



## Ouvrages Fluviaux

Journée présentée par

Sylvie Bretelle, Pascal Aguado (CFMS) et Philippe Gotteland (FNTP)

À la Maison des Travaux Publics

Journée parrainée par HUESKER et NGE



# Ouvrages Fluviaux

**Dimensionnement des ouvrages: adaptation des logiciels en fonction de la complexité et la destination**

Tatiana BENMAHDI, Pierre COSTE, Jérémy DUCHEMIN

18 JANVIER 2023

# Introduction

## Présentation des projets rencontrés

### Mission G1. Enjeu à l'échelle d'un projet : création de 20 logements

- Type de client : cabinet d'Expertise + agence immobilière.
- Objectif : obtenir dérogation aux PLU et PPRI par un ouvrage de protection contre la crue et éviter déconstruction.
- Méthode : utilisation d'abaques + bibliographie + recommandations CBFR + guide ERINOH.

### Mission G2-AVP - Enjeu local : ouvrage de rétention des EP

- Type de client : communauté de communes.
- Objectif : créer un ouvrage pour empêcher inondations chez des riverains.
- Méthode : vérifications des formules d'équilibre et de rupture + vérification de la stabilité avec logiciel analytique.

### Mission G2-PRO – Enjeu étendu : digues de la Leysse aval

- Client : CISALB (Syndicat de rivière).
- Objectif : de protection contre les inondations et restauration de la Leysse aval.
- Méthode : Modélisation des écoulements interne en régime transitoire + vérification de la stabilité avec logiciel analytique + évaluation des risques d'érosion interne (ERINOH).

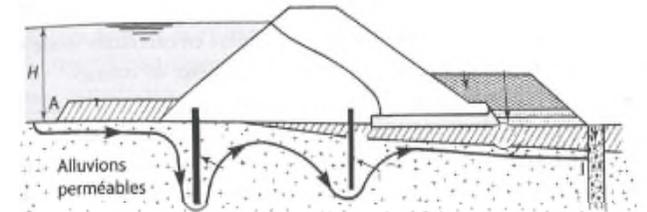


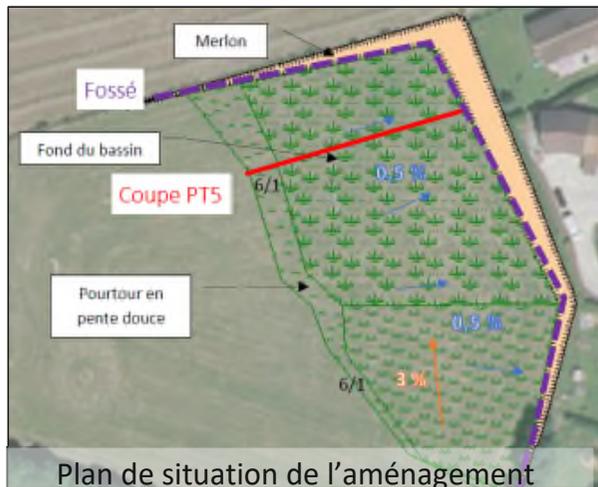
Schéma de principe présenté (Philipponnat)

