

ADSTD

JOURNEE TECHNIQUE

Les ponts en maçonnerie

Du diagnostic à la réparation

PROTECTION – ENTRETIEN – RENFORCEMENT DES FONDATIONS

Jean-Pierre LEVILLAIN Ingénieur conseil - JPLCONSEIL

COMMENT REPARER A BON ESCIENT LES FONDATIONS DES PONTS EN MACONNERIE ?



il faut connaître sa pathologie,

il faut établir un diagnostic correct de comportement et d'état,

disposer des connaissances sur la morphologie de la rivière et des agressions par affouillement,

disposer des connaissances sur les sols de fondation et leur comportement

- PRONOSTIC

il fait suite au diagnostic de comportement et d'état et aux réponses à la question : **RISQUES ENCOURUS ?**

nécessité d'une réflexion préalable sur les trois thèmes :

- sécurité de l'utilisateur ?
- origine des désordres ?
- évolution des désordres ?

- THERAPIE

travaux d'entretien, de protection, de restauration, de transformation ?

quels objectifs ? Quels types de travaux vont y répondre ?

principe des travaux, lister les moyens à mettre en œuvre, établir les procédures d'exécution

- sécurité à assurer à chaque phase (stabilité, réduire les agressions,..)

- LE PROJET

- il n'aggrave pas les désordres ou les risques encourus,
- il doit être simple :

protéger, consolider, renforcer, transformer la fondation, voire reconstruire.

- GENERALEMENT SIMPLE CONSERVATION DE L'EXISTANT

- amélioration et reconstitution des protections des sols au pourtour et des bases des appuis, (ne pas réaliser des caches misère)
- travaux de protection des sols par des techniques d'enrochement, de gabions ,de radier en maçonnerie ou en béton,
- travaux de protection des matériaux de fondation par des encagements.

- TRAVAUX D'AMELIORATION DE LA PORTANCE DES SOLS

- renforcement des propriétés mécaniques des sols et des matériaux de fondation.

- TRAVAUX DE TRANSFERT DES CHARGES SUR DE NOUVELLES STRUCTURES travaux exceptionnels de reprise en sous-œuvre.

SUPPRIMER LES CAUSES DES DESORDRES

LE MEILLEUR OBJECTIF

INSTABILITE DU LIT : fixer le lit

MODIFICATION DU DEBIT SOLIDE - réalimenter en sédiments

- créer un seuil en aval ,
- réaliser des chasses des barrages,
- interdire les prélèvements de sédiments;

AMENAGEMENTS SUR LES FONDATIONS DE L'OUVRAGE

- seuils,
- tapis d'enrochements ou de gabions,
- radier général entre appuis,
- radier long type déversoir,
- encagement des fondations,
- injection des sols de fondation.

L'ouvrage reste dans son état et on intervient sur son environnement

Assurer la pérennité du traitement

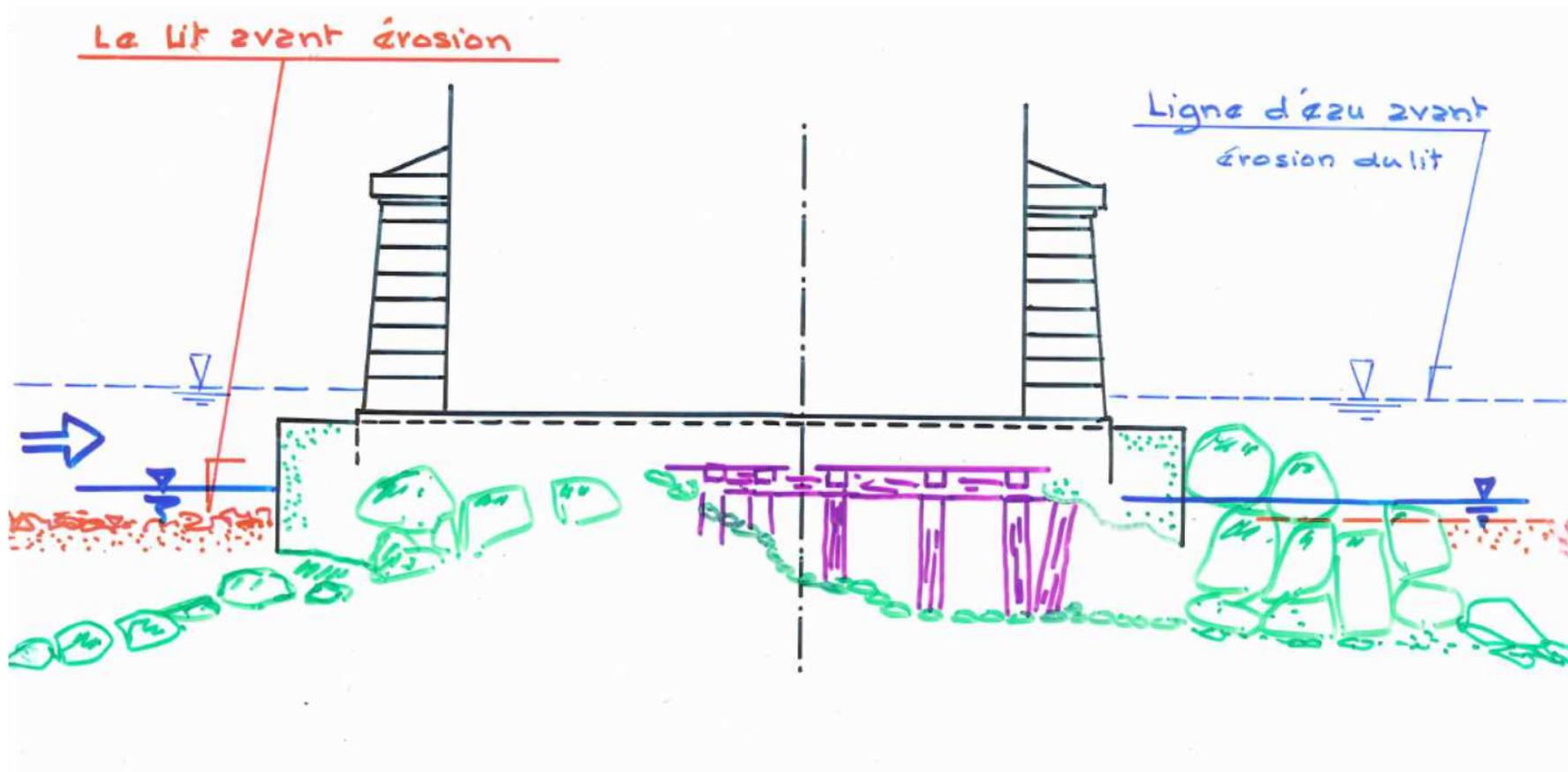
Connaissance du site par une étude hydraulique

- Extension du lit mineur et du lit majeur,
- Courbe des débits classés,
- Profil en travers du lit,
- Profil en long de la rivière dans le secteur en amont et en aval,
- Nature des fonds,
- Position des courants dans le lit et forme de l'érosion

