

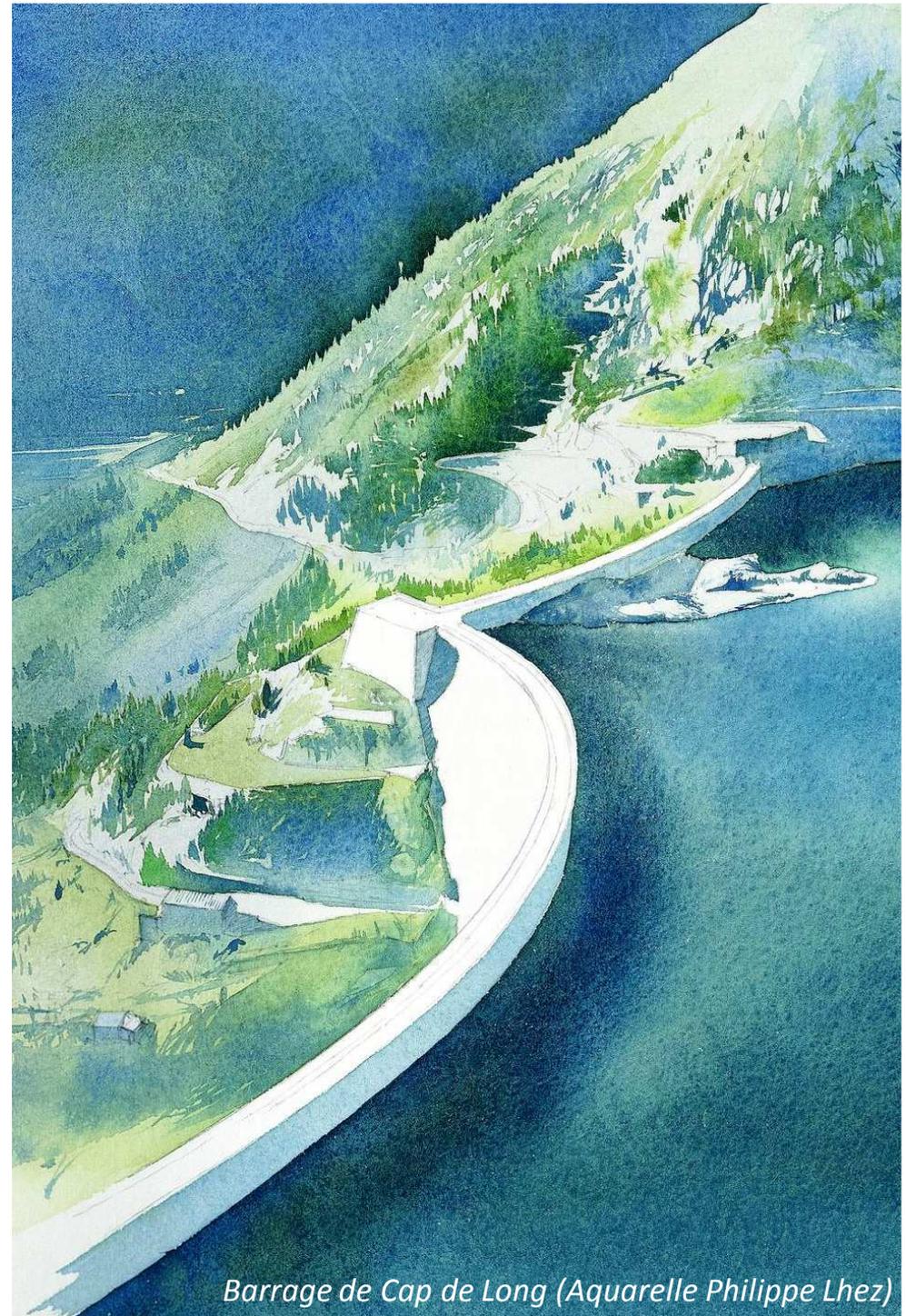


D9 Thème D: Instrumentation et Surveillance des fondations

# Nouvelles analyses du comportement des fondations

Jean-Paul FABRE, Alexandre SIMON,  
Florian MAURIS (EDF DTG)

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



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

# SOMMAIRE

## 1. L'Analyse des données d'auscultation des fondations

Evolution historique des méthodes  
Particularités des fondations

## 2. Les modèles spéciaux d'analyse pour:

Les comportements non-linéaires  
Le comportement élastique différé  
Les phénomènes hydrauliques (piézométrie, débits)  
La piézométrie en fondation rocheuse des voûtes (milieu fissuré)  
Le comportement irréversible

## 3. Conclusion

# Analyse des mesures d'auscultation

## ■ Evolution historique des méthodes de séparation des effets réversibles:

- Modèle historique HST (années 60) Cote, Saison et Temps
  - ❖ **Additif, Linéaire, à variables indépendantes** (méthode des moindres carrés)
- Modèle EFR (années 1990)
  - ❖ Effet retardé de la cote de la retenue (dans les noyaux et les milieux non saturés: nappes, écoulements dans les versants)
- Modèle HSTT (Canicule 2003)
  - ❖ Effet retardé de la température de l'air (sur les voûtes ..)

$$\text{Modèle} = f(H) + f(S) + f(t)$$

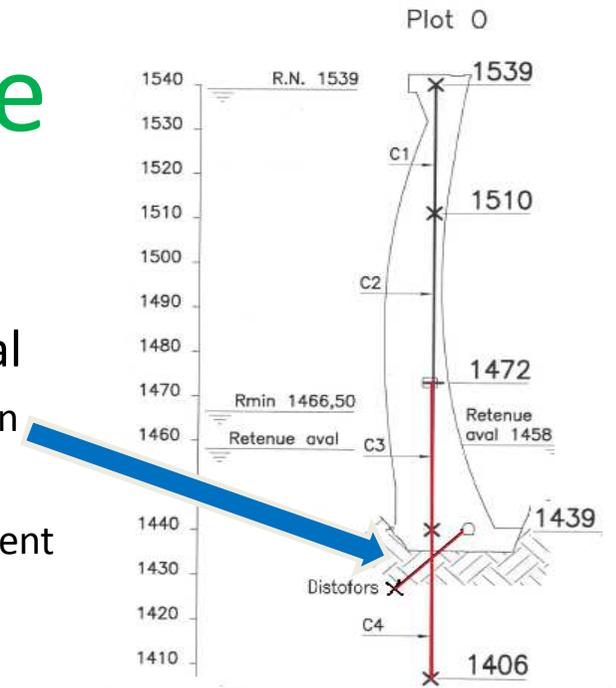
- ❖ Variable retardée ( $T_0$ ) calculée par récurrence 
$$Vr_{(t+dt)} = V_{(t+dt)}(1 - e^{-\frac{dt}{T_0}}) + Vr_{(t)}e^{-\frac{dt}{T_0}}$$