# I – Ouvrage à enjeu local « aménagement de rétention des eaux de ruissellement dans l’Orne(61) »

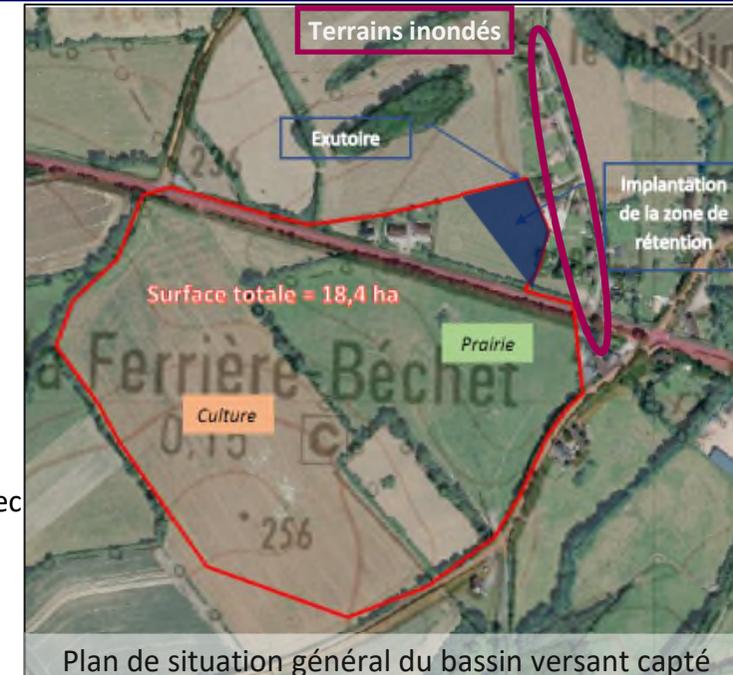
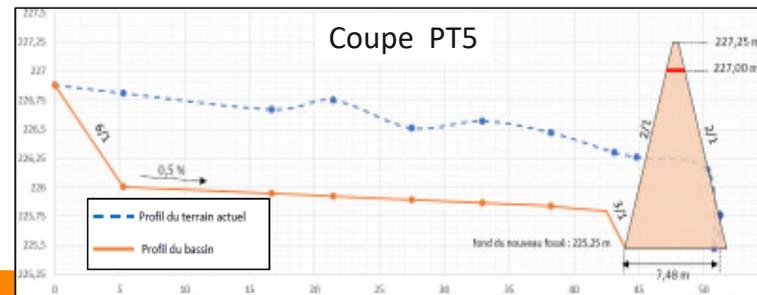
# I – Ouvrage à enjeu local – ouvrage de rétention

## Présentation du projet

- Pavillons de riverains **inondés** en 2008, 2009, 2018 et 2019.
- Pose d'une canalisation en 2009 insuffisante
- Caractéristiques du **bassin de rétention** :
  - Alimentation par **le réseau pluvial communal**.
  - Rétention lors d'orages intenses.
  - Reprofilage du fossé d'écoulement pour pluies faibles



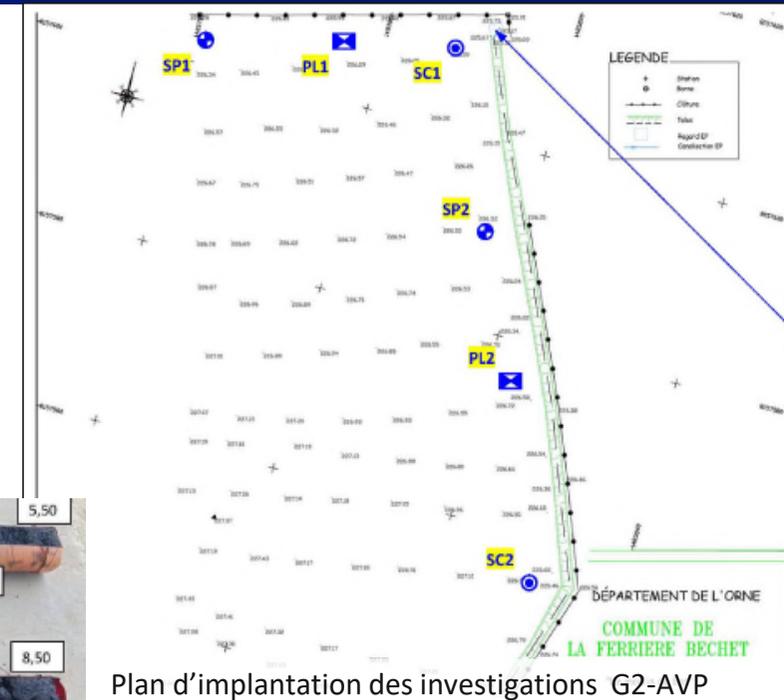
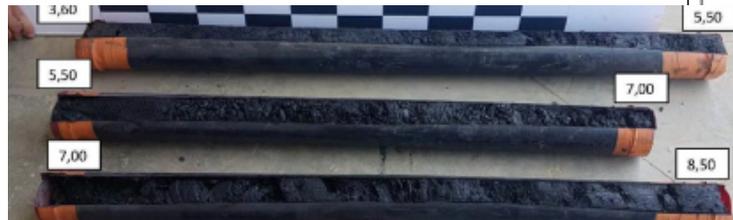
- Surface totale (bassin + pourtour + merlon) : 4 300 m<sup>2</sup>.
- Stockage : 3000 m<sup>3</sup> = **1 pluie centennale de durée 1h**.
- Merlon/digue en matériaux d'apport sur **1.5/2.0 m** avec pentes de 2/1.