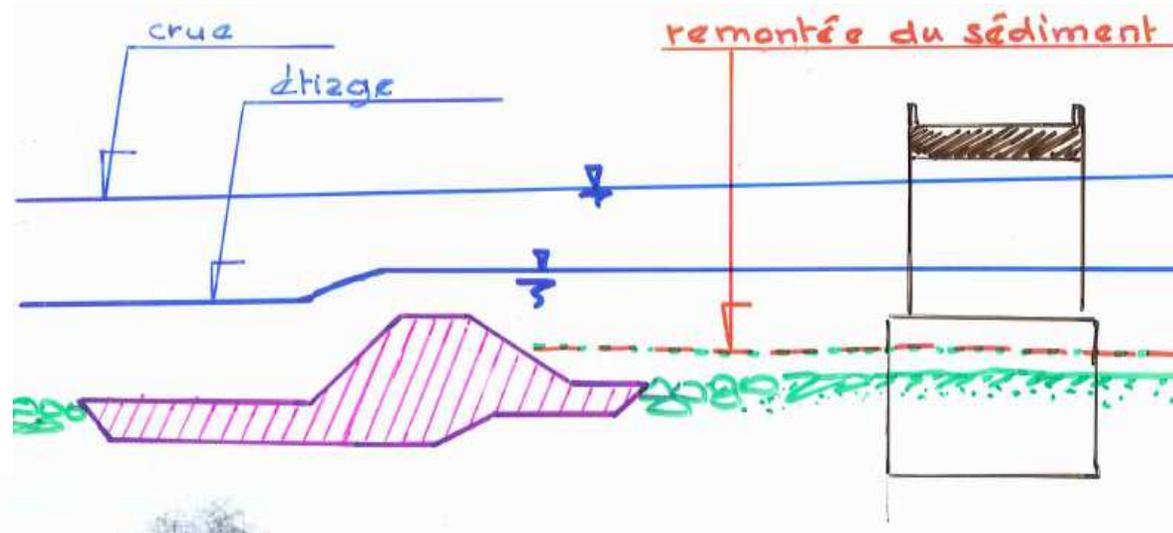
Le radier en maçonnerie assure la protection et la fixation des fonds au pourtour des appuis de ce pont du XVIII^e siècle



Abaissement des fonds de la rivière et les désordres dans une fondation sur pieux



Réparation par la réalisation d'un seuil en aval du pont



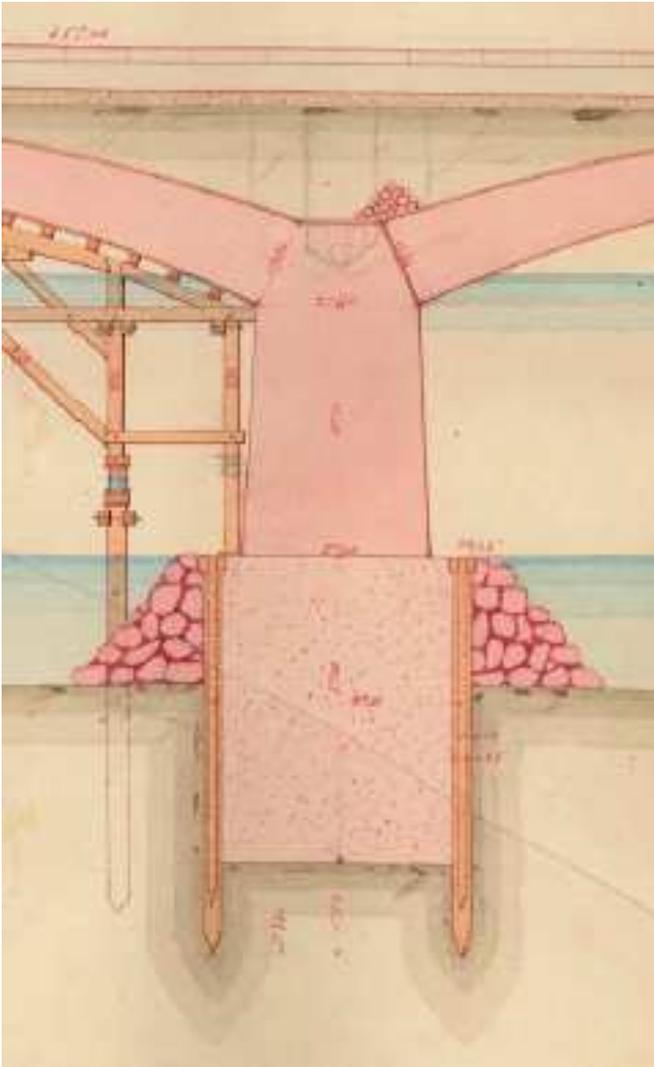
Seuil de 3 m de hauteur construit en aval d'un pont
pour remonter la ligne d'eau,... mais quinze ans après....



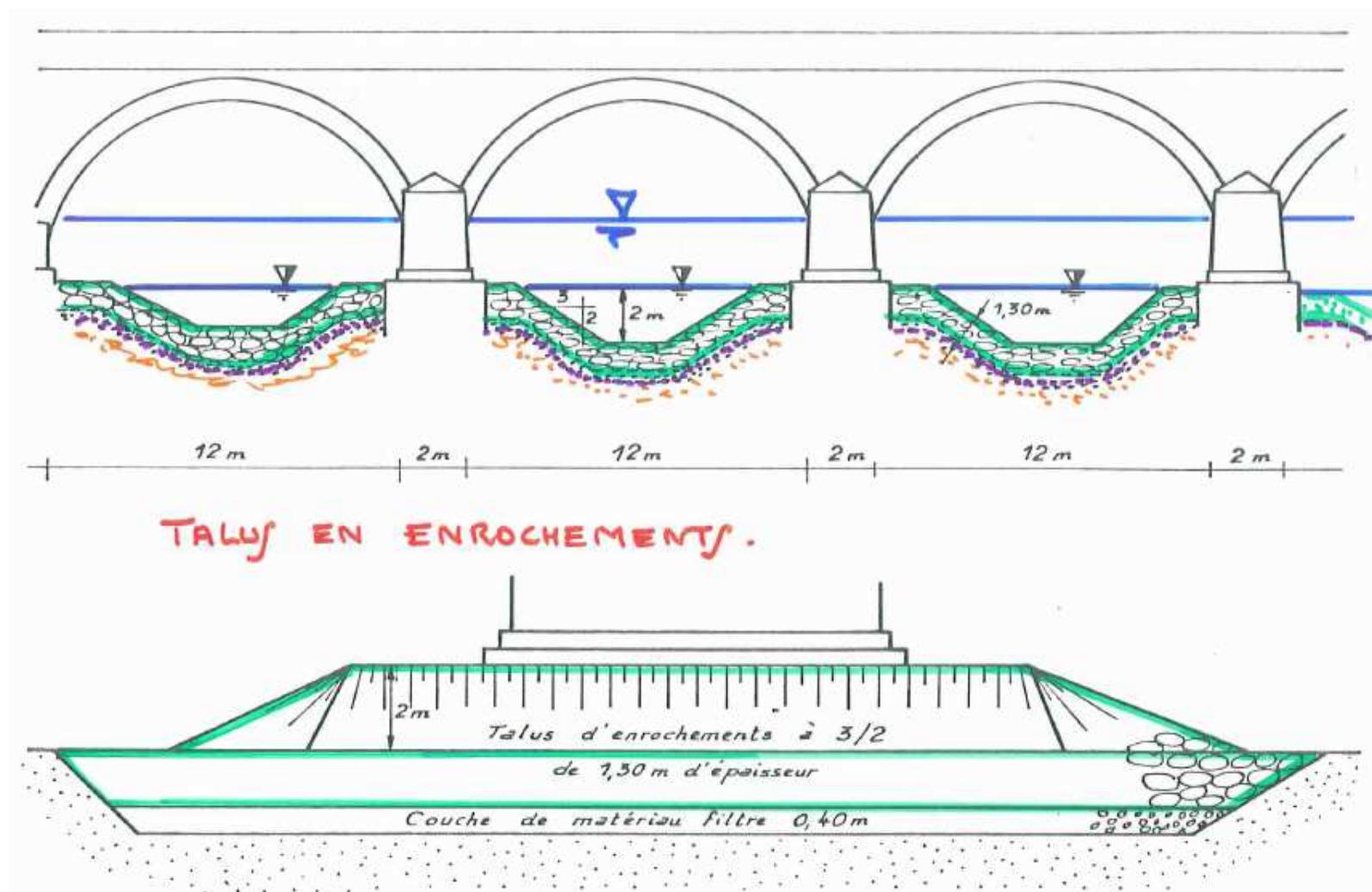
chute d'un ouvrage par érosion des sols et formation de cavités sous la fondation de la pile rive droite, antérieurement à la construction du seuil