## ■ Particularités des fondations, qui échappent à ces modèles simples:

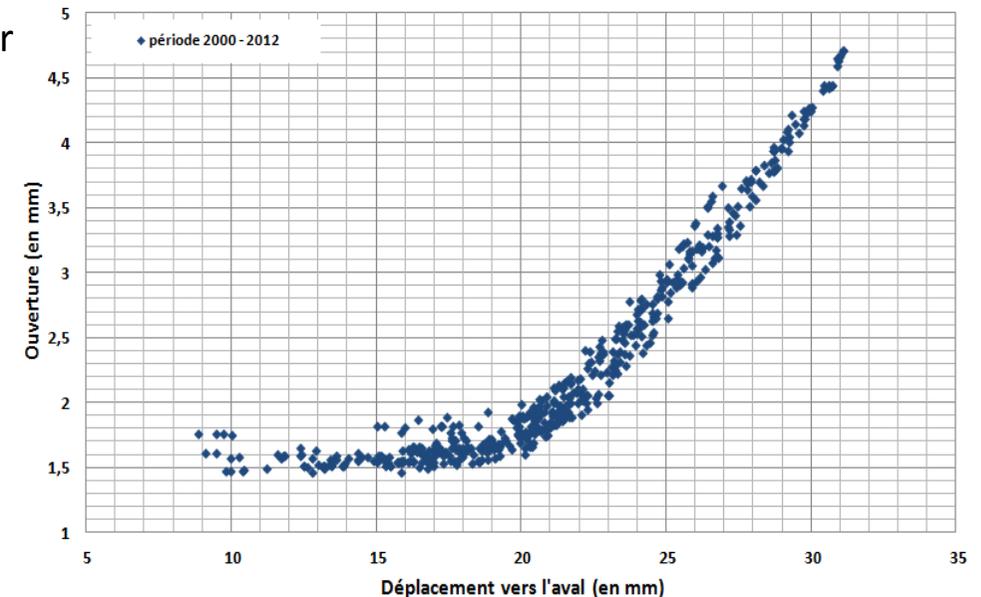
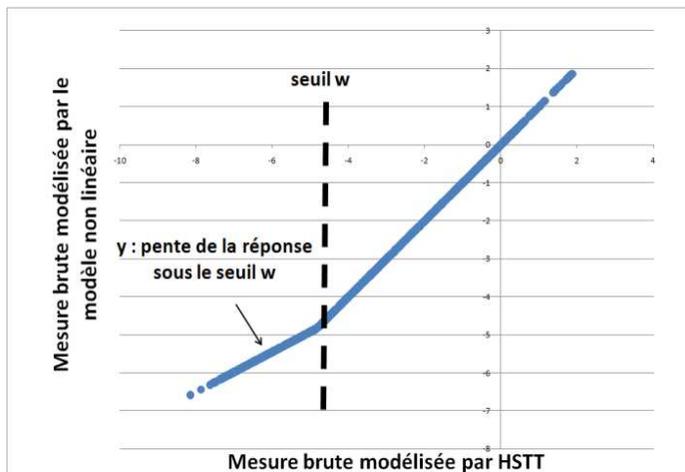
- ❖ Hydraulique en fondation a priori linéaire (Darcy), mais les **variations de perméabilité avec la charge et le temps** fait sortir le comportement de ce contexte
- ❖ Les effets réversibles thermiques vraiment significatifs en fondation sont induits par un mécanisme **thermo-mécanique**, qui peut influencer sur le régime hydraulique par des **variations de perméabilité**
- ❖ La séparation des effets peut donc être difficile essentiellement **pour les fondations rocheuses des voûtes** où de plus l'ouverture du contact induit un comportement non linéaire

# Comportement non-linéaire

- **En Fondation des voûtes en vallée large,**
  - Ouverture du contact béton-rocher en pied central
    - ❖ Mesurée (Distofor) sur les premiers mètres de la fondation
    - ❖ N'est pas linéaire des sollicitations,
    - ❖ Alors que les déplacements vers l'aval eux, le sont quasiment
    - ❖ Le modèle HST n'est pas optimal
- **Nouveau modèle HST – NL (HST Non linéaire)**
  - ❖ Un changement de comportement sur un seuil, est introduit pour améliorer la modélisation



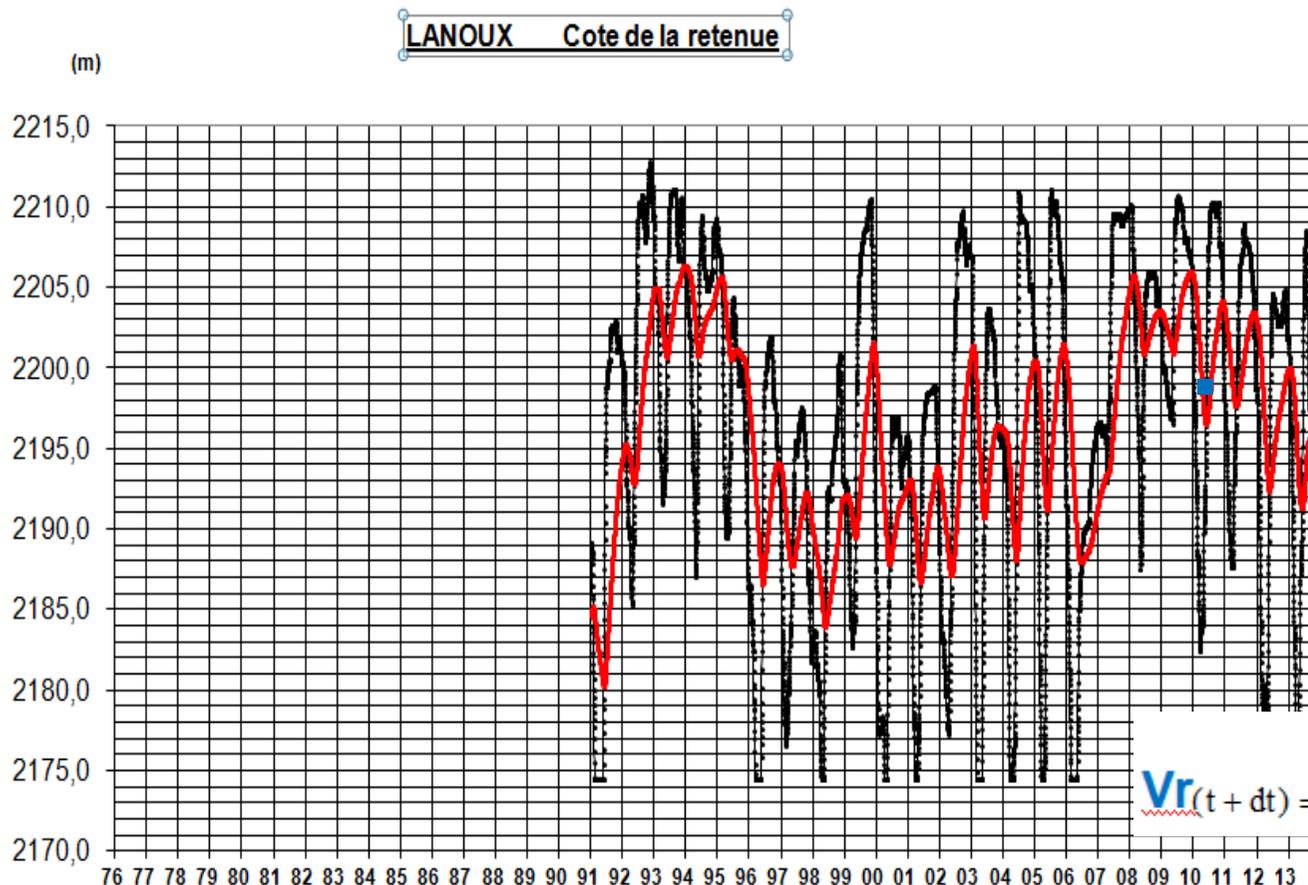
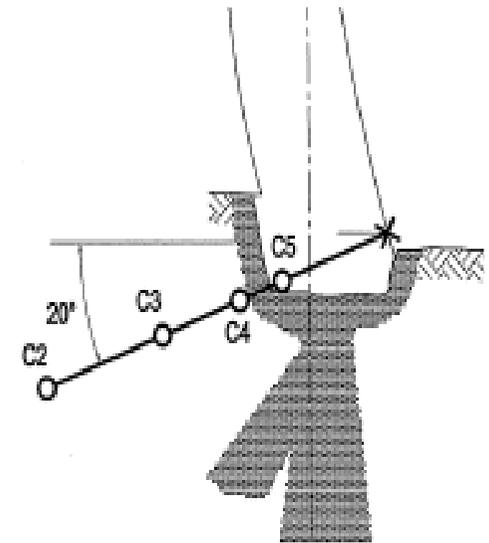
Corrélation entre l'ouverture (C5-C4) du contact et le déplacement vers l'aval mesuré au pendule C4