# I – Ouvrage à enjeu local – ouvrage de rétention

## Contexte géotechnique

- Mission G2-AVP avec **6 sondages** pour 120 ml de merlon,
- 2 SP + 2 SC + 2 essais de perméabilité dans fouilles PL,
- **Essais labo** : 4 GTR+1 cis **CD**+1 **oedo**+4 **perméabilités** à l'oedomètre+2 apt. traitement
- Contexte géotechnique avec **variation des épaisseurs et de la compacité** :
- Terre végétale jusqu'à 0.1/0.5 m de prof,
- Argile A2/C1A2 ferme à raide + graves **très peu perméable** ( $10^{-10}$  m/s) jusqu'à 2/3 m,
- Argile schisteuse **molle ou raide**, plus perméable, jusqu'à 3.5 et 6.5 m,
- Substratum : schiste + ou – altérée.



- **Corps de digue** : sables fins B6 peu perméable ( $10^{-7}$  m/s).
- Sismicité : **zone 2 (aléa faible)**
- Conditions hydrologiques : **nappe à faible profondeur** (< 3 m) et/ou circulations d'eau superficielles

# I – Ouvrage à enjeu local – ouvrage de rétention

## Vérifications en phase G2-AVP

➤ Soulèvement hydraulique avec formule d'équilibre des pressions :  $\gamma_m \times \sigma_v > \gamma_d \times u$

- Puits de **décharge** à mettre en place pour traverser l'argile,
- A confirmer en **G2-PRO avec essais de perméabilité** in situ.

➤ Phénomène de Renard solide :

$$q_{dst;d} \leq q_{stb;d}$$

➤ Phénomène de Boulance :

$$G' > 1,5 G_w \times i_{int}$$

➤ Rupture par **poinçonnement** en fin de construction et pendant la vie de l'ouvrage aux ELS, ELU et ELU SISMIQUE

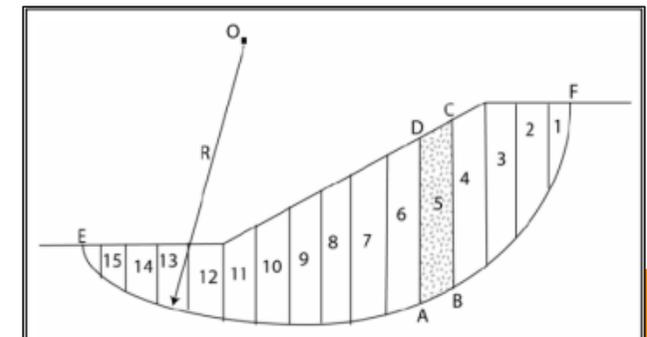
➤ Rupture par **glissement** à l'ELU FOND et ELU SISMIQUE

➤ Calcul des **tassements** par la méthode pressiométrique et par la méthode œdométrique

➤ **Stabilité de talus** sur le logiciel TALREN

➤ Calcul des cercles de rupture selon la méthode **BISHOP**

➤ 3 situations vérifiées pour 1 profil type : **fin de construction / retenue pleine / vidange rapide**