Conséquences de l'abaissement du lit sur une fondation érosion interne des sols porteurs et cavités sous le massif



La protection des sols formant radier peut être en enrochements judicieusement dimensionnés



RELATIONS PROPOSEES A LA SUITE D'ESSAIS EXPERIMENTAUX

- Formule de Isbach pour des enrochements lancés dans le courant en lignes d'eau parallèles :

$$V = 1,2 \left(2g \frac{Y_s - Y}{Y} \right)^{1/2} D^{1/2}$$

- Formule de la SGTE - LNH :

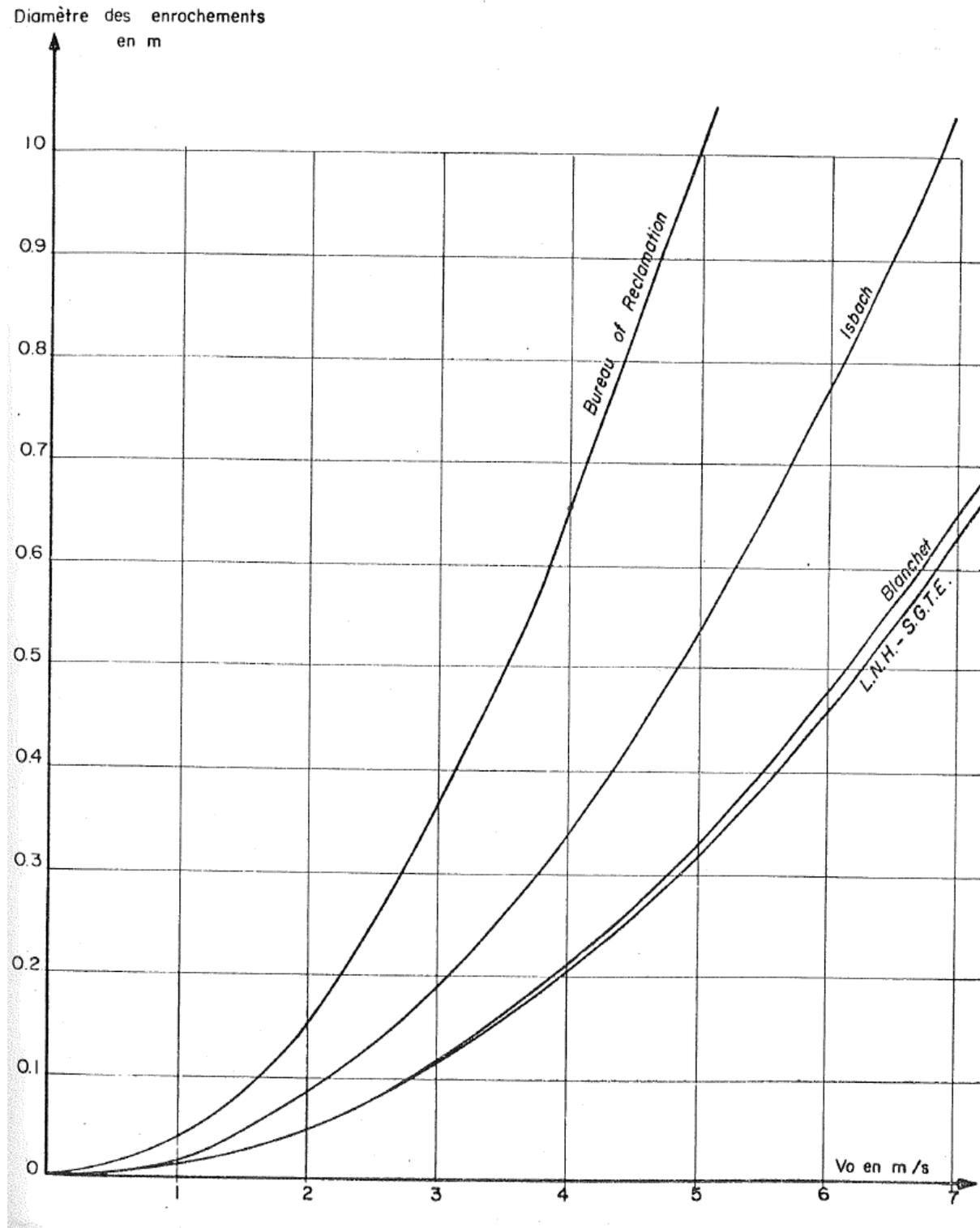
$$V = 1,55 \left(2g \frac{Y_s - Y}{Y} \right)^{1/2} D^{1/2}$$

- Formule de Blanchet :

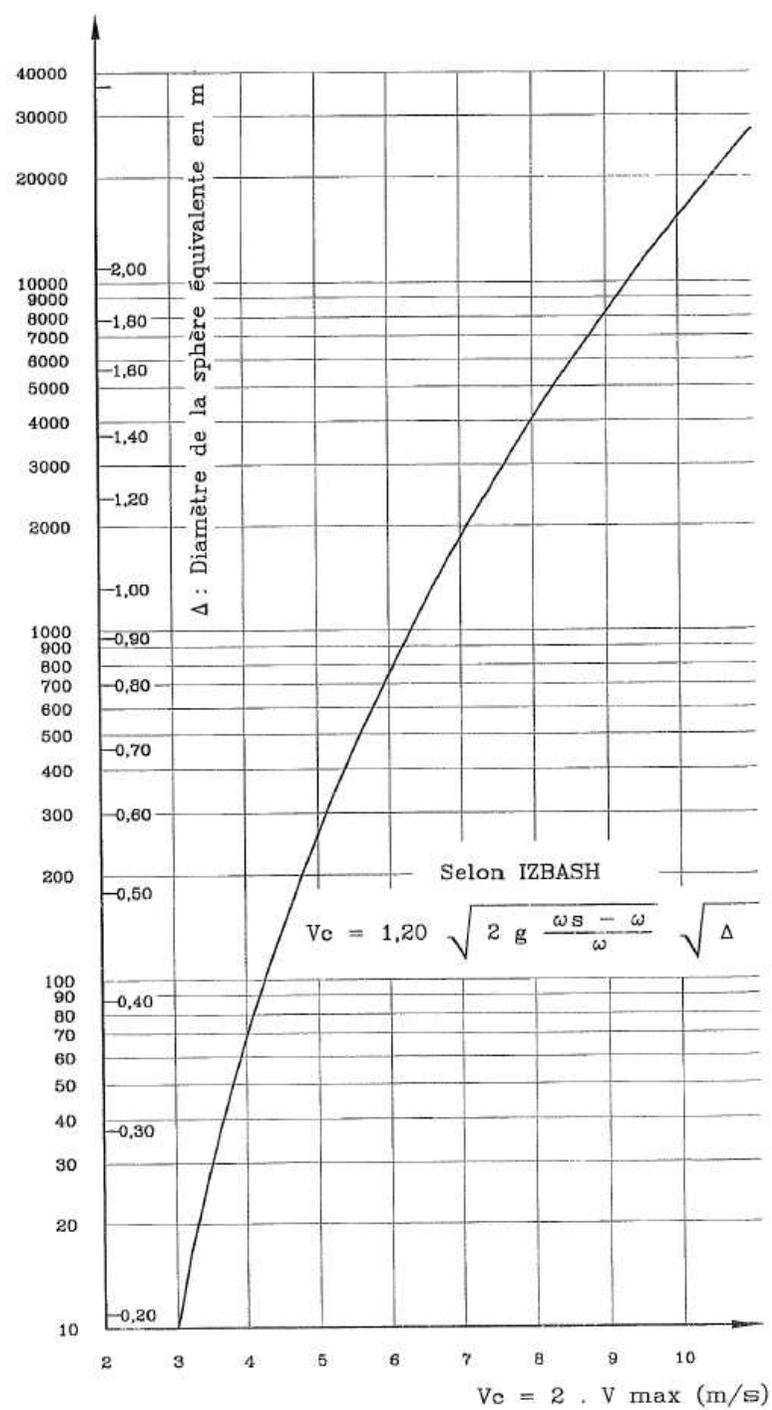
$$V = 1,2 \left(2g \frac{Y_s}{Y} \right)^{1/2} D^{1/2}$$

