



Barrages



Energie



Eau

Environnement



Infrastructures
et aménagements
hydrauliques



Calcul
scientifique

STABILITE DES BARRAGES EN REMBLAI HOMOGENE – RETOUR D'EXPERIENCE

Justine FAURE

ISL
Ingénierie

POURQUOI CE RETOUR D'EXPERIENCE ?

- ❑ Ouvrages anciens (> 100 ans);
- ❑ Ne vérifient pas les critères de stabilité ou marges de sécurité faibles;
- ❑ Doit-on nécessairement les conforter ?

POINTS ABORDÉS

- ❑ Description générale des ouvrages étudiés;
- ❑ Présentation des critères de stabilité analysés;
- ❑ Pour chaque critère :
 - ❖ Accidentologie;
 - ❖ Marges de sécurité;
 - ❖ Perspectives.

- Types d'ouvrages:

- ❑ Barrages de classe B à C incluant des digues de canaux;
- ❑ Ouvrages anciens, en grand majorité construit avant le 20^{ème} siècle;
- ❑ Ouvrages déjà confortés (pour un certain nombre);
- ❑ Ouvrages ayant connu des accidents mais pas récemment (>30 ans);
- ❑ Hauteurs des ouvrages comprises entre 5 et 20 m;
- ❑ Volume d'eau compris entre 0,2 hm³ et 16 hm³;
- ❑ Exploitant : en grande majorité Voies Navigables de France
- ❑ REX initié à la suite de la réalisation d'une dizaine d'études de stabilité pour le compte de VNF DTCEB (certaines encore en cours).

- Référentiel pour les études

- Les recommandations CFBR :

- ❖ Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai de 2015 (pour les états limites à considérer et les méthodes de calcul à employer) ;
- ❖ Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages de 2013 (pour les crues de projet à considérer);
- ❖ Recommandations de 2014 relatives au risque sismique ;

- L'arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages

NOUVELLE CAMPAGNE ?

NON si

- ❖ lithologies bien documentées (granulométrie, densité, limites d'Atterberg,...)
- ❖ Auscultation complète et pertinente.

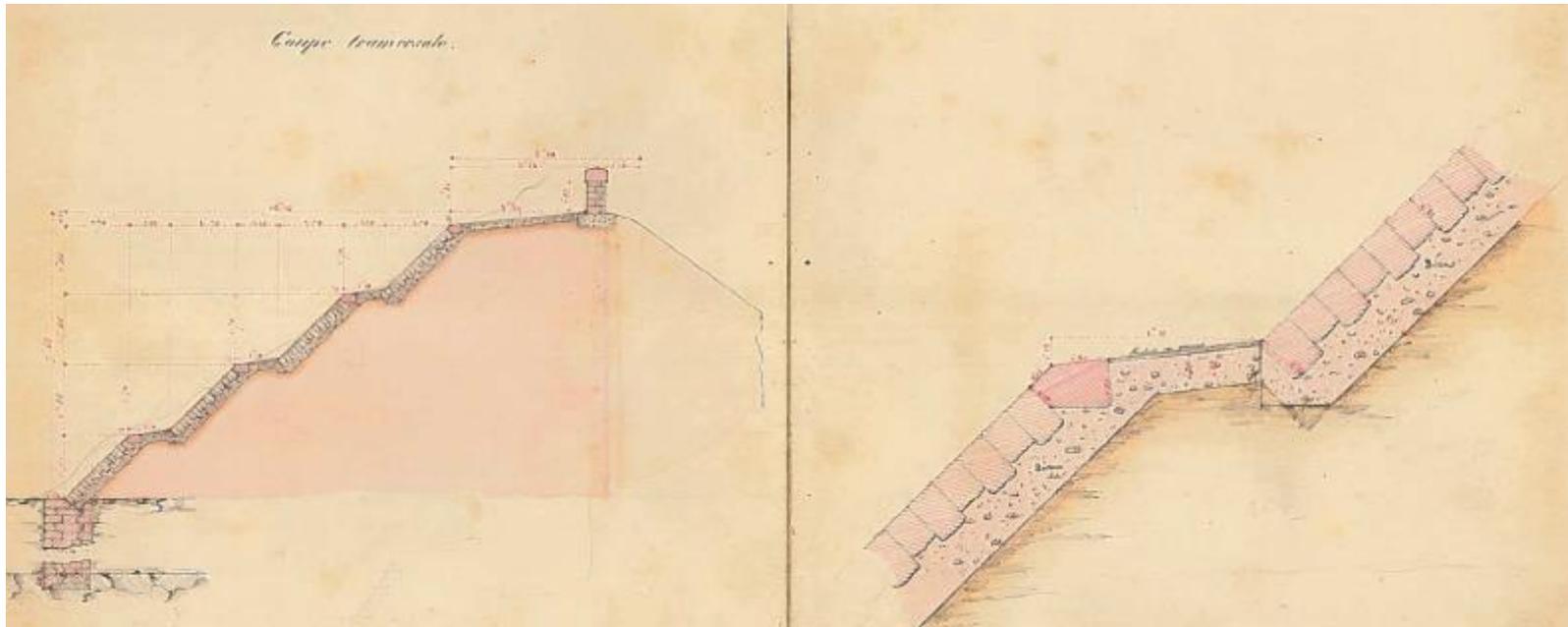
OUI donc définition du programme :

- ❖ Sondages carottés (attention au forage à l'eau!)
- ❖ Essais d'eau Lefranc
- ❖ Echantillons intacts pour classification GTR (tamisage et sédimentométrie, densité, limite d'atterberg,...), essais HET et essais triaxiaux;
- ❖ Equipements en piézomètres (piézomètres ouverts ou CPI).