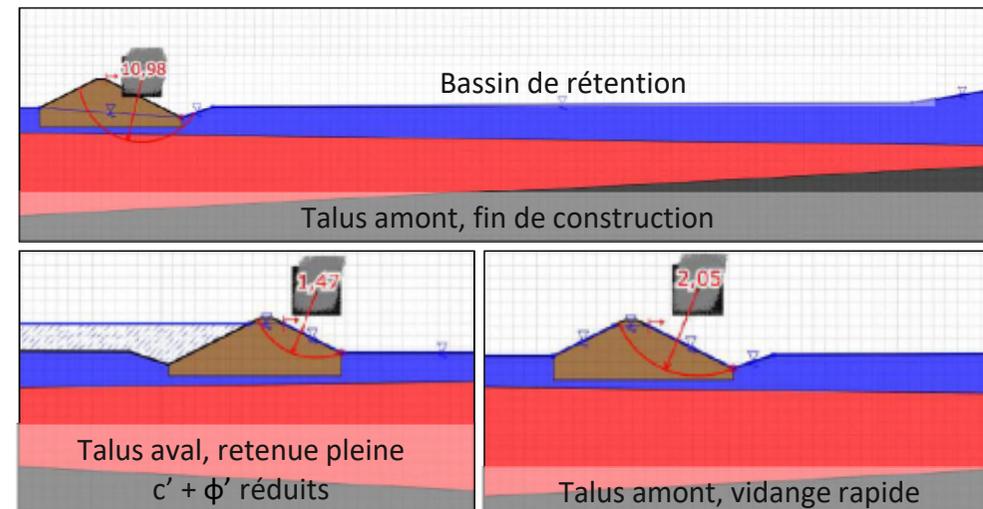
# I – Ouvrage à enjeu local – ouvrage de rétention

## Méthode analytique : utilisation de TALREN

- **Modèle géotechnique :**
  - $c_u$  : corrélation de CASSAN avec  $pl^*$ .
  - $c'$  et  $\phi'$  : 1 essai CD + analyse sondages + expérience.
  - Profil hydrique : **régime permanent**
  
- 3 situations vérifiées talus amont/aval :
  - **Fin de construction** : méthode traditionnelle  $F > 1,5$  /  $c_u$  et  $\phi_u$ .
  - **Retenue pleine** : méthode traditionnelle  $F > 1,5$  ( $> 1,2$ ) /  $c'$  et  $\phi'$ .
  - **Vidange rapide** : méthode traditionnelle  $F > 1,5$  ( $> 1,0$ ) /  $c'$  et  $\phi'$ .
  
- Séisme : méthode pseudo-statique  $F > 1,0$  / coeff. EC7 /  $c_u$  et  $\phi_u$  /  $a_{vg}$
- Résultats : optimisation des pentes à 3/2 (au lieu de 2/1).
  
- Sondages complémentaires :
  - Relevé des PZ ,
  - SC + triaxiaux UU et CD,
  - essais de perméabilité in situ.

Nature du sol	Argile	Argile schisteuse	Schiste +/- altéré	Remblai
Sol n°	1	2	3	4
Poids volumique humide : $\gamma_b$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	19	20	22 *
Cohésion de court terme : $C_u$ (kPa)	75 #	60 #	-	75 #
Angle de frottement de court terme : $\phi_u$ (°)	0	0	-	0
Cohésion de long terme : $C'$ (kPa)	8	10	10	8 (4)
Angle de frottement de long terme : $\phi'$ (°)	25	25	30	25 (20)

( ) Calculs avec valeurs réduites de  $c'$  et  $\phi'$  dans les matériaux de la digue



## II – Ouvrage à enjeu étendu Digues de la Leysse aval

OUVRAGES FLUVIAUX - DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES: ADAPTATION DES  
LOGICIELS EN FONCTION DE LA COMPLEXITÉ ET DE LA DESTINATION