Travaux de Neill, travaux du bureau of reclamation, résultats sur courbe expérimentale

Courbes de stabilité du tapis d'enrochements



Masse et diamètre de l'enrochement en fonction de la vitesse d'écoulement à adopter dans la justification selon IZBASH



ANALYSE SOMMAIRE DES FORCES APPLIQUEES SUR UN ENROCHEMENT

- force stabilisatrice : le poids, $P = \pi \gamma D^{3/6}$

force déstabilisatrice : force hydrodynamique du courant :

$$F = k_1 D^2 V^2$$

- des forces de frottement dépendent de l'arrangement des enrochements :

viennent en réaction aux deux autres forces,

difficiles à quantifier, elles interviennent comme sécurité supplémentaire.

Pour que l'enrochement soit en équilibre :

$$P = kF$$

$$\pi \gamma D^{3/6} = k k_1 D^2 V^2 \quad \text{soit } V = K (\gamma D)^{1/2}$$

On constate une proportionnalité entre la vitesse et $(\gamma D)^{1/2}$:

importance de la densité du matériau

COMPOURTEMENT MECANIQUE DES SOLS GROSSIERS

Études des laboratoires des Ponts et Chaussées – 2007

- Forme granulométrique donnant le maximum de densité : courbe concave.

- Amélioration de l'angle de frottement interne

$$d_{60}/d_{10} = 6,5$$

- Arrangement optimal :

30 % de fines

70 % de grosses particules

DU DIAMETRE MOYEN DU BLOC A LA BLOCOMETRIE

Pour une vitesse moyenne d'écoulement de 1,85 m/sec :

$$d_{60} = 30 \text{ cm (40 kg)}$$

Critère granulométrique des blocs à mettre en tapis :

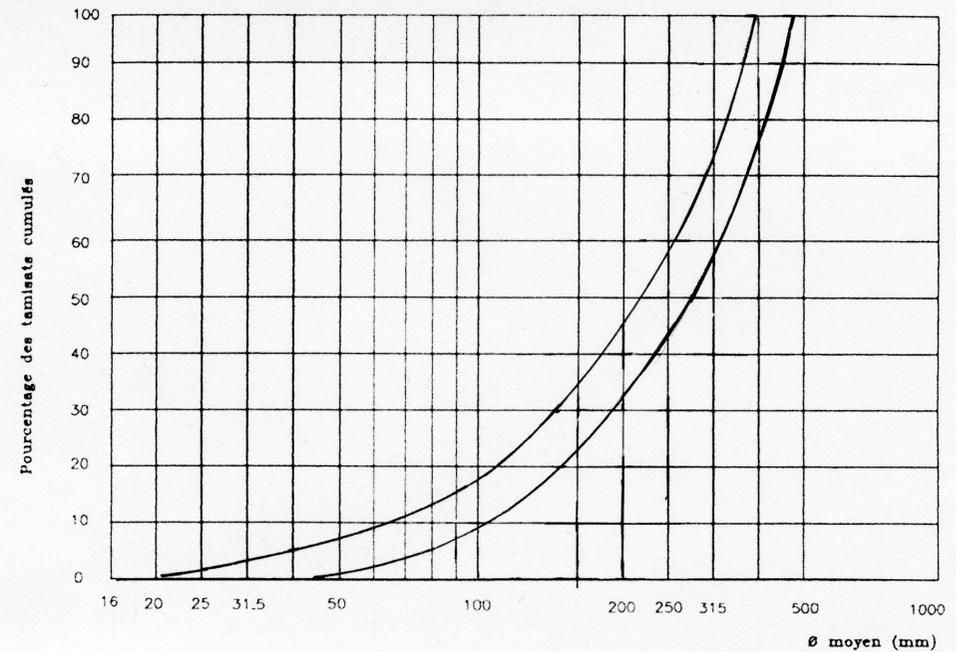
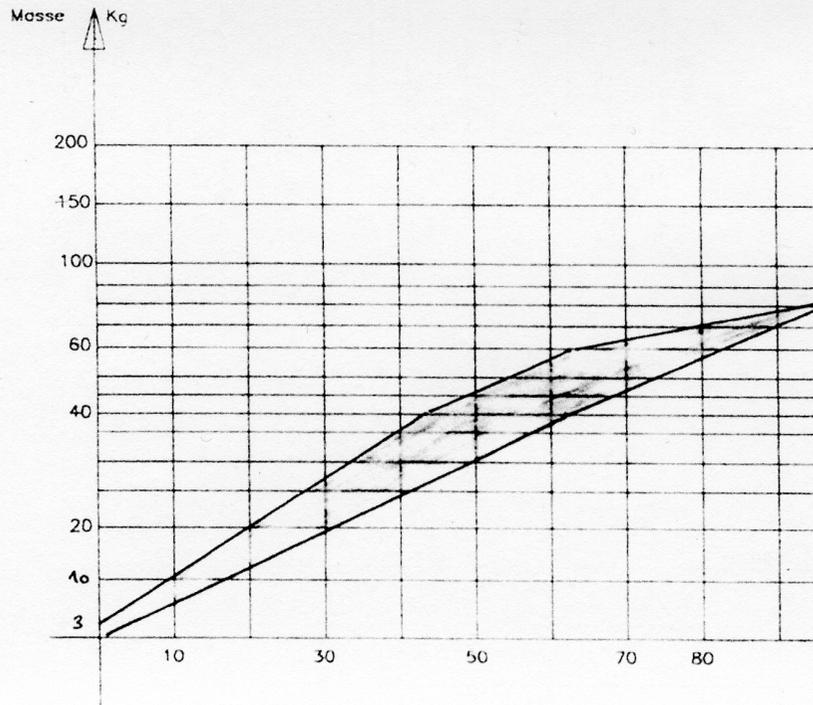
Dimension	Diamètre moyen	Fuseau	Poids moyen
$D_{100} = 1,35 D_{60}$	40 cm	37 à 45 cm	85 kg
$D_{85} = 1,20 D_{60}$	36 cm	32 à 42 cm	60 kg
$D_{60} = D_{60}$	30 cm	26 à 35 cm	37,5 kg
$D_{50} = 0,85 D_{60}$	26 cm	22 à 30 cm	24 kg
$D_{30} = 0,55 D_{60}$	17 cm	13 à 20 cm	7 kg
$D_{10} = 0,25 D_{60}$	7,5 cm	6 à 10 cm	0,6 kg
$D_0 = 0,15 D_{60}$	4,5 cm	2 à 5 cm	0,125 kg