# Comportement Viscoélastique: modèle HrST

- Fondation schisteuse anisotrope, qui participe au comportement viscoélastique du barrage (cette propriété est mieux connue pour le béton)
  - Ouverture du contact béton-rocher en pied

## Exemple distoform Lanoux plot KL



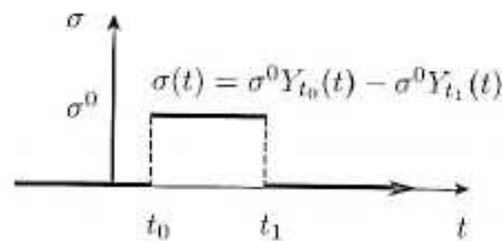
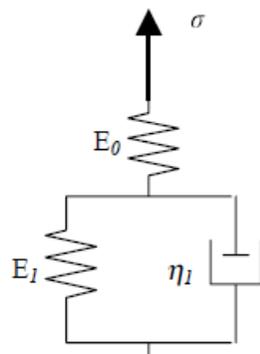
### Effets de la cote :

- ❖ 2/3 Instantané (en noir)
- ❖ 1/3 différé (en rouge)
- Temps caractéristique :  $T_0 = 6$  mois

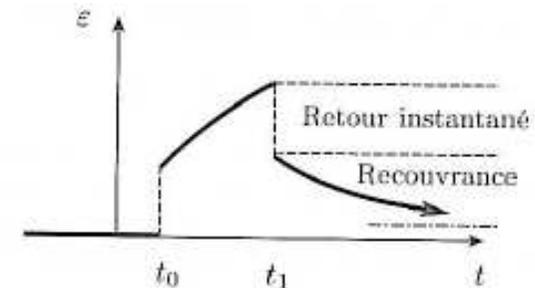
# Comportement Viscoélastique

- L'effet élastique différé est non négligeable (jusqu'à 30 % de l'effet total pour le béton).
- Sa réversibilité traduit la capacité de recouvrance du matériau. (viscoplasticité au cours des premières années)
- **Modèle simple KELVIN-VOIGT (solide linéaire standard) composé de deux ressorts et d'un amortisseur.**

Salençon, J. (2009) *Viscoélasticité pour le calcul des structures*. Éditions de l'École Polytechnique.

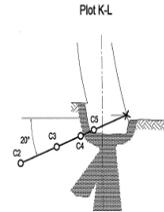


a) Créneau de contrainte

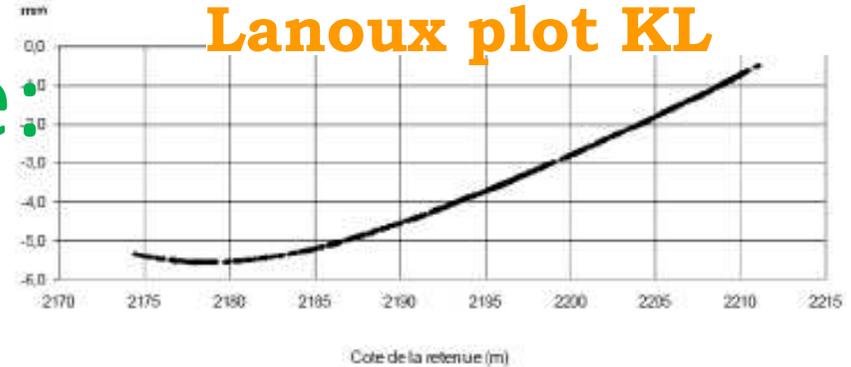


b) Réponse en déformation

# Comportement non linéaire Viscoélastique : modèle HrST NL

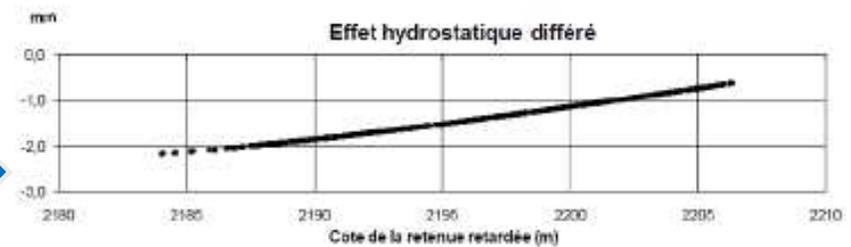


## LANOUX Exemple distoform Lanoux plot KL



### ■ Déformation en ouverture du contact

- Effet Hydrostatique
  - ❖ Une partie (6 mm) en instantané
  - ❖ Une partie (2 mm) en différé

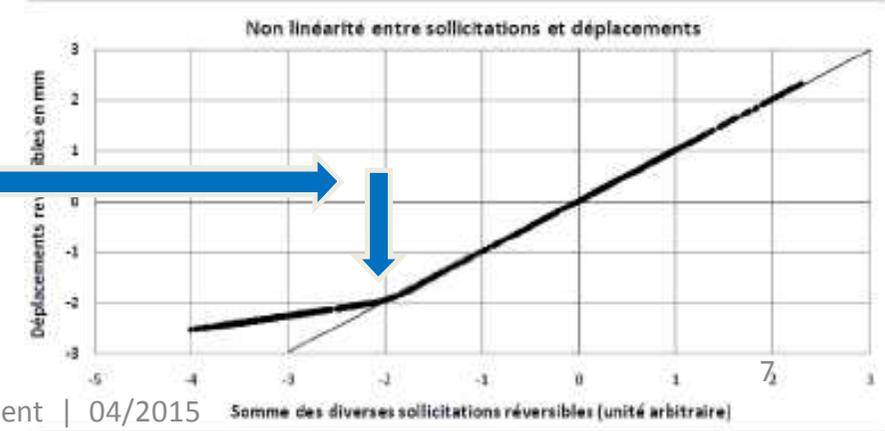


- Effet Saisonnier
  - ❖ 1mm entre Septembre et Février



### ■ Non linéarité:

- ❖ Ouverture au dessus d'un seuil de Sollicitation (passage en traction)



