i>	Check the displacements and the stresses <i>Vérifier les déplacements et les contraintes</i>



# Concrete gravity dams

## Barrages-poids en béton

2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Failure mode : sliding or overturning <i>Mécanisme de rupture : glissement ou basculement</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the displacements and the stresses <i>Vérifier les déplacements et les contraintes</i>	
<b>Relevant monitoring device</b> <i>Instrument adapté</i>	Penduli <i>Pendules</i>  Extensometers <i>Extensomètres</i>	

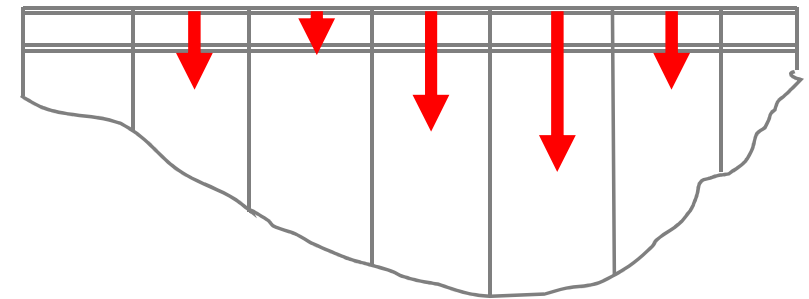




# Concrete gravity dams

## *Barrages-poids en béton*

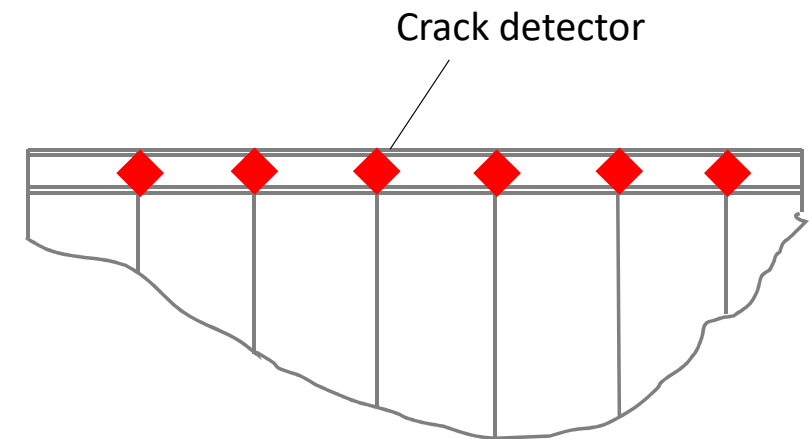
3	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Independent blocks <i>Plots indépendants</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Differential movements between blocks <i>Mouvements différentiels entre plots</i>	



# Concrete gravity dams

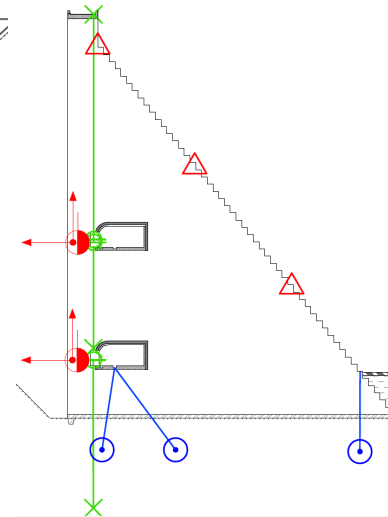
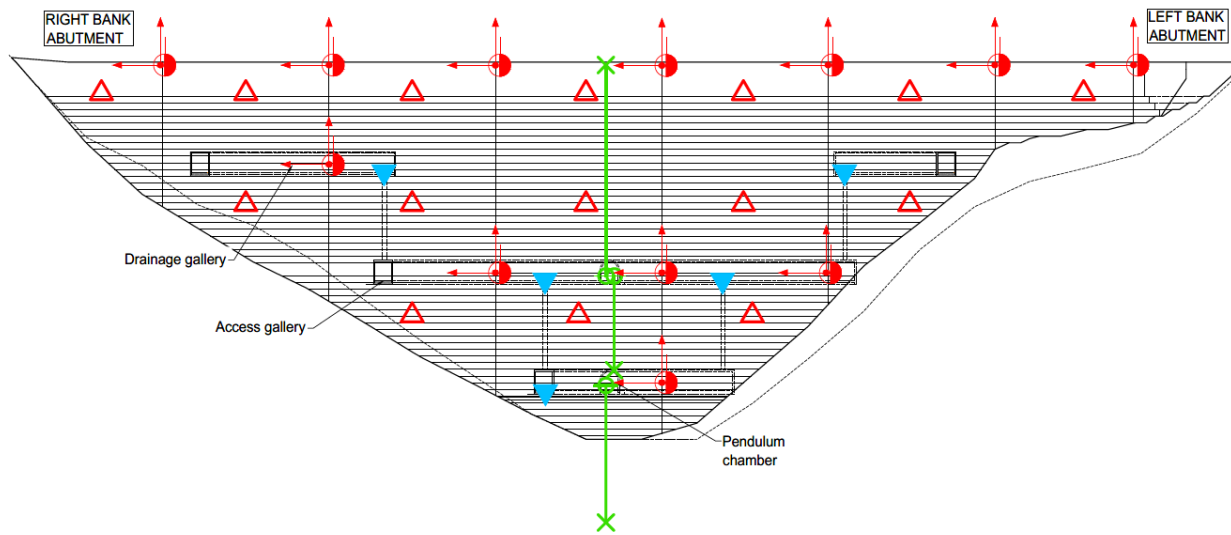
## *Barrages-poids en béton*







3	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Independent blocks <i>Plots indépendants</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Differential movements between blocks <i>Mouvements différentiels entre plots</i>	
<b>Relevant monitoring device</b> <i>Instrument adapté</i>	Crack detectors <i>Fissuromètres</i>	



# Concrete gravity dams - example

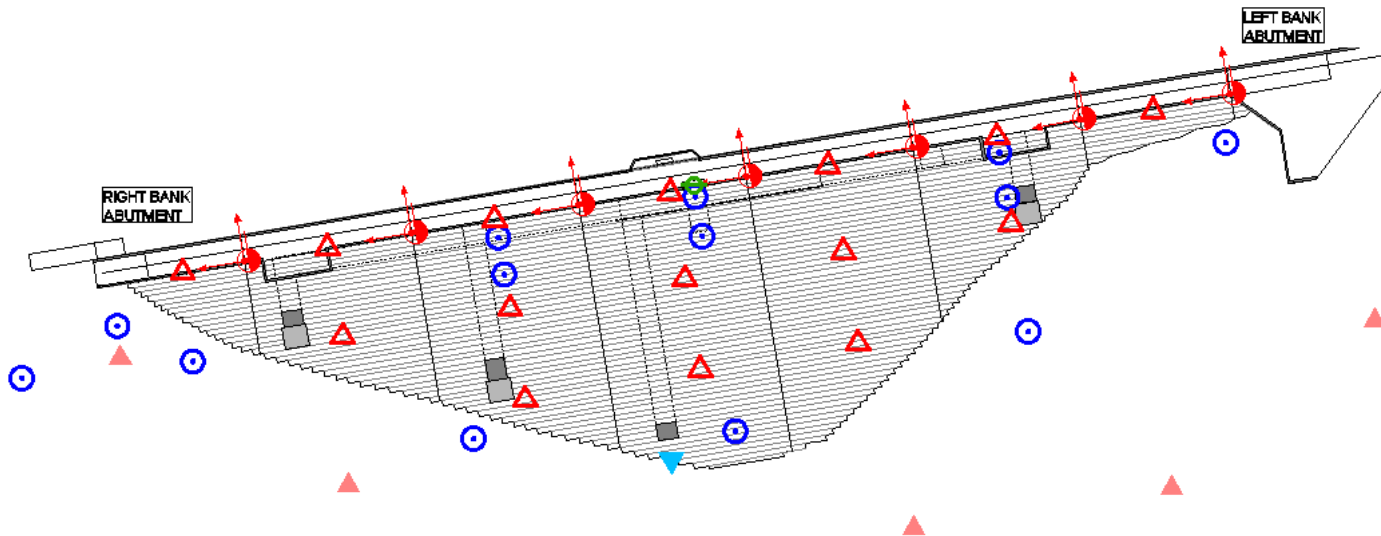
## Barrages-poids en béton - exemple









-  **Survey station**  
*Repère topographique*
-  **Reference station**  
*Point de référence*
-  **Seepage measurement**  
*Mesure de débit de fuite*
-  **Pendulum**  
*Pendule*
-  **Crack detector 3D**  
*Fissuromètre 3D*
-  **Pressure cell**  
*Cellule de pression interstitielle*

