

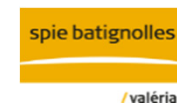
*Journée technique CFBR – CFMS –
SPTF FNTP du 16 mai 2019*

23 Avenue Condorcet, Villeurbanne **INDURA**
Auvergne-Rhône-Alpes

REX Barrages en sols fins

*J-M Lejeune Consultant
J-J Fry EDF*

Journée parrainée par :



CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins



Sommaire

- 1. Barrages en terre
- 2. Reconnaissances et études
- 3. Construction, contrôle, pathologie
- 4. Auscultation
- 5. Conclusion

ETUDES - BARRAGES EN TERRE

« Humilité devant la nature et respect de quelques fondamentaux »

DONNEES DU SITE

- Climat – Régime pluviométrique et hydrologique
- Conditions sismiques
- Topographie et morphologie
- Nature des fondations (épaisseur meuble déformable – niveau rocheux)
- Ressources du site en matériaux (terres, filtres, enrochements)
- Réutilisation des matériaux des fouilles potentielles (évacuateur, Usine et chenaux, DP...)

AUTRES ELEMENTS CLE

- Parti pour l'évacuateur de crue
- Durée des travaux et programme
- Maîtrise des crues en phase travaux

SANS OUBLIER... Exigences client – Coût.

SOLS FINS - CLASSIFICATIONS

1- Critère % de fines :

- USCS: + de 50% < 74 μ
- British standard: + de 35% < 60 μ
- SHW Britannique: + de 15% < 60 μ
- GTR: + de 35% < 80 μ sols de classe A

2- Plasticité (<400 μ) et sensibilité à l'eau :

- W, WL, WP, IP
- Indice de consistance $I_c = (WL - W) / (WL - WP)$

Mais des sablo graveleux grossiers 0/200mm à plus de $\approx 12\%$ de fines ont à court terme un comportement de sols fins (traficabilité coté humide) et sont quasi étanches.

Ex: Chili 1982 – Barrage homogène Machicura secondaire H=45m



Photo JM Lejeune

Mais aussi Influence de l'origine sur les propriétés géotechniques des sols fins



**Alluvial
Sédimentaire
Glaciaire**

80% < 80 μ
IP = 25 à 32%
 $\Phi' \approx 22$ à 24°



**Sols résiduels
(Altérations en
place des
roches sous
Climat tropical)**

75% < 80 μ
IP $\approx 25\%$
 $\Phi' \approx 32$ à 34°

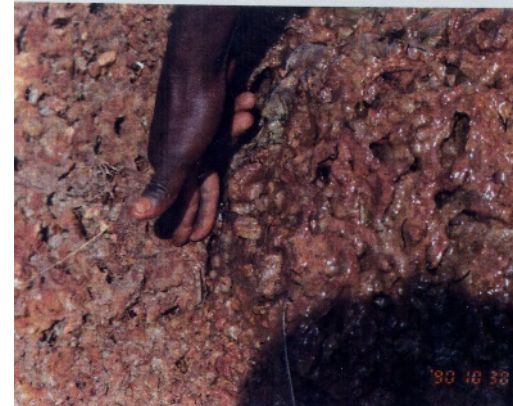
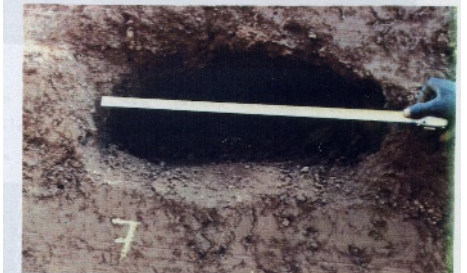
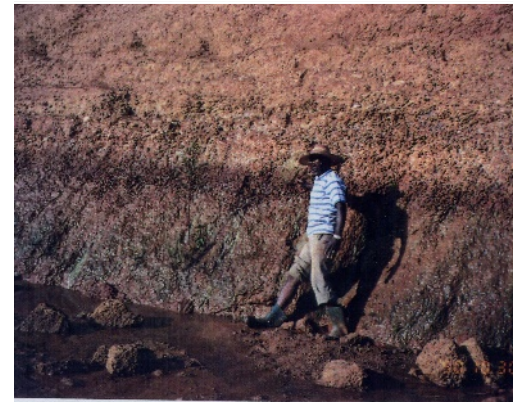
ALTERATIONS – NOMENCLATURES

ANOMALIES

Nature (suivant roche mère)	Degré altération roche mère (UK)	Appellation	Observations
-----------------------------	----------------------------------	-------------	--------------

Sol résiduel totalement cimenté	Cuirasse (massive) - Forte concentration hydroxydes de fer et aluminium		"Latérites"	Souvent non ripable
Sol résiduel partiellement cimenté	Latérites gravillonnaires (nodules 5/25 - rognons et fines)			Granulométrie discontinue (nodules et fines)
Sol résiduel	argile latéritique / arène argileuse	VI à V	"Saprolites"	VI: Sol - Structure roche mère non visible
	argile silteuse / arène sableuse	V		V et IV : Sol mais structure de la roche mère encore visible
	apparition de rognons rocheux dans le sol résiduel	IV		
Roche mère	moins de 50% de roche	III	Roche mère	
		II		
	Sain	I		

Burkina – La Comoé – Canalicules observées – Chenal DP et fondation RG: taille: quelques mm à 30 cm



Difficultés accrues en paysage volcanique : Alternances : roches massives, roches altérées poreuses, paléosols (terres) intercalés, roches tendres (tuffs), cendres déposées en environnement lacustre, etc.

MISE EN GARDE: Extrême sensibilité des caractéristiques des sols tropicaux (limites Atterberg, Proctor...) au mode de préparation des terres pour les essais de laboratoire - Source de lourds problèmes d'étude, construction et contrôle.

EXEMPLE DE ZONAGE – LA COMOIE (1989-91) BURKINA – Pluie:1250 mm/an

Argiles latéritiques
& latérites gravillonnaires

PBS TERRES ? NON

Spec: -1/+1 et >95% OPN

Contrôles (Hilf - Nb: 1280)

Argiles latéritiques (1)

- $w-w_{opn} = -0,1$
- 97,5% OPN

Latérites gravillonnaires (2)

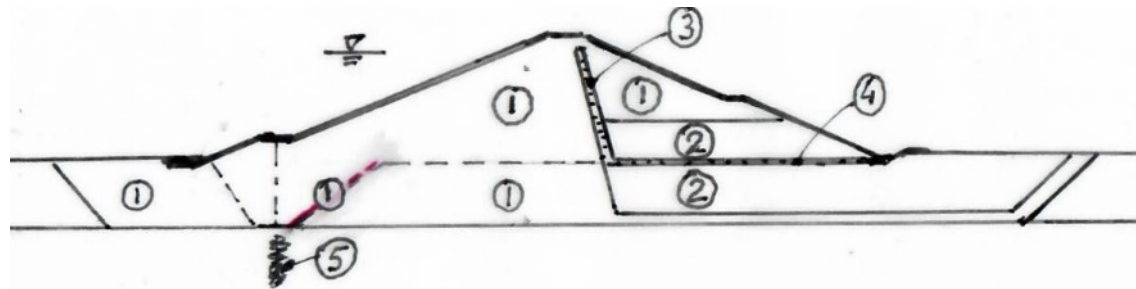
- $w-w_{opn} = -0,4$
- 98,1% OPN

Auscultation fin construction

- $R_u \approx 0$ (20 capteurs)

MAIS DIFFICULTES:

- **Filtre fin - Protections**
- **Fondation**
(canalicules en RG)



Coupe type zone rivière (purge)

(1) Argile latéritique (2) latérites gravillonnaires (3) Filtre fin (4) tapis drainant
(5) injections TAM dans les altérations + obturateur au rocher

--- Coupe zone centrale avec canalicules

.....: géotextile

CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins

LA COMOIE (Suite)- Points délicats: Filtre et protections des talus en sols fins



Protection talus amont 2,5/1:
Géotextile 510 g/m² et moellons latéritiques 12,5kg à 40kg H=30 à 45cm - Posés sur queue

Protection talus aval 2,2/1
Moellons latéritiques 15/25cm + bourrage de grave latéritique entre les blocs

Filtre
L=80cm



Barrages en terre

Photos JM Lejeune

JML

EXEMPLE DE ZONAGE ALGERIE - DOUERA

SMD: $a_{\max}=0,35g$ $M=6.3$

SMP: $a_{\max}=0,53g$ $M=7.2$

PB NOYAU ARGILE? : non

Mais difficultés avec les

Recharges (grès très tendre)

$\approx 15\% < 80\mu$ et $\approx 25\% > 20mm$ après compactage

Recharge Amont :

Non liquéfaction:

Compactage $> 98\%$ OPM



Couche 40cm

12 p V4 + 4 p V4 en statique

Planches d'essais

avec SPT:

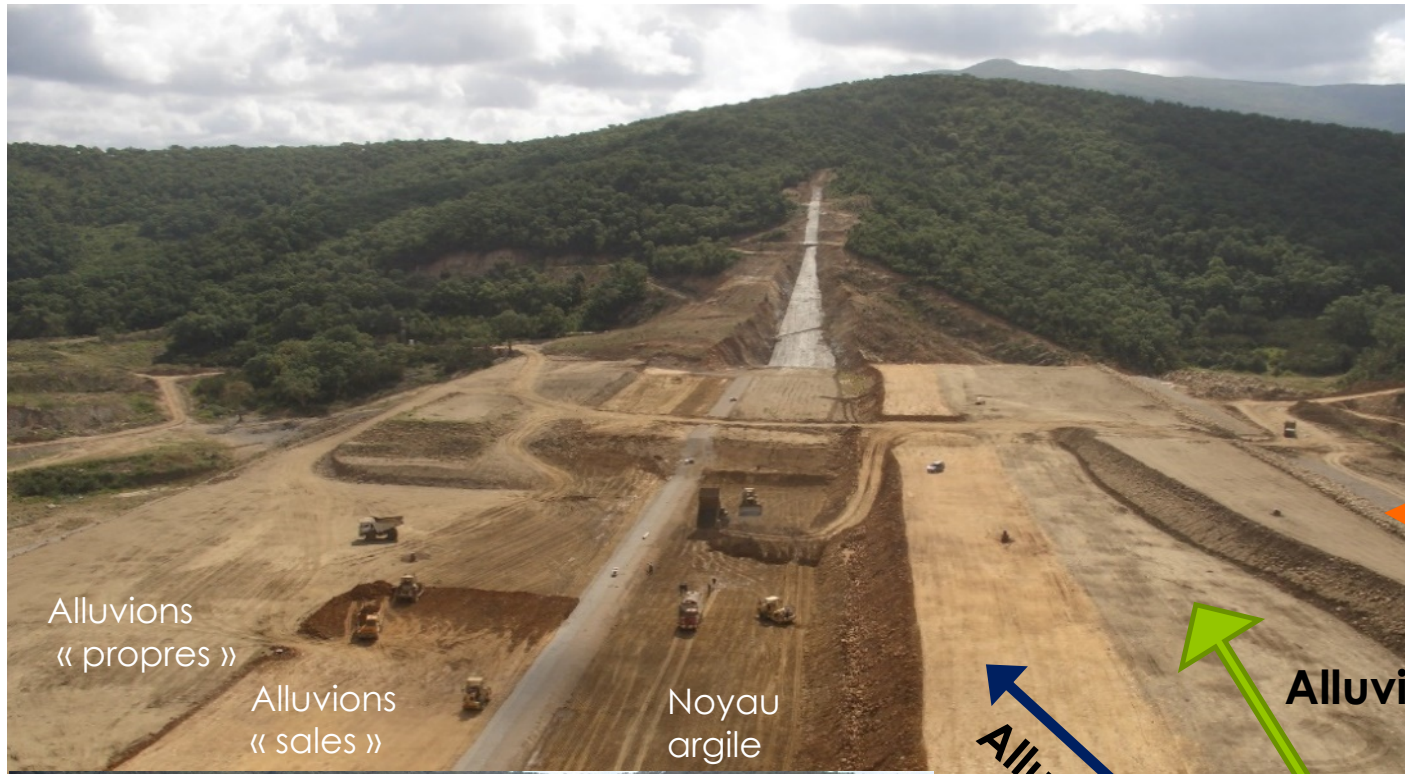
$(N1)_{60} \approx 35cps$



Photos JM Lejeune



CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins



EXEMPLE DE ZONAGE - TUNISIE KEBIR (Tabarka)

Alluvions
« propres »

Alluvions
« sales »

Noyau
argile

Riprap: gros blocs du
contact
Alluvions
propres/substratum

Alluvions « propres »

Alluvions « sales »



Adaptation du phasage



Barrages en terre

Photos JM Lejeune

JML

ETUDES « PROSPECTION »

1976: Une prospection « à l'ancienne »

Noumbiel sur la Volta
Noire (Burkina / Ghana)
(EDF/DAFECO)



Photos JM Lejeune

Etudes - Prospection de site

Afrique, Altérations degré VI, V, IV avec nappe basse

Supériorité des puits manuels (fondation et emprunts): visitables par le géotechnicien

Echantillonnage de qualité possible :

- Boîtes cubiques et trouses coupantes + sacs
- Mesures au cohésimètre, poinçon...



Cameroun

Mokolo 1974 →

← La Mapé 1982



Photos JM Lejeune

Etudes - Essais en laboratoire

Identifications visuelle + identification labo

→ groupes de sols couvrant la plage de variabilité

Sur échantillon représentatif de chaque groupe:

A - Ré-identification complète dont minéralogie (Si mélange) et γ_s . Essais de compactage PN « soigné » avec tracé des teneurs en air 0, 5%, 10% et cohésimètre sur moulages côté humide.

B - Essais couvrant les plages de ($w - w_{OPN}$) et γ_d/OPN envisagées

- a. Résistance intergranulaire : triaxiaux CD ou CU+u saturés sous CP
- b. Résistance Résiduelle : cisaillement alterné à la boîte (si $IP > 27$)
- c. Résistance court terme: Triaxiaux UU
- d. Génération et dissipation des pressions interstitielles: R_u et C_v au triaxial
- e. Perméabilité après consolidation et avant cisaillement au triaxial
- f. Compressibilité, gonflement, perméabilité, C_v : à l'oedomètre

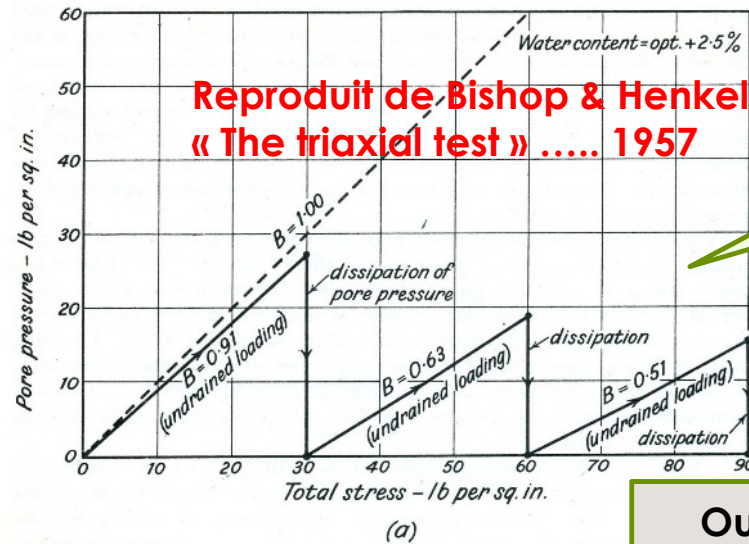
C – Dispersivité et érodabilité au pinhole test (ou HET)

MAIS : Difficulté en l'absence de planches d'essai de déterminer les valeurs caractéristiques des terres qui seront mises en œuvre sur chantier

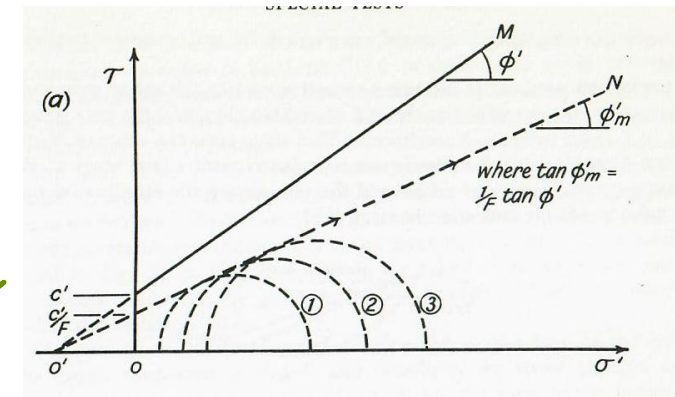
Compactage côté humide: Réponse en pression interstitielle au chargement non drainé

136

THE TRIAXIAL TEST: PART III



Un essai simple à réaliser au triaxial en chargement isotope:
 $B = \Delta u / \Delta \sigma$



Ou, plus délicat, à rapport de contrainte contrôlé (Bishop 1957!)