Vérification : $D_{100}/D_0 = 9$ et $D_{60}/D_{10} = 4$

ENROCHEMENT 5 – 60 kg obtenu par :

35 % classe normalisée 63 – 180 mm

65 % classe normalisée 16 – 60 kg



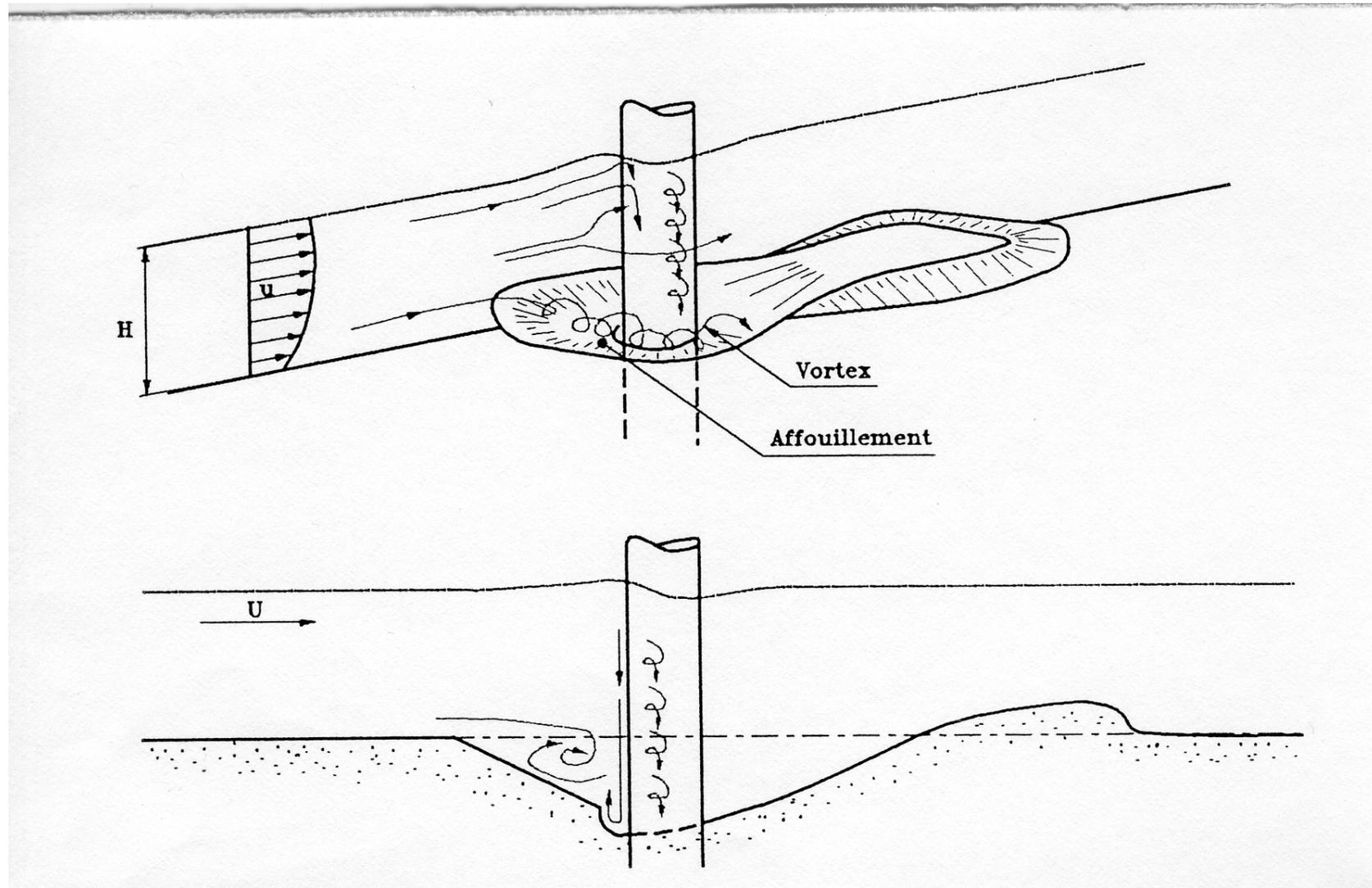
BLOCS D'ENROCHEMENTS DE 3 à 35 Kg - résistent à plus de 2 m / sec