TALUS AMONT

- ❑ Parement incliné à 1,5H/1V en moyenne
- ❑ Parements maçonnés (avant 1900) ou en béton (après 1900).
- ❑ Pas de fonction d'étanchéité à proprement parler
- ❑ Rôle de protection mécanique (effets du batillage)
- ❑ Rôle de protection vis à vis des sollicitations atmosphériques (dessiccation,..).



Coupe type (barrage du Plessis, C, VNF (71))

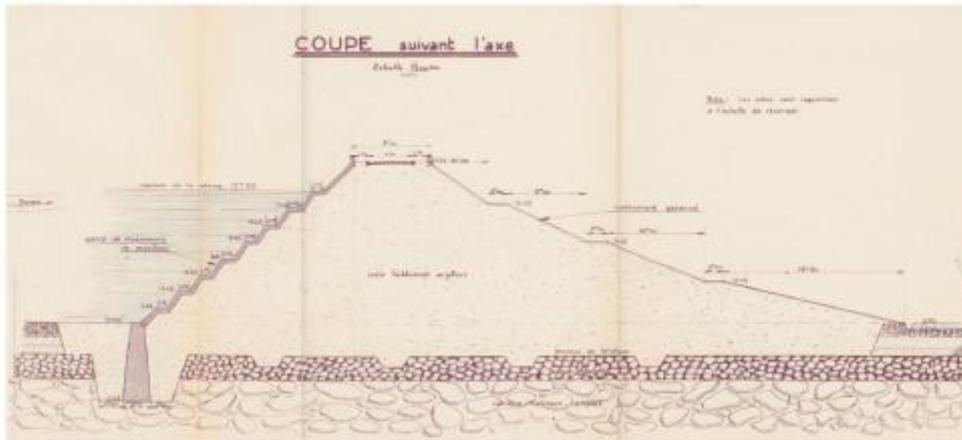


TALUS AVAL

- ❑ **Classe C** : talus aval raide ($1,5H/1V$) ; présence quasi systématique d'arbres (Diam > 10 cm).
- ❑ **Classe B** : pente comprise entre $1,5H/1V$ et $3H/1V$ (pente raide en partie haute du talus). Parement enherbé et bien entretenu.



Talus aval (barrage de Beurois, C, VNF (89))

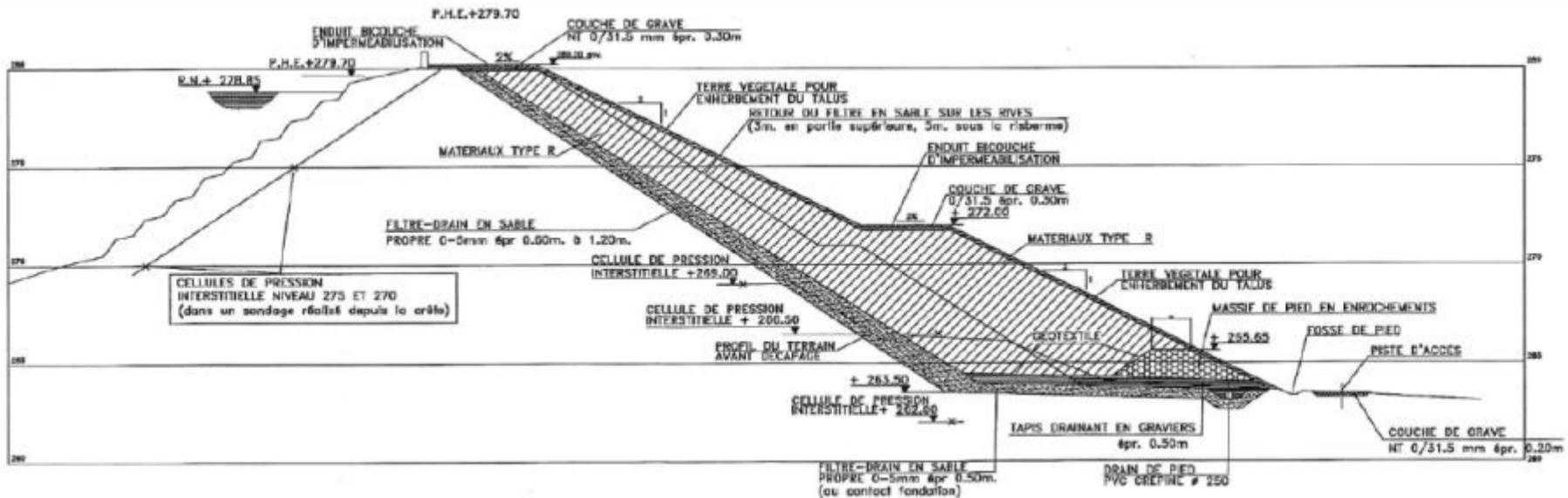


Coupe type (barrage du Bourdon, B, VNF (89))



Talus aval (barrage de Charmes, B, VNF (52))

- ❑ Confortement avec recharge aval filtrante/drainante (filtre granulaire ou géotextile) : 4 ouvrages concernés.
- ❑ Pente des recharges aval comprise entre 2H/1V et 2,5H/1V.
- ❑ Recharge réalisée jusqu'en crête ou au 2/3 ou à mi-hauteur du talus aval.