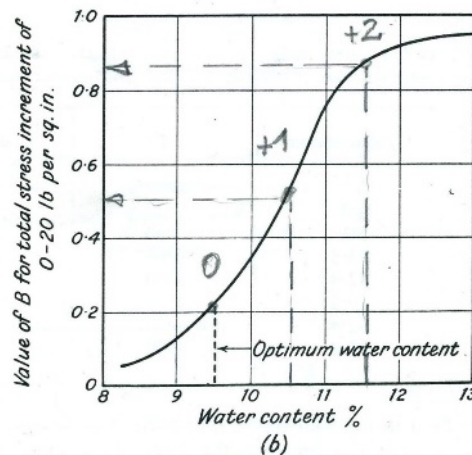


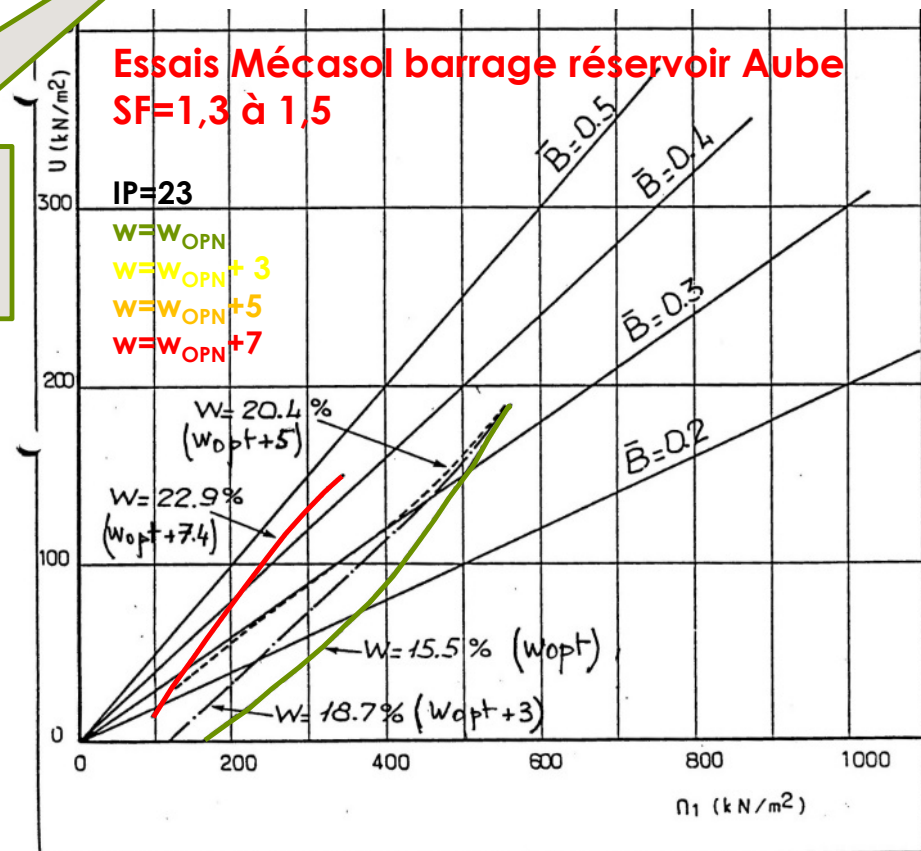
Fig. 97. Pore-pressure and dissipation tests on compacted boulder clay

- (a) Changes in pore pressure during a three-stage dissipation test.
 (b) Variation in the initial value of B with the water content at which the soil is compacted.

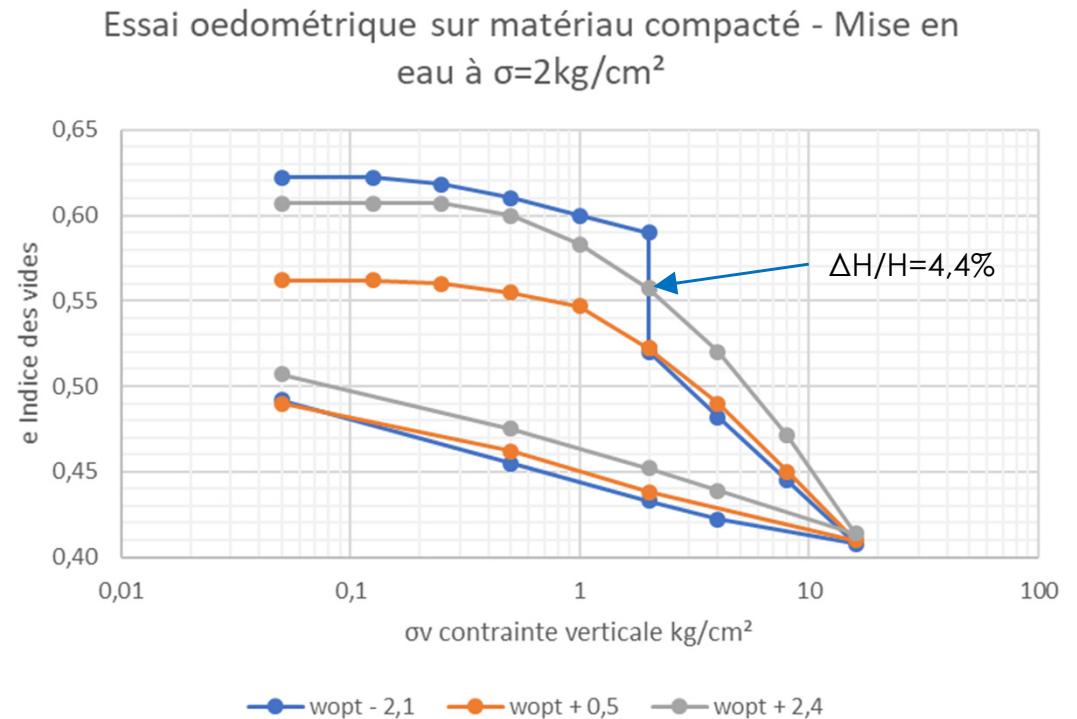
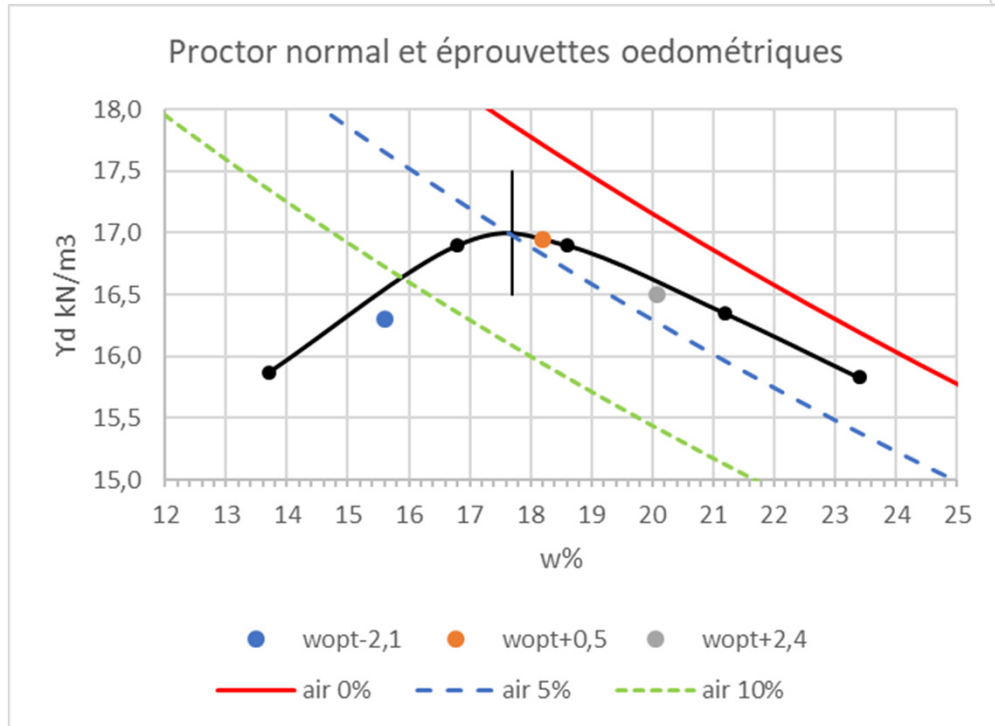


Professor A. W. Bishop

Essais Mécasol barrage réservoir Aube
 SF=1,3 à 1,5



Etudes – Essais Labo- Compactage coté sec: Effondrement de structure et augmentation de la perméabilité



Afrique - Emprunt : haute terrasse alluviale - $86\% < 80\mu$ - $WI=44$, $IP=30$

À $w_{opt}-2,1$: Effondrement à la mise en eau sous $\sigma_v = 200 \text{ kPa}$: $\Delta h/h = 4,4\%$

Effet sur perméabilité: $k(w_{OPN}-2,1) = 15 k(w_{OPN})$

ETUDES: Passage résistance au cisaillement labo – résistance opérative en masse sur le barrage

Représentativité des échantillons compactés au labo ?

- Variabilité naturelle des terres et donc de w_{OPN} et de $w - w_{OPN}$
- Surfaces de cisaillement dues aux engins NON incluses et donc pas d'effet de rupture progressive sur ces surfaces,
- Effet de la dimension et du mode de préparation des éprouvettes labo (détails de préparation du sol, compactage statique ou dynamique...),
- Vitesse de chargement labo >> vitesse chantier



Prudence et corrections nécessaires pour passer aux valeurs de calcul

Nota: Les prélèvements intacts en gros diamètre sur des planches d'essai (lorsqu'on en dispose....) réduisent en partie ces problèmes

CORRECTIONS A APPORTER AUX MESURES LABO

Résistance non drainée opérative en masse:

Argiles très plastiques:

Su terrain $\approx 0,60$ Su labo essai rapide UU petit diam

Source: P. Vaughan (Clay fills), Potts et al, Rupture Carsington

Confirmé par la rupture du Mirgenbach:

Su terrain $\approx 0,60$ Su cohésimètre

Résistance intergranulaire en masse

Prise en compte de plans aléatoires (P. Vaughan)

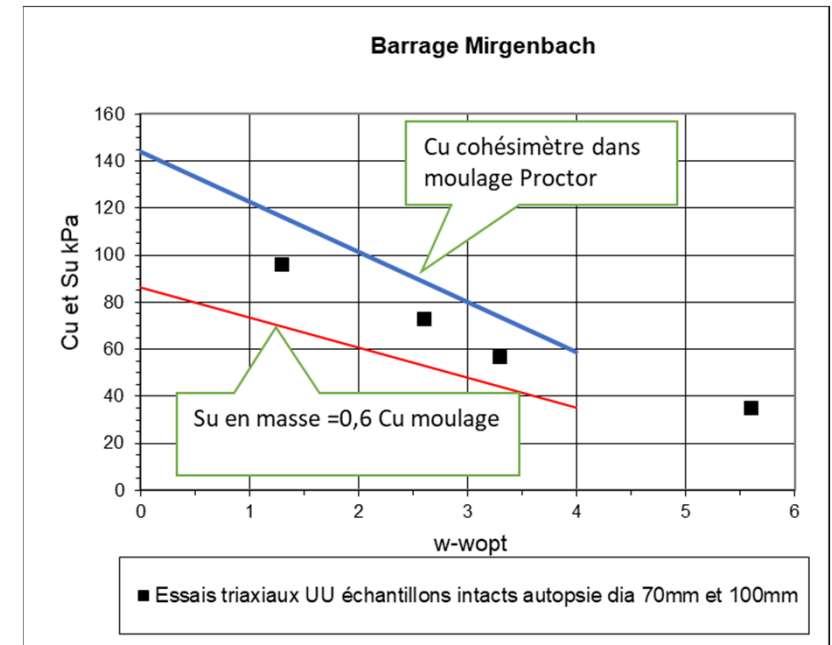
(non valable si plans horizontaux généralisés dus aux engins)

Perméabilité en masse

Anisotropie – Incidence des inter-couches

CALCULS

- Ecoulements
- Stabilité



Dossier d'appel d'offres- Spécifications

- Investigations complémentaires (notamment de début de chantier)
- Nature, provenance et caractérisation des matériaux
- Préparation et mise en œuvre des matériaux
 - Planches d'essais et essais associés
 - Essais de convenance
 - Compactage: Pour les terres, $w-w_{OPN}$, %OPN, fourchettes de résistance non drainée
 - Compacteurs: certains peuvent être proscrits (RV bille lisse)
 - Traitement des inter-couches
 - Méthodes et fréquences de contrôles
- Equipement du laboratoire de chantier
- Pose et suivi des appareils d'auscultation en phase construction

Dossier d'appel d'offres - Information géotechnique

Regroupe les reconnaissances et essais de la phase étude - A monter avec le soin le plus extrême – Support potentiel en phase travaux des réclamations géotechniques et de leurs conséquences (extensions de délais et coûts) dans des Marchés de type FIDIC

CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins

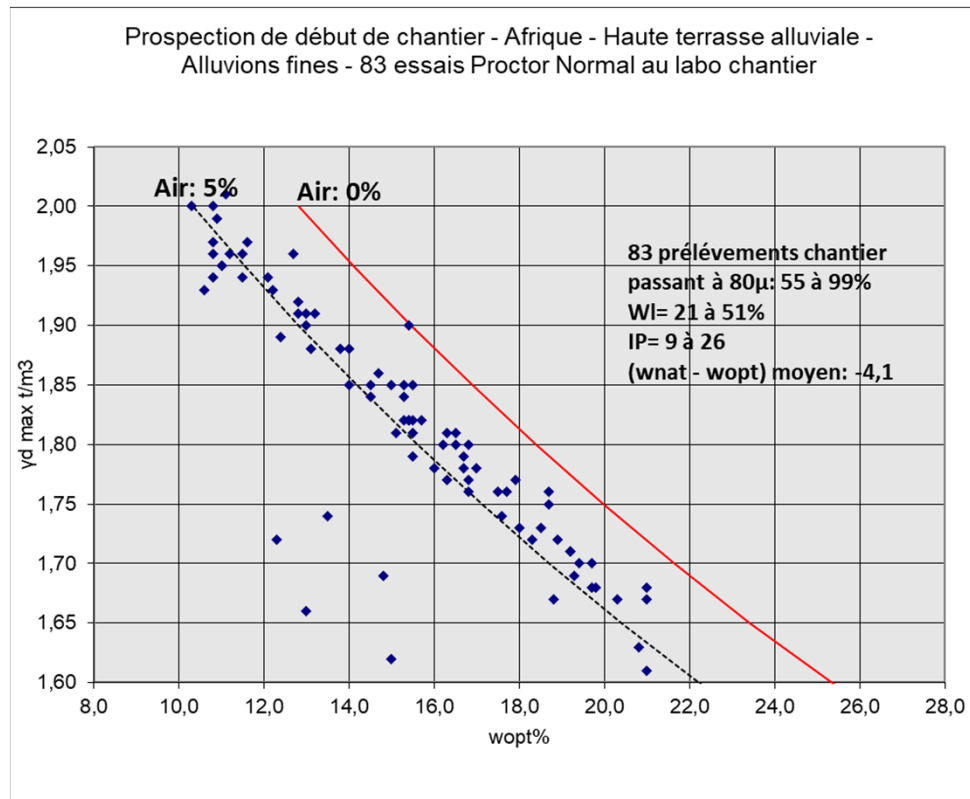
Une difficulté en étude, construction et contrôles :