Appuis sans protection des sols et affouillés

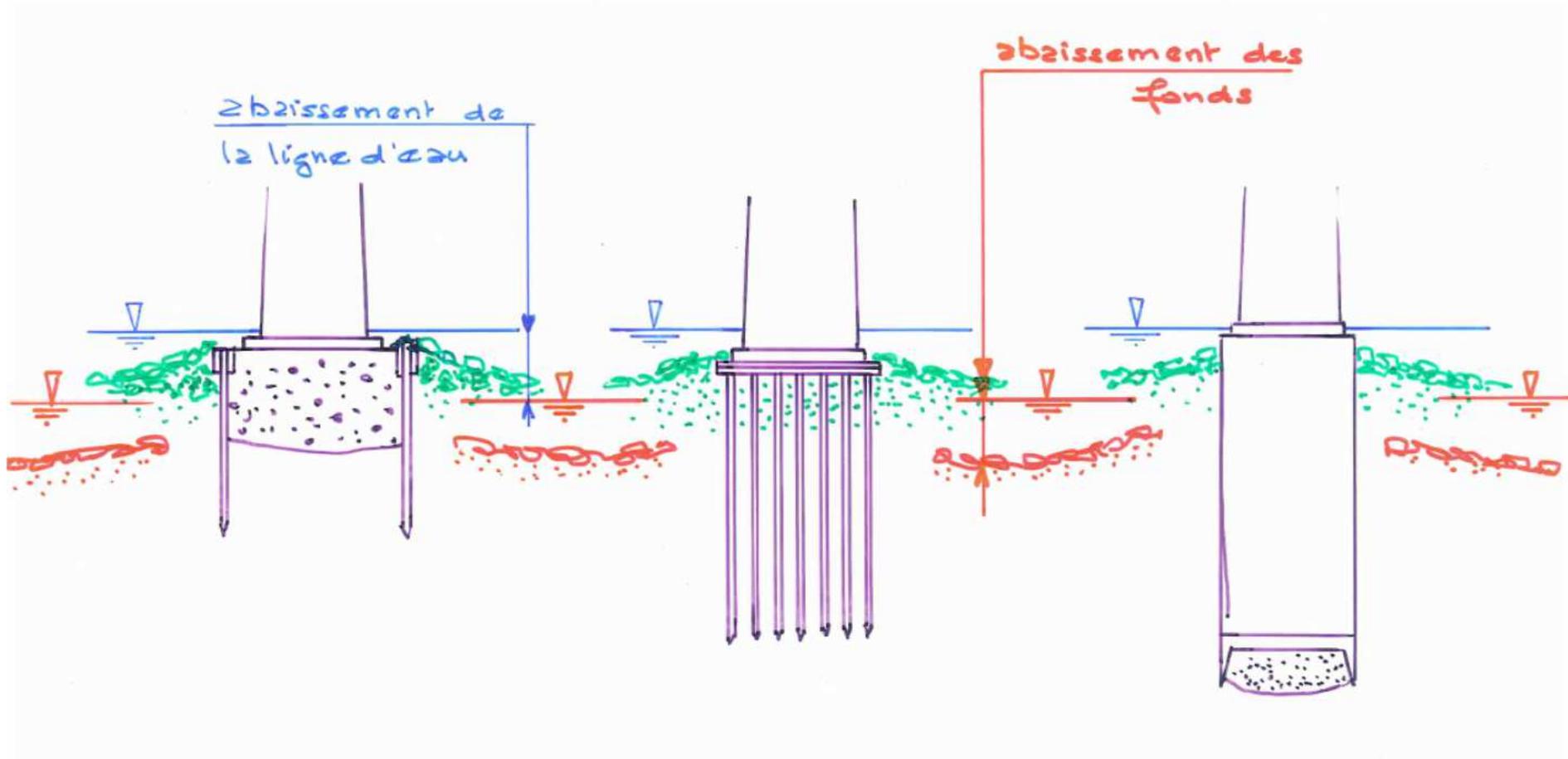


Affouillement local dû à l'obstacle



Conséquences des abaissements du lit sur les fondations des ouvrages d'art anciens

diminution de l'encastrement et de la portance, érosion et formation de cavités,
abrasion et altération des pièces de bois découvertes et des massifs de béton
de chaux

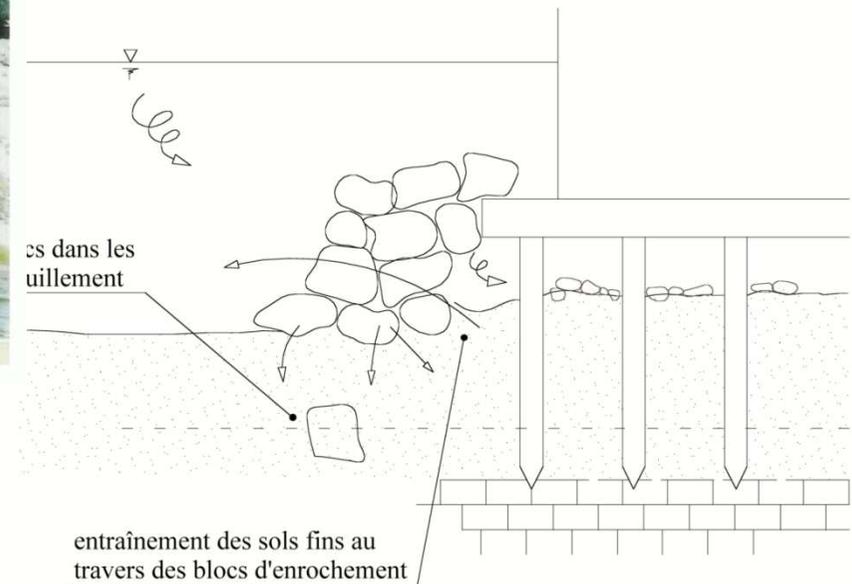


Enrochements disposés en talus au pourtour des fondations

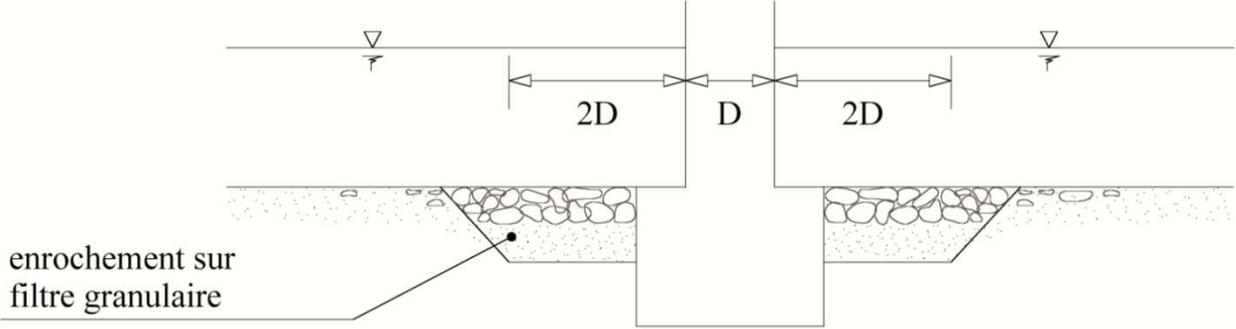
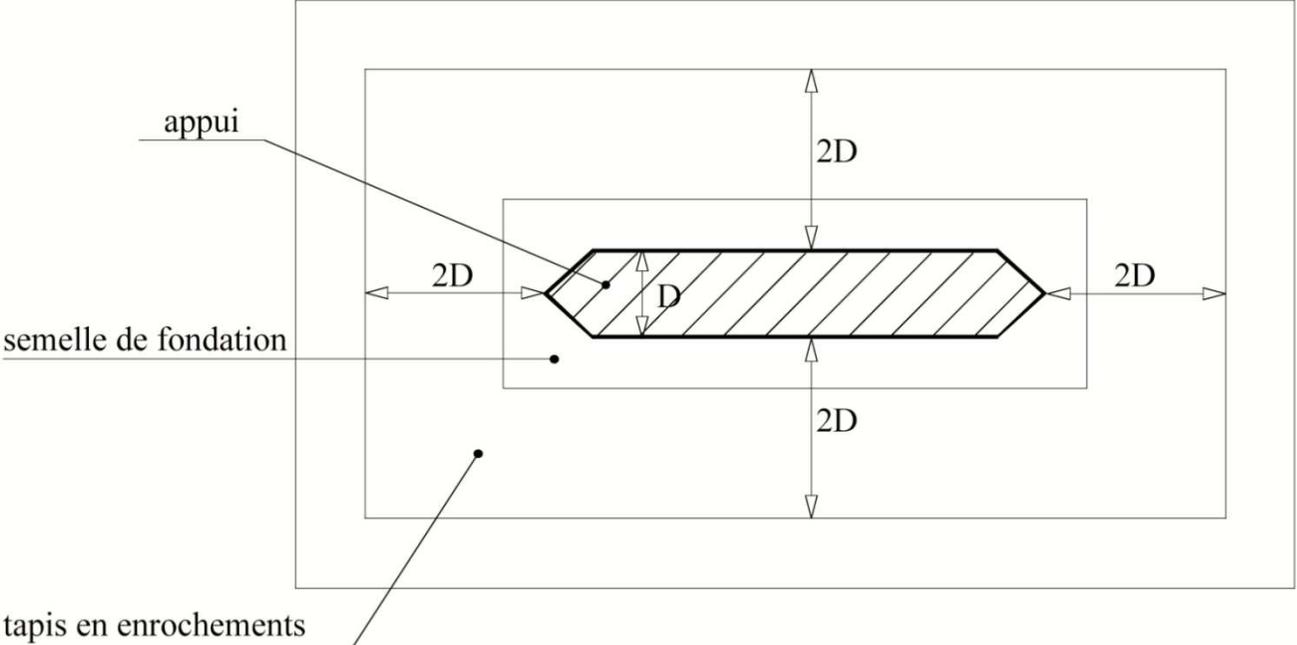


BLOCS D'ENROCHEMENT HOMOMETRIQUES

PROTECTION INEFFICACE CONTRE LE DEPART DES SOLS



GEOMETRIE DES PROTECTIONS



enrochement sur
filtre granulaire

FILTRE SOUS ENROCHEMENTS

Il est fortement recommandé de disposer un filtre entre le sol et le tapis d'enrochement, ce filtre est dimensionné par les conditions suivantes :

$$\Delta_{15} < 5 d_{85}$$

$$4 d_{15} < \Delta_{15} < 20 d_{15}$$

$$\Delta_{50} < 25 d_{50}$$

Le matériau filtre est à mettre en œuvre sur une épaisseur de 0,35 m d'épaisseur

Mais comment mettre en œuvre sous quelques mètres d'eau et dans le courant ?

un matériau type 4 – 85 mm (soit un 5 – 40 mm selon la classe normalisée)

sans perte ni arrachement.