# Comportement non linéaire et Viscoélastique

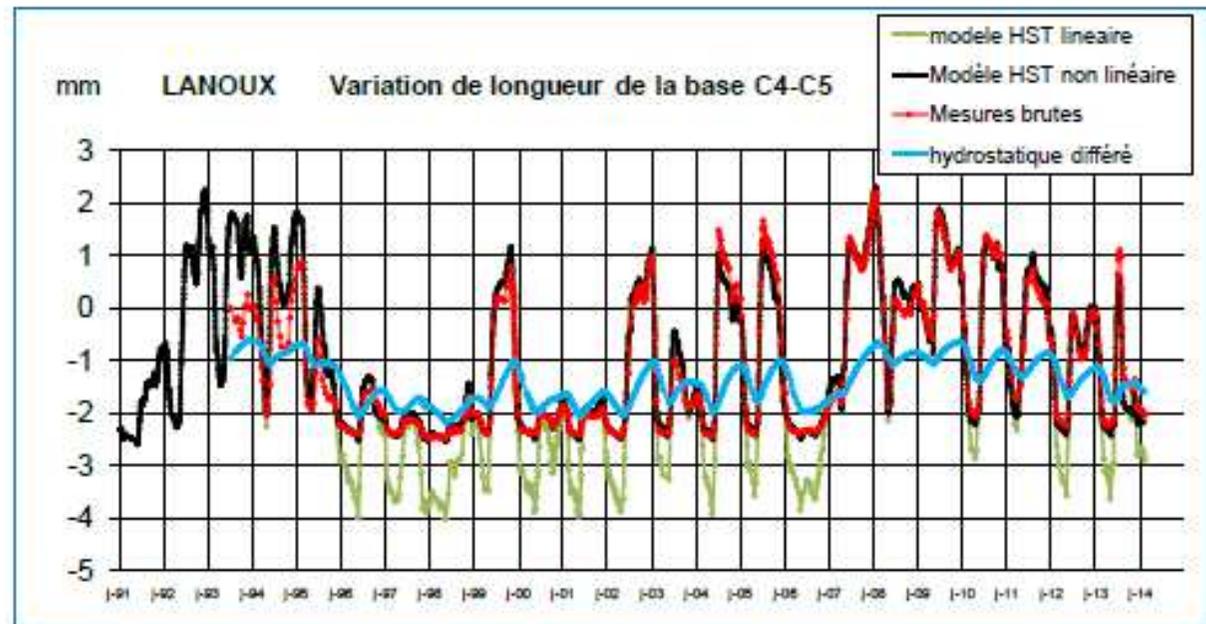
## Exemple distofofor au contact béton-fondation

Mesures à conditions identiques : plein depuis plus de 6 mois, à saison constante

- Pas d'irréversible
  - ❖ Adaptation tubage Distofofor Les 2 premières années

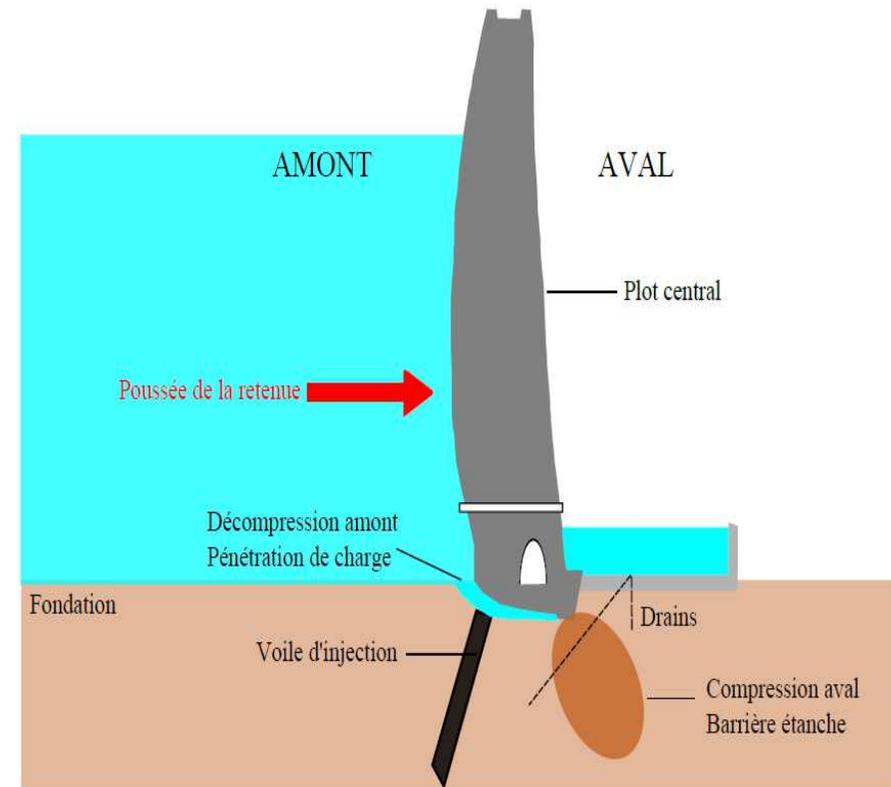
### Mesures et modélisation

- ❖ Mesures brutes en rouge
- ❖ Modèle linéaire en vert
- ❖ Modèle HST NL en noir
- ❖ Effets différés en bleu (1 à 2 mm)



# Modélisation des phénomènes hydrauliques

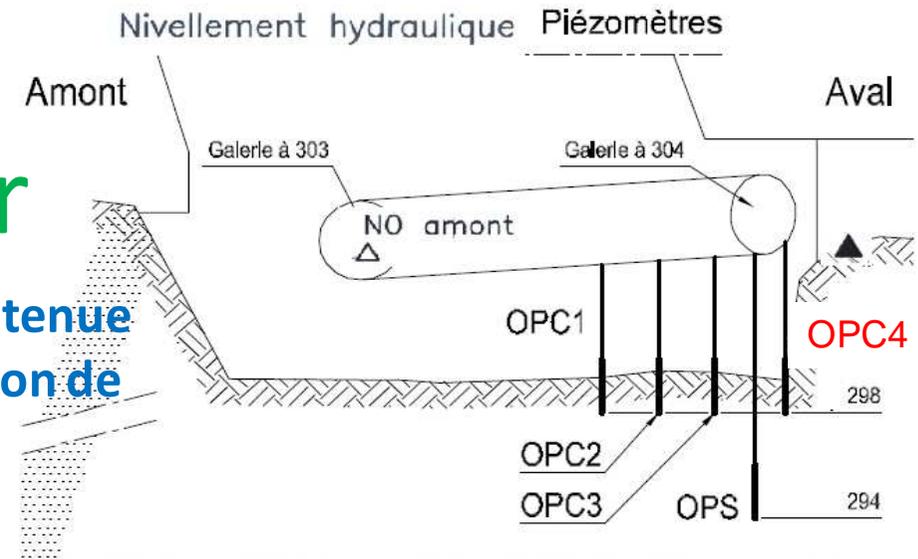
- **Non indépendance des effets Hydrostatiques et saisonniers**
  - Par exemple l'influence du froid sur un débit (par ouverture et augmentation de perméabilité) n'est pas la même à vide (le débit reste nul) et à plein (l'influence peut se faire sentir nettement)
  - Les tractions au contact béton-rocher modifient la perméabilité du rocher et la linéarité de la réponse des piézomètres, les effets hydrostatiques dépendent de la saison
  - L'effet thermique sur le parement amont dépend de la cote de la retenue
  - La piézométrie et les fuites contiennent donc des **facteurs explicatifs** de type **Hydrostatique X Saison**