Coupe type (barrage de Montaubry, B, VNF (71))

- ❑ Matériaux extraits du site (cuvette des ouvrages, déblais des canaux,...)
- ❑ Principalement argileux (% passant à 2 μm supérieur à 15%) mais avec des passages sableux à graveleux variables.
- ❑ Granulométrie attribuée aux techniques de réalisation de l'époque : Matériaux argileux additionnés généralement à des graviers.

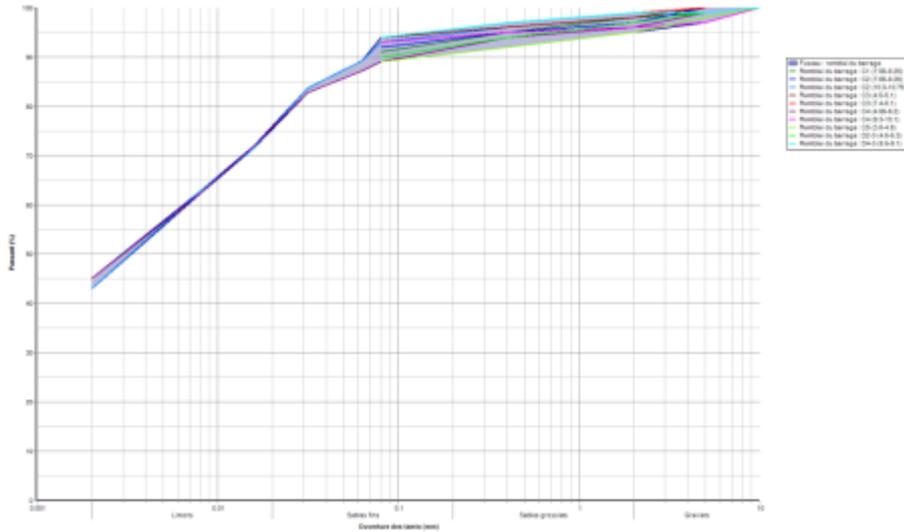
NOTA : le mélange argile/graviers n'a pas toujours été mélangés avant sa mise en œuvre.

- ❑ Les documents d'archives parlent systématiquement d'utilisation de terres corroyées !
- ❑ Notion scientifique de principe de compactage = Proctor 1930.

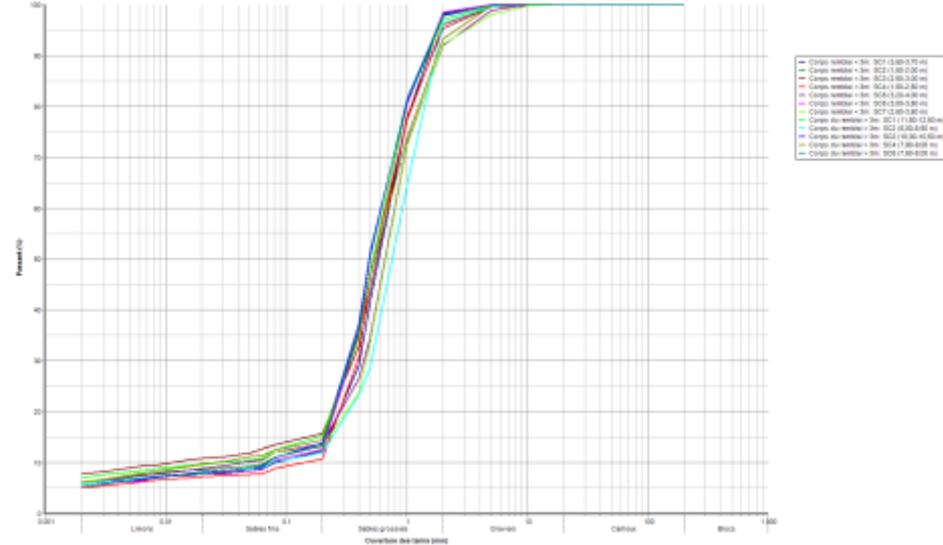


CORPS DU BARRAGE

- Des remblais plutôt homogènes mais avec des pourcentages de fines très différents.



Remblais du barrage de la Vingeanne (B, VNF, (52))

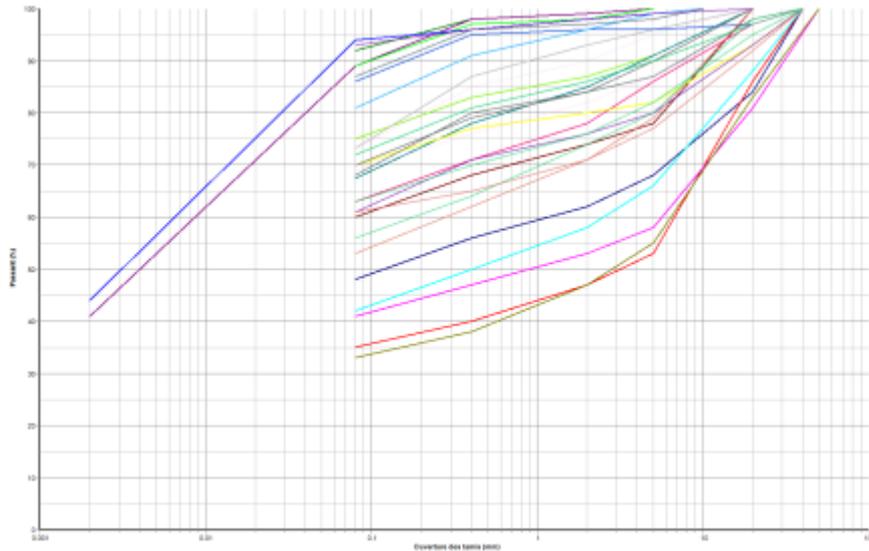


Remblais du barrage du Bourdon (B, VNF, (71))

- 90 à 95% de fines ($<80 \mu\text{m}$),
- 40 à 45 % d'argile ($<2 \mu\text{m}$),
- 3 à 5% de sable grossier,
- 0 à 5% de gravier.

