

Thème B : Critères de conception

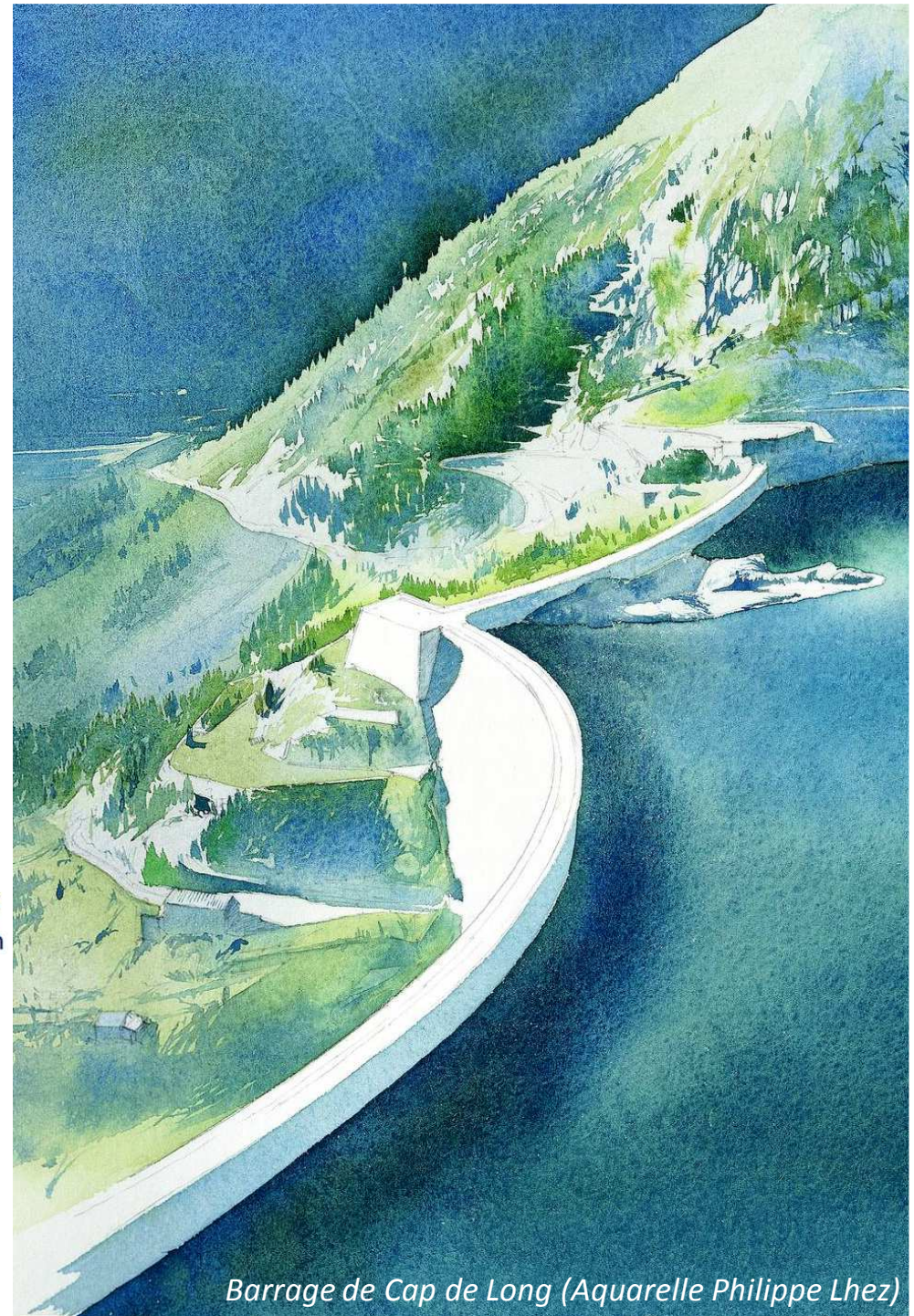
# Analyse structurale d'un barrage circulaire construit dans un massif argileux