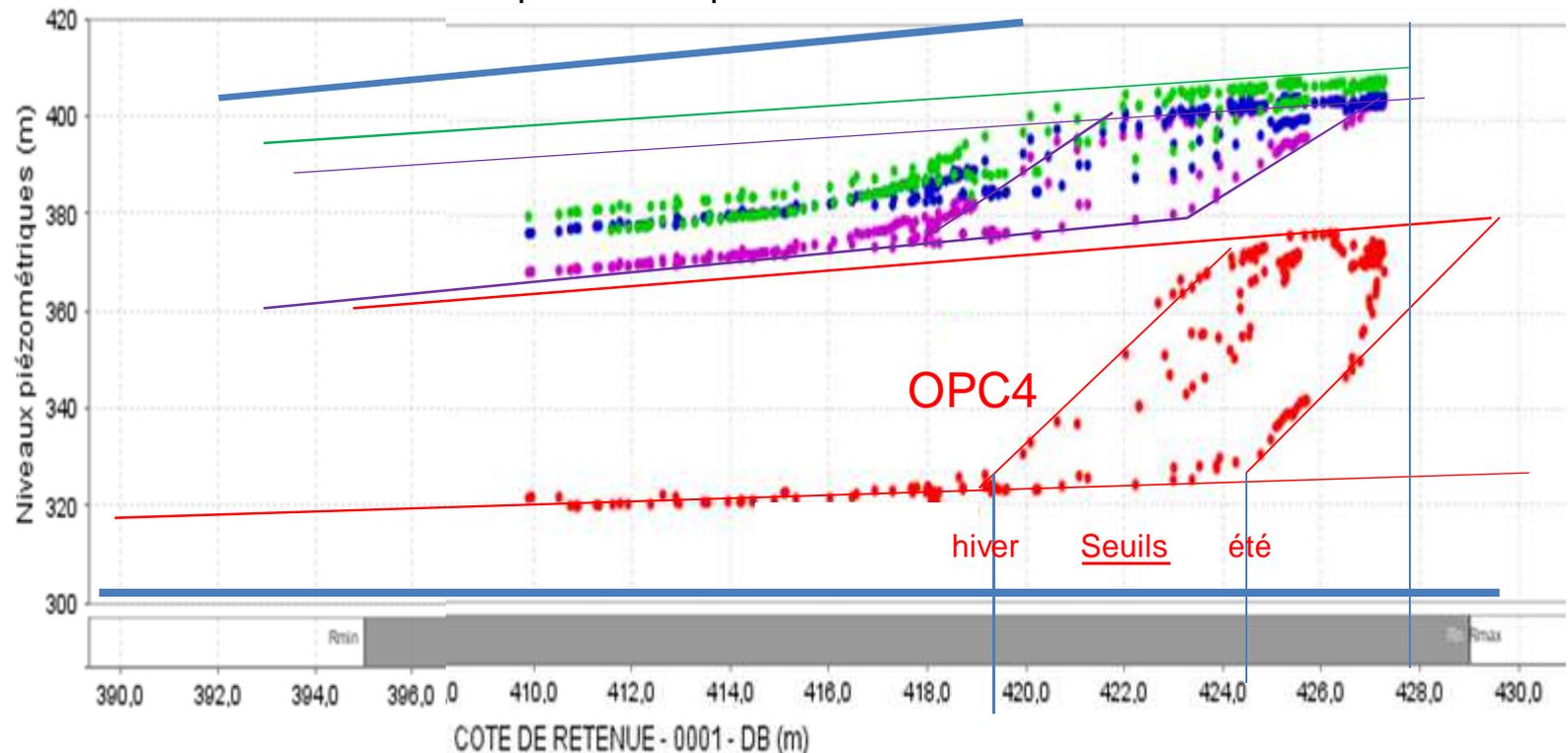
**Modélisation parfois utile des effets non indépendants, non additifs**  
**Modèles à « termes croisés »**

# Piézométrie au contact béton-rocher

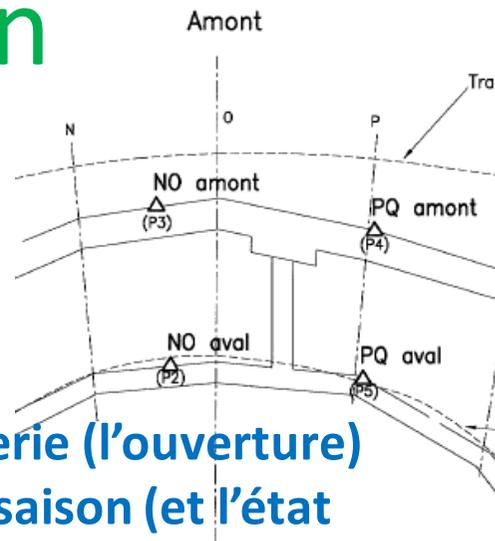
- Réaction amplifiée aux variations de la retenue surtout en aval (OPC 4 ) avec la propagation de l'ouverture du contact béton rocher
- Transition entre deux régimes (contact fermé/ouvert) dépend de la saison



Niveaux piézométriques OPC1 à OPC4 en fonction de la cote



# Modélisation HST HY NL



- Le soulèvement en galerie (l'ouverture) varie avec la cote et la saison (et l'état thermique du barrage)

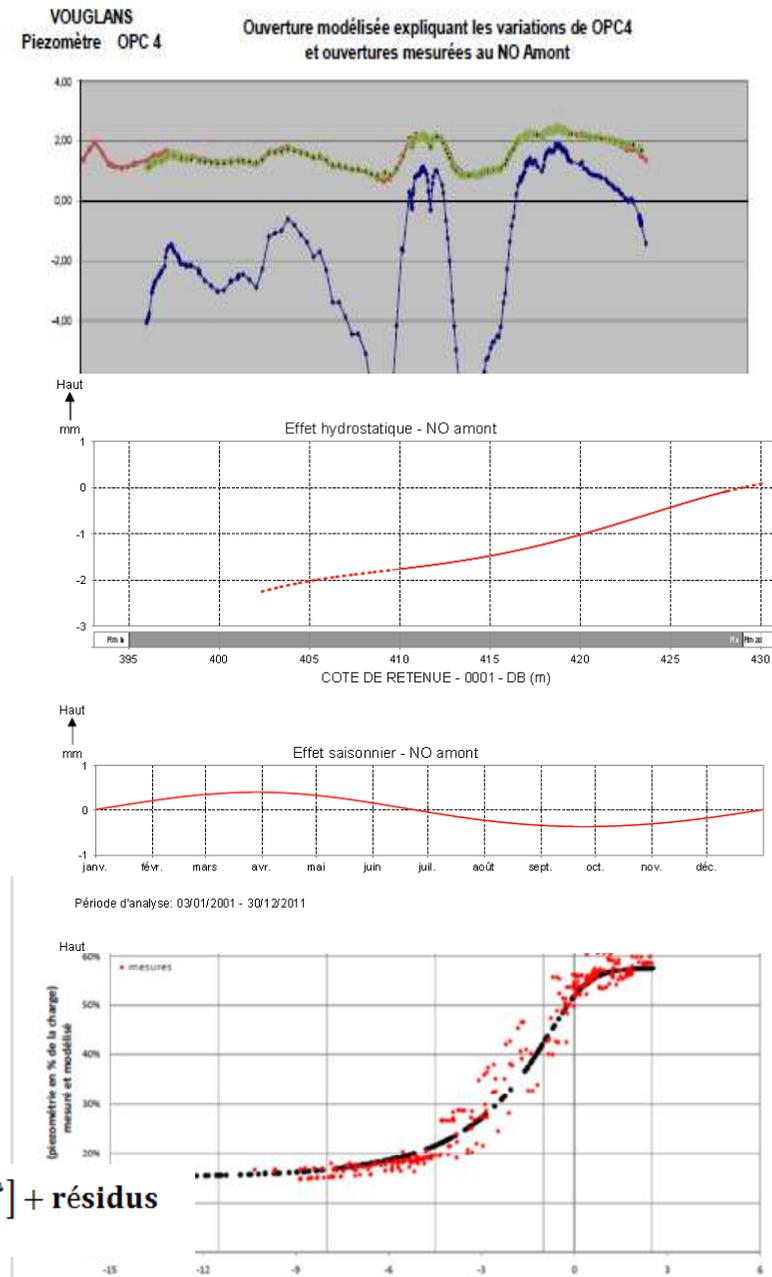
- Un modèle additif fonctionne bien dans la plage de marnage habituelle haute