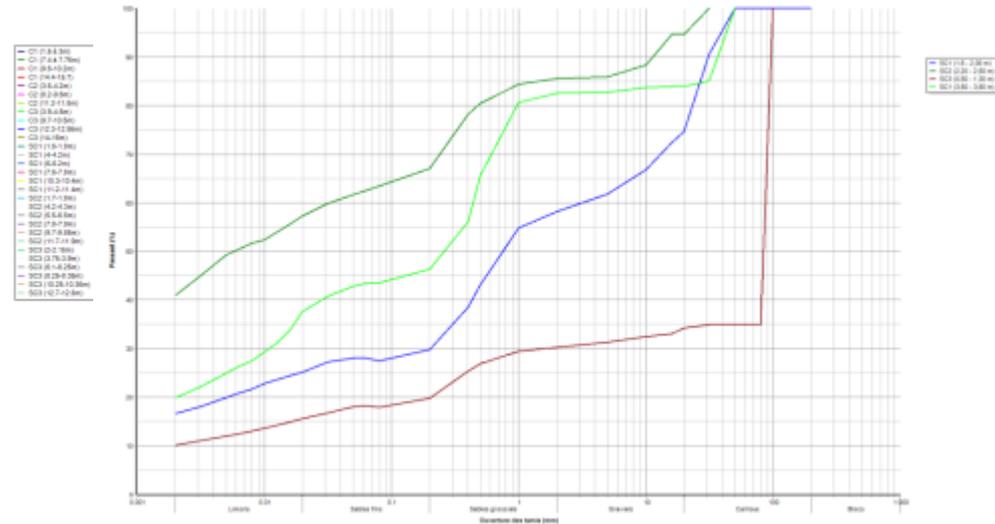
- 9 à 14% de fines ($<80 \mu\text{m}$);
- 5 à 8% d'argiles ($<2 \mu\text{m}$);
- 81 à 83% de sables grossier;
- 1 à 8% de graviers.

❑ D'autres remblais réputés homogènes mais pas vraiment...



Remblais du barrage de la Liez (B, VNF, (52))

- 36 à 95% de fines ($< 80 \mu\text{m}$) ;
- 1 à 34% de graviers ;
- 0 à 19% de cailloux.



Remblais du barrage de Cahaderie (C, VNF, (89))

- 18 à 63% de fines ($< 80 \mu\text{m}$) ;
- 10 à 41% d'argiles ($< 2 \mu\text{m}$) ;
- 11 à 19% de sables grossier ;
- 5 à 63% de cailloux.

OUVRAGES TRAVERSANTS

- ❑ Galerie/aqueduc maçonnée traversant le corps du barrage (vidange, prise d'eau,...)
- ❑ En rive ou au droit du profil de plus grande hauteur.
- ❑ Quelques exemples :



Galerie du barrage de Charmes (B, VNF, (52))

À gauche : Vue générale sur la portion amont (présence d'importantes concrétions)

À droite : Vue générale sur la portion aval

Galerie du barrage du Plessis (C, VNF, (71))

À gauche : Vue générale

À droite : existence d'une fissure dans maçonnerie (date d'apparition inconnue).



❑ MÉCANISMES ÉTUDIÉS :

- ❖ **Glissement du talus aval;**
- ❖ **Glissement du talus amont;**
- ❖ **Soulèvement hydraulique;**
- ❖ **Erosion interne : focus sur l'érosion de conduit;**
- ❖ **Erosion externe par surverse.**

❑ POUR CHAQUE MÉCANISME :

- ❖ **Principaux résultats;**
- ❖ **Problématiques rencontrées;**
- ❖ **Perspectives.**

STABILITE AU GLISSEMENT – TALUS AVAL

□ RESULTATS :

- ❖ Talus raide c'est-à-dire pente entre 1,5 H/1V et 2H/1V.
- ❖ Stabilité fonction de la cohésion et distribution des pressions interstitielles
- ❖ Respect des critères ($F_s \geq \gamma_m$) pour les ouvrages confortés.
- ❖ Non respect des critères pour la majorité des ouvrages non confortés.

DOIT-ON NECESSAIREMENT PREVOIR UN CONFORTEMENT ?

STABILITE AU GLISSEMENT – TALUS AVAL

❑ FOCUS SUR LES PROBLEMATIQUES

❑ Cas dimensionnant = RN

❑ Accidentologie : il n'y en a pas (ici est exclu le glissement du talus aval de la digue de Cercey à la construction)

❑ Incidents : OUI :

❖ Traces d'humidité sur le talus aval !