**Auteurs :**

**Keyvan Maleki et Joseph Chahde**



Colloque CFBR – Fondations des Barrages  
8 et 9 avril 2015 – Chambéry



*Barrage de Cap de Long (Aquarelle Philippe Lhez)*

# Sommaire

## 1. Introduction

## 2. Cellule ICOS

Traitement de la fondation  
Barrage circulaire

## 3. Analyse structurale

Interaction sol-structure  
Analyse de stabilité

## 4. État actuel

Comportement dans le temps  
Résultats d'auscultation

## 5. Vérification des analyses

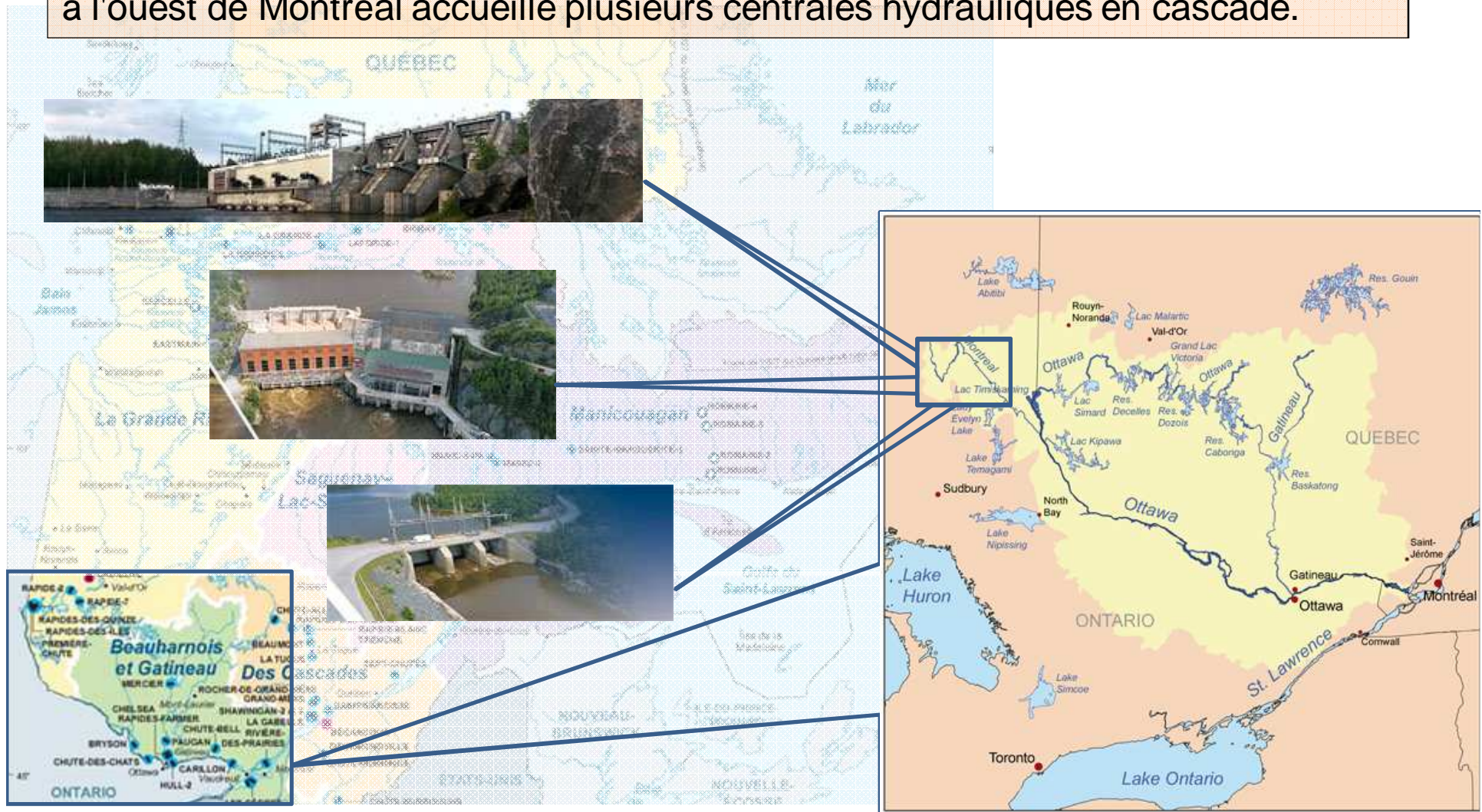
Modélisation numérique

## 6. Conclusion



# Introduction

La rivière des Outaouais, l'une des plus longues rivières du Canada ( $\approx 1200$  km) à l'ouest de Montréal accueille plusieurs centrales hydrauliques en cascade.