# Concrete gravity dams - example

*Barrages-poids en béton - exemple*



-  **Survey station**  
*Repère topographique*
-  **Reference station**  
*Point de référence*
-  **Seepage measurement**  
*Mesure de débit de fuite*
-  **Pendulum**  
*Pendule*
-  **Crack detector 3D**  
*Fissuromètre 3D*
-  **Pressure cell**  
*Cellule de pression interstitielle*

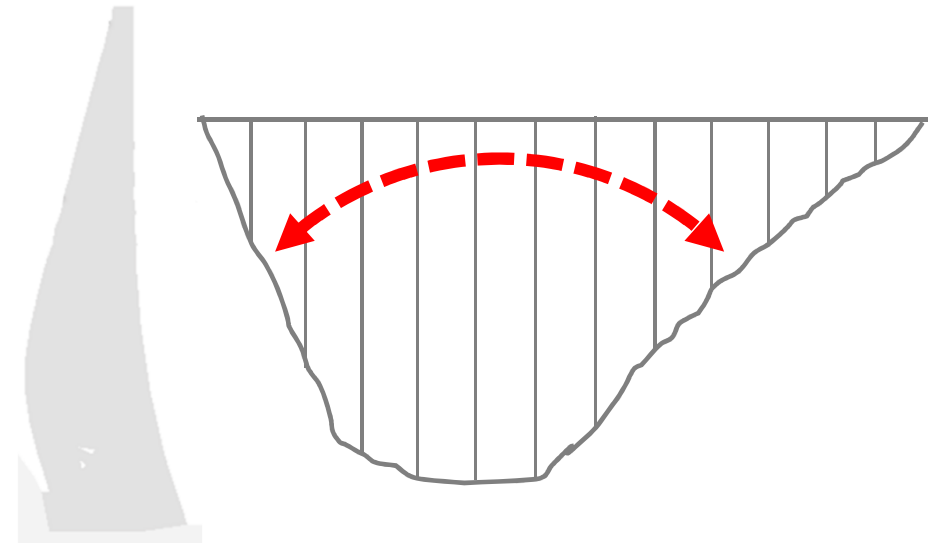
# Arch dams

## *Barrages-voûtes*

1

**Particularity of the dam**  
*Particularité du barrage*

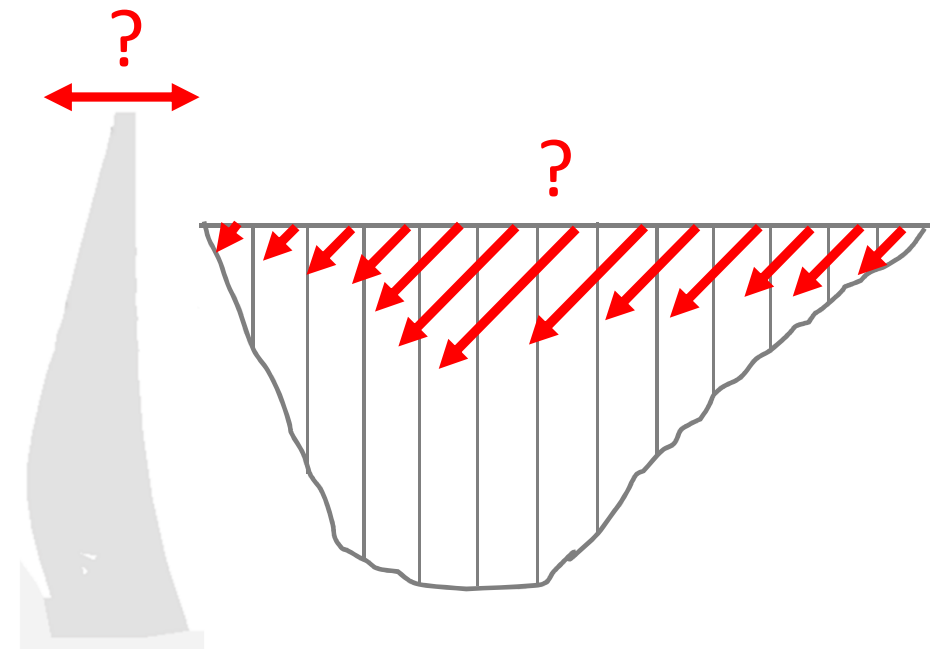
Flexibility and hyperstaticity (3D  
behaviour)  
*Flexibilité et hyperstatisme*  
*(comportement 3D)*



# Arch dams

## Barrages-voûtes

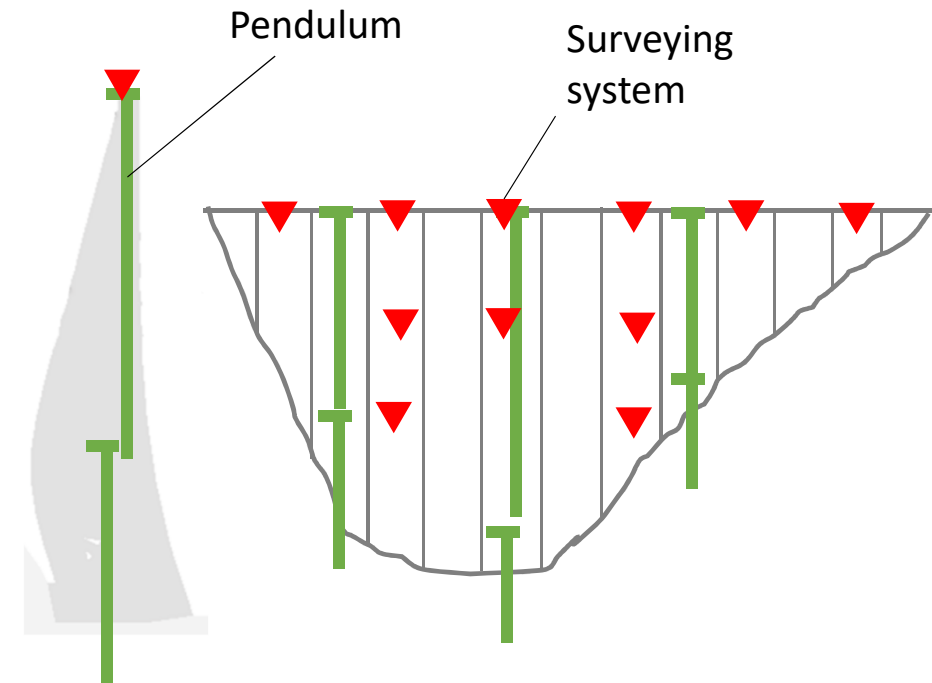
1	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Flexibility and hyperstaticity (3D behaviour) <i>Flexibilité et hyperstatisme (comportement 3D)</i>
	<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Significant displacements <i>Déplacements significatifs</i> Laterality of the behaviour (RB $\neq$ LB) <i>Latéralité du comportement (RD <math>\neq</math> RG)</i>



# Arch dams

## Barrages-voûtes

1	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Flexibility and hyperstaticity (3D behaviour) <i>Flexibilité et hyperstatisme (comportement 3D)</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Significant displacements <i>Déplacements significatifs</i>  Laterality of the behaviour (RB $\neq$ LB) <i>Latéralité du comportement (RD <math>\neq</math> RG)</i>	
<b>Relevant monitoring device</b> <i>Instrument adapté</i>	Penduli in several blocks and at the dam/foundation contact <i>Pendules dans plusieurs plots et au contact barrage/fondation</i>  Surveying system (sometimes extended to the banks) <i>Réseau topographique (parfois étendu aux appuis)</i>	



Analysis methods of dam monitoring data - 27/05/2022

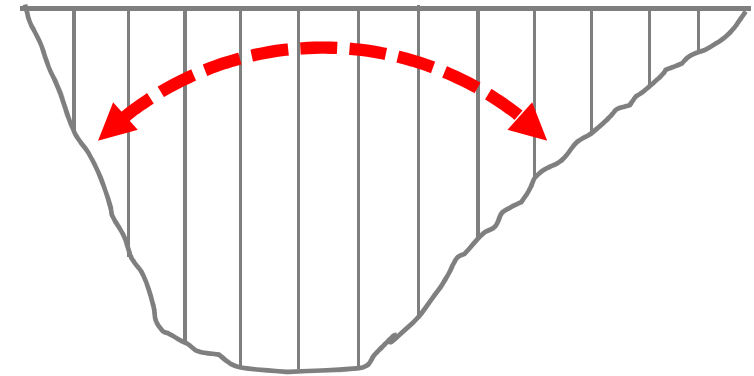
# Arch dams

## *Barrages-voûtes*

2

**Particularity of the dam**  
*Particularité du barrage*

Stability : transfer of the water pressure towards the banks  
*Stabilité : transfert de la poussée vers les appuis*