- Par contre la piézométrie traduit un changement de régime à l'ouverture

- Un modèle non-linéaire est nécessaire, avec une loi en S, (famille des sphymoides)

$$N_{p_{brut}} = N_{av} + \underbrace{(RN - R_{vide})(1 - z)}_{\text{Charge}} * \underbrace{[\alpha_1 + (\alpha_2 * \tanh(\alpha_3 + \xi(z) + \xi(S) + \xi(t)))]^{\alpha_4}}_{\text{Non-Linéaire (H + S + T)}} + \text{résidus}$$

= Niveau Aval + Charge x Non-Linéaire (H + S + T)

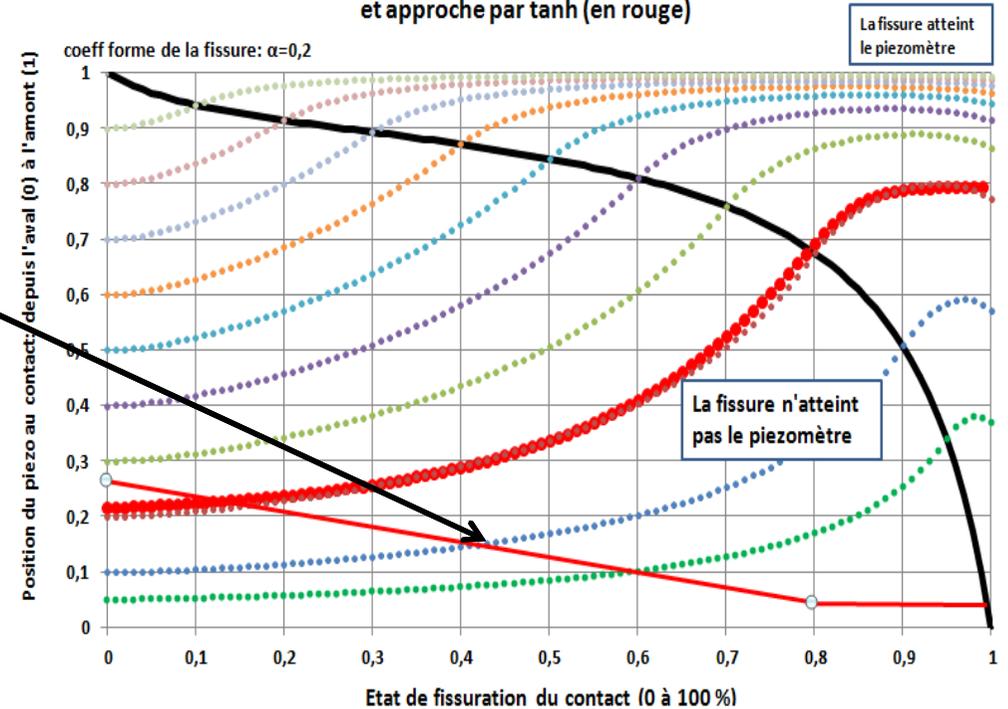


Réponse piézométrique OPC4 fonction de l'ouverture NO Amont

# Modélisation HST HY NL

- **H1: Ouverture du contact linéaire (entre l'ouverture à l'amont et l'extrémité de cette ouverture),**
  - puis constante en aval dans la zone non ouverte
- **H2: Loi de Poiseuille (la perméabilité est proportionnelle au carré de l'ouverture)**
  - on peut calculer la réponse théorique d'un piézomètre en % de la charge amont, et on retrouve la même allure de variation que celle qui a été mesurée.
  - La modélisation par fonction en S (Th) est très correcte.

% de charge mesurée par le piézomètre Modélisation de la piézométrie en fissure et approche par tanh (en rouge)



Extrait de la Thèse Université de Paris-Est de Mr Rastello G. (2013) *Influence de la fissuration sur le transfert de fluides dans les structures en béton. Stratégies de modélisation probabiliste et étude expérimentale.* [11]

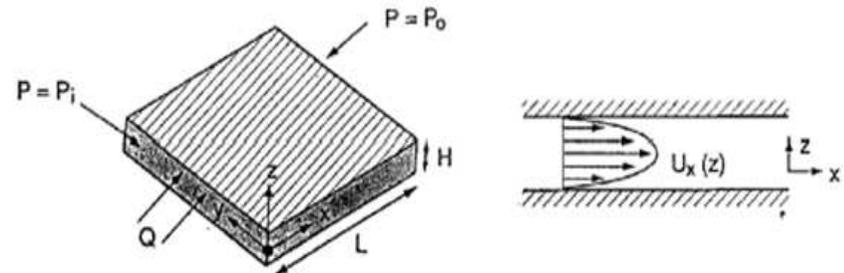


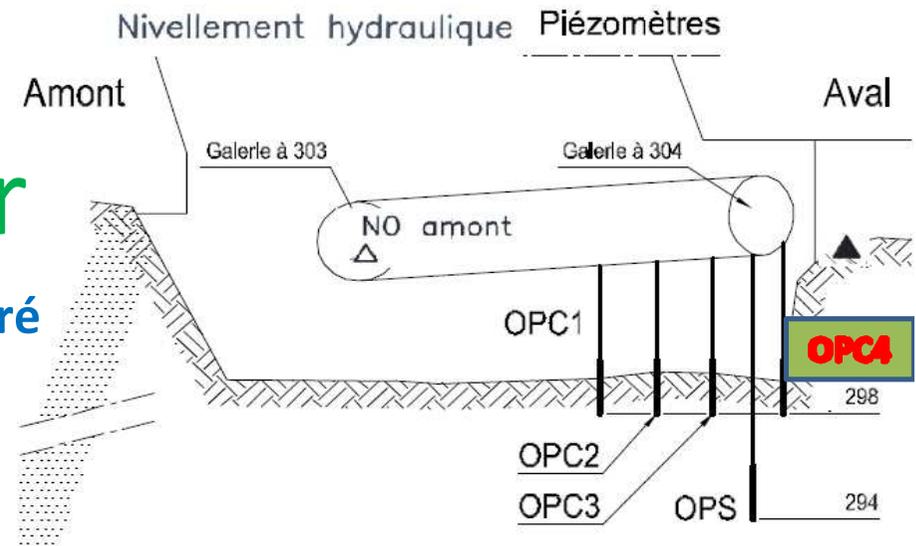
Figure 2.7 – Représentation schématique de la fissure selon le modèle des plaques parallèles [Zimmerman et Bodvarsson 1996]