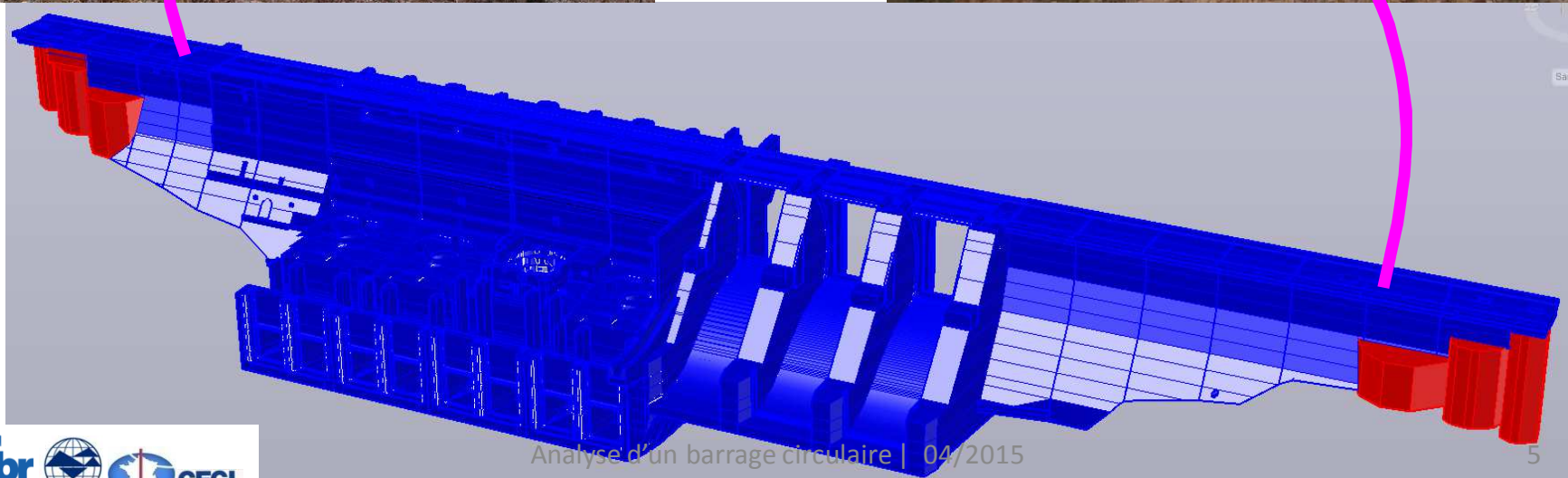
# Contexte

- L'un de ces aménagements possède une centrale construite sur le fond rocheux au centre de la rivière. Les deux barrages-poids situés aux deux extrémités de la centrale sont butés sur les rives composées principalement d'un massif argileux d'une épaisseur de plus de 20 m avec le risque de glissement.
- De plus, une couche mince de sable séparant le dépôt argileux de la roche en profondeur constituait une préoccupation quant aux infiltrations susceptibles de contourner les barrages-poids.

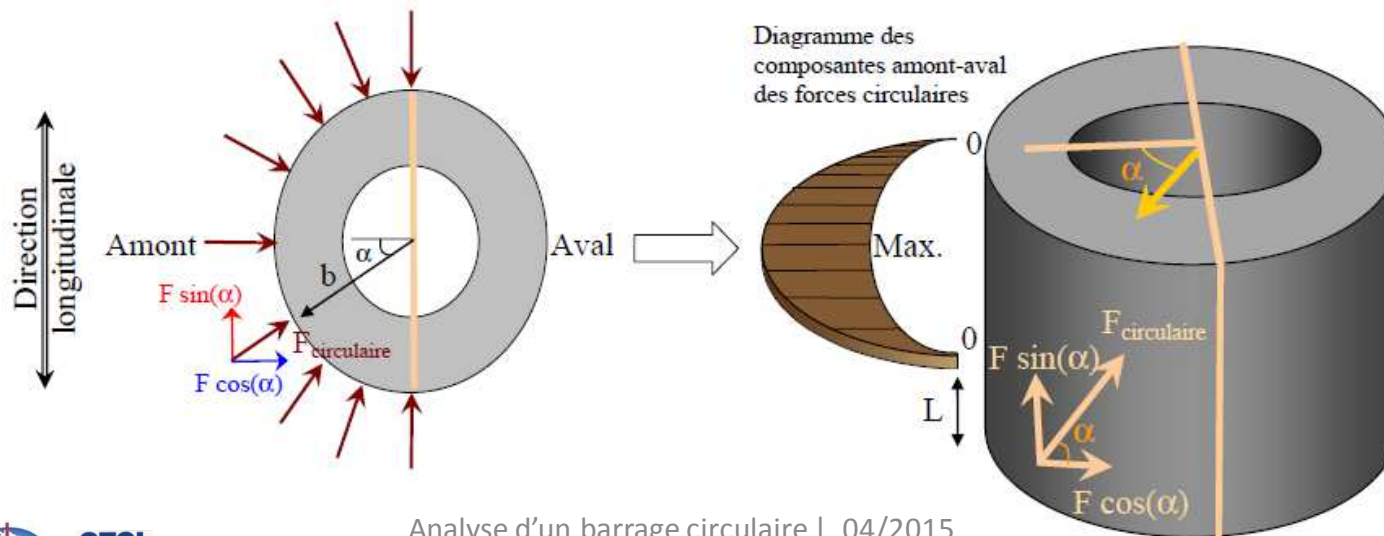
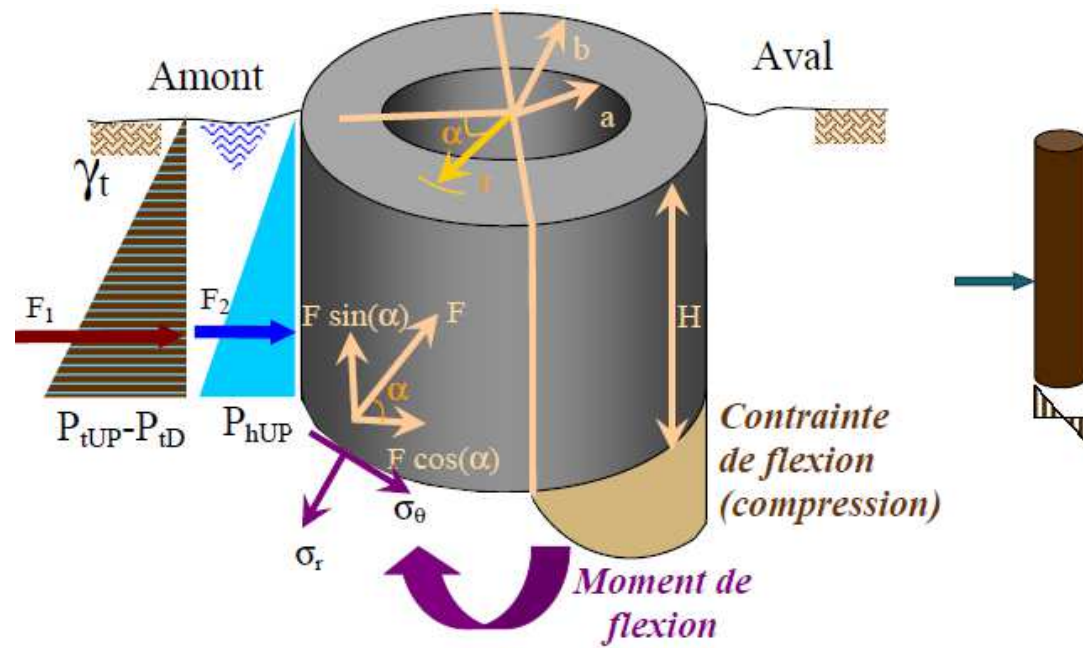