La variabilité naturelle des terres (granulométrie et limites)

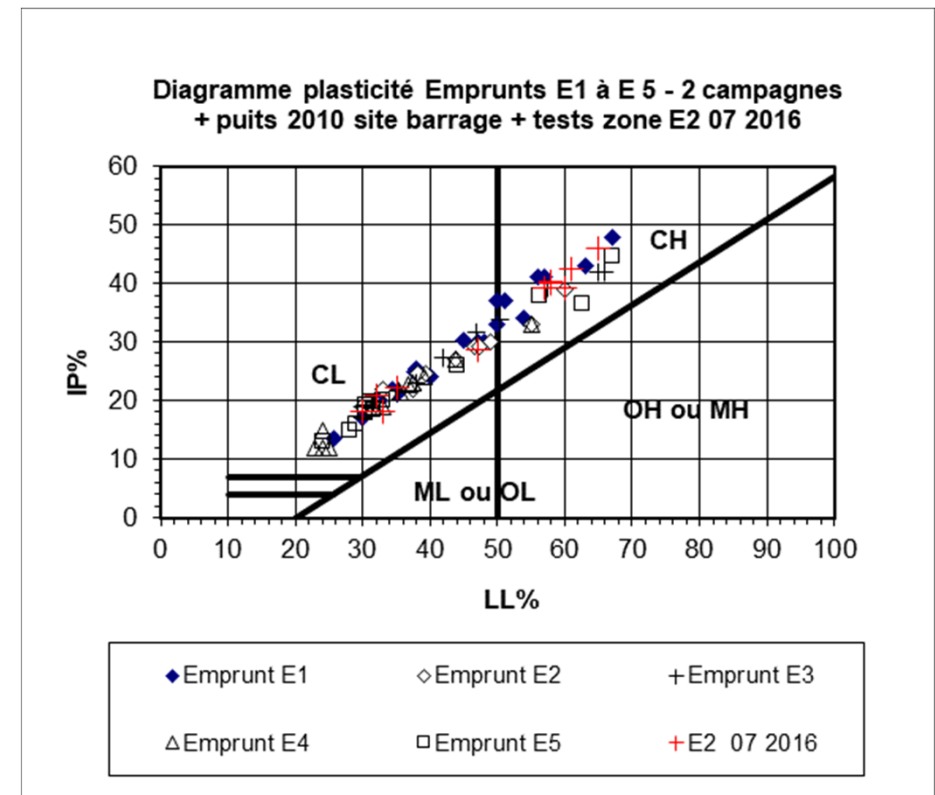
(même en zone géographiquement limitée et géologiquement / morphologiquement homogène....

.....et donc des essais Proctor et des caractéristiques mécaniques associées

Exemples : Essais de convenance en début de travaux pour ≈ 3 à 4 hm^3 de terres



Afrique de l'Ouest – Haute terrasse- Alluvions fines
Variabilité des Proctors normaux



Tunisie – Remplissage alluvial fin dans la vallée de l'Oued – Variabilité des limites d'Atterberg

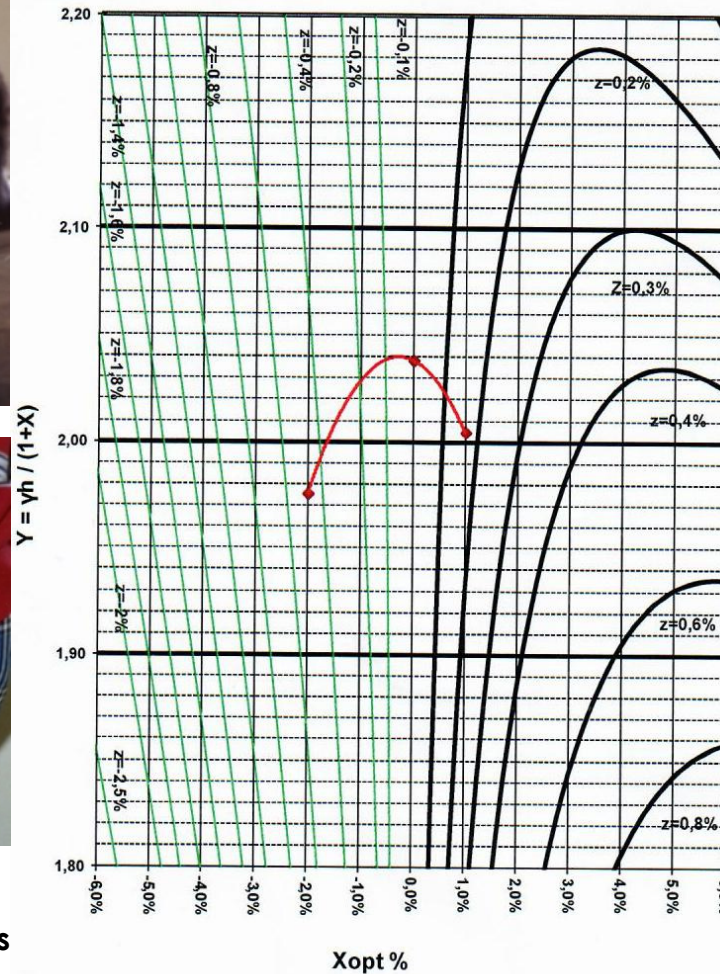
CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins

Un moyen de s'affranchir de cette variabilité:
Contrôle de compactage par la Méthode de Hilf
Associée à une mesure de densité humide in situ



Photos F. Cointe

.....et néanmoins nombreux chantiers toujours
« contrôlés » avec « Proctors de référence » ...



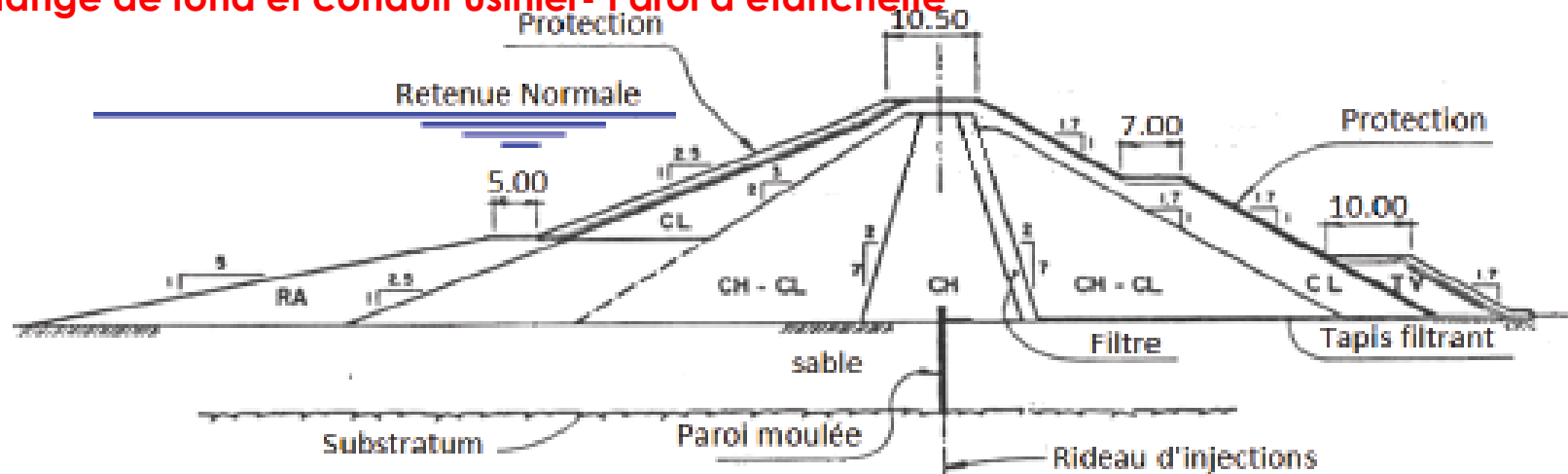
Construction



Mesures de S_u au cohésimètre
dans le moulage

Modification radicale d'un projet d'exécution

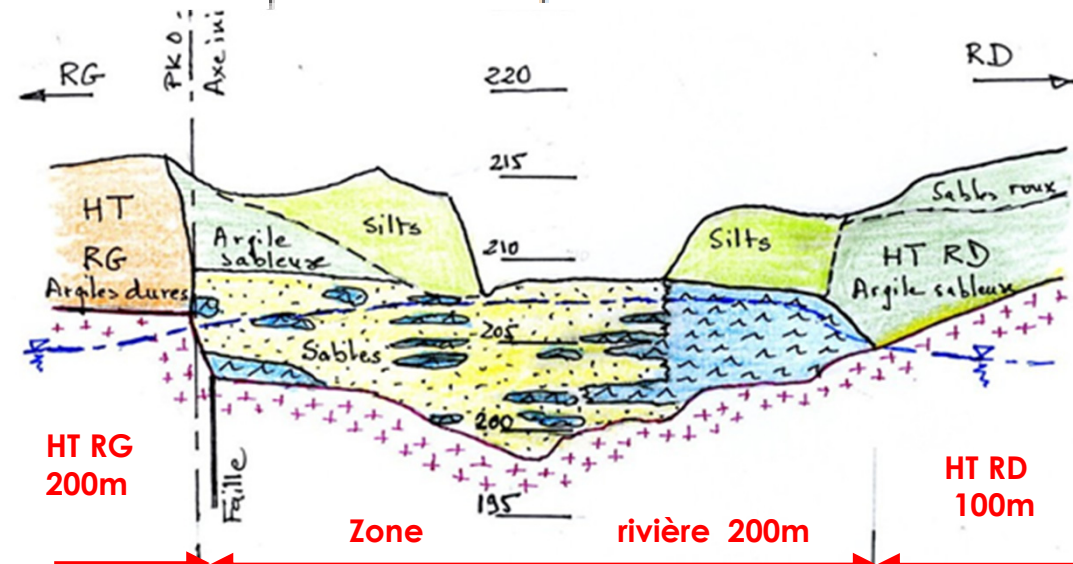
(A) Etude et Marché travaux: Section en rivière - Barrage zoné en argile - Dérivation par vidange de fond et conduit usinier- Paroi d'étanchéité



Les constatations en début de chantier...



Argile sèche et très dure de HT (wopt-4,5). Zonage d'emprunts en termes CH, CH-CL, CL impossible en exploitation industrielle tant en termes géographiques qu'altimétriques



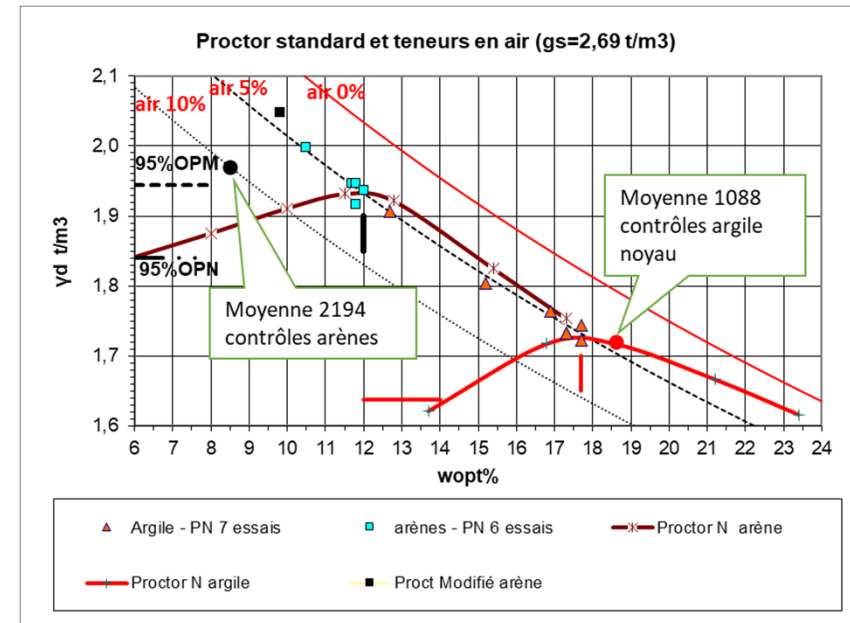
Argiles bleutées organiques Su cohésimètre $\approx 30\text{kPa}$ en quasi continuité amont aval

Modification radicale d'un projet d'exécution

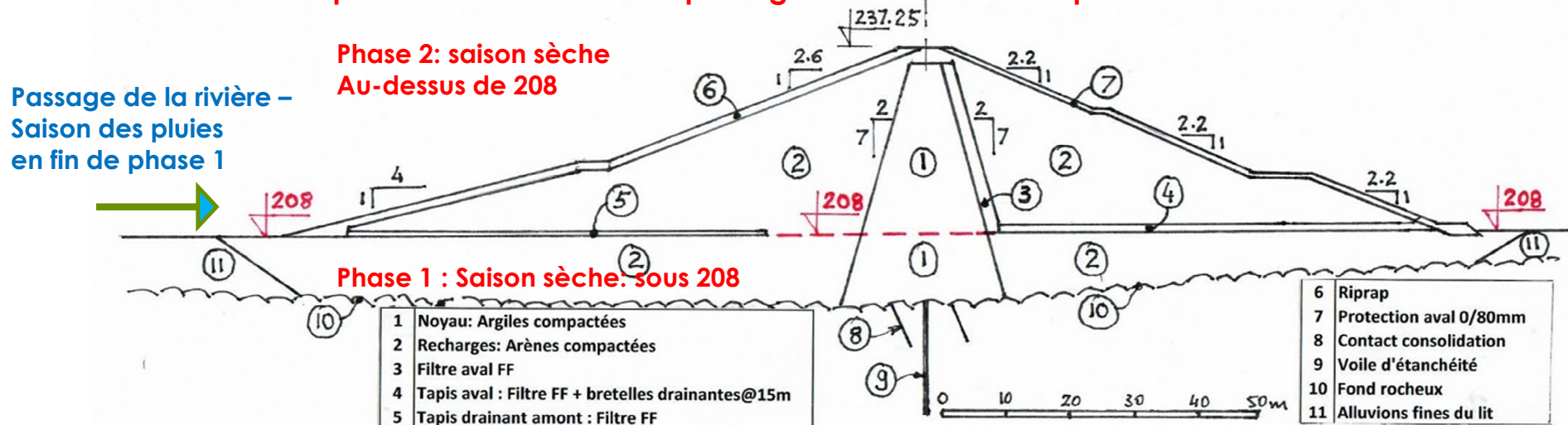
.....Essais terrain et labo sur un matériau alternatif moins problématique: arènes d'altération (10 à 30% < 80 μ)



↓
Projet
d'exécution
modifié



(B) Tel que construit: Barrage Noyau argile (1) + Recharges arènes (2) fondé au rocher après purge totale - - Deux phases de travaux avec passage de la rivière sur la partie basse



CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins

Phasage de travaux dans la zone en rivière



1- Purge des alluvions et préparation rocher en fondation du noyau



3- Fin de la saison des pluies, après passage de la rivière sur la partie basse



	Nouvelles spécifications						Résultats planches d'essai
	%<5mm	% < 80μ	LL%	IP%	w-wopt	%OPN	
Argiles du Noyau	90 à 100	> 40%	20 à 50	12 à 32	0 à +2	> 94% toutes mesures > 96% pour 90% des mesures (**)	Couche 30cm - 4 passes CAT 825
Arènes des Recharges	50 à 100	5 à 30	<36	<20	-2 à +1(*)	> 94% toutes mesures > 96% pour 90% des mesures (**)	Couche 50cm - 4 passes Ingersoll rand V4