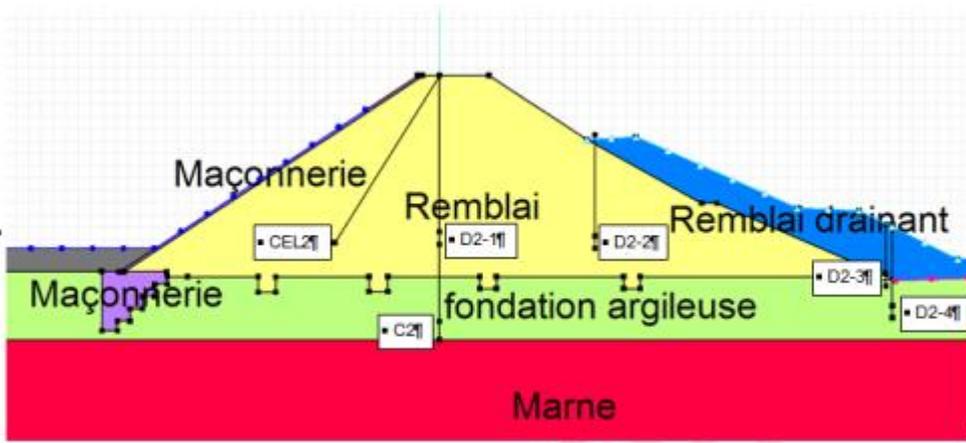
❖ Montées de piézométrie à retenue haute = calage de la ligne saturation délicate. Plusieurs facteurs :

1. Influence de la pluviométrie : saturation des remblais superficiels et alimentation des piézomètres.
2. Influence du creux estival (soutien d'étiage) et de la remontée rapide du plan d'eau lors des phases de remplissage.
3.

Que se passera t-il pour des remontées du plan d'eau au-delà de RN/PHE ?

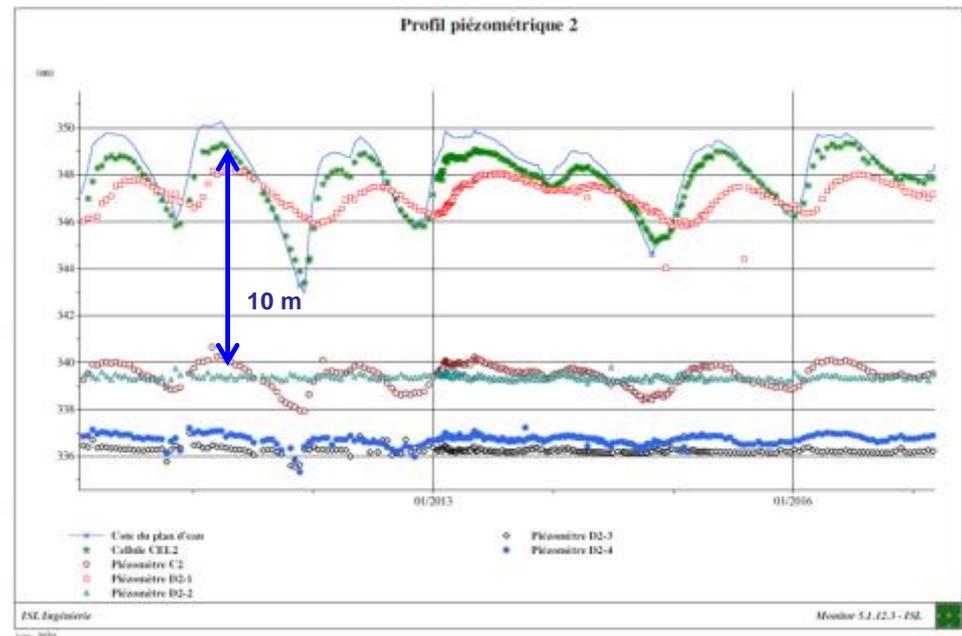
STABILITE AU GLISSEMENT – TALUS AVAL

□ Distribution des pressions interstitielles : Exemple du barrage de la Liez :