Le débit volumique  $q_x$  traversant une section générique quelconque, orthogonale à la direction de l'écoulement et de largeur  $w$ , peut être obtenu par intégration du champ de vitesses (2.21) :

$$q_x = w \int_{-a/2}^{a/2} v_x(z) dz = -\frac{wa^3 \Delta p}{12\mu \Delta x} \quad (2.22)$$

# Piézométrie au contact béton-rocher

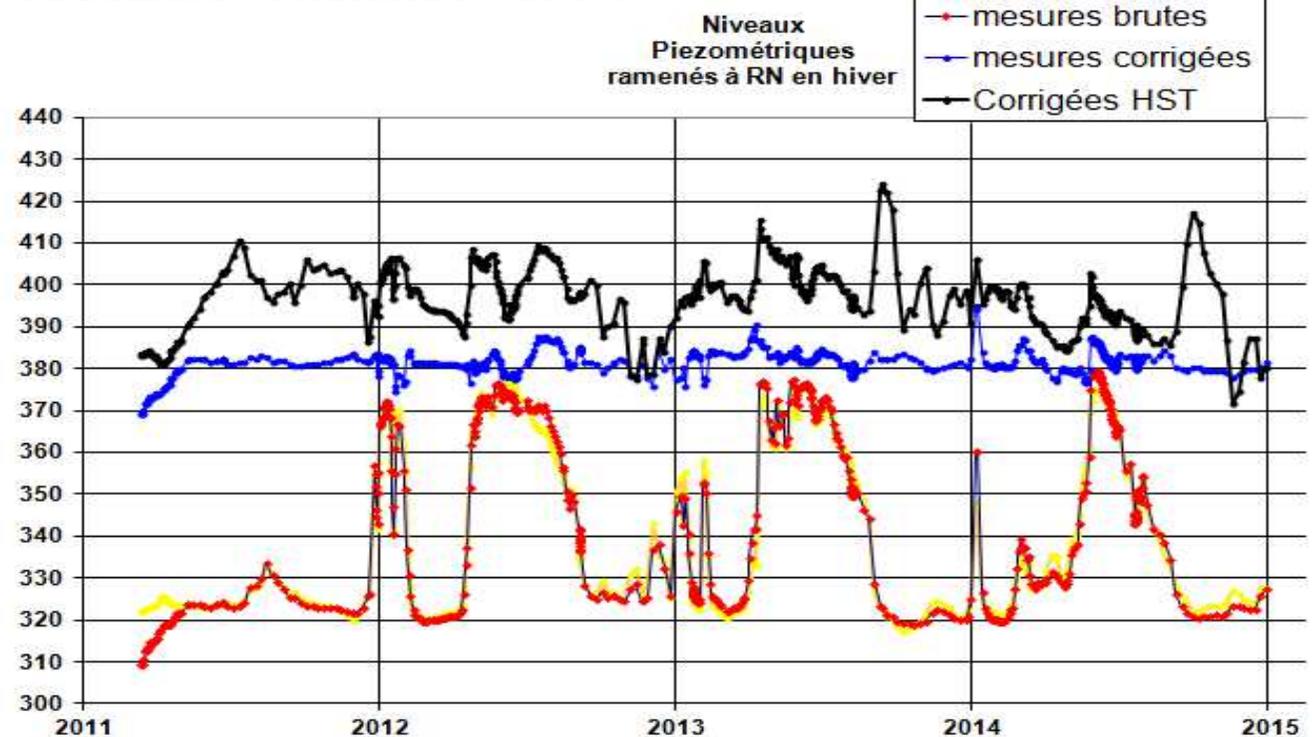
- La modélisation suit bien ce qui est mesuré
- Amélioration par rapport à HST



- Modélisation globale :

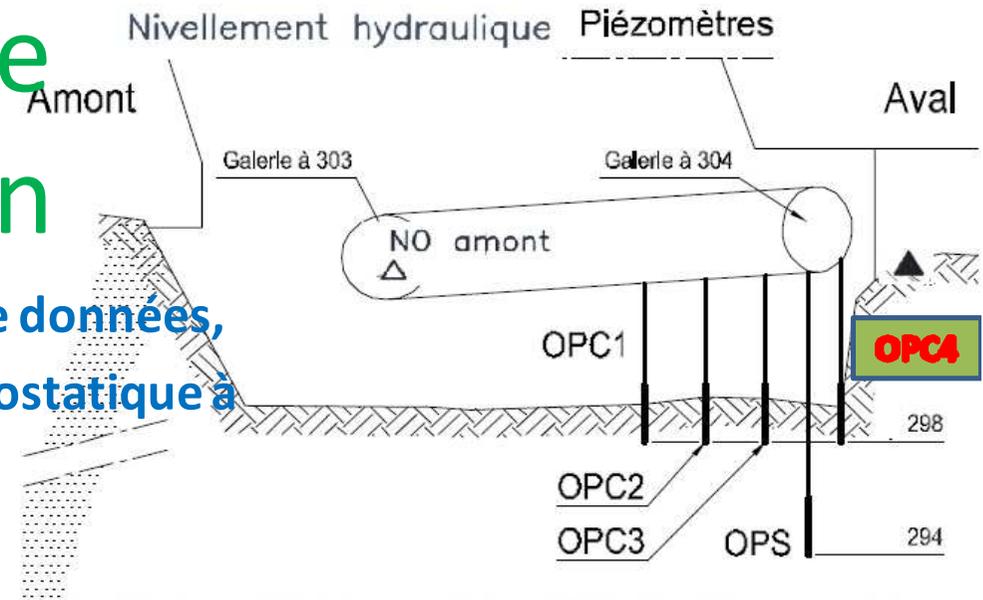
(ensemble des piézomètres d'un profil) : permet de remonter à la forme de l'ouverture au contact (amplitude et allongement vers l'aval)

VOUGLANS Piézomètre OPC 4



# L'effet hydrostatique dépend de la saison

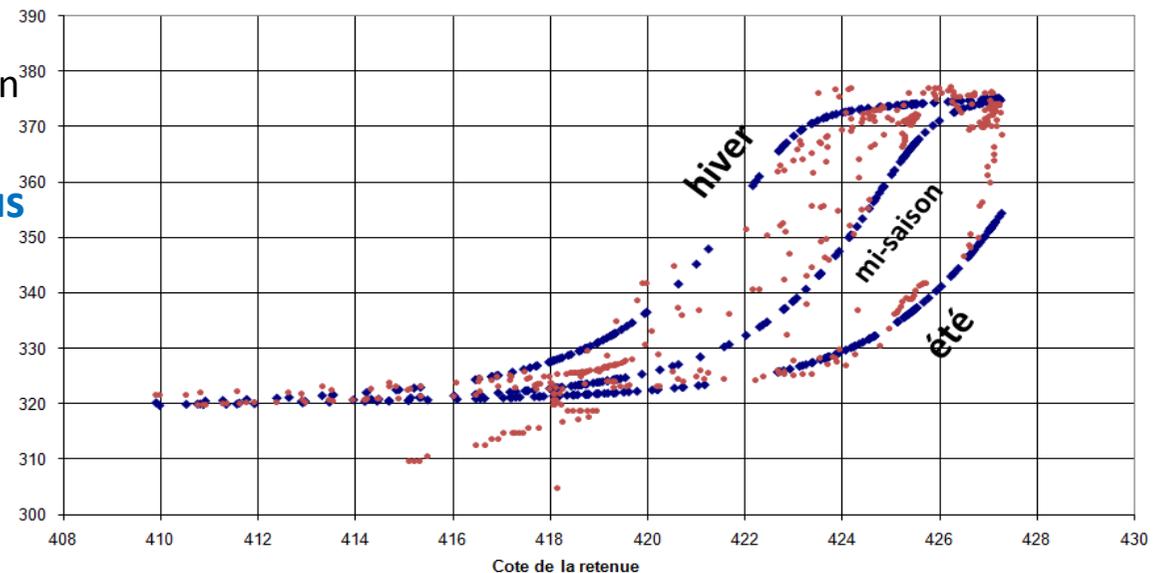
- L'effet hydrostatique : à saison et date données,
- il est intéressant de tracer l'effet hydrostatique à plusieurs saisons dont l'hiver
- Les effets hydrostatiques et saisonniers ne sont plus indépendants, du fait