(*) spécification élargie à -3,5 à +1 en dernière phase de travaux

(**) examiné par série de 20 résultats



2- Construction partie basse sous 208



4- Vue générale de la zone rivière en fin de saison des pluies

5- Construction au-dessus de 208

Photos JM Lejeune

CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins

Incidence du passage de la rivière sur la partie basse du barrage

				Résultats des controles										
Zone	Période	Nb controles (*)	w-wopt Spec	Hilf		Etuvage Hilf		Caractéristiques moyennes de mise en œuvre						
				%OPN	w-wopt	%OPN	w-wopt	w%	γd	γh	S%	air%	%< 80μ	IP
Arènes recharges	Janvier - Juillet 1991	750	-3 à +1	99,1	-1,4	99,0	-1,3	8,7	1,96	2,13	63	9,9	14,7	14,5
	Novembre 1991	52		100,6	-1,5	100,4	-1,3	8,9	1,98	2,16	67	8,6		
Argiles du Noyau	Janvier - Juillet 1991	266		97,8	+0,7	97,6	+0,9	17,4	1,75	2,05	88	4,3	80	23
	Novembre 1991 12 tests	12		98,1	+ 0,2	97,7	+ 0,6	18,7	1,72	2,04	90	3,7		

Arènes ys 2,685

Argiles ys 2,680

(*) Controles densité in situ + Hilf + étuvage 24h points Hilf et in situ

Essais labo ru sur arène en isotrope
 $B=0,11$ non saturé
 $B=0,30$ « saturé » sous 10m d'eau
 $C_v \approx 2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$

Par précaution, pour les arènes : **Amont**: Tapis drainant – **Aval**: cinq tranchées drainantes + 8 puits - Renforcement de l'auscultation sous 208

Mesures fin de construction du barrage en zone rivière –

Capteurs en partie basse sous 208:

Arènes: $ru \approx 0,05$ à $0,09$ – Noyau: $ru = 0,30$ à $0,41$

Zone	Contrôle de compactage des remblais - Valeurs moyennes ensemble du chantier												Compacteurs utilisés	
	Identification			Cu sur remblai vane test kPa	Hilf		Etuvage des Hilf		Caractéristiques					
	%<80μ	LL%	IP%		%OPN	w-wopt	%OPN	w-wopt	w%	γd	S%	% air		K m/s
Argiles - Noyau et clés	82	38	23	110	97,8	+ 0,6	97,4	+ 0,9	18,6	1,72	89	3,8	de 2x10-10 à 1x10-9	PD: CAT 825C
Arènes des Recharges	19	27	15	na	99,5	- 1,6	99,3	- 1,5	8,5	1,97	63	9,9	2x10-7	Divers (*)

(*) Ingersoll rand SD 150 lisse, pied dameurs et CAT 825C

Arènes ys 2,685

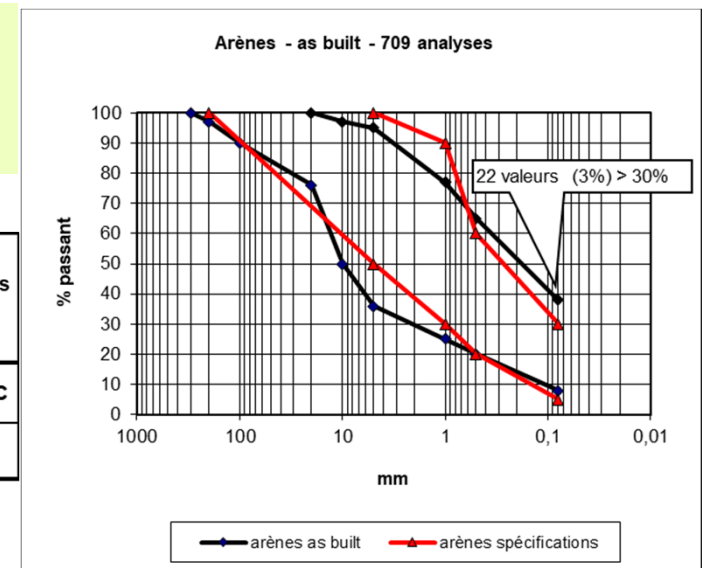
Argiles ys 2,680

2194 controles Hilf acceptés

1088 controles Hilf acceptés

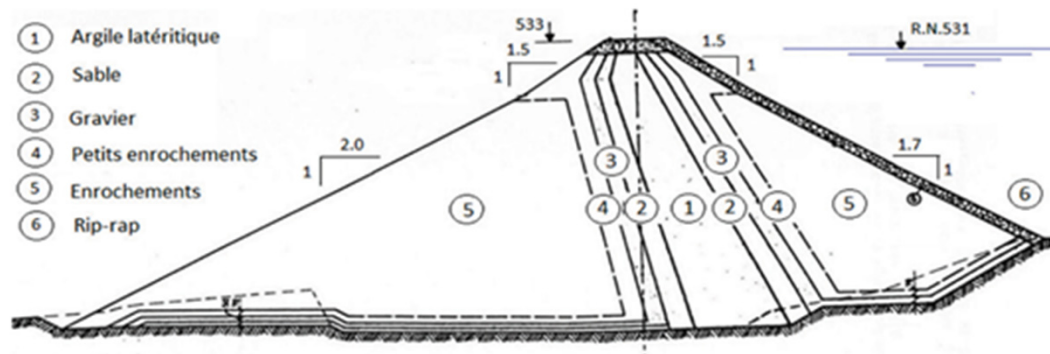
3065 réalisés

1660 réalisés



CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins

Tchimbélé – Gabon – 1977-1978 – H=36m
Zone équatoriale - Pluie 2500mm/an – Site en
foret - Forte hygrométrie



Sol résiduel altération gneiss

70 à 85% < 80 μ

WI=75 à 85% IP=45 à 56%

w_{nat}-w_{OPN} jusqu'à +13 (?)

Etude FEM du risque de fracturation hydraulique du
noyau pour fixer l'écart w-w_{OPN} acceptable
(approche américaine Kulhawy Gurtowski 1976)

→ Maxi: w_{opt}+6

Des tentatives de séchage vouées à l'échec



Mélange argile /latérite gravillonnaire

Photos F. Cointe



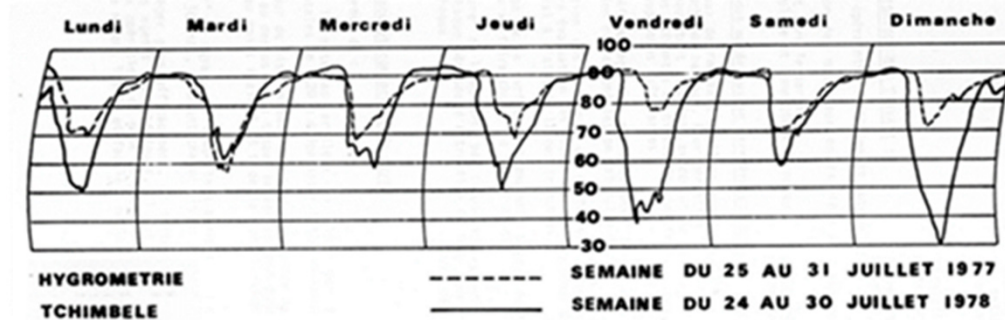
Hangar chauffant

.....Et des gros problèmes de contrôle
liés à la forte variabilité des terres.....

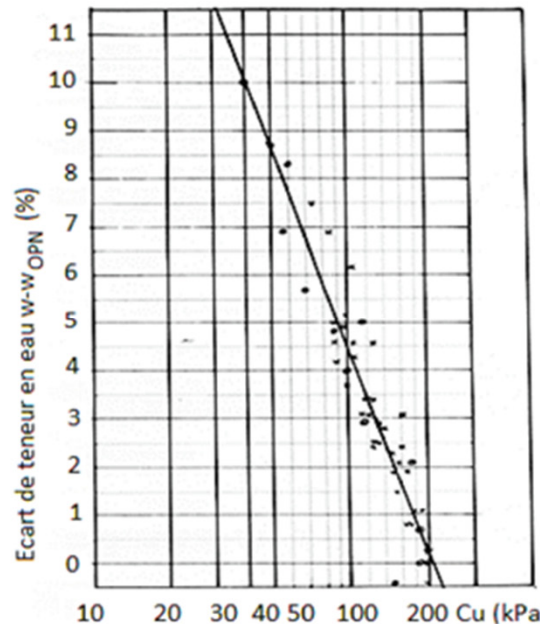
CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins

Tchimbélé – Gabon – 1977-1978 (Suite)

Les pratiques adoptées sur chantier pour réduire et contrôler la teneur en eau



(1) Humilité devant la nature et la physique: séchage uniquement possible quand chute de l'hygrométrie – Préparation de stocks



(2) Contrôle indirect du séchage à l'emprunt par mesure au cohésimètre de la résistance non drainée (matériau compacté dans le moule Proctor)

(3) Réception sur remblai ($w - w_{OPN}$, %OPN en méthode de Hilf contrôlée par étuvage à 24h

Mais, sur le principe :

une pratique à l'opposé de l'approche britannique historique des noyaux très humides (« puddle clay cores ») actualisée à:

Monasavu Iles Fidji (1979-1982). $H=80m$,
Noyau $S_u = 17kPa$, $w=72\%$, $\gamma_d = 0,90 t/m^3$
« compacté » au bull D6 LGP ($\sigma_v = 33kPa$).....



(4) Bâchage du noyau en alerte pluies

Les résultats (compactage CAT 815 et 825)

- 1977: mise en place moyenne $w_{opt} + 5,5$ et 96%OPN
- 1978: mise en place moyenne $w_{opt} + 3,9$ et 97,5%OPN

Photo F. Cointe

KENYA - Sols résiduels volcaniques - Pb des références labo

Sasumua dam

Initial

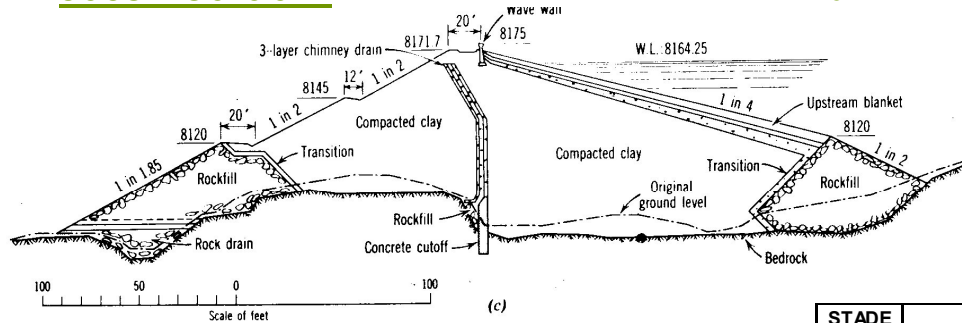
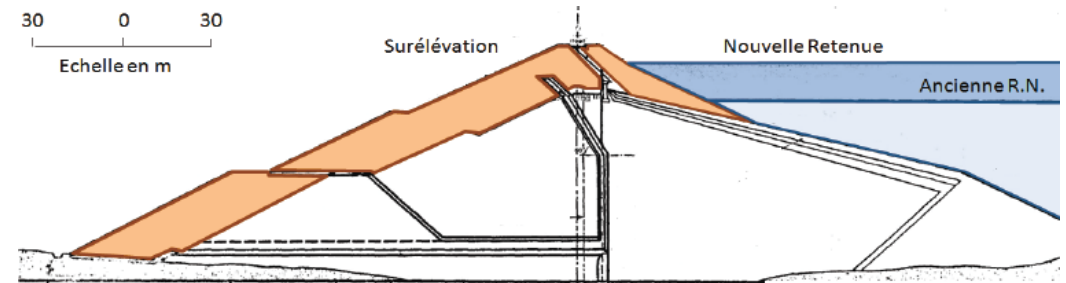


Fig. 1.2:6(c) Cross section of Sasumua Dam, Kenya (after Terzaghi, Ref. 304).



		STADE	ETUDES									COMPACTAGE	Contrôles (moyennes)				
			wnat moyen	WI	PL	PI	source	wopt	γd max	γs	%air	Prépa. Proctor	Compactage	w%	γd	%OPN	% air
SASUMUA DAM		Initial (1956)	63 / 64	87	54	33	Dixon & al, Terzaghi 1958	49,0	1,12	2,86	6,0	A	7 passes pied mouton + 7	49,2	1,13	101	4,9
				93	67	26	Matyas 1958 cité par Bishop 1970	60,5	0,99	2,90	6,3	B	passes rouleau pneu 45t gonflé à 10b.			115	5,4
		Surélév. (1968)				Dixon & Berry 1970	57,7	1,05				B	6 passes rouleau pied mouton 14t tiré par D8	55,5	1,08	102	

(A) Séchage préalable à l'air ou à l'étuve

(B) Pas de séchage préalable

Note 1: nombre de contrôles des couples w et γ_d après compactage - Barrage initial : 1800 tests; Barrage surélevé: 1349

Note 2: % OPN des contrôles et teneur en air calculés à partir des valeurs étude qui sont en nombre limité

Thika dam (H=70m) - 1994

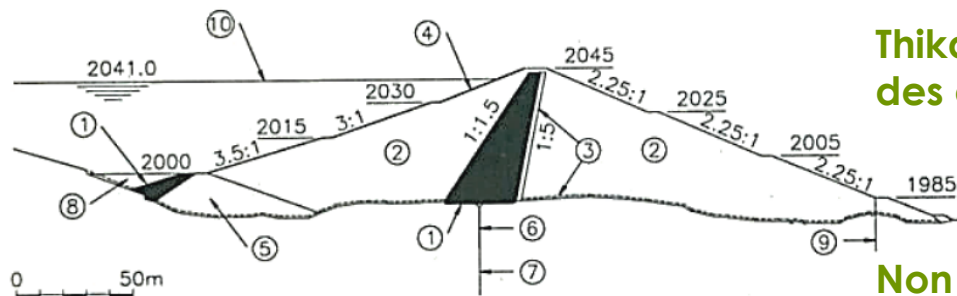


Figure 3-25. Coupe type du barrage de Thika (Attewill et al.).