# Cellules ICOS

Afin d'éviter une excavation volumineuse et risquée, une conception novatrice a été proposée par Casagrande → mise en place de trois cellules cylindriques (ICOS) aux extrémités de l'aménagement dans le massif argileux, construites avec la technique de la paroi moulée.



# Interaction sol-structure



# Analyse de stabilité

Géométrie de la grande cellule rive droite		
a (m) = 6.10	r (m) = (a+b)/2 = 6.48	H <sub>ext.</sub> (m) = 10.50
b (m) = 6.86	niveau supérieur (m) = 196.60	H <sub>int.</sub> (m) = 9.00
Poids volumique du béton (kN/m³) = 23.54	Volume de cellule (m³) = 325.61	
Épaisseur de la dalle supérieure (m) = 1.50	Vol. de la dalle sup. (m³) = 175.12	
Poids total de la cellule plus la dalle (kN) = 11789.15		t (m) = (b-a) = 0.76
Surface d'appui de cellule (m²) = 29.19		I = Moment Inertie (m⁴) = 650.47

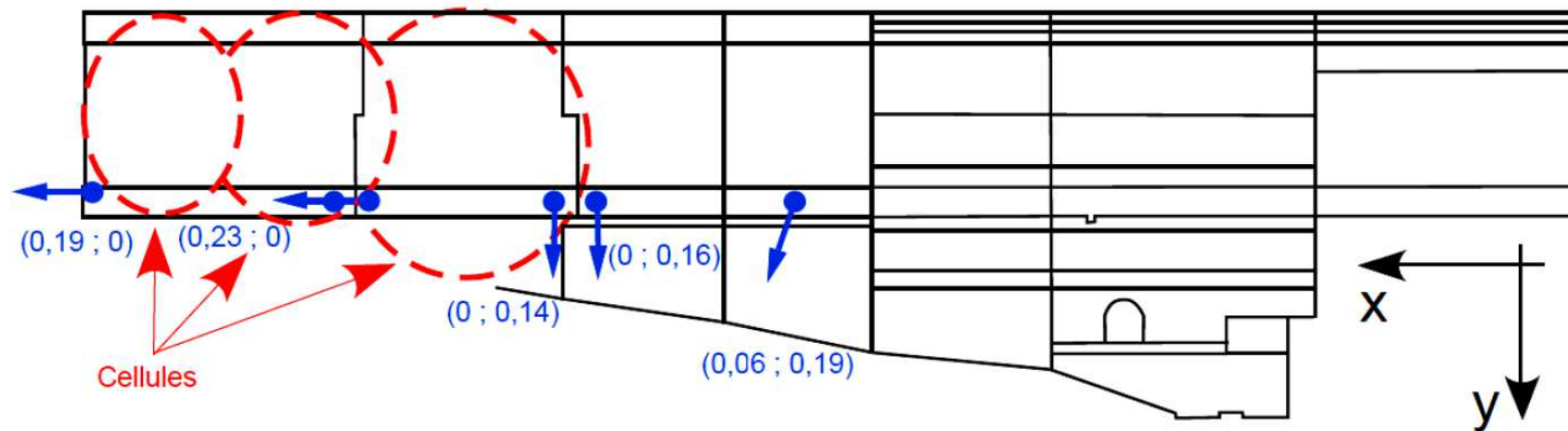
Géométrie du barrage-poids sur la cellule	
Niveau de la crête (m) = 204.20	H <sub>barrage-poids</sub> = 7.60
Largeur amont-aval (m) = 6.71	Volume du BP (m³) = 711.64
Largeur de crête (m) = 7.32	Poids du BP (kN) = 16754.93
F <sub>Gl</sub> = Poussée de la glace (kN) = 1371.60	Bras de levier glace (m) = 15.53
M <sub>Gl</sub> = Moment de la glace (kN.m) = 21300.95	Largeur du BP = 2xr (m) = 13.72