SOLUTION : joindre le matériau filtre aux enrochements

PROCEDURE DE MISE EN ŒUVRE - AVANTAGES

Les deux classes granulométriques (voire trois) correspondent aux spécifications de la norme NF EN 13383-1 et sont mélangées sur site.

Les matériaux élaborés doivent :

- être non clapés
- être déposés dans la souille,
- serrés par le dos de la pelle,
- non griffés ce qui conduirait à une ségrégation.

Durabilité de la protection mise en œuvre et réduction des travaux d'entretien .

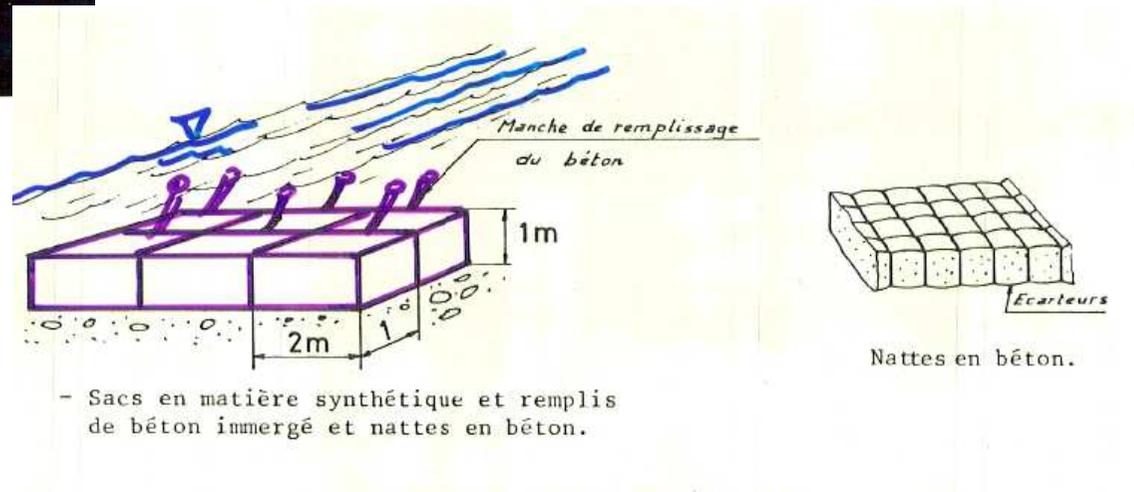
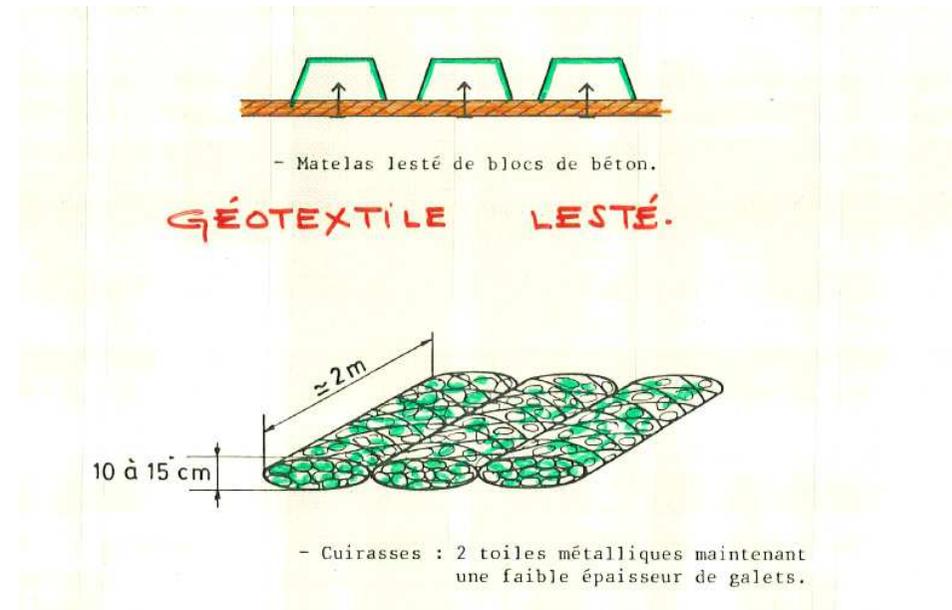
Meilleure protection des sols du fait d'une compacité plus élevée.

Grande stabilité de la protection au pourtour des appuis.

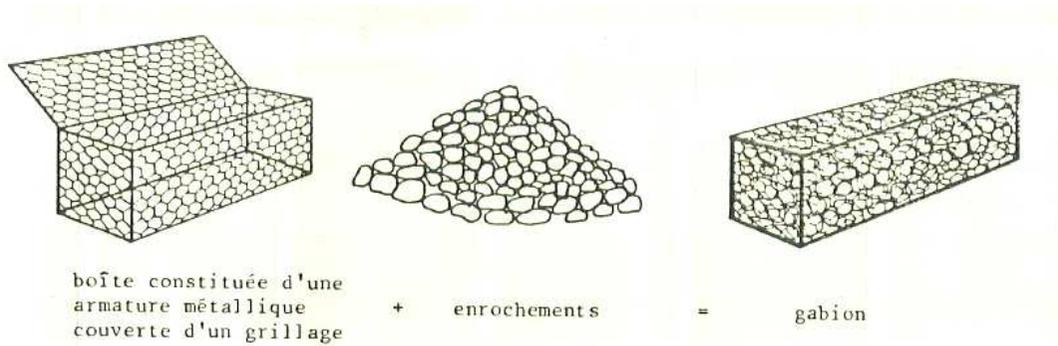
Épaisseur de la carapace plus faible que celle des blocs libres.

Mise en œuvre plus contraignante qui interdit le clapage ou le déversement.