Thika : Pressions interstitielles dans les recharges > prévisions des essais labo – Pb de références Proctor – Remède:

125 puits drainants prof 15m

4 tapis drainants

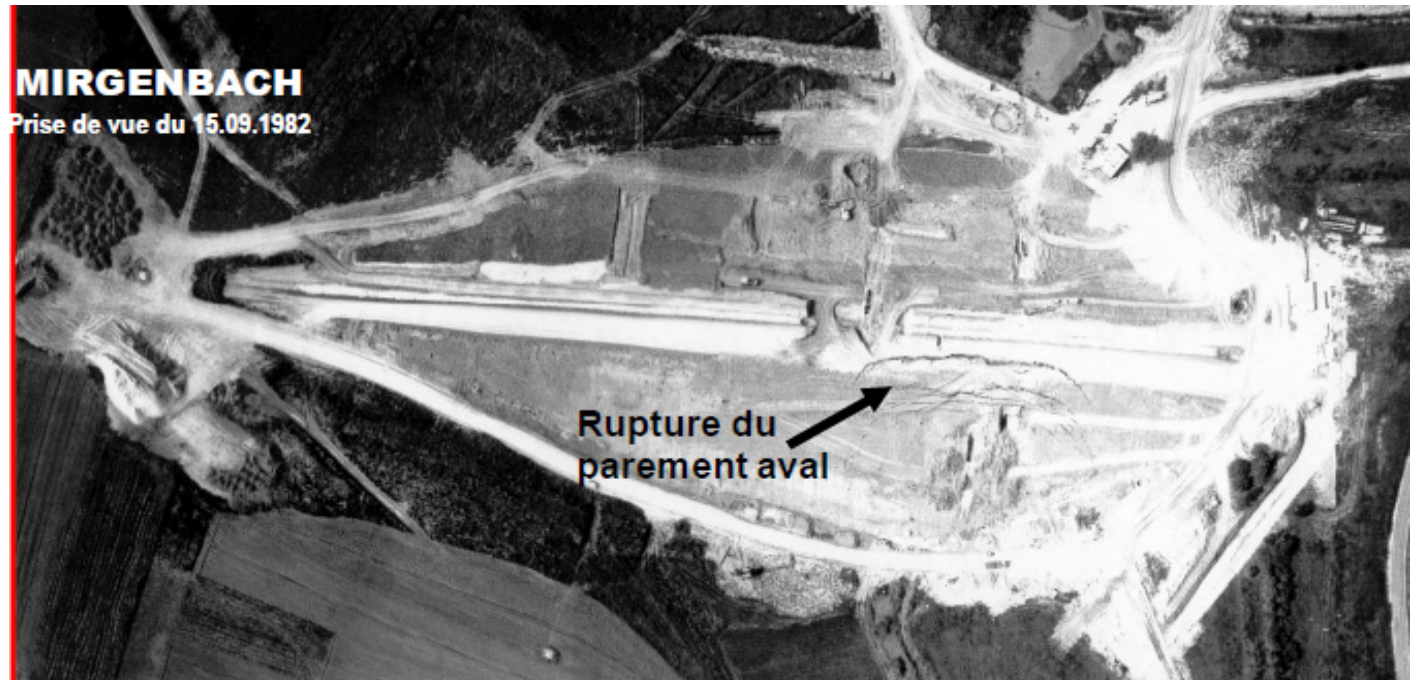
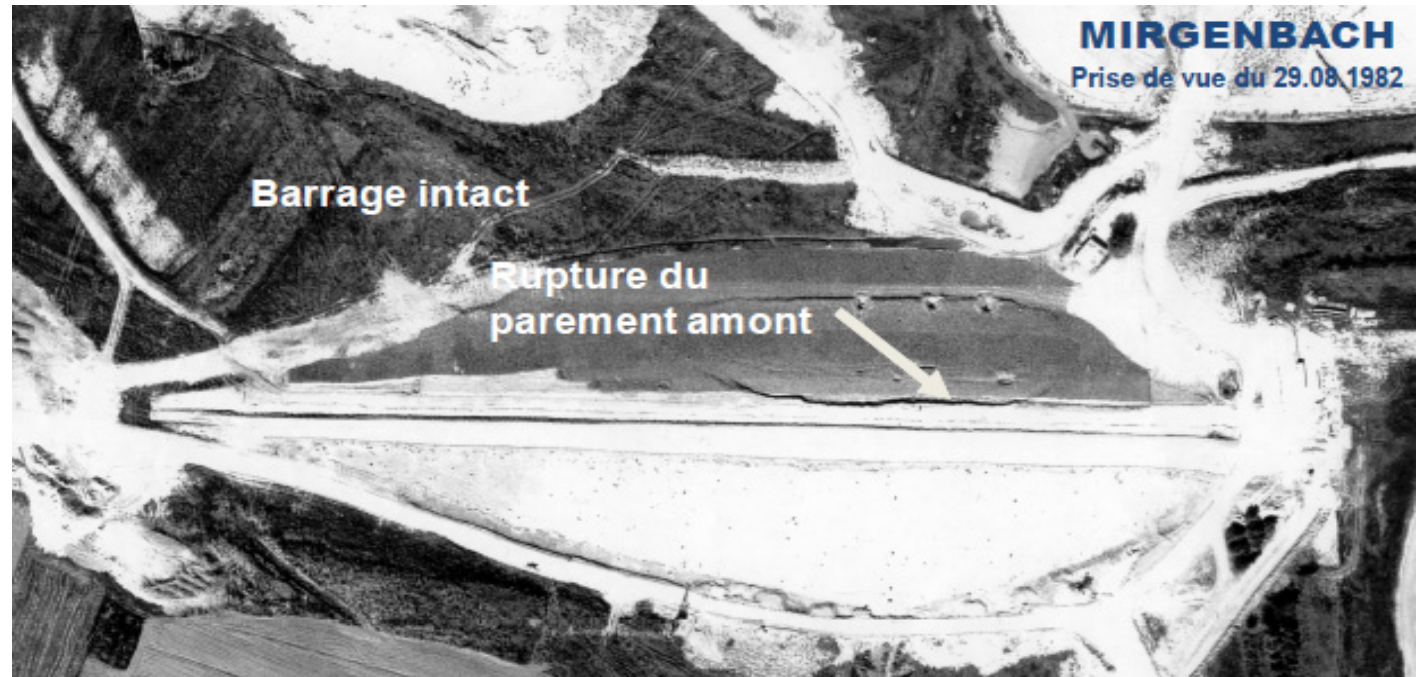
Berme amont

Non utilisation du contrôle en résistance non drainée « pour des raisons contractuelles »

CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins

Barrages en argile plastique humide:
de MIRGENBACH,
à La Mappé
et Kol dam

1982



CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins

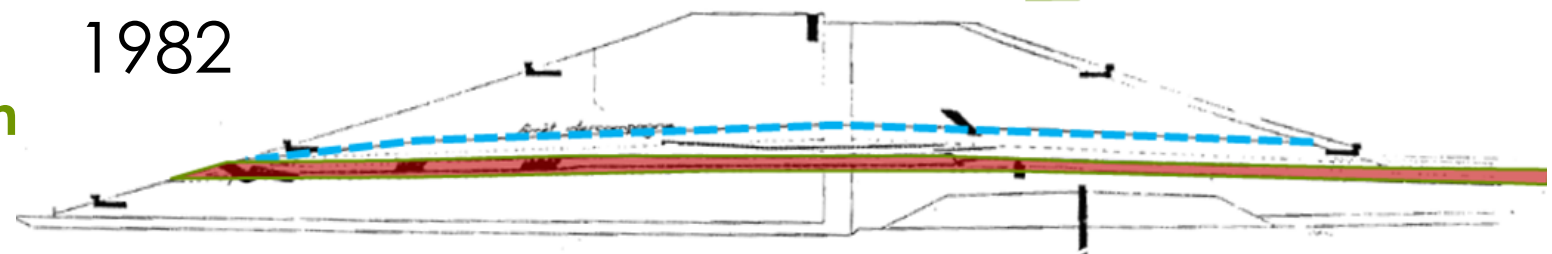
Barrages en argile plastique humide: MIRGENBACH, La Mappé et Kol dam

Positionnement des fissures dans les couches
mises en place en septembre et octobre 1981

1982

Profil B

-  fissures
-  arrêt intercampagne
-  4ième semaine septembre 1981
-  5ième semaine septembre 1981

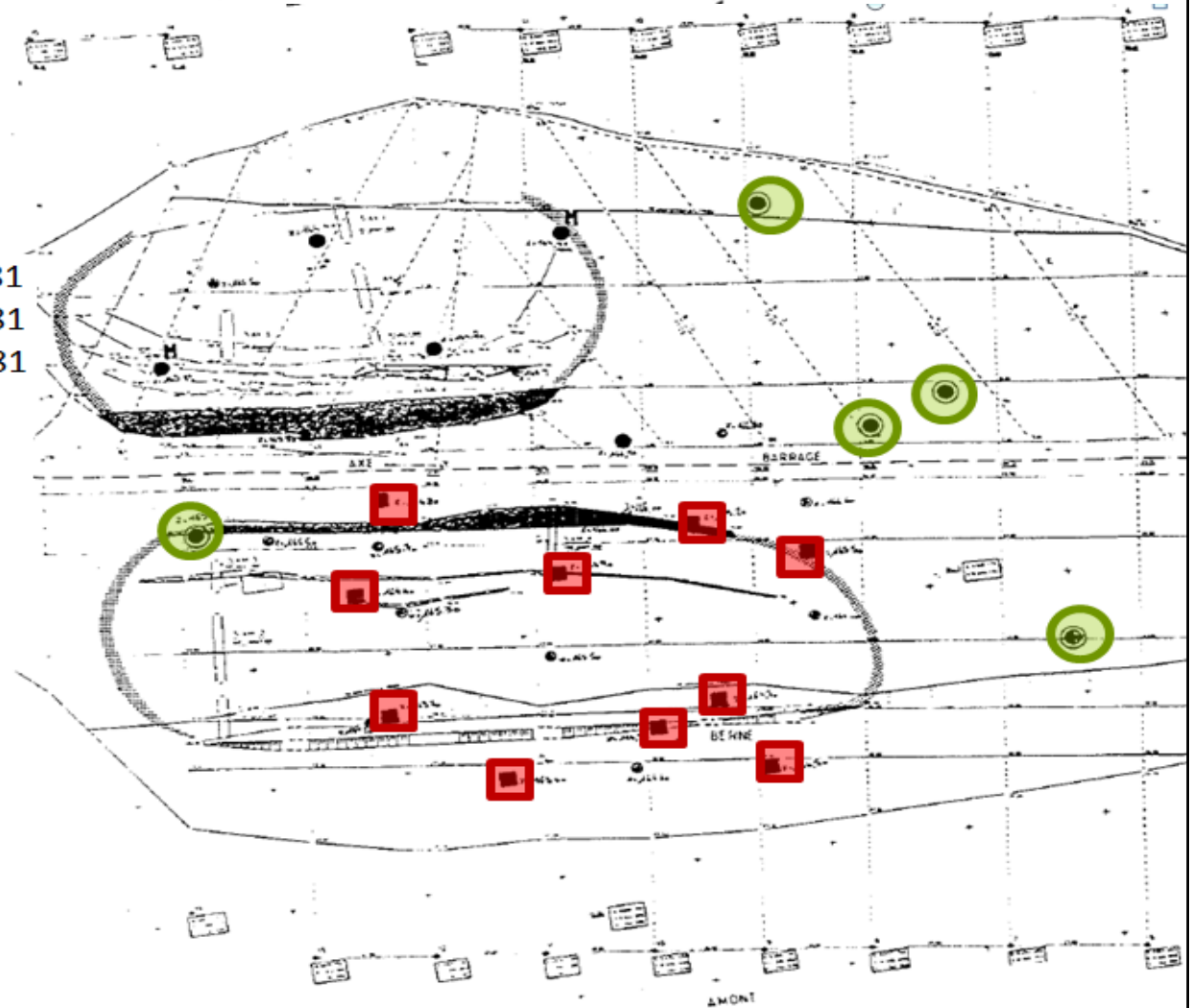
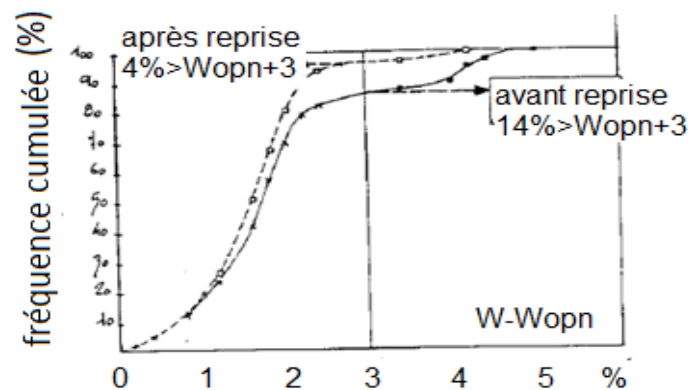
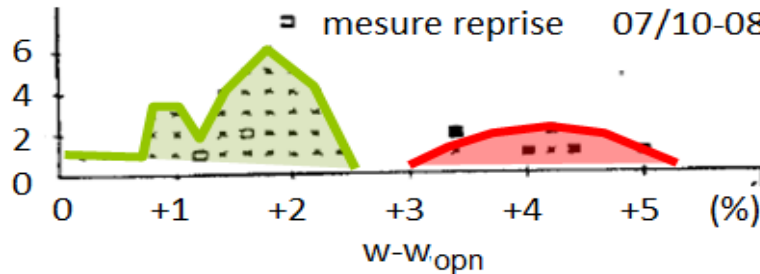


 Les mesures refusées et reprises sont hors glissement

 Les mesures refusées dans la zone de glissement

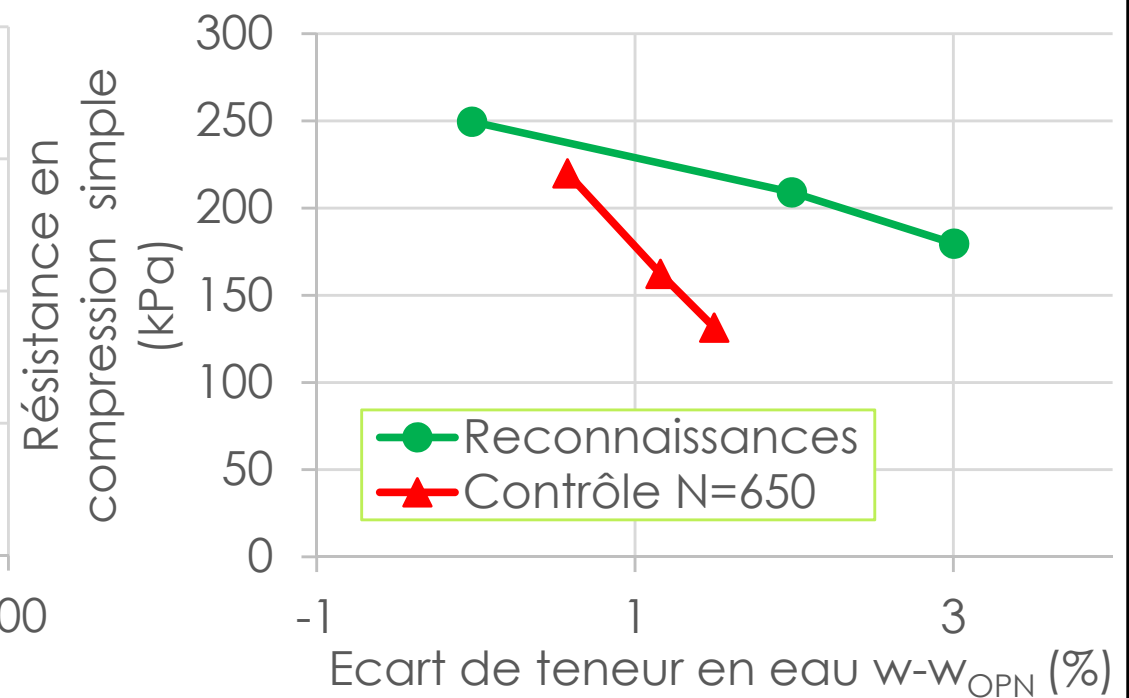
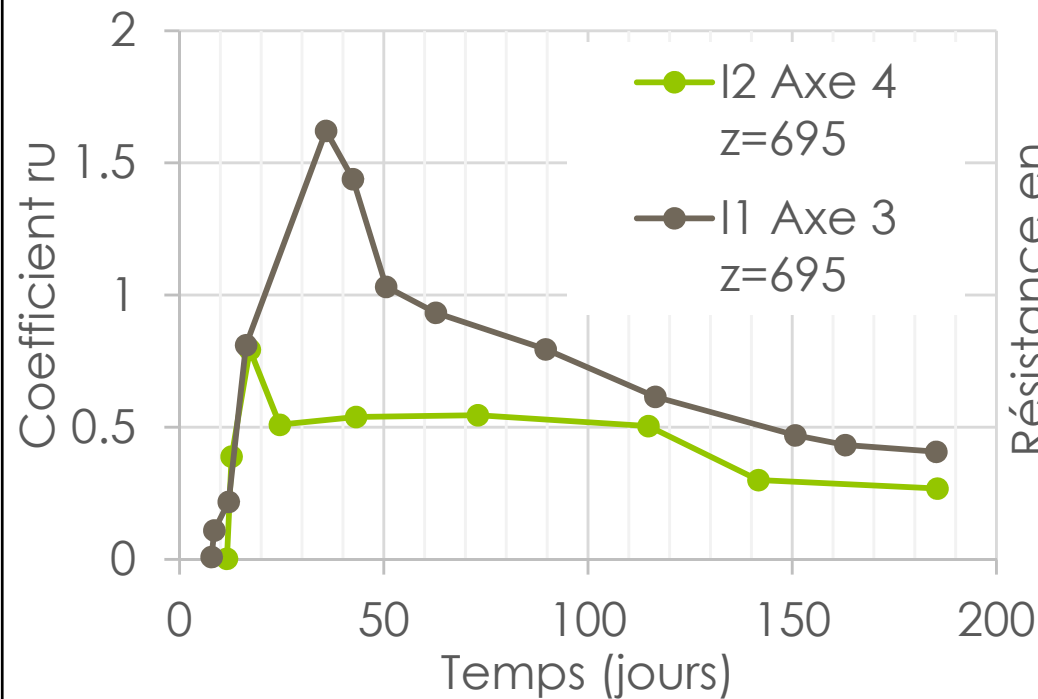
nombre d'observations