VOUGLANS  
Piezomètre OPC 4

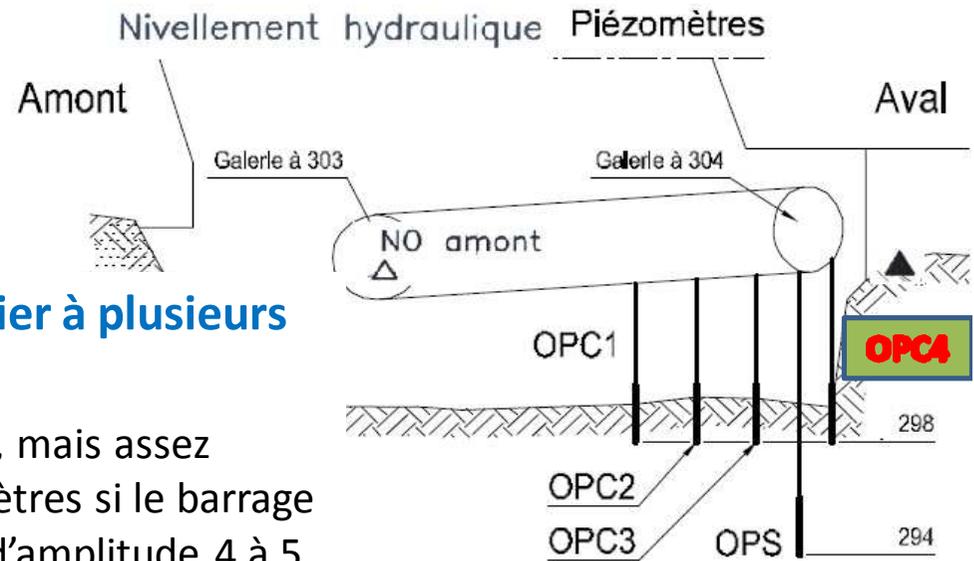
Niveau piézométrique en fonction du remplissage, en hiver à mi-saison et en été

- de la nature du phénomène (hydraulique)
- de la non-linéarité de la variation de la perméabilité
- La montée piézométrique est plus précoce en hiver qu'en été,
- avec des variations de piézométrie nettement plus fortes que les variations de cote, au moment de l'ouverture du contact



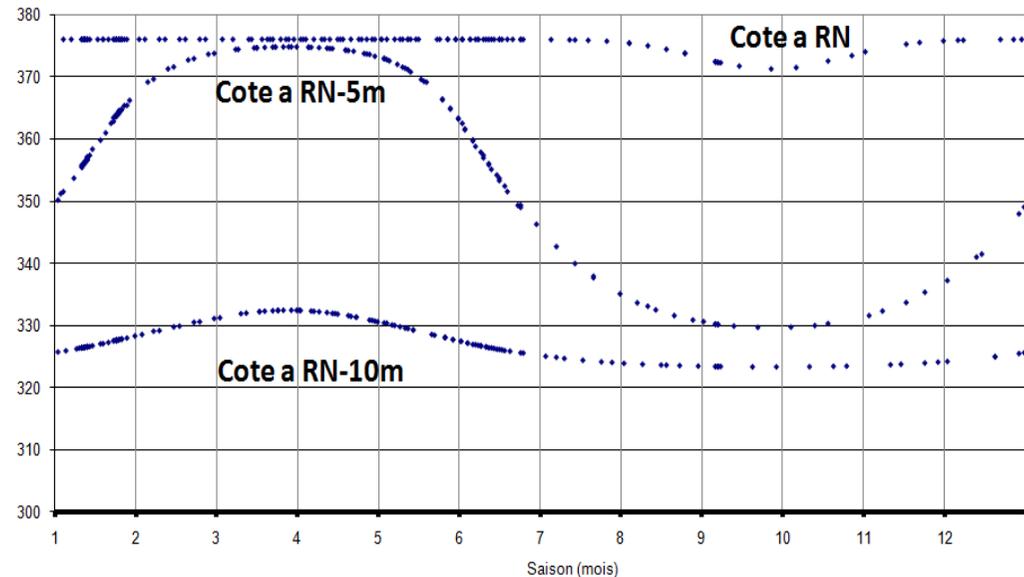
# L'effet saisonnier dépend de la cote

- il est intéressant de tracer l'effet saisonnier à plusieurs cotes,
- on observe un effet saisonnier assez classique, mais assez « plat » avec une amplitude de moins de 10 mètres si le barrage est plein ou à RN-10m, et un effet, « creusé » d'amplitude 4 à 5 fois plus forte si le barrage est à cote constante à RN-5m



- une étude similaire a été menée sur ce piézomètre à l'aide des réseaux de neurones. Les résultats obtenus sont similaires et les conclusions sur les effets sont les mêmes.

Niveau piézométrique en fonction de la saison à RN= 429 à 424 et à 419





# CONCLUSION

- **Les conditions d'une évolution étaient réunies:**
  - Une base de données désormais très riche (anciennes mesures + télémesure + qualité (contrôles et critique)
  - Outils statistiques modernes (réseaux neuronaux.. ) et méthodes de calcul disponibles
  
- **Emergence récente de nouvelles familles de modélisations statistiques des comportements des barrages**
  - Qui enrichissent les analyses classiques
  - Certains concepts sont riches car ils permettent de se rapprocher de la réalité des comportements des ouvrages, et montrent leur complexité
  - Les nouveaux modèles HST HY et HST NL permettent la meilleure prise en compte des phénomènes hydrauliques et des comportements non-linéaires
  - Il y a donc possibilité de tirer des informations plus complètes, plus pertinentes pour mieux comprendre le comportement particulier de certains ouvrages, à partir de l'historique de leurs mesures d'auscultation
  
- **Quelle utilisation, quelles précautions**
  - Sont utilisées dans certains rapports d'auscultation (mais pas encore standardisés)
  - Ces modèles complexes sont réservés au traitement de quelques cas spécifiques, pour lesquels ils doivent être adaptés avec précaution afin de préserver le sens physique des résultats.
  - Ces nouveaux modèles réclament des échantillons assez fournis et équilibrés, afin d'éviter les risques d'extrapolation du comportement dans des situations qui n'ont pas été observées
  - L'interprétation demandera une attention particulière (nécessaire validation du "sens physique" des résultats, notamment vis-à-vis de la géologie/hydrogéologie du site).
  - Les plus intéressants mériteront d'être intégrés ultérieurement au logiciel Koala, afin d'en faire des outils de surveillance quotidiens des ouvrages.



MERCI