Calculs hydrauliques	
Niveau du réservoir (m) = 201.93	P <sub>hUP2</sub> = Pression en haut de cellule (kPa) = 52.29
P <sub>U</sub> = Sous pression (kPa) = P <sub>hUP1</sub> = 155.29	P <sub>hUP1</sub> = Pression à la fondation (kPa) = 155.29
F <sub>circulaire hydraulique</sub> = Force résultante radiale due à la pression (kN/m) : 1089.79	
F <sub>totale circulaire</sub> = 2xF <sub>circulaire hydraulique</sub> xr (kN) = 14117.18	H <sub>eau</sub> = 15.83
L <sub>hc</sub> = bras de levier de la pression de cellule (m) = 4.38	L <sub>hc</sub> = $\frac{H}{3} \frac{P_{hUP1} + 2P_{hUP2}}{P_{hUP1} + P_{hUP2}}$
M <sub>hc</sub> = Moment hydrostatique de la cellule (kN.m) = 61856.05	
F <sub>hydraulique barrage-poids</sub> (kN) = 1911.26	L <sub>hBP</sub> = bras de levier de la pression du BP (m) = 12.28
M <sub>hBP</sub> = Moment hydrostatique du BP (kN.m) = 23463.96	
F <sub>totale hydraulique</sub> (kN) = 16028.44	M <sub>h</sub> = Moment hydrostatique (kN.m) = 85320.02

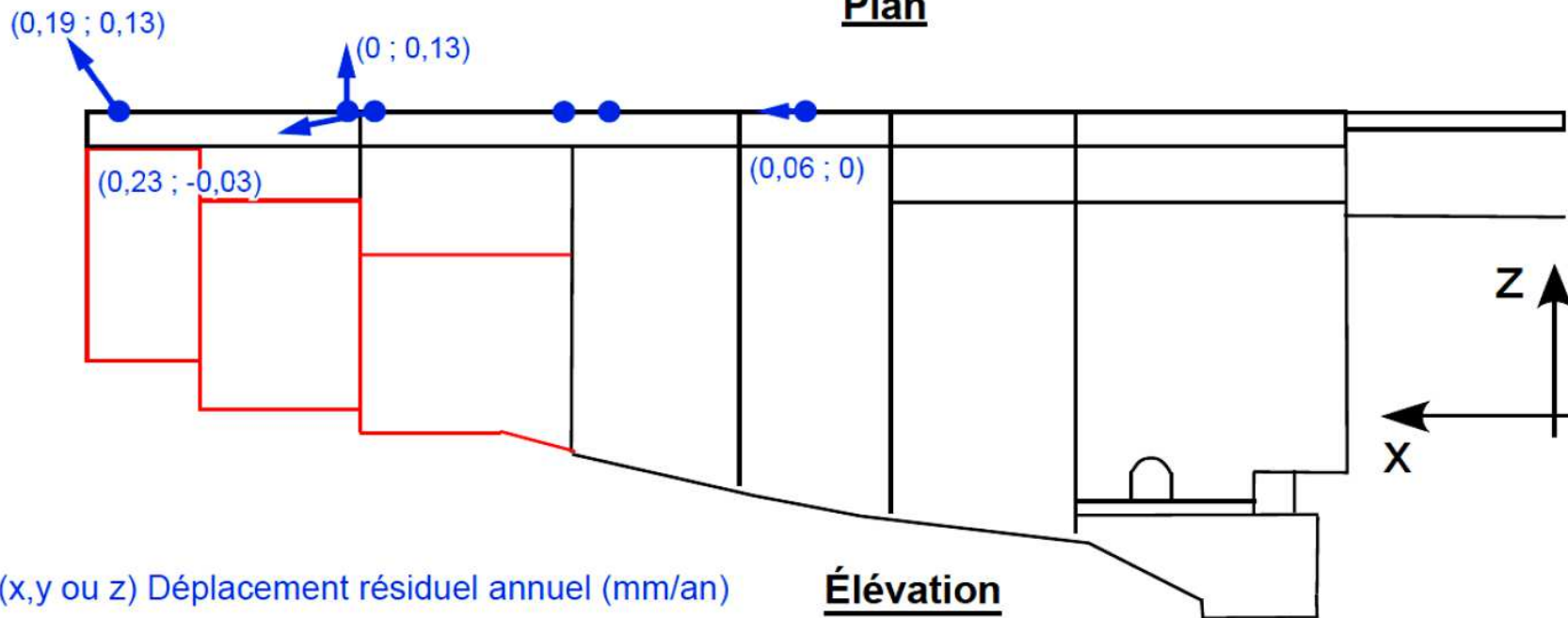
Calculs Géotechniques	
Niveau moyen du remblai (m) = 198.12	H <sub>remblai</sub> = 12.02
Densité du sol (kN/m³) = 18.64	Densité déjaugée (kN/m³) = 8.83
Angle de frottement de l'argile saturé (φ°) = 15	Coef. de poussée au repos = 0.74
K <sub>r</sub> = (1-sinφ)	
<b>Condition du remblai en amont</b>	
P <sub>hUP2</sub> = Pression en haut de cellule (kPa) = 9.95	P <sub>hUP1</sub> = Pression à la fondation (kPa) = 78.66
F <sub>circulaire géotechnique</sub> = Force résultante radiale due à la pression (kN/m) = 465.17	
F <sub>totale circulaire</sub> = 2xF <sub>circulaire géotechnique</sub> xr (kN) = 6025.84	
L <sub>GC</sub> = bras de levier de press. géot. de la cell. (m) = 3.89	L <sub>GC</sub> = $\frac{H}{3} \frac{P_{hUP1} + 2P_{hUP2}}{P_{hUP1} + P_{hUP2}}$
MG = Moment Géotechnique de la cellule (kN.m) = 23458.05	
F <sub>Géotechnique barrage-poids</sub> (kN) = 103.69	L <sub>GBP</sub> = bras de levier de la géotech. du BP (m) = 11.01
M <sub>GBP</sub> = Moment Géotechnique du BP (kN.m) : 1141.24	
F <sub>totale géot. amont</sub> (kN) = 6129.53	M <sub>G1</sub> = Moment Géotech. amont (kN.m) : 24599.29