×	mesure acceptée	17/09-01/10/81
■	mesure refusée	25/09-28/09/81
□	mesure reprise	07/10-08/10/81



CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins

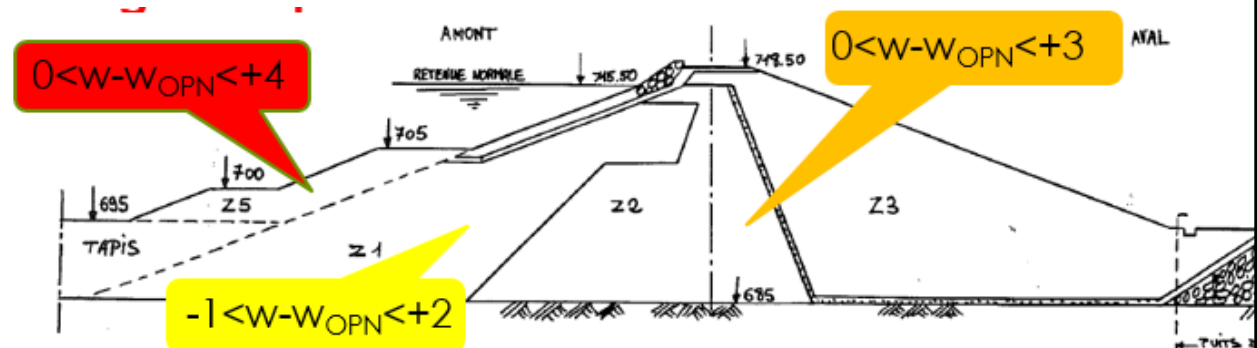
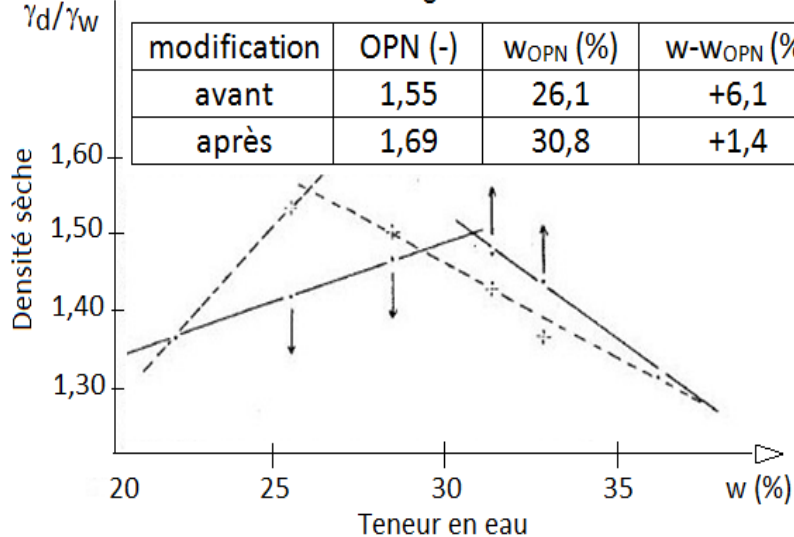
Barrages en argile plastique humide: Mirgenbach, LA MAPPE et Kol dam



1986: La cause et la conséquence

Essai M40 Digue Amont 14/11/1996

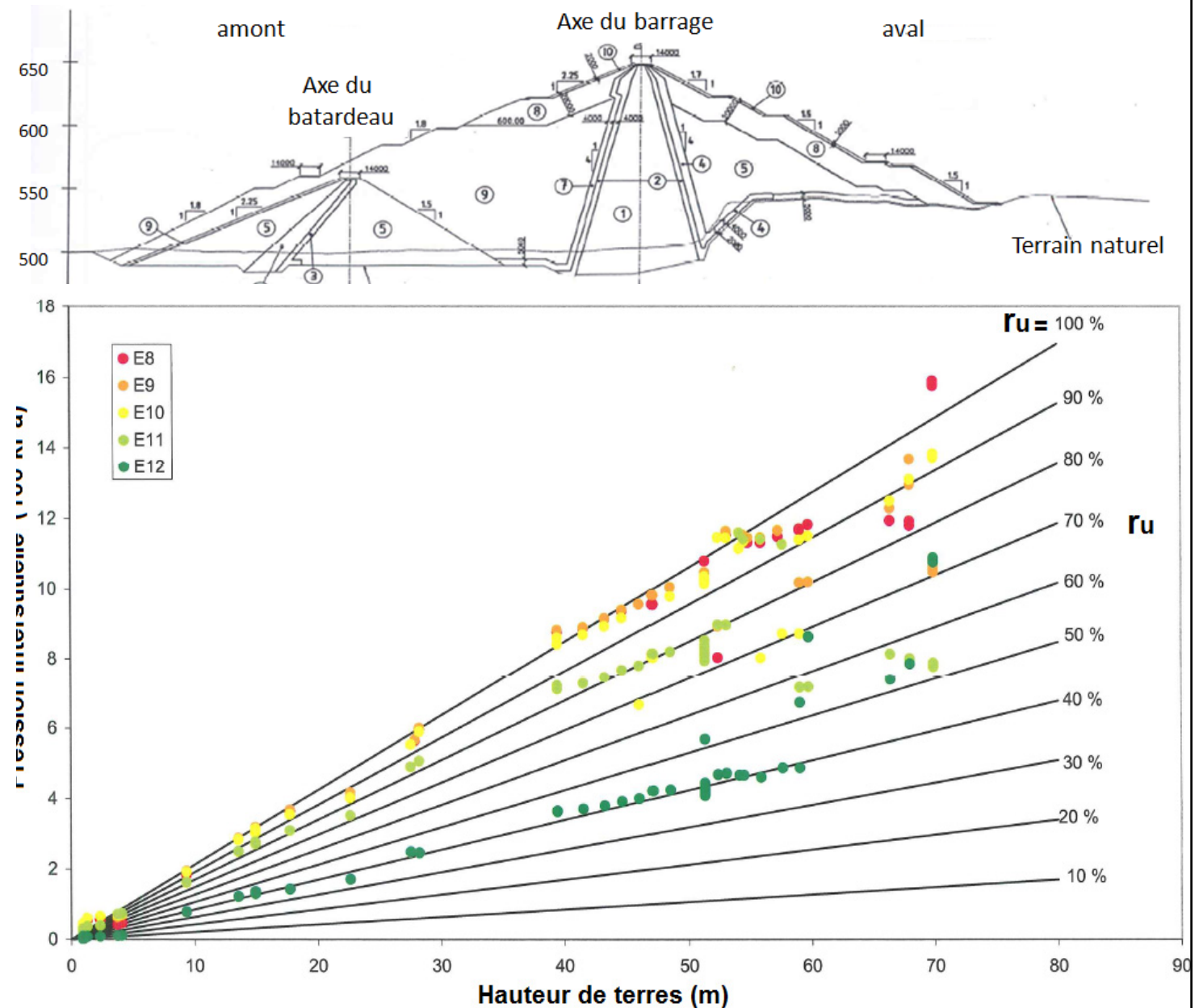
modification	OPN (-)	w_{OPN} (%)	$w - w_{OPN}$ (%)
avant	1,55	26,1	+6,1
après	1,69	30,8	+1,4



CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins

Barrages en argile plastique humide: Mirgenbach, La Mappé et KOL DAM

- Des cellules mesurent $r_u=1$! (mai-juin 2007)
- Causes :
 - Dérogation spec
 - Sr# 100% trop fort
 - Mauvais calfatage
 - résurgences karstiques
- Une partie du noyau est mise en dépôt (482-497)
- Contrôle durci des spécifications w:
 - $-1 < w - w_{OPN} < +2\%$
 - Contrôle sur gîte
 - Contrôle sur site avant compactage
- Plus de problème ensuite ...



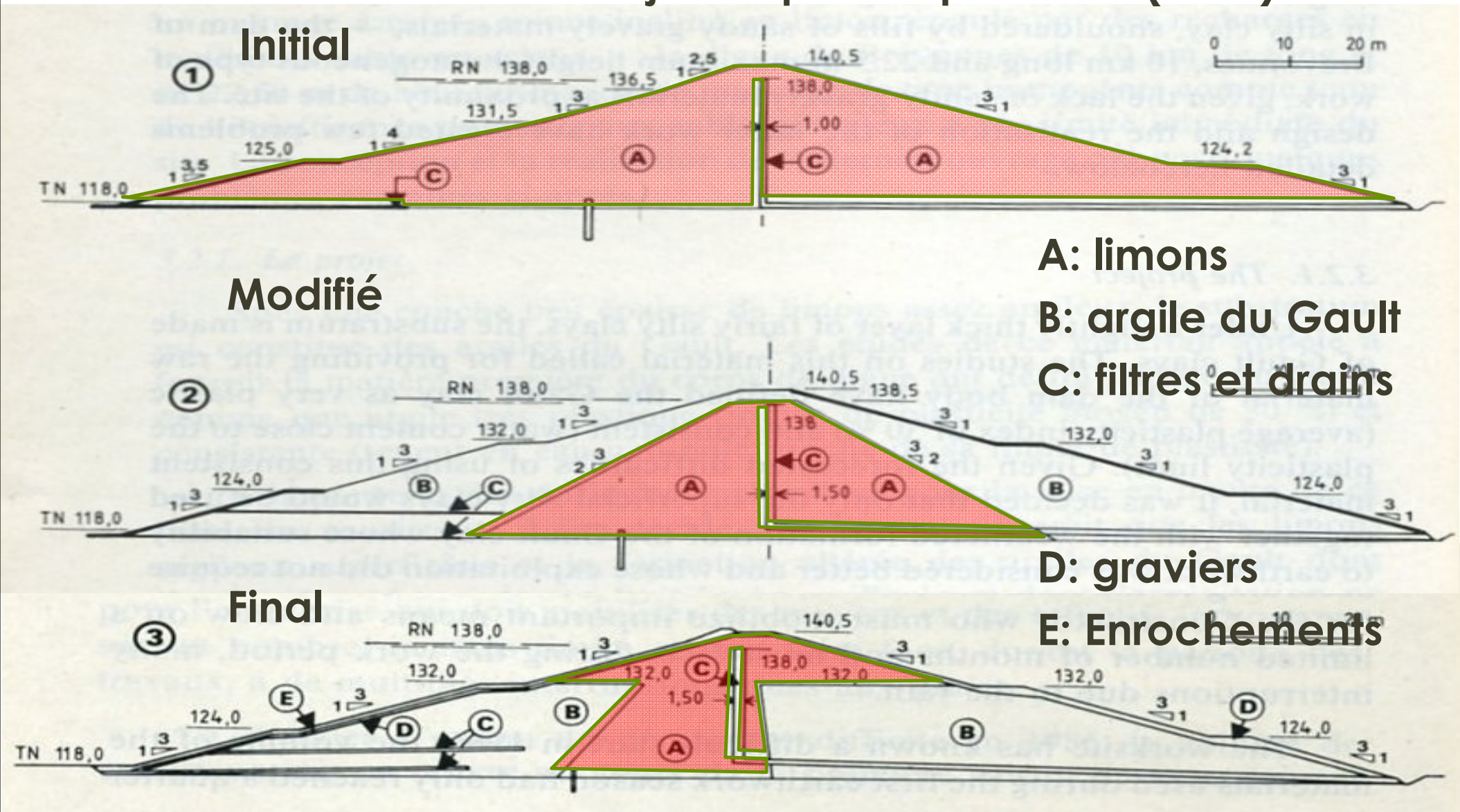
Barrages en marne et argile surconsolidée: du canal de la Durance (1962) au barrage réservoir AUBE (1989)

- **1962 - Les marnes du canal de la Durance**
 - argile gréseuse au calcaire marneux $R_c=0,6-2,7$ MPa
 - Solution: **concassage pour $<5\text{mm}>50\%$** , arrosage, pétrissage+12 passes RPD
- **1973 - Le barrage réservoir Marne**
 - Remblai homogène (abandon du limon trop humide, mais argile de Gault décapée en plaques réduites à la charrue)
 - **Confortement** suite aux Tassement $> 5\%$, fissures longitudinales et glissements après pluies
- **1983 – Le barrage de Montbel**
 - Marnes intacte, intermédiaire dure, intermédiaire tendre, tendre
 - Fragmentation au Tamping 835 avant arrosage
 - Un test d'imbibition de plusieurs mois montre que **seules les marnes tendres sont utilisables**
 - Zonage des marnes: à l'amont les plus tendres, à l'aval les plus dures
 - $\gamma_d/\text{OPN} >$ la moyenne entre 100% et celui en place
- **1989 - Le barrage réservoir Aube**
 - 1° Rex de Marne: profil zoné avec recharges en argile de Gault
 - 2° Rex de Marne : Le limon protège l'argile en crête
 - 3° Rex: **séchage industriel du limon** (12 hm^3 extraits 6 mis en place; $-2\%/24\text{H}$ seulement 3 mois, sur une grande emprise - Betoux 1986)

CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins

Barrages en marne et argile surconsolidée: du canal de la Durance (1962) au barrage réservoir AUBE (1989)

Evolution du Projet d'après Dupas et al (1991)



AUSCULTATION

A- Tassements

Fell et Hunter (2003)

Module de compressibilité:

K=10-15 MPa argile plastique

K=15-25 MPa argile peu plastique

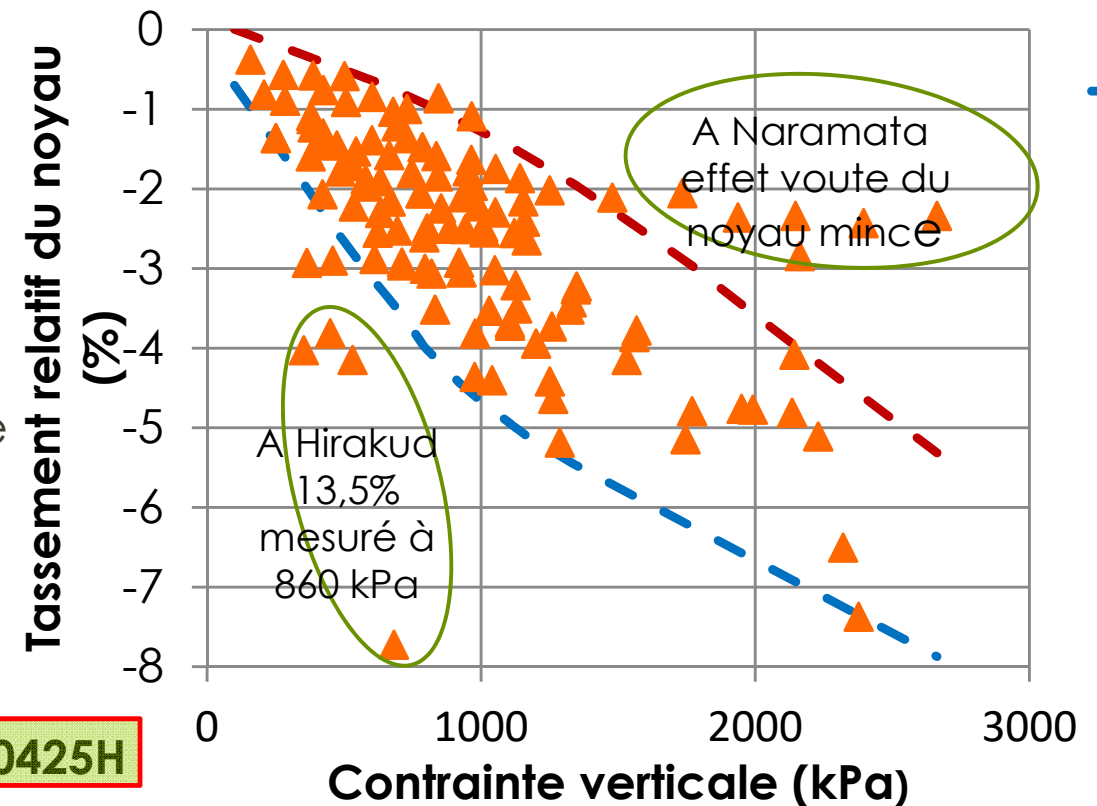
K=80 MPa grave argileuse

B- Déplacements horizontaux

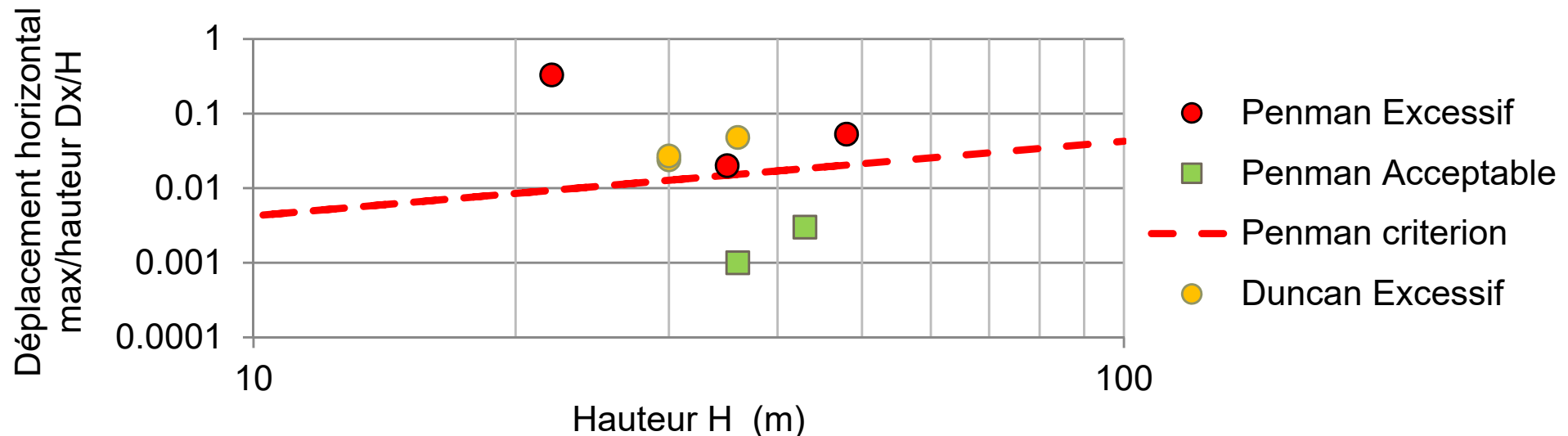
Penman et Charles (1982)

$$DX/H=0,000425H$$

Walker et Duncan (1984)

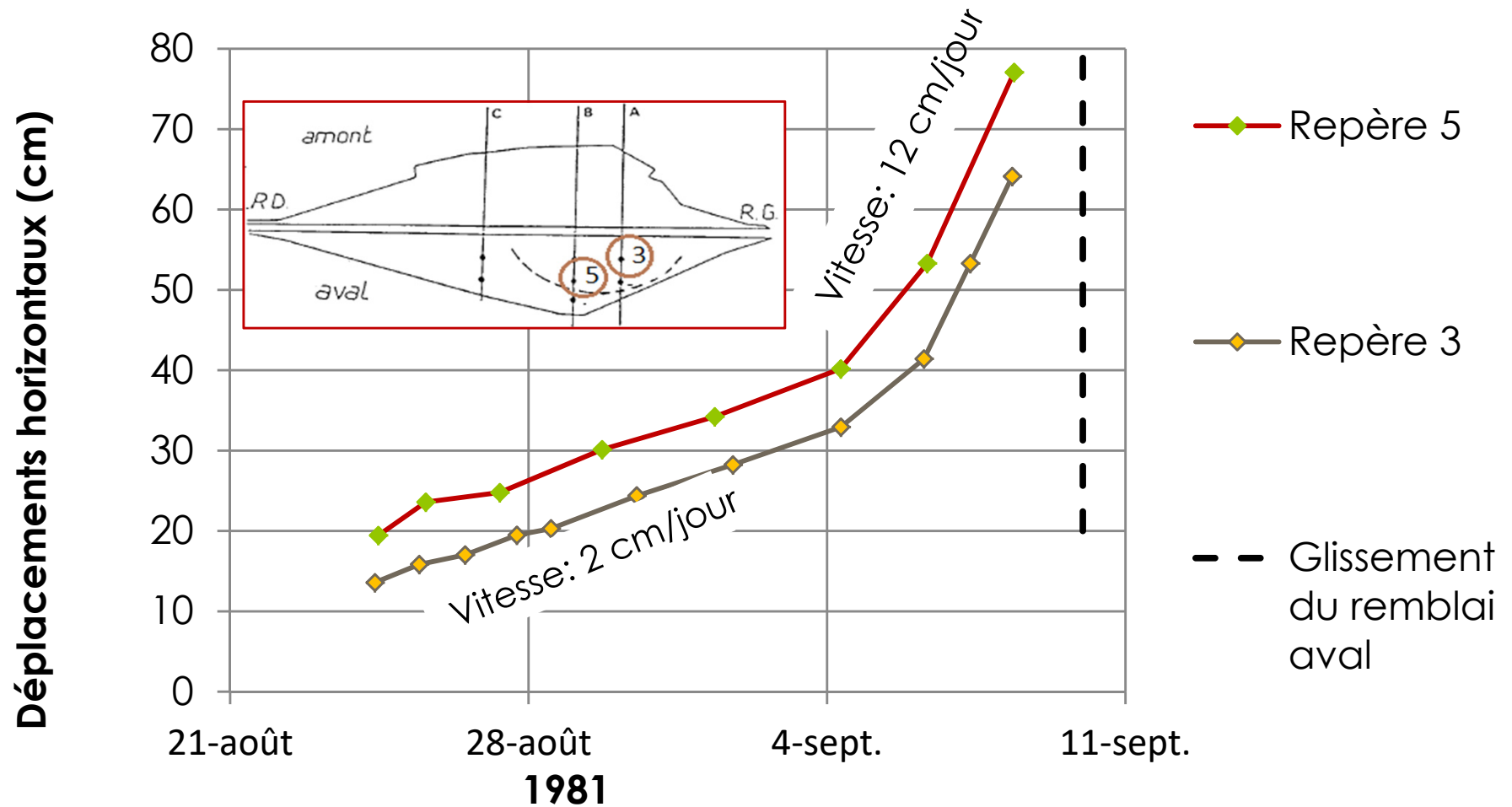


Déplacement horizontal maximum acceptable



AUSCULTATION

C- Vitesse de déplacement



- Critère de mise en sécurité: REX Mirgenbach

v=1cm/j

AUSCULTATION

D – Pression interstitielle

- **EFFET DU DRAINAGE**
- **Les 3 types de montée**
(Fell et Hunter 2003)

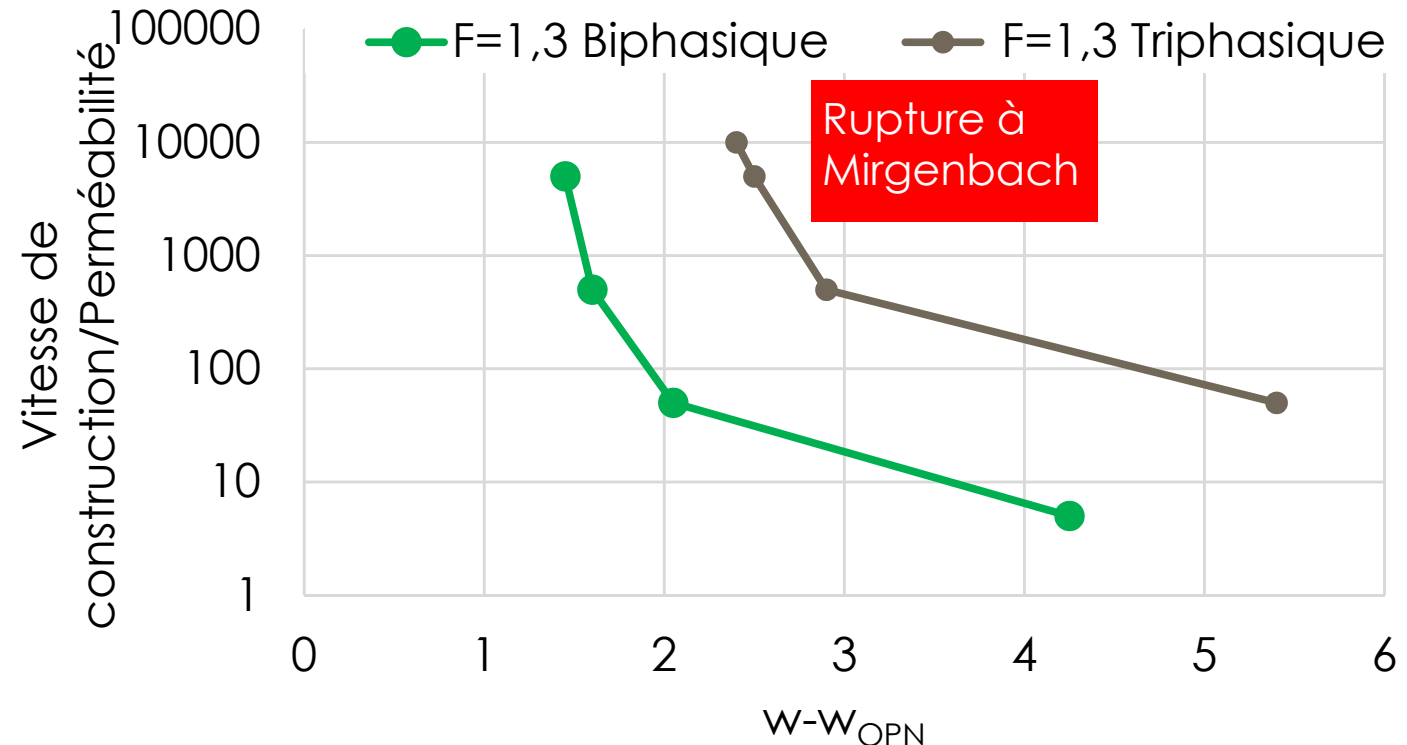
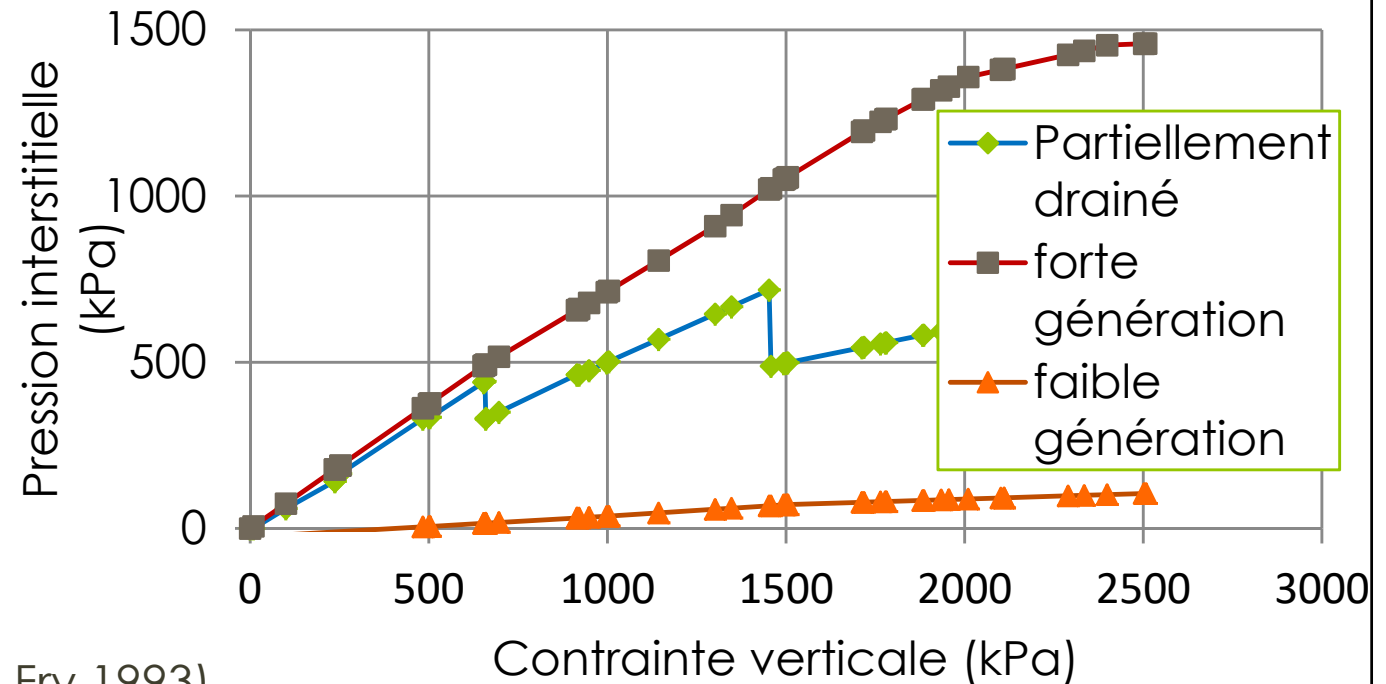
- **Exemple de Mirgenbach**
(Nanda, Gatmiri, Delage, Fry 1993)