# II – Ouvrage à enjeu significatif - Dignes de la Leysse aval

## Présentation du projet

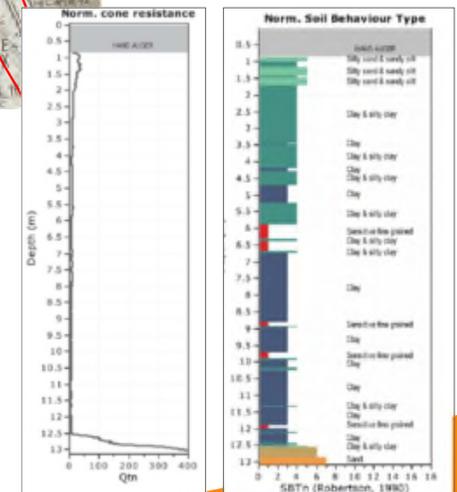
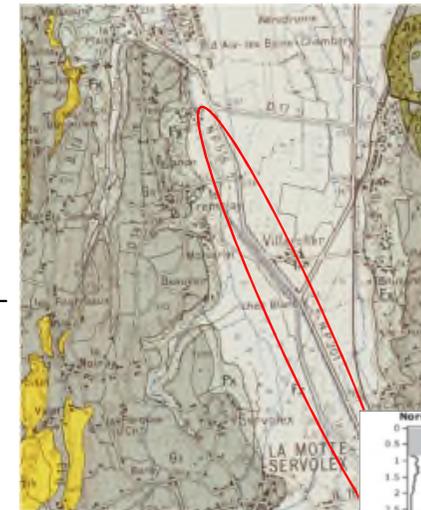
- Site : **Dignes de la Leysse aval** entre Chambéry et le Lac du Bourget (73)
- MOA : CISALB
- MOE : Suez Consulting
- BE géotechnique : Technosol + Kaena
- **Objectifs** du projet :
  - **Hydrauliques** : réduction de la vulnérabilité de la zone protégée
  - **Sûreté des systèmes d'endiguement** : remise à niveau des digues selon réglementation en vigueur
  - **Ecologiques** : diversification des habitats aquatiques et rivulaires (enjeu de la trame verte)
- Linéaire : 2800 ml (RD) + 1800 ml (RG)
- Enjeux : zone d'activité en RD et zone agricole en RG



# II – Ouvrage à enjeu étendu - Dignes de la Leysse aval

## Contexte géotechnique

- Contexte géologique: **alluvions fluviales modernes** ( Fz) de la Leysse
- Campagne de reconnaissances (G2-AVP + G2-PRO) :
  - **RG**: 15 SC + 4 TR + 3 PD + 8 CPT + 9 essais Lefranc + Panneaux électriques (1 PL et 4 PT)
  - **RD**: 6 SC + 1 SD + 2 PD + 4 essais Lefranc + Panneaux électriques (1 PL et 5 PT)
  - **Essais labo**: identification GTR, sédimento, cisaillements...
- Lithologie :
  - **Remblai de corps de digue** : Grave sableuse à Sable limoneux
  - **Alluvions limoneuses** : Limon sableux à Sable limoneux
  - **Alluvions graveleuses** : Grave sablo-limoneuse à quelques galets
  - **Alluvions argileuses** : Argile plus ou moins sableuse ou limoneuse compressible
- Sismicité : **zone 4 (aléa moyen)** → justifications sous séisme
- Conditions hydrologiques : **nappe à faible profondeur** (2 à 4 m)



# II – Ouvrage à enjeu étendu - Dignes de la Leysse aval

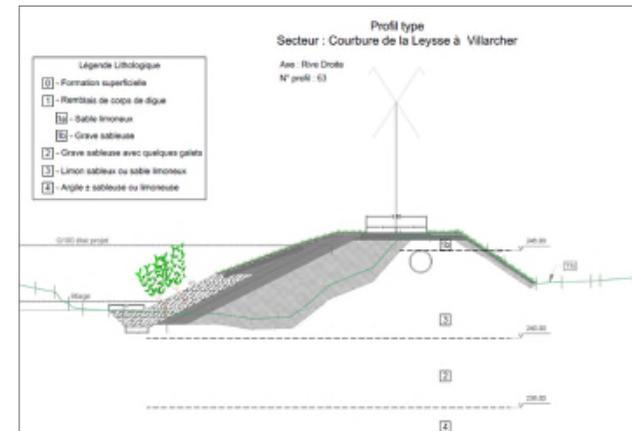
## Principales problématiques géotechniques

➤ **Rive droite** : réduction de la vulnérabilité la digue existante

- Stabilité au glissement
- Risques d'érosion interne
- Risques d'érosion de surface
- Etanchéification de la digue : GSB vs matériaux argileux
- Maintien de la circulation cycliste en crête de digue

➤ **Rive gauche** : déplacement de la digue pour élargissement de la zone inondable

- Stabilité au glissement
- Risques d'érosion interne
- Tassements différés (sols compressibles)
- Ressources en matériaux
- Etanchéification de la digue : GSB vs matériaux argileux
- Enjeu de vulnérabilité plus faible (ouvrage non classé)