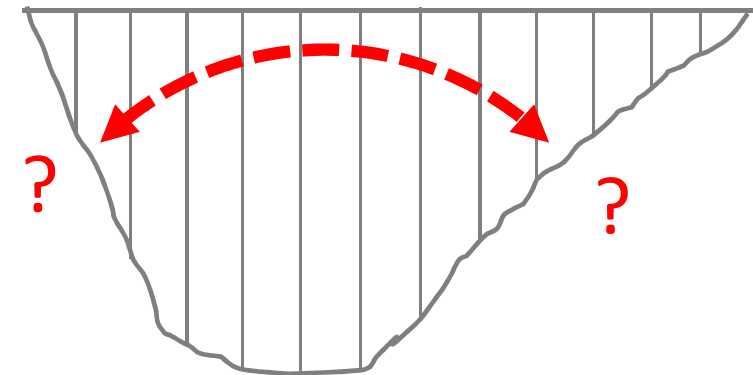




# Arch dams

## Barrages-voûtes

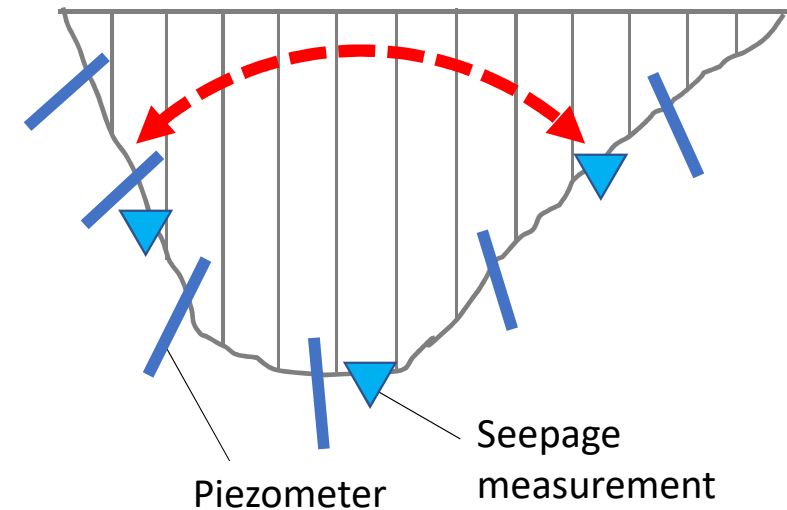
2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Stability : transfer of the water pressure towards the banks <i>Stabilité : transfert de la poussée vers les appuis</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Stability of the banks <i>Stabilité des appuis</i>	



# Arch dams

## Barrages-voûtes

2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Stability : transfer of the water pressure towards the banks <i>Stabilité : transfert de la poussée vers les appuis</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Stability of the banks <i>Stabilité des appuis</i>	
<b>Relevant monitoring device</b> <i>Instrument adapté</i>	Piezometers in the banks and at the downstream toe <i>Piézomètres dans les appuis et en pied aval</i> Seepage measurement in the banks to check their watertightness <i>Mesure des fuites au droit des appuis pour vérifier leur étanchéité</i>	



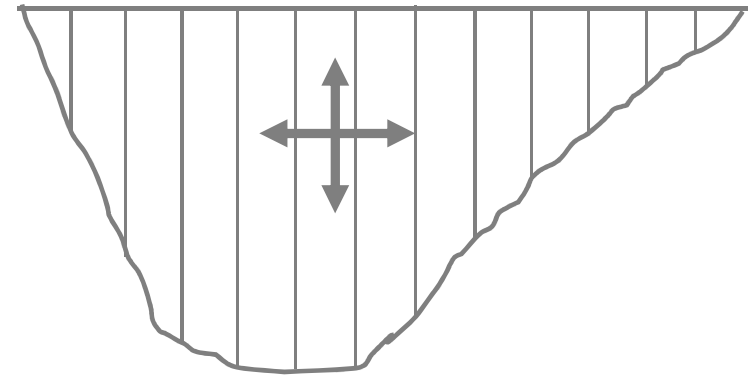
# Arch dams

## *Barrages-voûtes*

3

**Particularity of the dam**  
*Particularité du barrage*

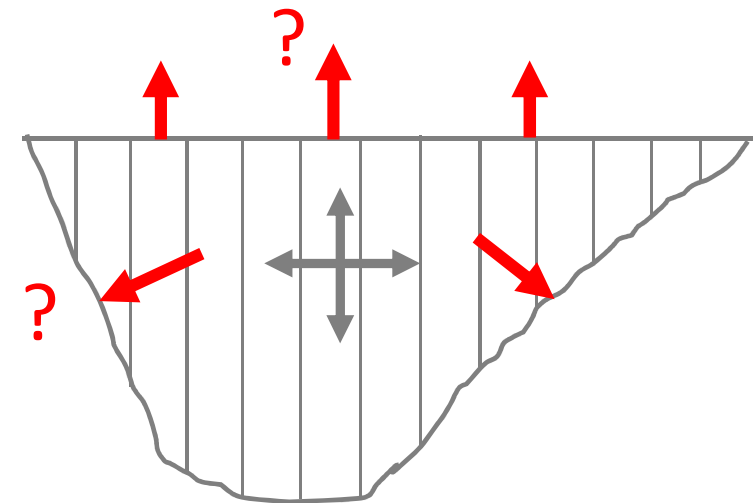
Concrete dam subject to swelling  
*Barrage en béton sujet au gonflement*



# Arch dams

## Barrages-voûtes

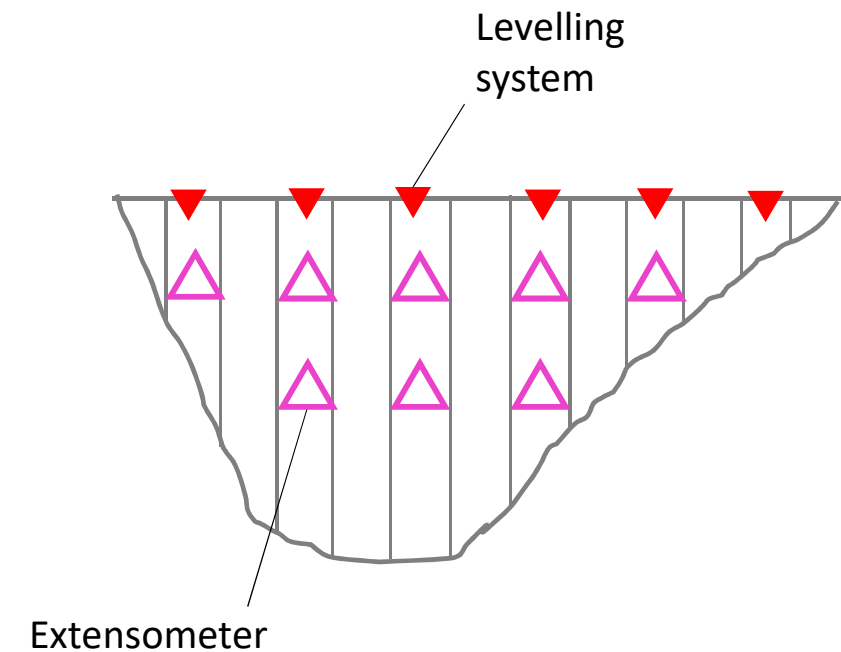
3	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Concrete dam subject to swelling <i>Barrage en béton sujet au gonflement</i>
	<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the long-term displacements and concrete strain <i>Contrôler à long terme les déplacements et les déformations dans le béton</i>