- V: vitesse construction
- K: perméabilité
- Θ_a : teneur en air

- **Cas général:**

- **Non drainé:**
- **$V/(k/n_e) > 10$**
- **Drainage:**
- **$V/(k/n_e) < 0,1$**

ne: porosité efficace

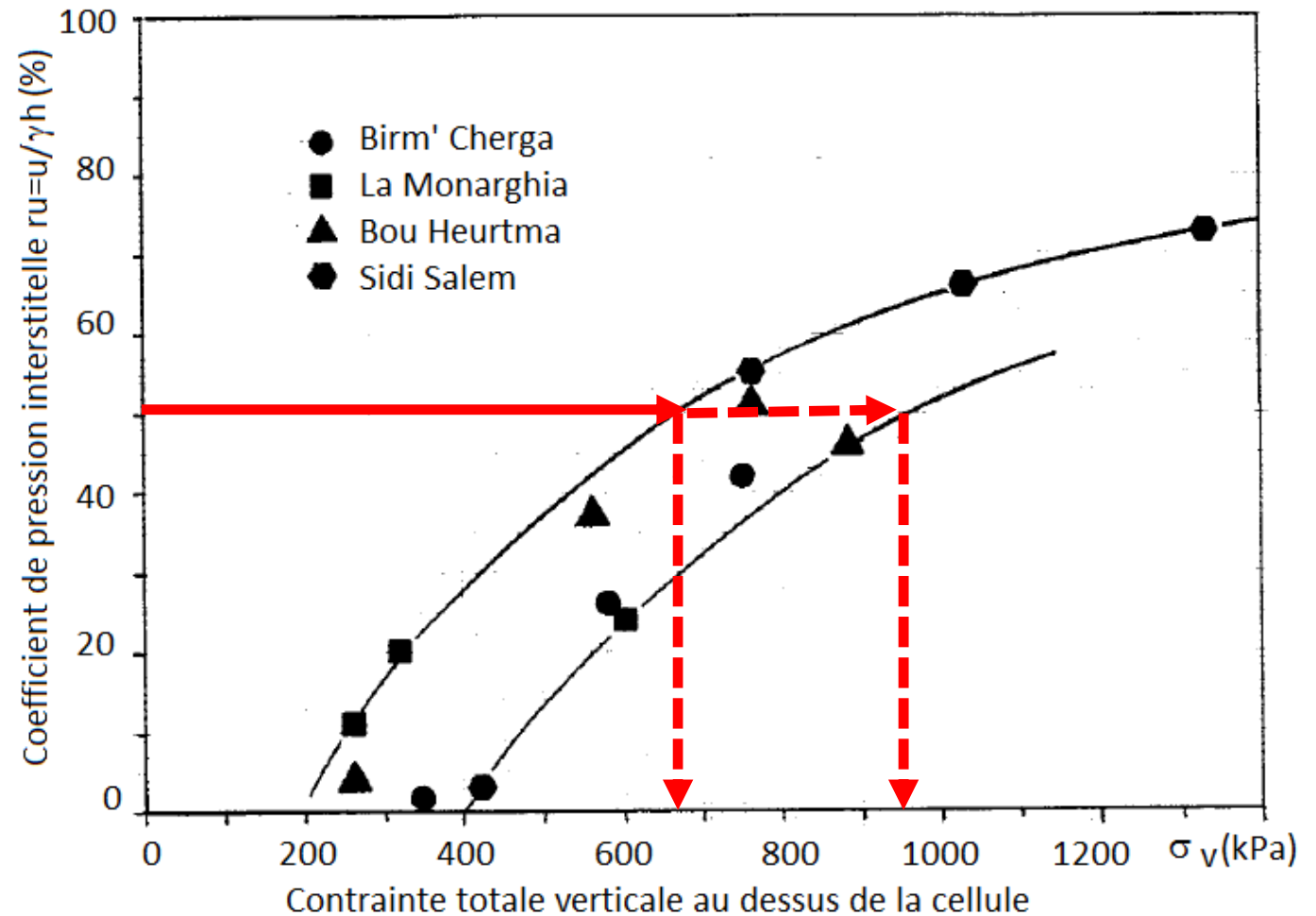


AUSCULTATION

D – Pression interstitielle

- EFFET DE LA HAUTEUR

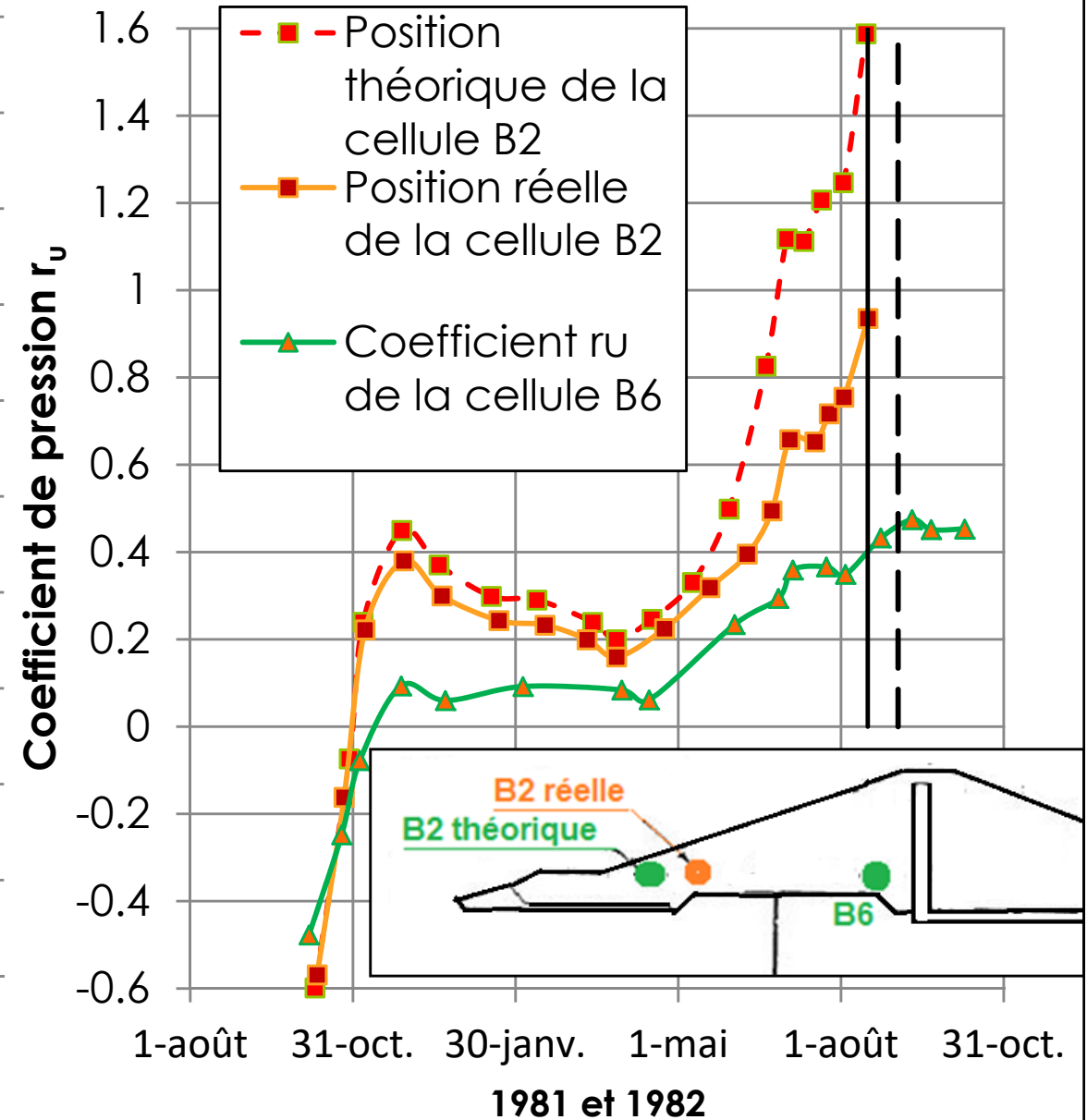
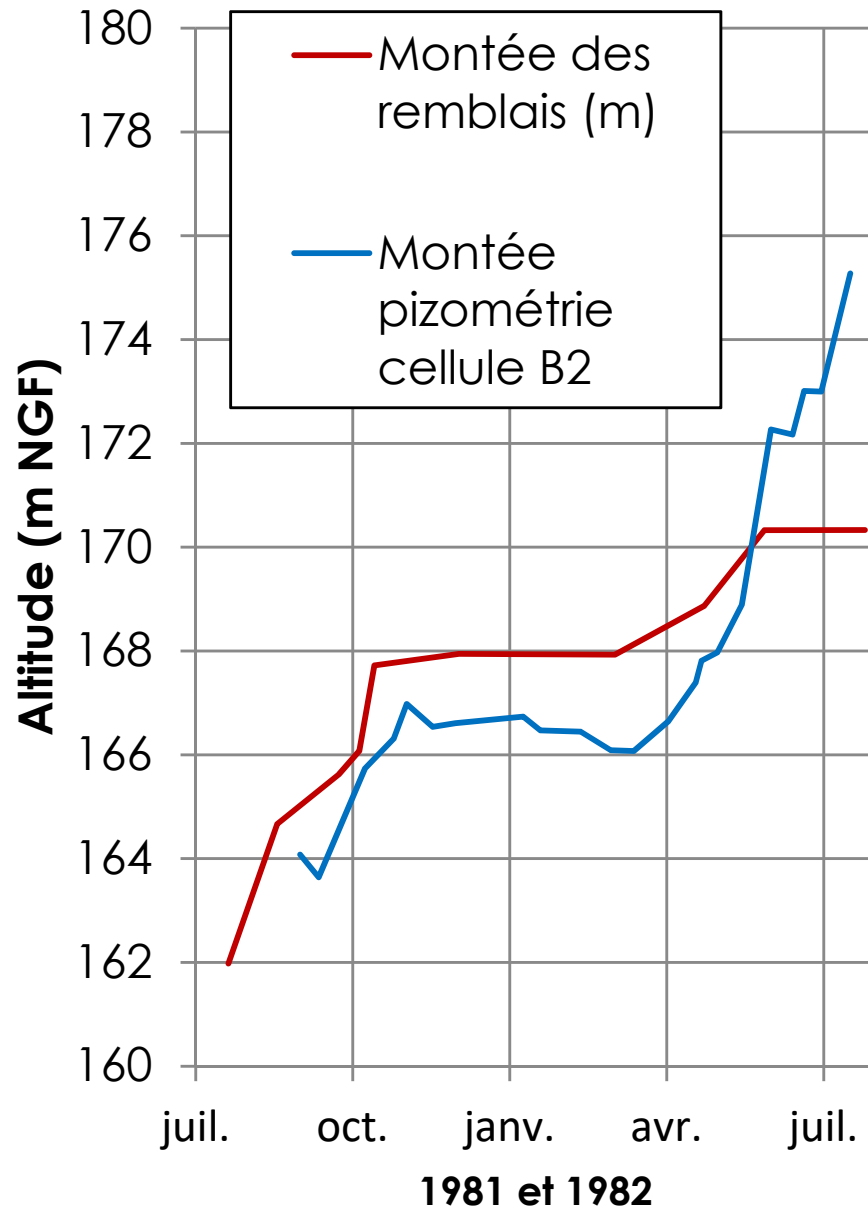
- Binquet (1986)
- $-1 < w - w_{OPN} < +2\%$



- $H > 30 \text{ m} \Rightarrow ru > 0,5 \Rightarrow$ risque d'instabilité

AUSCULTATION

D – Pression interstitielle • Doubler ou tripler les profils auscultés



AUSCULTATION E – Le Bon comportement du barrage de Monasavu

-

A - CONCLUSIONS: BARRAGES EN ARGILE SÉDIMENTAIRE/ALLUVIALE

1. Reconnaissances: mesurer la variabilité et les propriétés en place

- Vérifier les hypothèses du projet par prélèvement sur les planches d'essai

2. Conception: extrême prudence si $IP > 27$

- Phénomènes de rupture progressive
- Les plans de cisaillement dus aux engins peuvent diviser par deux la résistance par perte de cohésion et baisse de l'angle de frottement opératif en masse
- Phénomènes de gonflement-retrait en l'absence de protection

3. Conception: extrême prudence dans les gites où $w > w_{OPN} + 2\%$

- Etude poussée de la faisabilité du séchage: séchage : si en 24h l'évapo-transpiration $>$ précipitation + 0,3 mm avec calcul de surfaces de séchage
- Etude poussée et paramétrique des pressions d'eau et des résistances
- Etude poussée du séchage
- Intégration d'un zonage des teneurs en eau

4. Conception: prudente : zonage et limitation de l'usage de ces argiles

5. Construction: homogénéisation (pulvimixer), séchage ou traitement

6. Auscultation: suivi impératif des pressions interstitielles de construction

7. Contrôle: à multiplier

- Vérifier en tranchée l'absence de feuillement ou de surcompactage
- taux de compactage : méthode RAPIDE de Hilf + étuvage points Hilf à 24h
- Résistance non drainée: RCS avec mesure de déformation
- Sur remblai: Cohésimètre / Pénétrromètres PANDA

B - CONCLUSIONS BARRAGES EN SOLS RESIDUELS

1. Reconnaissances:

- Privilégier les prélèvements manuels en puits ou tranchées (structure)
- Coordonner et synchroniser les reconnaissances sur place
- Toujours préparer les terres au voisinage des teneurs en eau naturelles (pas d'étuvage ou de séchage préalable excessif).
- Vérifier les hypothèses du projet par prélèvement sur les planches d'essai

2. Conception avec des IP élevés:

- Beaucoup moins problématique que pour les argiles sédimentaires: angle de frottement et perméabilité + grands
- Usage validé si respect des points qui suivent

3. Conception: prudente ou audacieuse pour les gites où $w > w_{OPN} + 2\%$

- Soit étude poussée de la faisabilité du séchage, des pressions d'eau, des résistances, de la stabilité et du zonage éventuel
- Soit compactage très humide au bull léger dans un noyau incliné protégé par des filtres inversés et tenu par des recharges en enrochements

4. Construction: (voir précédemment argile)

5. Auscultation: suivi impératif des pressions (voir argile)

6. Contrôle: à doubler et même à tripler (voir argile)

C - CONCLUSIONS BARRAGES EN MARNES ou SOLS SURCONSOLIDÉS

1. Reconnaissances:

- Préciser et identifier l'horizon exploitable dans le faciès d'altération
- Réaliser des essais d'imbibition longue durée
- Etudier le gonflement et retrait

2. Conception:

- Protéger les marnes du gonflement et du retrait
- Usage validé si respect des points qui suivent

3. Construction

- Utiliser le pulvimixer sur site et éventuellement sur gîte pour homogénéiser la plasticité et l'humidité
- Humidifier par asperseur bien à l'avance
- Compacter à la moyenne de 100% et du taux en place

4. Conception: prudente (voir argile)

5. Auscultation: suivi impératif des pressions et des déplacements dans le temps

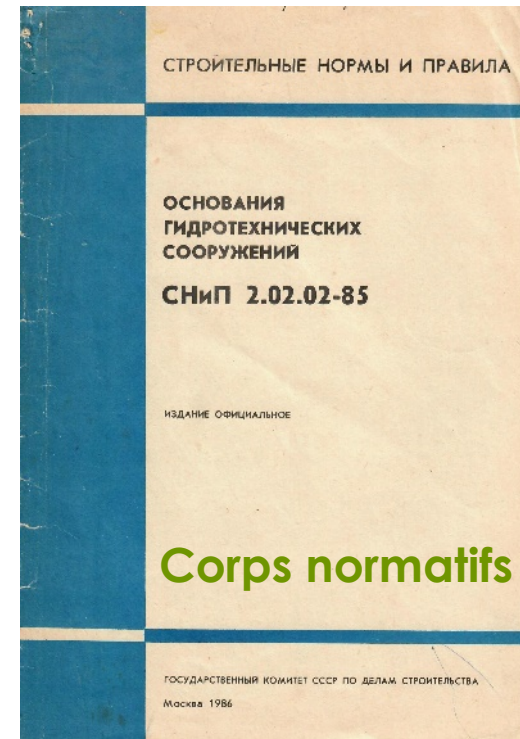
6. Contrôles: à multiplier

- Vérifier visuellement l'absence de vides et de feuillette
- taux de compactage : méthode RAPIDE de Hilf + Proctor à 24h
- Sur remblai: Cohésimètre / Pénétrromètres PANDA

BARRAGES – ETUDES ET TRAVAUX- DIFFICULTES DIVERSES



**Multiplicité des intervenants.
Eclatement des taches.
Communication.
Conditions contractuelles.
Montages financiers.**



Conditions of Contract for **Construction**

FOR BUILDING AND ENGINEERING WORKS DESIGNED BY THE EMPLOYER

**Complicent la vision globale et freinent les prises
de décision rapides nécessitées par les difficultés
et imprévus géologiques et géotechniques**

Merci de votre attention...