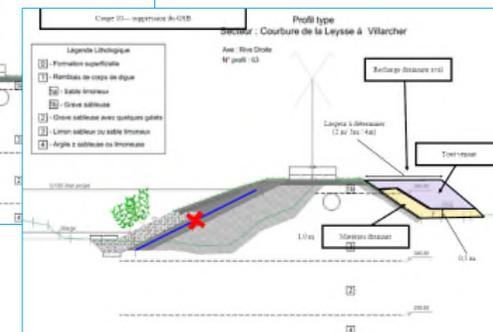
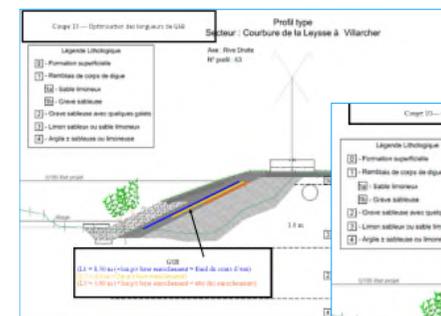
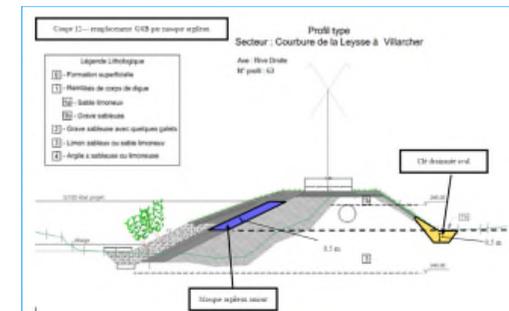
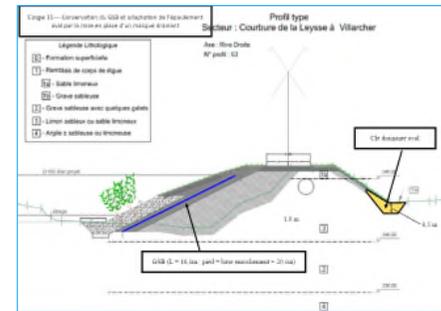


# II – Ouvrage à enjeu étendu - Dignes de la Leysse aval

## Coupe type des ouvrages projetés

Plusieurs configurations étudiées pour identifier les solutions envisageables pour le MOE et chercher des optimisations :

- **Etanchéité** par GSB (géosynthétique bentonitique) ou masque argileux,
- **Etude paramétrique** des dimensions du complexe d'étanchéité,
- **Suppression du complexe d'étanchéité** associée à une nappe drainante et un épaulement à l'aval,
- **Présence ou absence d'alluvions graveleuses** (perméables) en assise de la digue.



# II – Ouvrage à enjeu étendu - Dignes de la Leysse aval

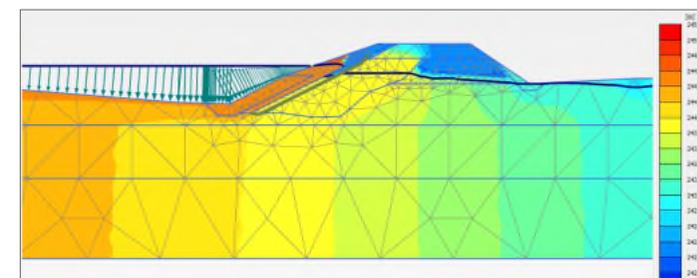
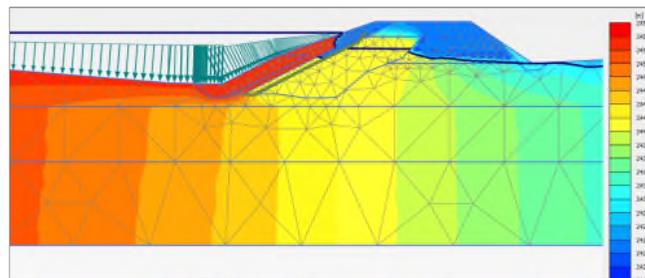
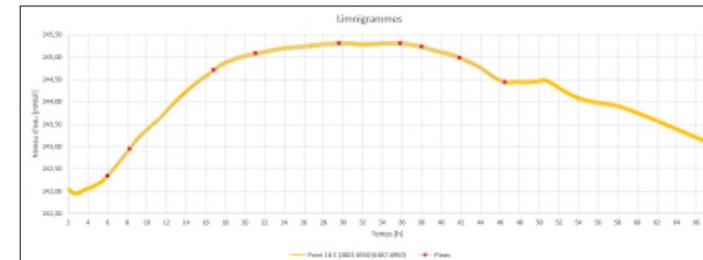
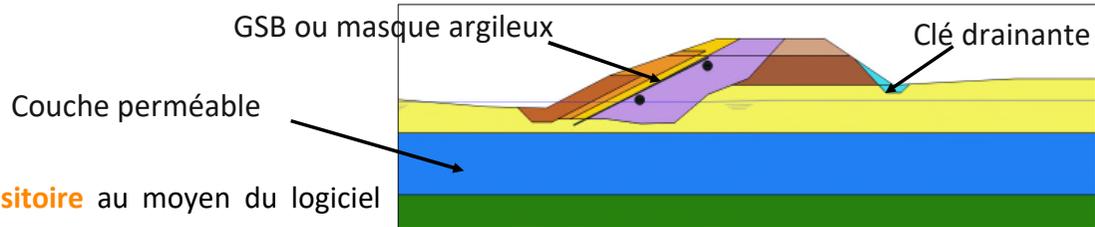
## Méthodologie de l'étude – 1/2