# Arch dams

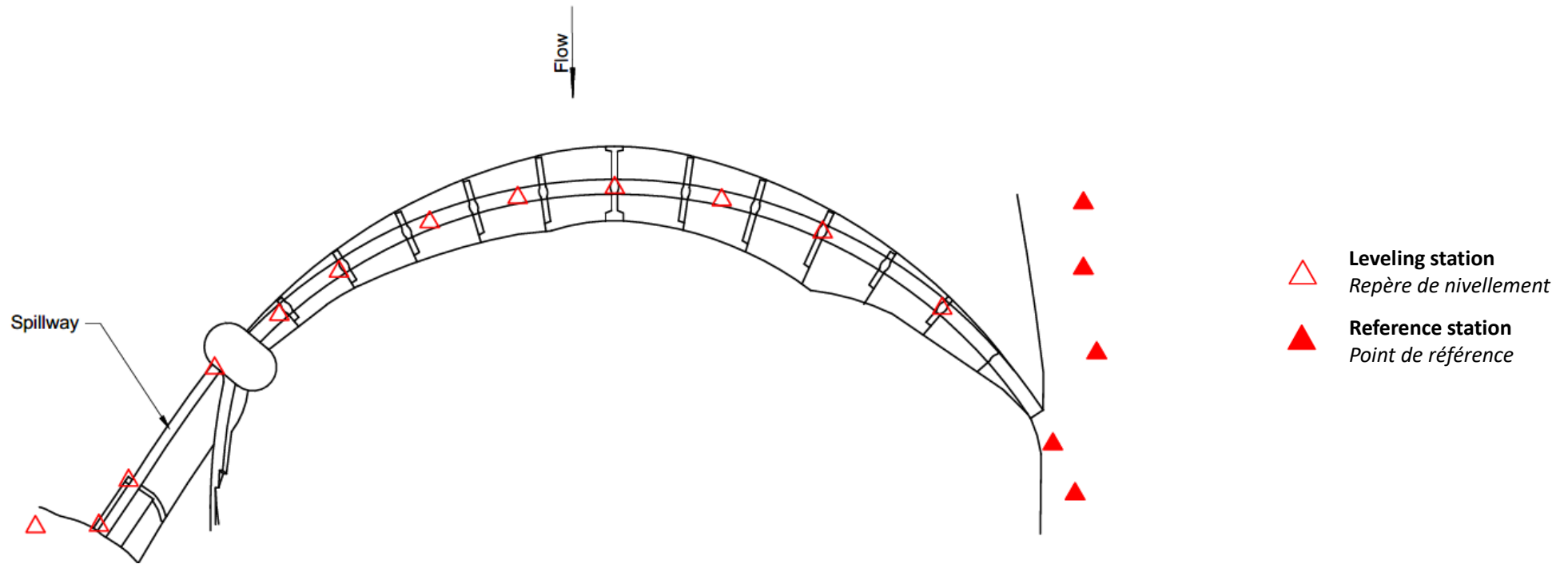
## Barrages-voûtes

3	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Concrete dam subject to swelling <i>Barrage en béton sujet au gonflement</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the long-term displacements and concrete strain <i>Contrôler à long terme les déplacements et les déformations dans le béton</i>	
<b>Relevant monitoring device</b> <i>Instrument adapté</i>	Vibrating wires or extensometers <i>Cordes vibrantes ou extensomètres</i>  Levelling system <i>Mesures de nivellement</i>	



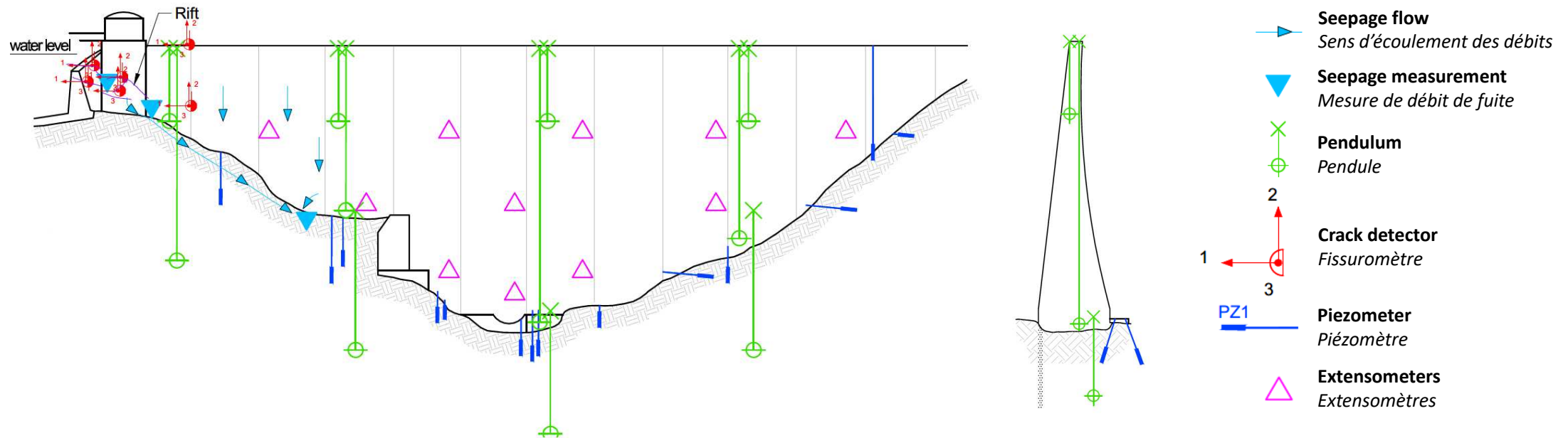
# Arch dams - example

## *Barrages-voûtes - exemple*



# Arch dams - example

## Barrages-voûtes - exemple



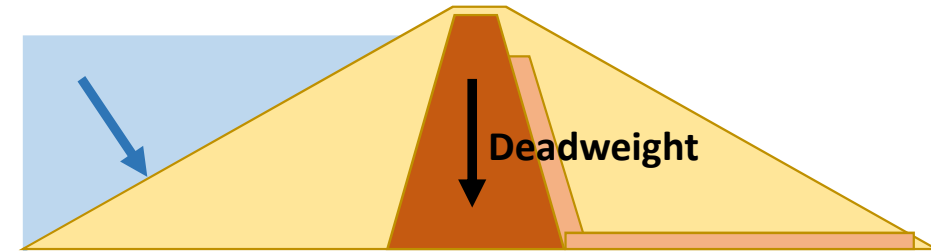
# Earthfill dams

## *Barrages en remblai*

1

**Particularity of the dam**  
*Particularité du barrage*

Long-term settlement due to  
deadweight and water pressure  
*Tassement à long terme dû au poids-  
propre et à la poussée de l'eau*

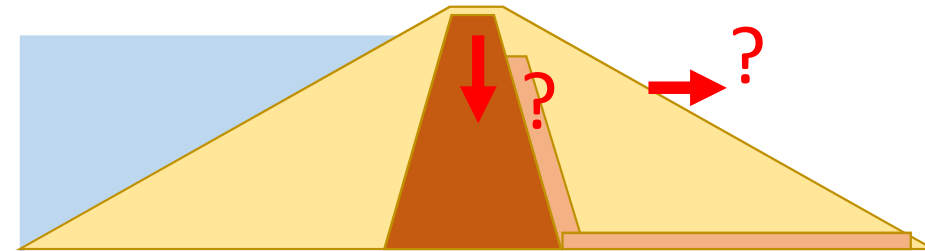




# Earthfill dams

## *Barrages en remblai*

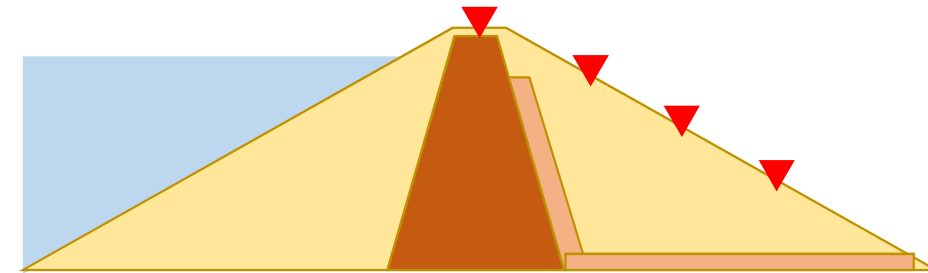
1	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Long-term settlement due to deadweight and water pressure <i>Tassement à long terme dû au poids-propre et à la poussée de l'eau</i>
	<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the displacements of the crest and the d/s face <i>Mesurer les déplacements de la crête et du parement aval</i>



# Earthfill dams

## *Barrages en remblai*

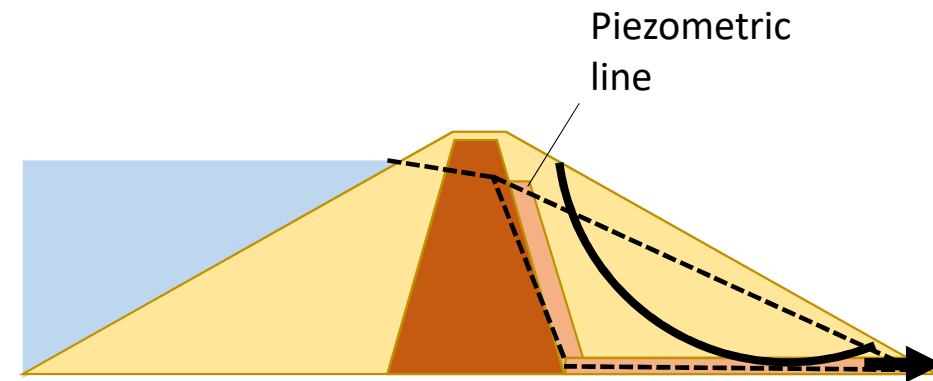
1	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Long-term settlement due to deadweight and water pressure <i>Tassement à long terme dû au poids-propre et à la poussée de l'eau</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the displacements of the crest and the d/s face <i>Mesurer les déplacements de la crête et du parement aval</i>	
<b>Relevant monitoring device</b> <i>Instrument adapté</i>	Surveying system (levelling, planimetry) <i>Réseau topographique (nivellement, planimétrie)</i>	