Condition du remblai en aval	
P <sub>hD2</sub> = Pression en haut de cellule (kPa) = 21.00	P <sub>hD1</sub> = Pression à la fondation (kPa) = 166.05
F <sub>circulaire géotechnique</sub> = Force résultante radiale due à la pression (kN/m) = 982.03	
F <sub>totale circulaire</sub> = 2xF <sub>circulaire géotechnique</sub> xr (kN) = 12721.22	
MG = Moment Géotechnique de la cellule (kN.m) = 49522.56	
F <sub>Géotechnique barrage-poids</sub> (kN) = 218.89	M <sub>GBP</sub> = Moment Géotechnique du BP (kN.m) : 2409.28
F <sub>totale géot. aval</sub> (kN) = 12940.11	M <sub>G2</sub> = Moment Géotech. aval (kN.m) = 51931.84

# État actuel des cellules - Auscultation



Plan

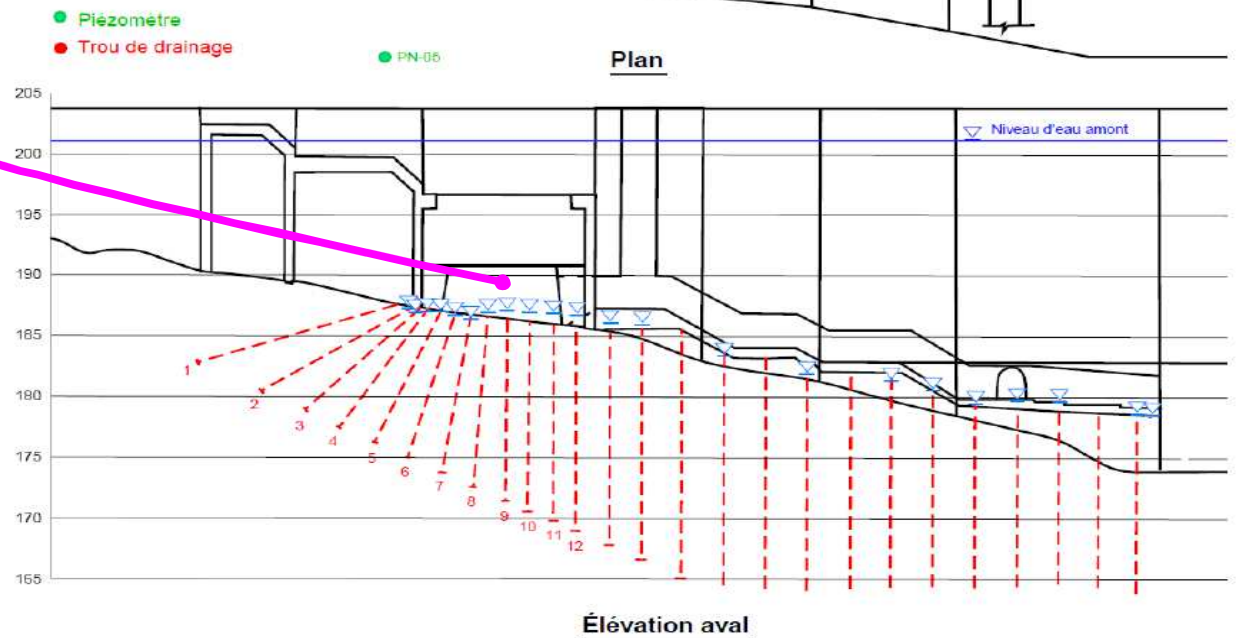
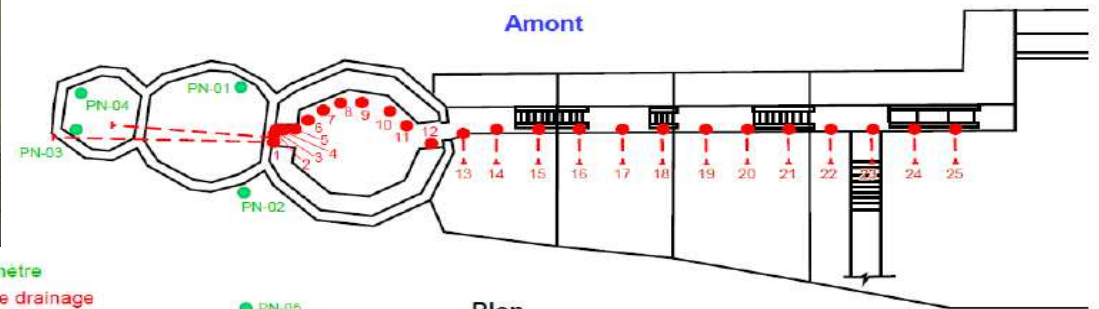