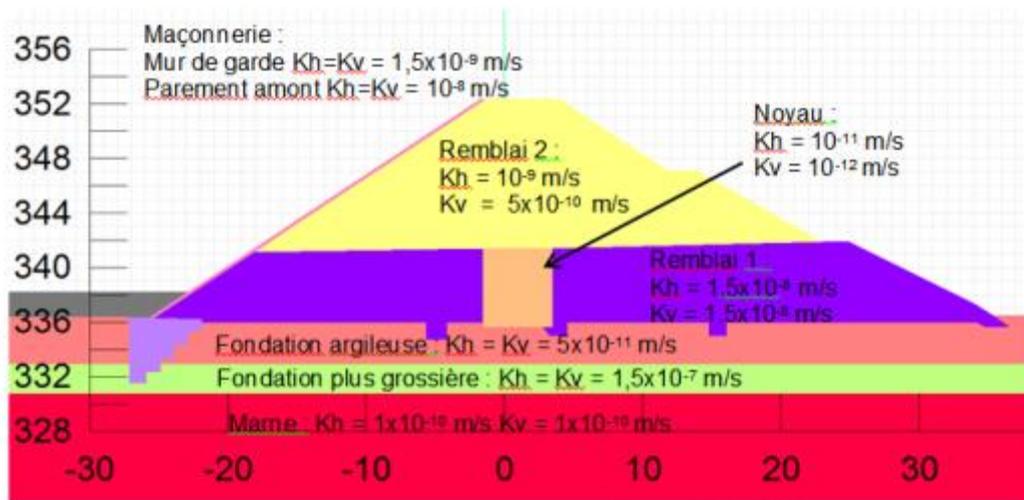


Coupe schématique du barrage de la Liez

Rabatement de 10 m entre parement amont et 1^{ère} risberme



STABILITE AU GLISSEMENT – TALUS AVAL



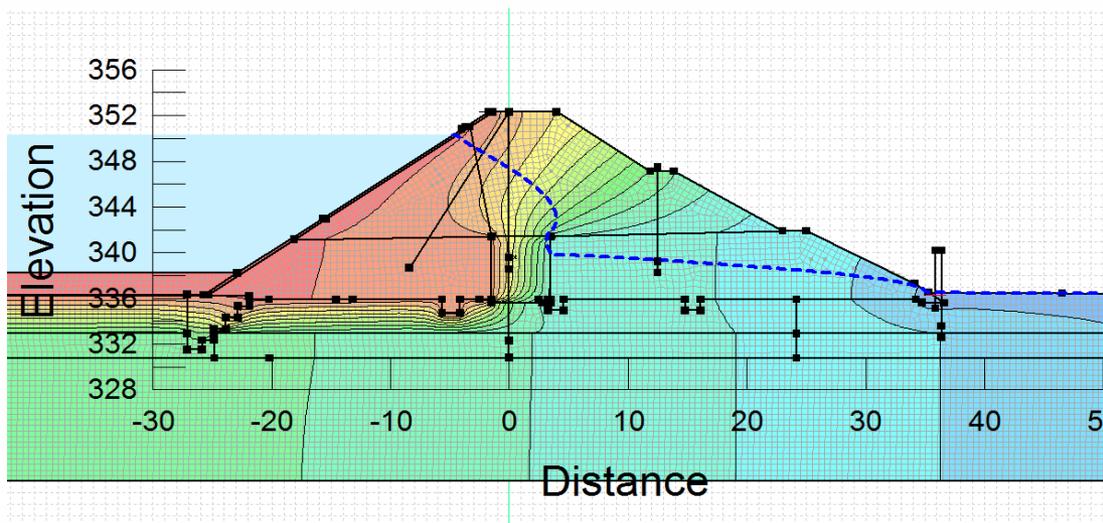
❑ PAS VRAIMENT HOMOGENE

❑ CALAGE SUR DES EVENEMENTS PASSES

❖ En transitoire

❖ À partir des données d'auscultation

❖ En cohérence avec des essais d'eau



STABILITE AU GLISSEMENT – TALUS AVAL

❑ COHESION DES REMBLAIS :

❖ Grande variabilité dans les essais triaxiaux. :

Sondage	Profondeur	C' (kPa)	Phi' (°)
C2-1	4,65-5,25m	6	29
C2-3	10,0-10,75m	43	21
C3-2	7,4-8,1m	12	31
C4-1	4,55-5,2m	35	28
C5-2	8,55-9,1m	22	27

Résultats essais triaxiaux Cu+u– barrage de la Vingeanne

	Cohésion c' (kPa)	Angle de frottement ϕ' (°)
SC1 (*) 3,10-3,20 m	0	26
SC1 3,20-3,30 m	9	30
SC2 3,00-3,50 m	16	33
SC3 3,00- 3,50 m	26	29
SC4 2,30- 2,80 m	28	26

Résultats essais triaxiaux CD – barrage de Beaurois

- ❖ Re-dépouillage quasi systématique par rapport aux résultats proposés par le BE de géotechnique (être vigilant sur les PV des essais).
- ❖ Cas des remblais à faible argilosité : $c'=0$ kPa → Excès de prudence?

Comment prendre en compte la cohésion capillaire du matériau ?

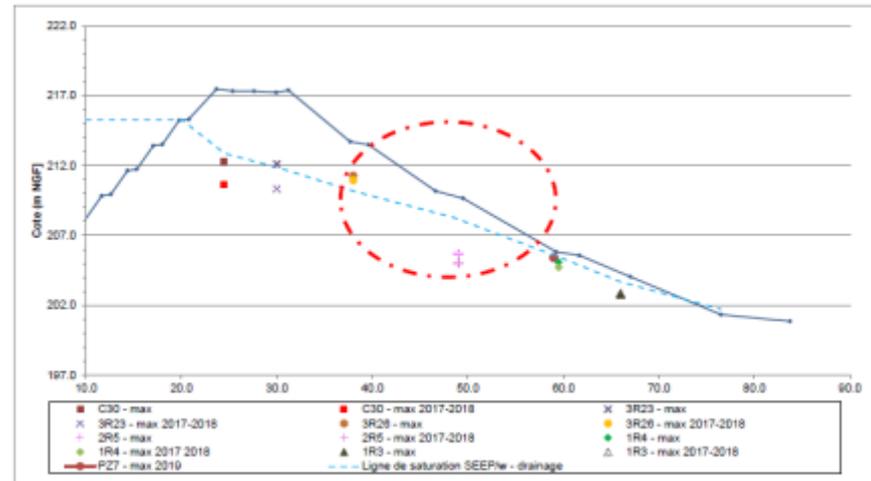
STABILITE AU GLISSEMENT – TALUS AVAL

REX du barrage du Bourdon :

	Triaxial CD		Cisaillement rectiligne CD	
	Cohésion c' (kPa)	Angle de frottement ϕ' (°)	Cohésion c' (kPa)	Angle de frottement ϕ' (°)
SC1 (0,40-3,80 m)	0	35		
SC1 (7,80-8,50 m)	-	-	0	35
SC2 (3,60-3,80 m)	0	37		
SC2 (6,00-6,50 m)	-	-	0	35
SC3 (3,00-3,50 m)	0	35		
SC4 (1,50-2,50 m)	0	35		
SC5 (3,20-4,00 m)	-	-	0	37
SC6 (3,00 -3,50 m)	-	-	0	31
SC6 (6,50-7,00 m)	-	-	0	35
SC7 (2,50-3,50 m)	-	-	0	35