# Earthfill dams

## *Barrages en remblai*

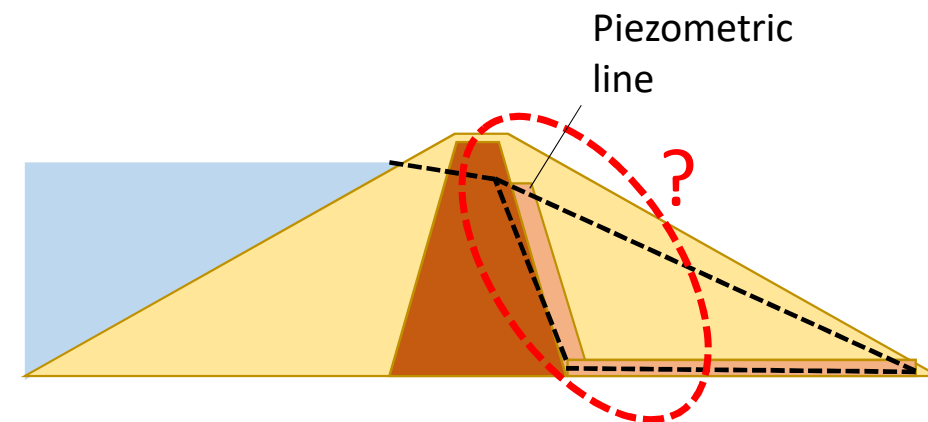
2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Failure modes : hydraulic fracturation / erosion / sliding <i>Mécanisme de rupture : fracturation hydraulique / érosion / glissement</i>
---	--	---



# Earthfill dams

## *Barrages en remblai*

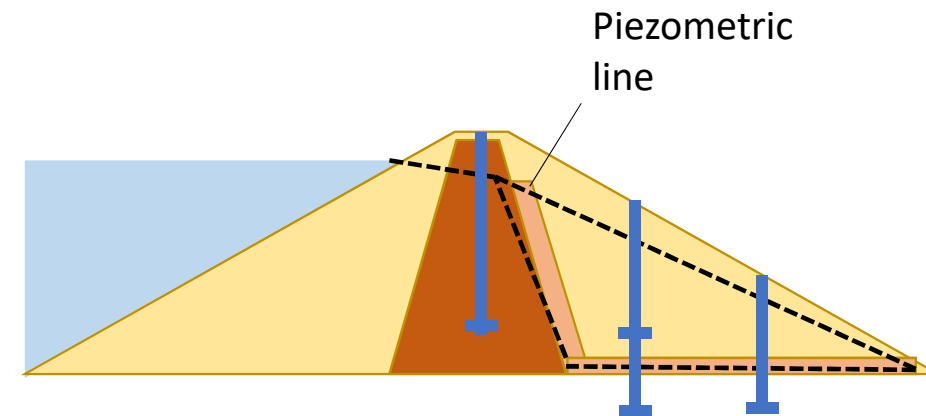
2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Failure modes : hydraulic fracturation / erosion / sliding <i>Mécanisme de rupture : fracturation hydraulique / érosion / glissement</i>
	Issue <i>Problématique</i>	Check the piezometry <i>Vérifier la piézométrie</i>



# Earthfill dams

## *Barrages en remblai*

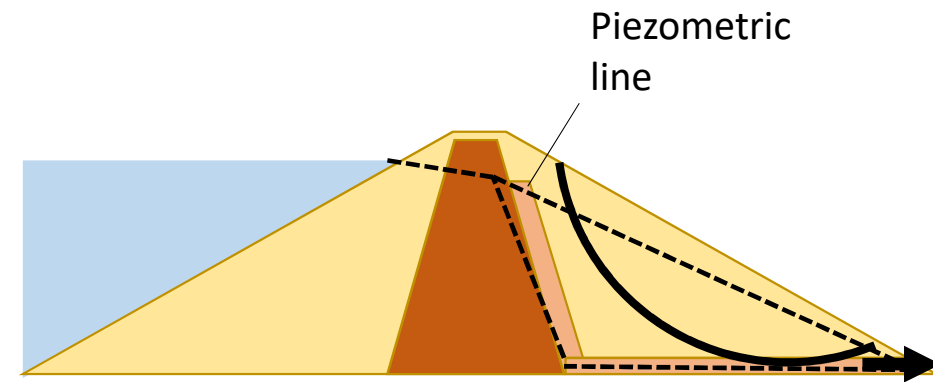
2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Failure modes : hydraulic fracturation / erosion / sliding <i>Mécanisme de rupture : fracturation hydraulique / érosion / glissement</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the piezometry <i>Vérifier la piézométrie</i>	
<b>Relevant monitoring device</b> <i>Instrument adapté</i>	Piezometers and/or pore pressure cells in the dam and in the foundation <i>Piézomètres et/ou cellules de pression interstitielles dans le barrage et la fondation</i>	



# Earthfill dams

## *Barrages en remblai*

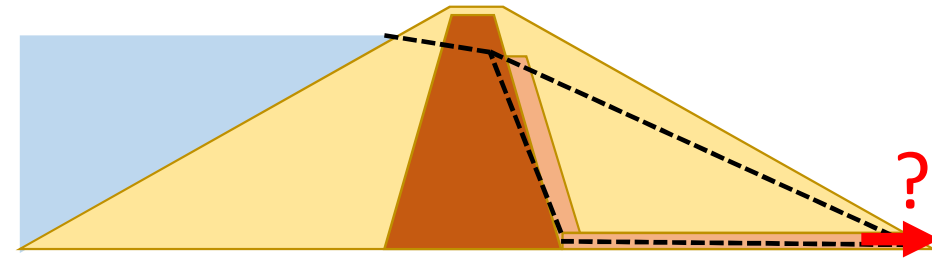
2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Failure modes : hydraulic fracturation / erosion / sliding <i>Mécanisme de rupture : fracturation hydraulique / érosion / glissement</i>
---	--	---



# Earthfill dams

## *Barrages en remblai*

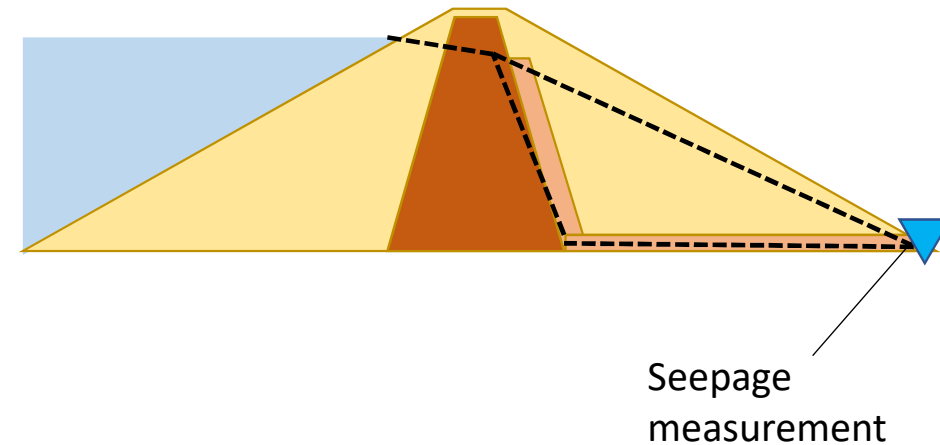
2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Failure modes : hydraulic fracturation / erosion / sliding <i>Mécanisme de rupture : fracturation hydraulique / érosion / glissement</i>
	<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the seepage & solids transport <i>Vérifier les écoulements interne et le transport solide</i>