Élévation

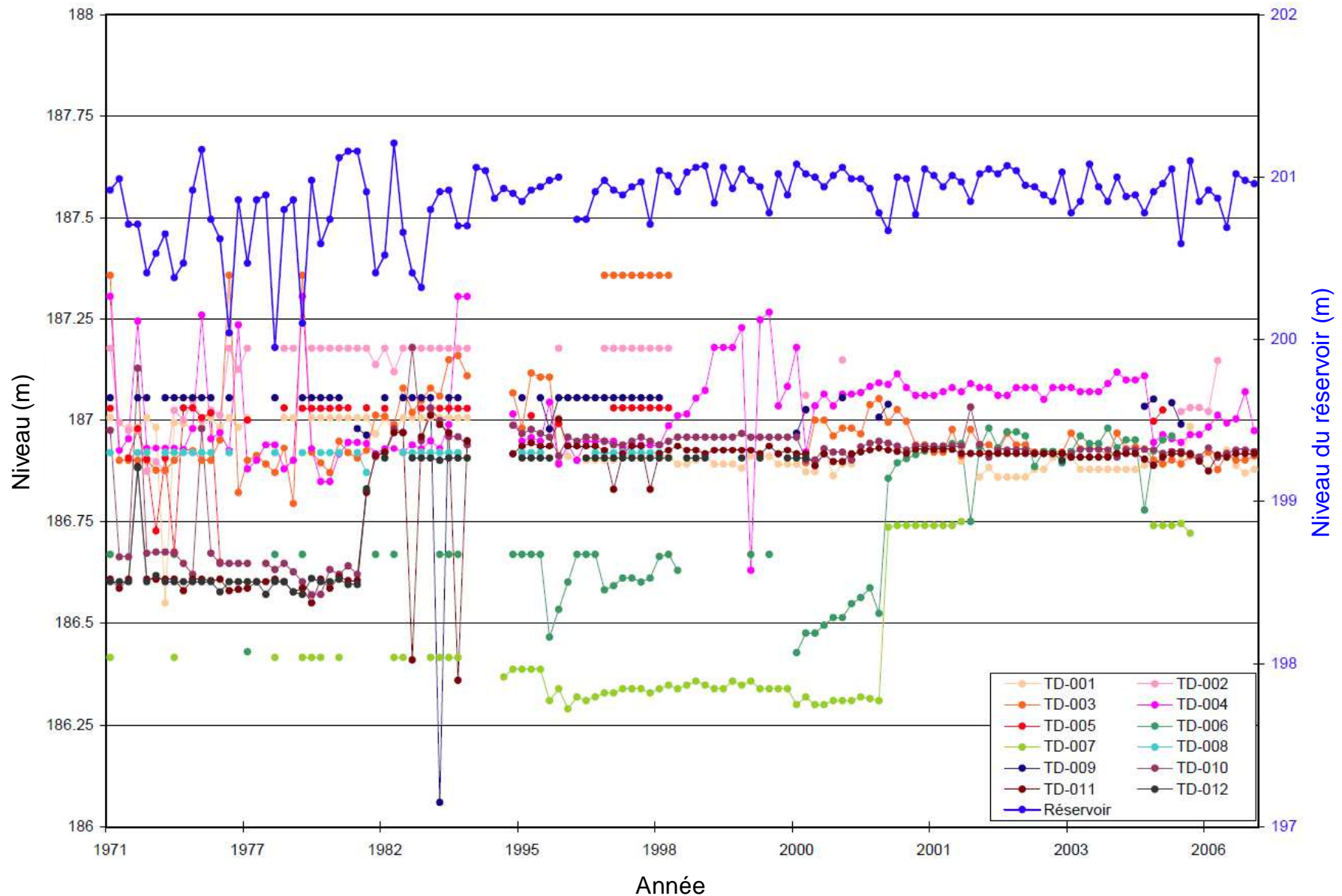
(x,y ou z) Déplacement résiduel annuel (mm/an)