Cohésion saturée : $c' = 0$ kPa

Résultats des essais triaxiaux CD et cisaillement – barrage du Bourdon

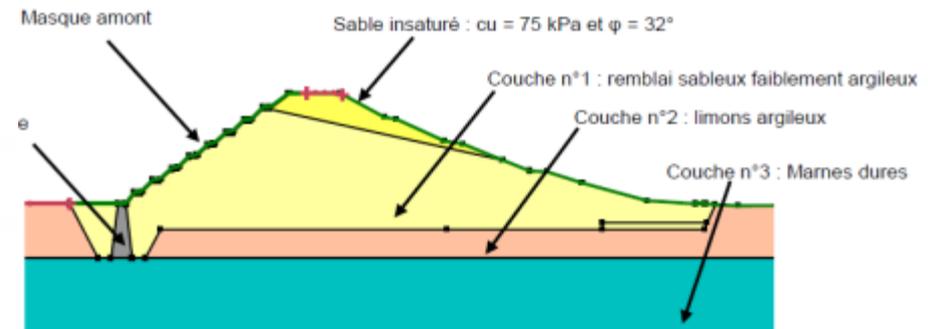


Ligne de saturation calculée sous SEEP/w et différence entre piézomètres en partie centrale et en rive

❖ Prise en compte de la cohésion capillaire?

❖ Evaluation possible¹ :

- ❖ Corrélation entre degré saturation et cohésion capillaire (Fleureau; 2002)
- ❖ Marge de sécurité à considérer sur la cohésion capillaire.



Présence d'un sable non saturé en partie supérieure du talus ?

¹Caractérisation du critère de rupture pour un remblai non saturé en condition normale d'exploitation, colloque CFBR, 27 et 27 novembre 2019

STABILITE AU GLISSEMENT – TALUS AVAL

CONCLUSION/PERSPECTIVES :

- ❑ Rappel de l'objectif : Justifier les talus aval sans les conforter
- ❑ Comment fait-on quand on doit compter sur la cohésion capillaire ?
 - ❖ Lors de l'occurrence de la crue de projet
 - ❖ Lors de la saturation des remblais superficielles par la pluviométrie
- ❑ Importance de disposer d'un dispositif d'auscultation pertinent et fiable
- ❑ Importance des inspections visuelles des talus aval : Résurgence sur talus aval = saturation
- ❑ Etude de sensibilité pour choisir le confortement : opportunité de ne pas réaliser systématiquement une recharge filtrante/drainante si on peut compter sur la cohésion capillaire.

□ RESULTATS :

- ❖ Talus raide : 1,5H/1V.
- ❖ Non respect des critères pour la majorité des ouvrages confortés ou non confortés.
- ❖ Influence probable de la vitesse de vidange
- ❖ Des accidentologies anciennes mais bien documentées

DOIT-ON NECESSAIREMENT PREVOIR UN CONFORTEMENT ?

CONFORTEMENT AMONT = CONFORTEMENT CHER ET DIFFICILE !

❑ REX ACCIDENTOLOGIE : TORCY-VIEUX

- ❖ Rupture par glissement du talus en 1831, 1837 et 1843
- ❖ Situation = plan d'eau quasi vide
- ❖ Confortement par contreforts en maçonnerie dès 1837 pour la partie Ouest.
- ❖ Nouveau glissement de 1843 = application du même confortement qu'en 1837
- ❖ Aujourd'hui difficulté à justifier la stabilité !
- ❖ Influence des contreforts : OUI mais estimation du gain en frottement de la tranche glissante limité à 5%
- ❖ Confortement par contrefort = non adapté aujourd'hui

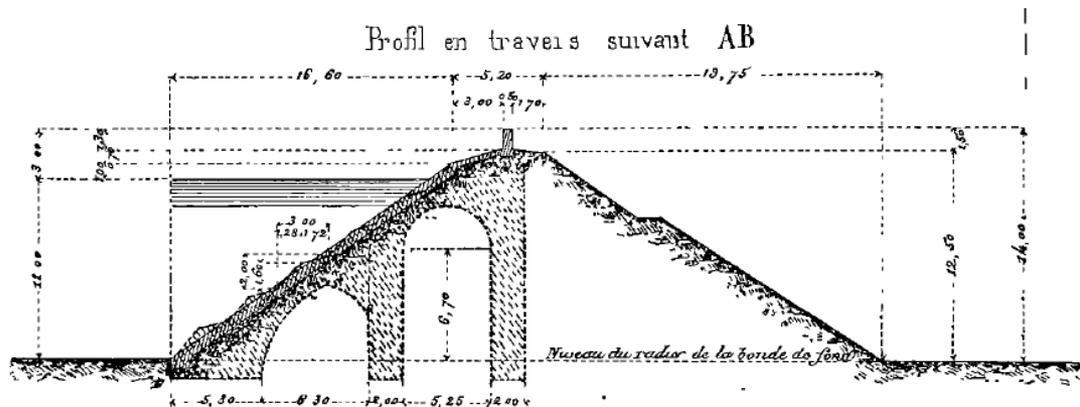
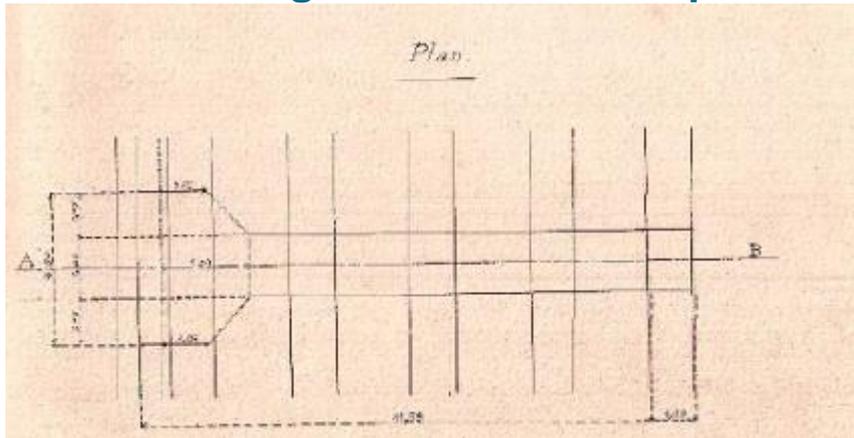


Fig. 6 et 7. — Digue de Torcy-Vieux. Plan et profil en travers, suivant AB.