# Earthfill dams

## *Barrages en remblai*

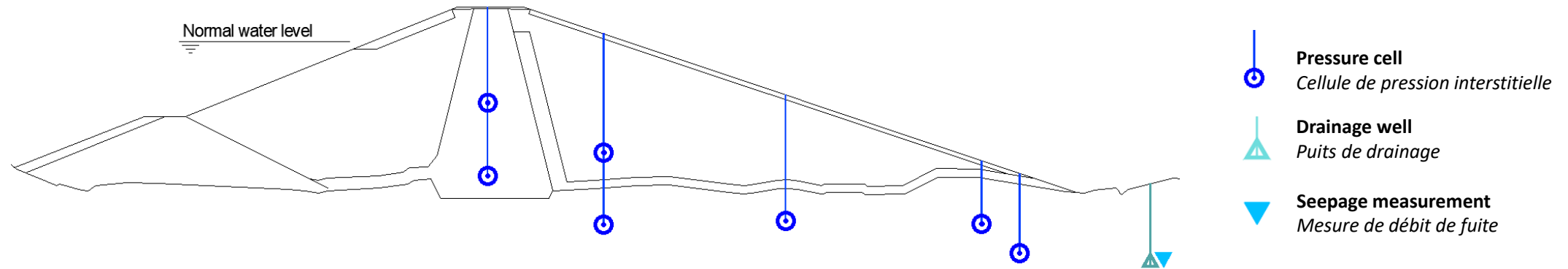
2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Failure modes : hydraulic fracturation / erosion / sliding <i>Mécanisme de rupture : fracturation hydraulique / érosion / glissement</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the seepage & solids transport <i>Vérifier les écoulements interne et le transport solide</i>	
<b>Relevant monitoring device</b> <i>Instrument adapté</i>	Seepage measurement <i>Mesure des débits de fuites</i>	





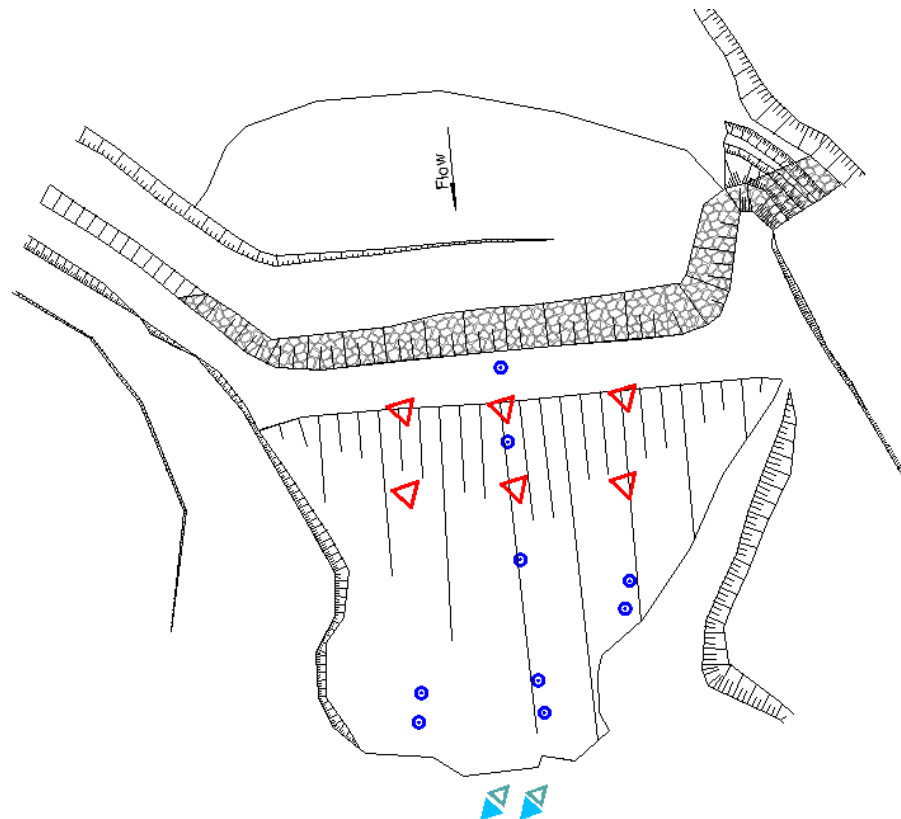
# Earthfill dams – example





## *Barrages en remblai – exemple*



# Earthfill dams – example

## *Barrages en remblai – exemple*



-  **Leveling station**  
*Repère de nivellement*
-  **Pressure cell**  
*Cellule de pression interstitielle*
-  **Drainage well**  
*Puits de drainage*
-  **Seepage measurement**  
*Mesure de débit de fuite*

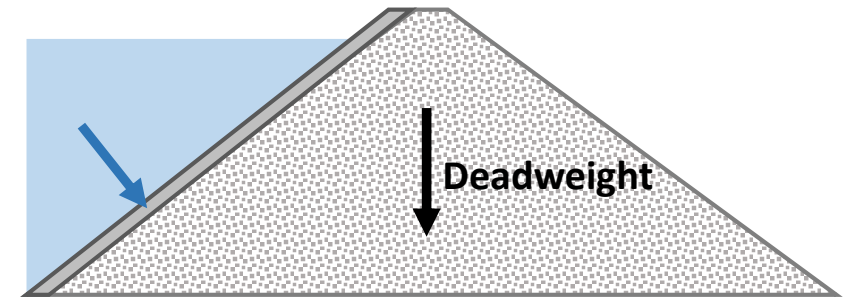
# Rockfill dam with facing

*Barrages en enrochements à masque amont*

1

**Particularity of the dam**  
*Particularité du barrage*

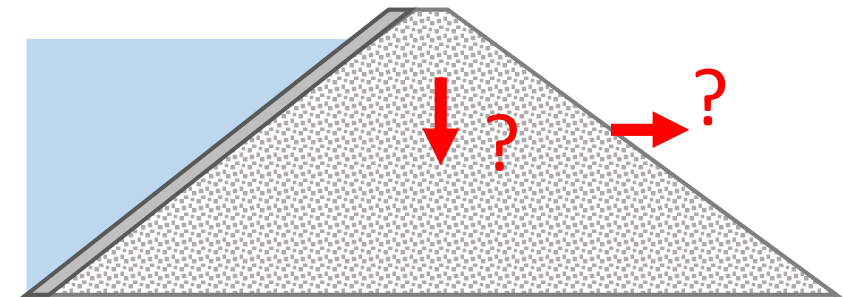
Long-term settlement due to  
deadweight and water pressure  
*Tassement à long terme dû au poids-  
propre et à la poussée de l'eau*



# Rockfill dam with facing

*Barrages en enrochements à masque amont*

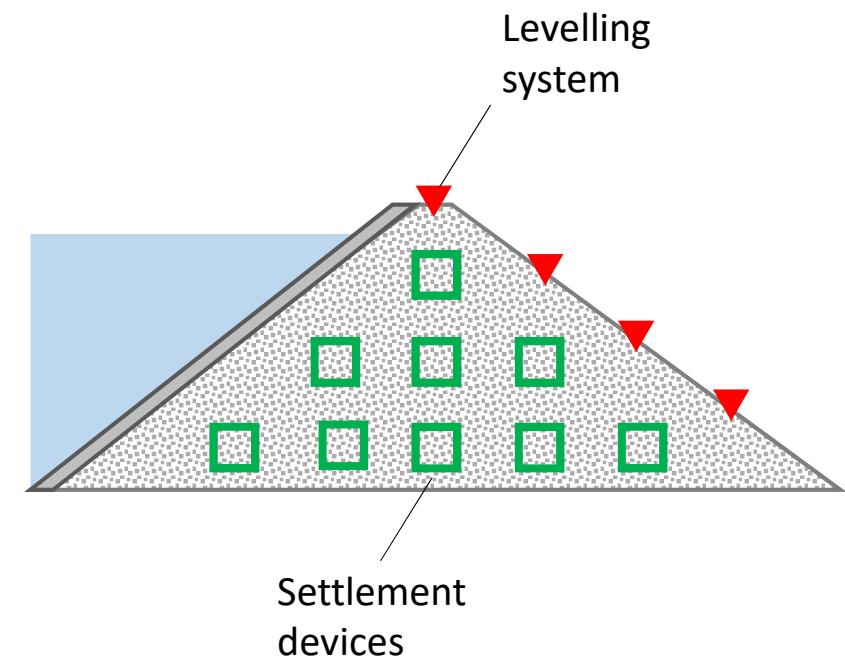
1	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Long-term settlement due to deadweight and water pressure <i>Tassement à long terme dû au poids-propre et à la poussée de l'eau</i>
	<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the displacements of the crest and the d/s face <i>Mesurer les déplacements de la crête et du parement aval</i>



# Rockfill dam with facing

*Barrages en enrochements à masque amont*

1	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Long-term settlement due to deadweight and water pressure <i>Tassement à long terme dû au poids-propre et à la poussée de l'eau</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the displacements of the crest and the d/s face <i>Mesurer les déplacements de la crête et du parement aval</i>	
<b>Relevant monitoring device</b> <i>Instrument adapté</i>	Surveying system (levelling, planimetry) <i>Réseau topographique (nivellement, planimétrie)</i>  Settlement devices in the rockfill <i>Mesure du tassement dans les enrochements</i>	