➤ Modélisation des **écoulements internes en régime transitoire** au moyen du logiciel Plaxis 2D Ultimate

➤ Prise en compte des **limnigrammes** de la crue de protection (Q100)

➤ **3 phases** étudiées :

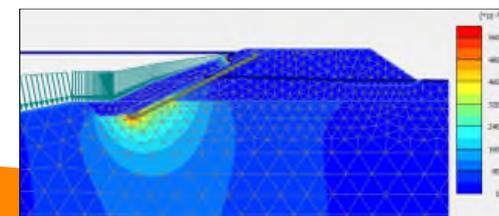
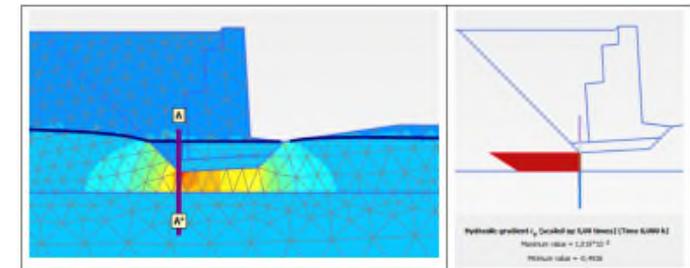
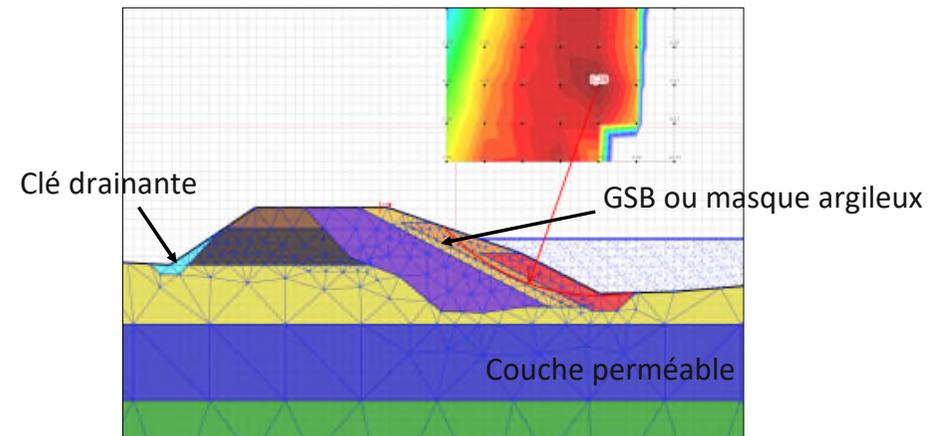
- **niveau d'eau quasi-permanent,**
- **fin de la montée de la crue,**
- **fin de la décrue.**