# État actuel des cellules - Drainage

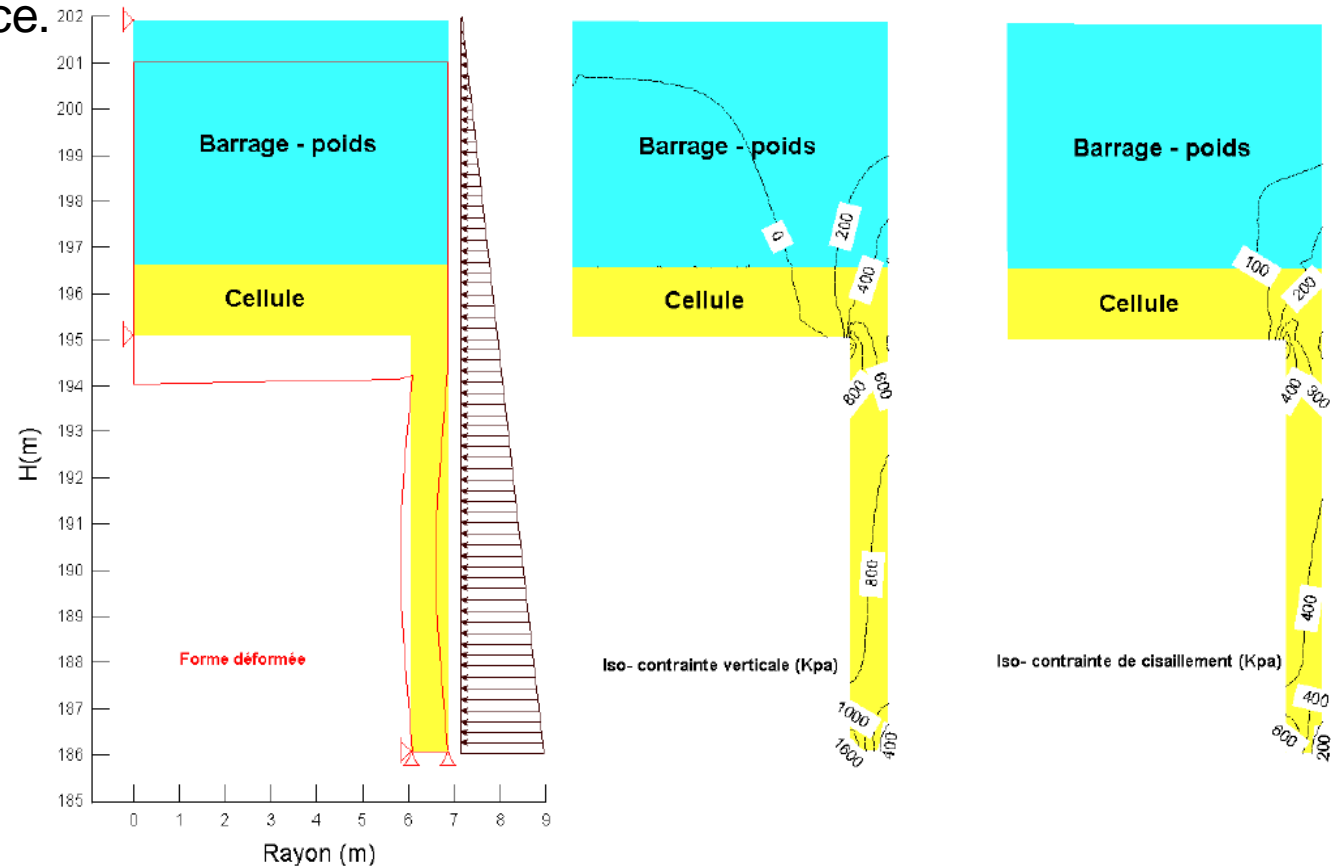


# État actuel des cellules - Drainage



# Analyse numérique

- Modèle axisymétrique simple d'éléments finis occupant un radian.
- La masse du barrage-poids impliquée sur la cellule est ainsi ajustée.
- Seule la structure en béton a été discrétisée (modèle rhéologique élastique linéaire).
- Poussée de Coulomb du massif argileux sur une paroi de béton lisse.
- Aucun élément interface.



# Conclusion

- Une technique novatrice pour implanter des structures massives sur des fondations de type argileux de capacité portante limitée a été présentée.
- Cette conception a permis de diminuer le volume d'excavation dans le dépôt argileux et de le garder en place sans le remanier.
- En même temps, cette technique élimine le risque de glissement dans l'argile sensible tout en assurant la capacité portante nécessaire contre les charges appliquées.
- L'article présente une vérification de l'état des contraintes et de la stabilité de la grande cellule.
- En l'absence de données de conception, une analyse reposant sur des hypothèses conservatrices a été réalisée mais la stabilité des cellules répond aux exigences de la norme en vigueur à Hydro-Québec.
- On peut donc conclure que cette conception novatrice a réussi à mettre en œuvre des ouvrages de retenue fiables tout en diminuant le coût de construction.
- La méthode de calcul présentée offre une approche utile pour la conception d'ouvrages de retenue pour lesquels l'interaction entre le sol et la structure joue un rôle important.