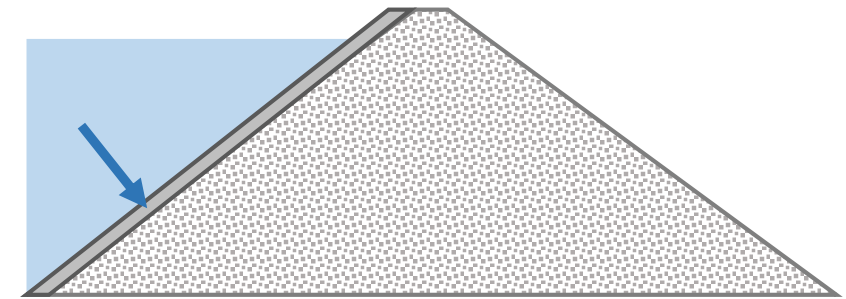
# Rockfill dam with facing

*Barrages en enrochements à masque amont*

2

**Particularity of the dam**  
*Particularité du barrage*

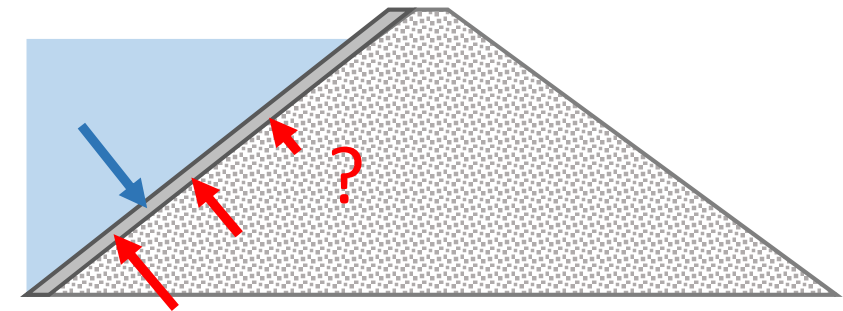
**Facing: must be stable and watertight**  
*Masque : doit être stable et étanche*



# Rockfill dam with facing

*Barrages en enrochements à masque amont*

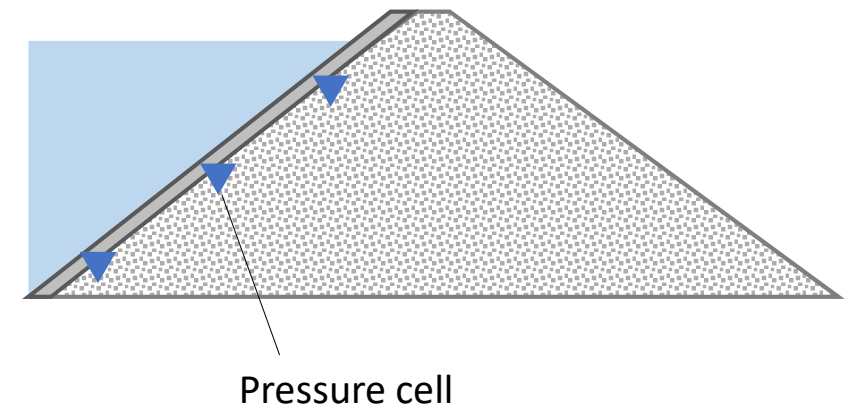
2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Facing: must be stable and watertight <i>Masque : doit être stable et étanche</i>
	<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the uplift (especially in case of emptying of the reservoir) <i>Vérifier les sous-pressions (en cas de vidange notamment)</i>



# Rockfill dam with facing

*Barrages en enrochements à masque amont*

2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Facing: must be stable and watertight <i>Masque : doit être stable et étanche</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the uplift (especially in case of emptying of the reservoir) <i>Vérifier les sous-pressions (en cas de vidange notamment)</i>	
<b>Relevant monitoring device</b> <i>Instrument adapté</i>	Pressure cells under the facing <i>Cellules de pression sous le masque</i>	

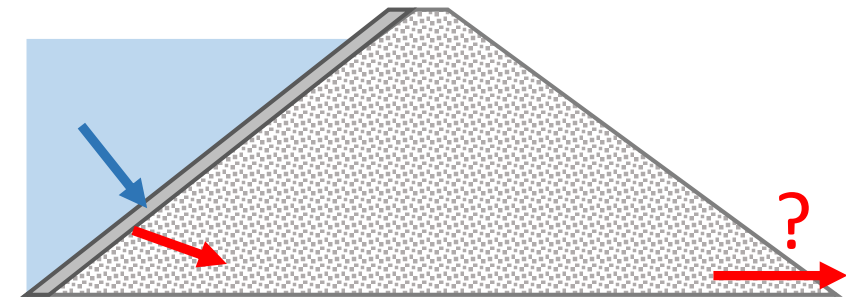




# Rockfill dam with facing

*Barrages en enrochements à masque amont*

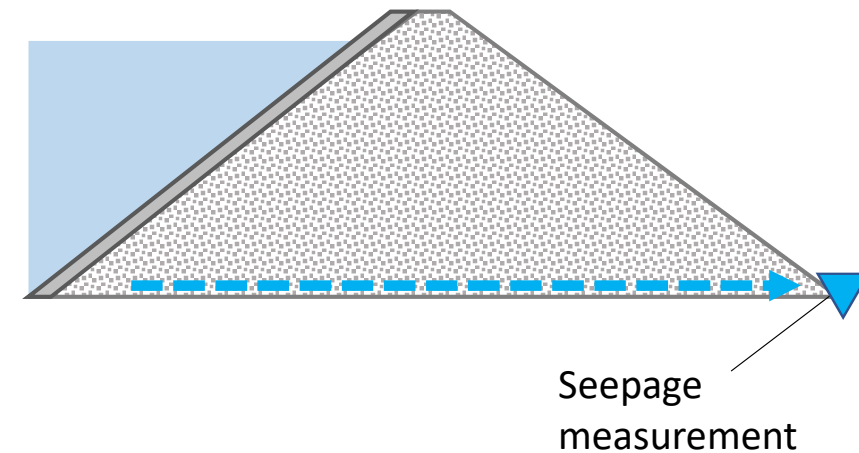
2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Facing: must be stable and watertight <i>Masque : doit être stable et étanche</i>
	<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the seepage <i>Vérifier les fuites</i>



# Rockfill dam with facing

*Barrages en enrochements à masque amont*

2	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Facing: must be stable and watertight <i>Masque : doit être stable et étanche</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the seepage <i>Vérifier les fuites</i>	
<b>Relevant monitoring device</b> <i>Instrument adapté</i>	Drainage collector + seepage measurement <i>Collecteur de fuites + mesures de débit</i>	



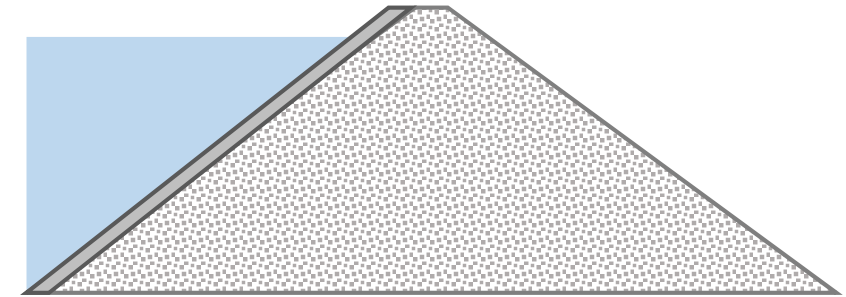
# Rockfill dam with facing

*Barrages en enrochements à masque amont*

3

**Particularity of the dam**  
*Particularité du barrage*

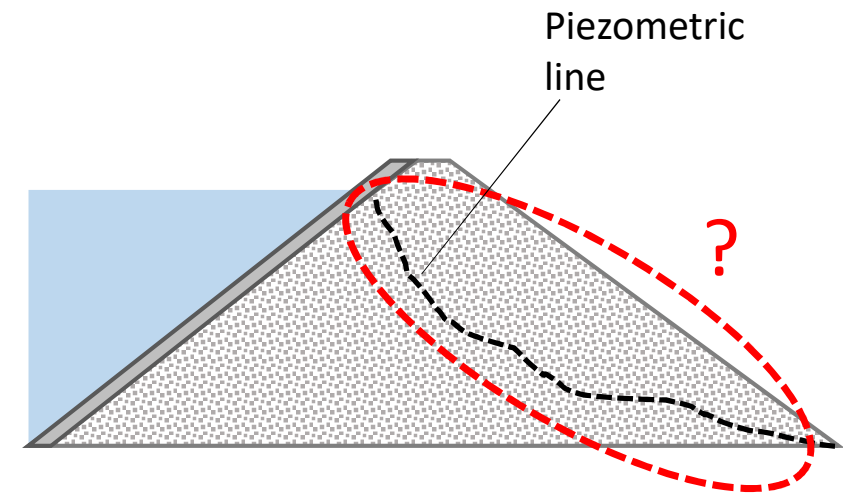
Rockfill: dry (low piezometry)  
*Enrochements : secs (piézométrie bien rabattue)*