# II – Ouvrage à enjeu étendu - Dignes de la Leysse aval

## Méthodologie de l'étude – 2/2

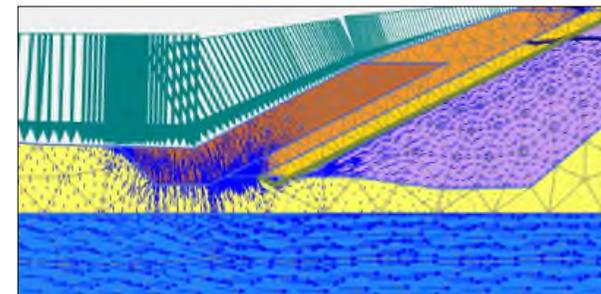
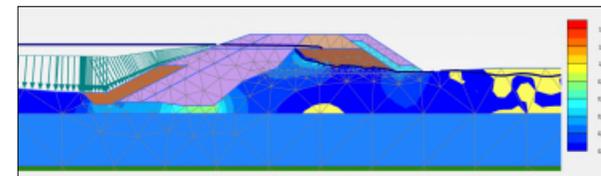
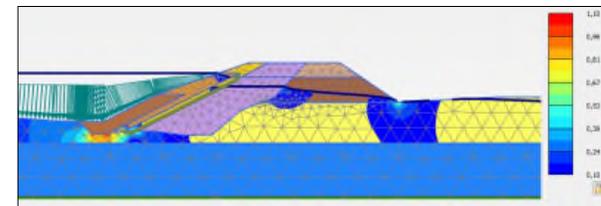
- Stabilité au **glissement** :
  - Importation des **champs de pression interstitielle** vers le logiciel Talren
  - Calcul de stabilité selon la **méthode de Bishop** et en appliquant les **coefficients partiels** recommandés par le CFBR
  - Justification pour 4 situations (courante, pic de la crue, vidange rapide, séisme).
- Risques d'**érosion interne**:
  - Études des **principaux mécanismes** (boulance, soulèvement hydraulique, suffusion, érosion de contact, érosion de conduit/régressive),
  - Application des recommandations du guide **ERINOH**,
  - Exploitation des essais d'identification (**critère géométrique**) et des calculs d'écoulements internes (**critère hydraulique**).



# II – Ouvrage à enjeu étendu - Dignes de la Leysse aval

## Principaux résultats de l'étude

- Forte influence des **conditions hydrauliques** (limnigrammes) sur la saturation du corps de digue
  - Importance de prendre en compte l'**ensemble de la montée et de la descente** dans le cours d'eau,
  - **Réduction du niveau de vulnérabilité** par la prise en compte des écoulements transitoires (régime permanent très défavorable),
  - **Optimisation des dispositions constructives** pour les systèmes d'endiguement (mise en charge temporaire).
  
- **Recharge drainante** en remplacement du complexe d'étanchéité
  - Répartition des **gradients plus homogène**, réduction des extremums,
  - **Augmentation des débits** traversants,
  - **Solution pertinente** du point de vue de la stabilité au glissement et des risques d'érosion,
  - Alternative intéressante pour cause de **difficultés de mise en œuvre de l'étanchéité** sur certains tronçons
  
- Efficacité de l'étanchéité **limitée par la présence d'une couche perméable** en assise de digue



## III – Conclusion

# III – Conclusion

## Synthèse comparative des 3 approches

### ► Une étude préliminaire à **enjeu limité**

- Une approche de **principe**,
- Utilisation d'abaques + bibliographies,

### ► Un projet à **enjeu local**

- Une approche **simplifiée mais conservative**,
- Des **entrants classiques** en géotechnique,
- Des **moyens** (logiciel analytique) et un **temps** d'étude **modéré** (quelques jours).

### ► Un projet à **enjeu étendu**

- Une **approche détaillée** pour une évaluation plus fine des phénomènes,
- Des **outils flexibles** permettant le dimensionnement optimisé de différentes solutions,
- La nécessité d'**entrants détaillés** (perméabilités) dont certains non courant en géotechniques (limnigrammes),
- Des **moyens** (modèle numérique) et un **temps** d'étude **conséquent** (plusieurs semaines).

### ► 3 **approches adaptées aux enjeux** spécifiques

## III – Conclusion

**Merci pour votre attention!**