STABILITE AU GLISSEMENT – TALUS AMONT

- ❑ Barrage de Charmes (construction entre 1902-1906)
- ❖ rupture par glissement du talus en 1909
- ❖ Conditions : plan d'eau bas et vitesse de vidange de 17 cm/jour
- ❖ Deux mesures adoptés :
 - ❖ Eperons en maçonneries
 - ❖ délestage des remblais en partie supérieure.



Vue en plan des éperons en maçonneries

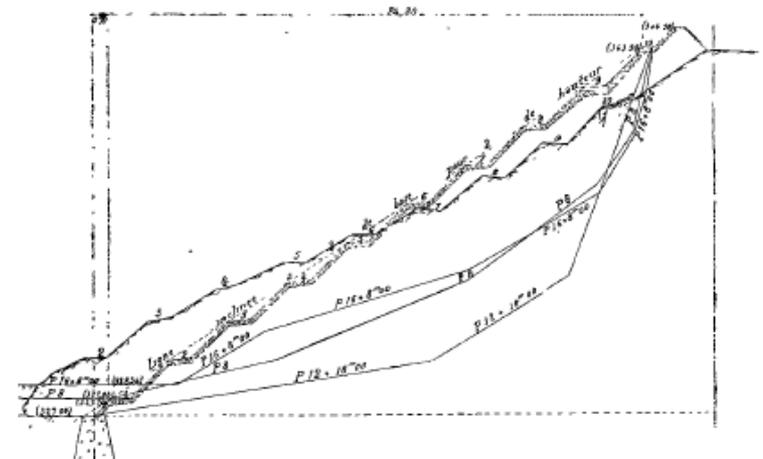


Fig. 5. — Surface de glissement en 1909. Résultats d'ensemble des sondages.

Aujourd'hui difficulté à justifier le confortement. Toutefois cela semble fonctionner (vidange 2001 : vitesse maximale de 8 cm/jour et pas de glissement).

CONCLUSIONS/PERSPECTIVES :

❑ Confortement cher et difficile : peut-on justifier les talus amont sans confortement?

- ❖ limiter les vitesses d'abaissement (viable à court terme?)
- ❖ Influence de la cohésion capillaire lors de la désaturation des remblais en vidange.
- ❖ Evaluer les capacités de drainage des parements :
 - ❖ Piézomètres en arrière des parements
 - ❖ Essai d'eau pour caractériser la perméabilité
 - ❖ Calage sur des événements connus.
- ❖ Méthode innovante pour conforter des talus raides.



Focus sur l'érosion de conduit :

- ❑ Utilisation des essais HET réalisés dans le cadre des campagnes de reconnaissance récentes.
 - ❑ Conduits envisagés :
 - ❖ traversant (à travers l'ouvrage)
 - ❖ débouchant dans les galeries maçonnées (réduction importante du chemin hydraulique = gradient important).
 - ❑ L'érosion débute si la pression de l'eau à l'intérieur du conduit est égale à la contrainte de cisaillement critique, soit $P_{f10} = T_c$.
- ➔ Obtention d'un rayon d'initiation du défaut en fonction du gradient d'écoulement.

RESULTATS:

- ❑ 3 ouvrages avec des accidents mais pas de rupture
- ❑ Apparition de fontis en crête à proximité des ouvrages traversants. Mécanisme stabilisé lors de la découverte.
- ❑ Essais HET réalisés sur ces ouvrages en particulier. Des contraintes critiques très variables entre ouvrage (150 Pa pour un ouvrage et 1-5 Pa pour un 2nd).
- ❑ Essai HET = conclusion sur l'érosion de conduit le long de l'ouvrage **MAIS** :
 - ❖ Vigilance sur les éventuels défauts dans les ouvrages traversants (gradient fort) = mécanisme des accidents déjà observés.
 - ❖ Des parades : inspection périodique/réfection maçonneries!



Photo n° 2 : fontis (septembre 1997)



Photo n° 6 : fontis (avril 1998)



Illustration 3: Bouche du frontis



Illustration 4: Dégagement des terres déstructurées

- ❑ REX RÉALISÉ SUR UNE DIZAINE D'OUVRAGES MAIS DE NOMBREUX OUVRAGES DU PARC FRANÇAIS CONCERNÉS?
- ❑ OBJECTIF : trouver des parades au confortement cher et difficile pour des ouvrages anciens ayant fait leur preuve (et sans vieillissement avéré).
- ❑ DES PISTES :
 - ❑ Cohésion capillaire : évaluation/prise en compte/marge de sécurité
 - ❑ Une caractérisation systématique des remblais : essais HET, classification GTR (granulométrie, teneur en eau, saturation, limite d'Atterberg,...)
 - ❑ Une optimisation facilitée pour les ouvrages auscultés depuis de nombreuses années.
 - ❑ L'approche historique à ne pas négliger.



MERCI POUR VOTRE ATTENTION