# Rockfill dam with facing

*Barrages en enrochements à masque amont*

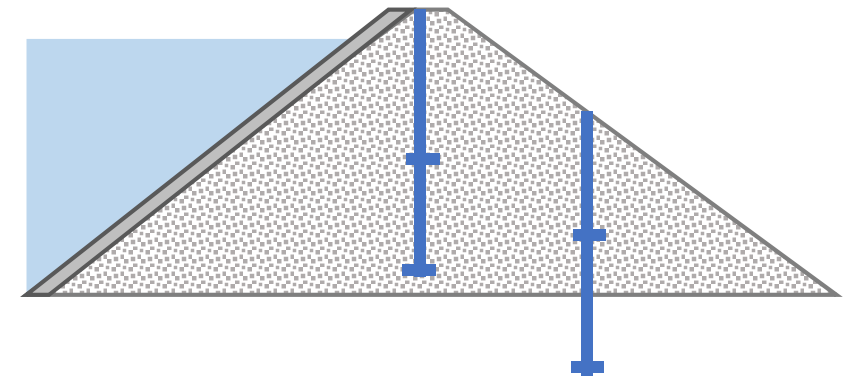
3	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Rockfill: dry (low piezometry) <i>Enrochements : secs (piézométrie bien rabattue)</i>
	<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the piezometry <i>Vérifier la piézométrie</i>



# Rockfill dam with facing

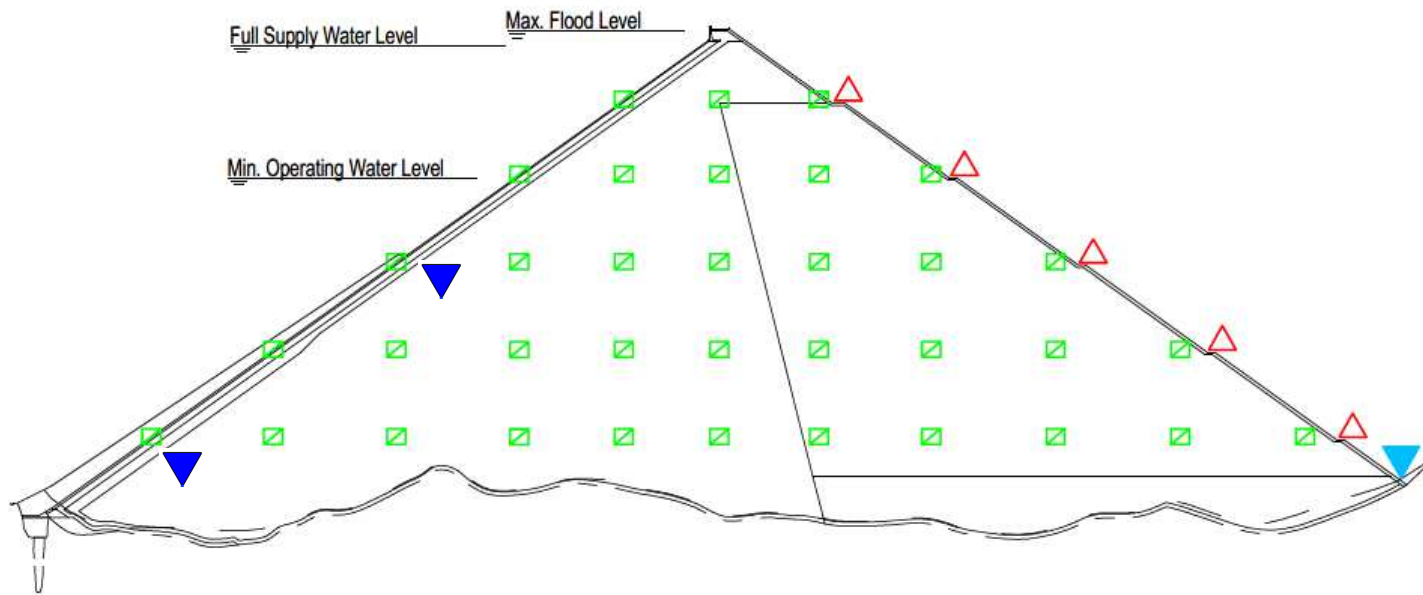
*Barrages en enrochements à masque amont*





3	<b>Particularity of the dam</b> <i>Particularité du barrage</i>	Rockfill: dry (low piezometry) <i>Enrochements : secs (piézométrie bien rabattue)</i>
<b>Issue</b> <i>Problématique</i>	Check the piezometry <i>Vérifier la piézométrie</i>	
<b>Relevant monitoring device</b> <i>Instrument adapté</i>	Piezometers in the rockfill <i>Piézomètres dans les enrochements</i>	



# Rockfill dam with facing – example

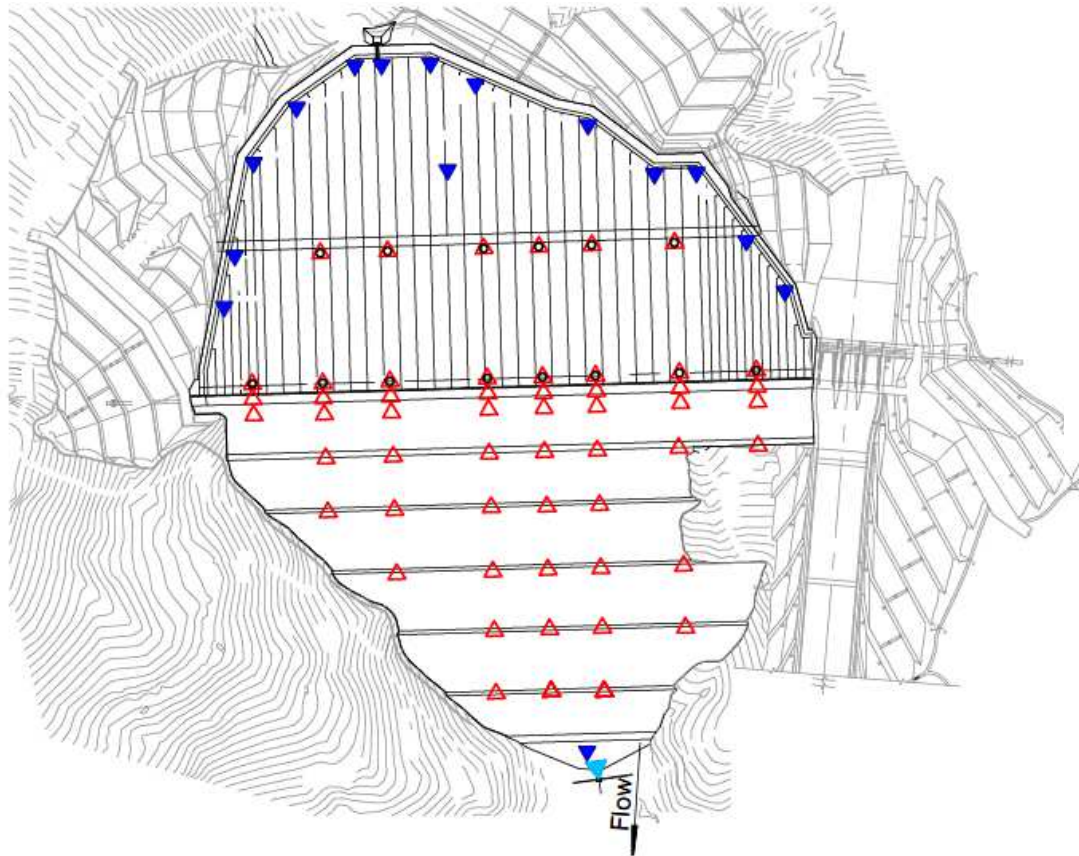
*Barrages à masque amont – exemple*



-  **Survey and levelling station**  
*Repère topo et de nivellement*
-  **Piezometer**  
*Piézomètre*
-  **Seepage measurement**  
*Mesure de débit de fuite*
-  **Settlement device**  
*Mesure de tassement*

# Rockfill dam with facing – example

*Barrages à masque amont – exemple*



- △ Survey and levelling station  
*Repère topo et de nivellement*
- ▼ Piezometer / pressure cells  
*Piézomètre / cellules de pression*
- ▼ Seepage measurement  
*Mesure de débit de fuite*