SOLUTION VARIANTE DES ENROCHEMENTS A DISPOSER AUTOUR DES FONDATIONS OU EN TAPIS



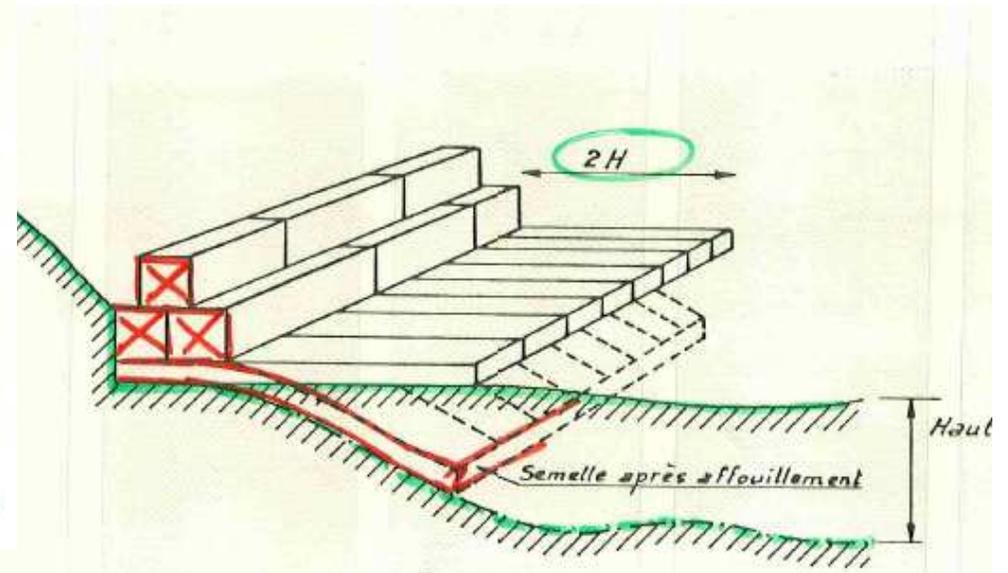
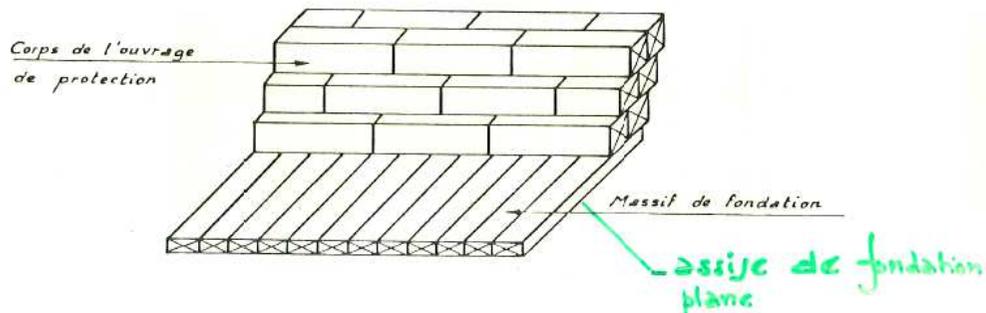
SOLUTION DES GABIONS BOITES



Gabion d'enrochements.

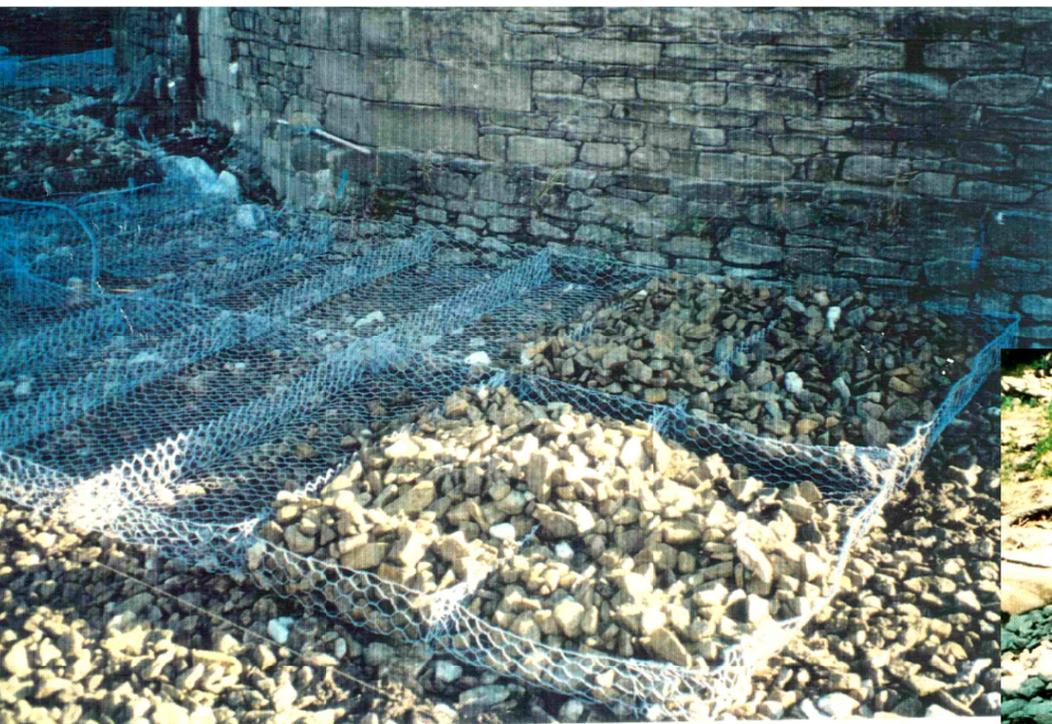
- LES GABIONS -

$$D_G \approx 1,5 D_E$$



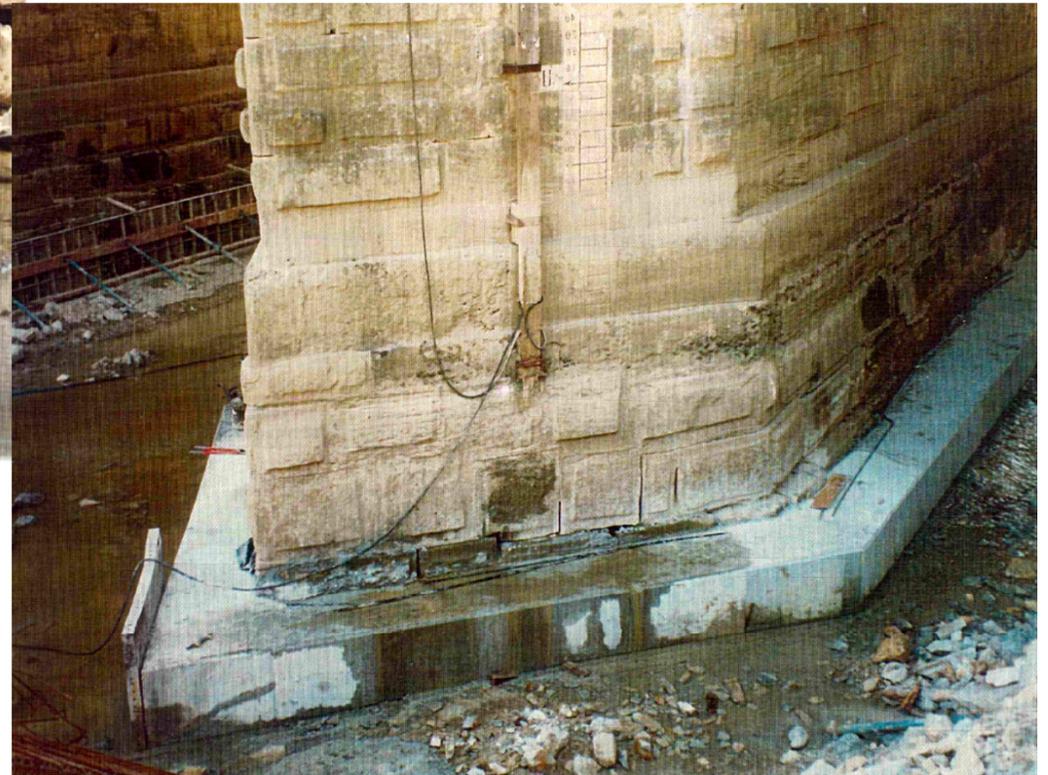
Déformation de la semelle après affouillement.

PROTECTION DES FONDS AUTOUR D'UN APPUI PAR TAPIS DE GABIONS

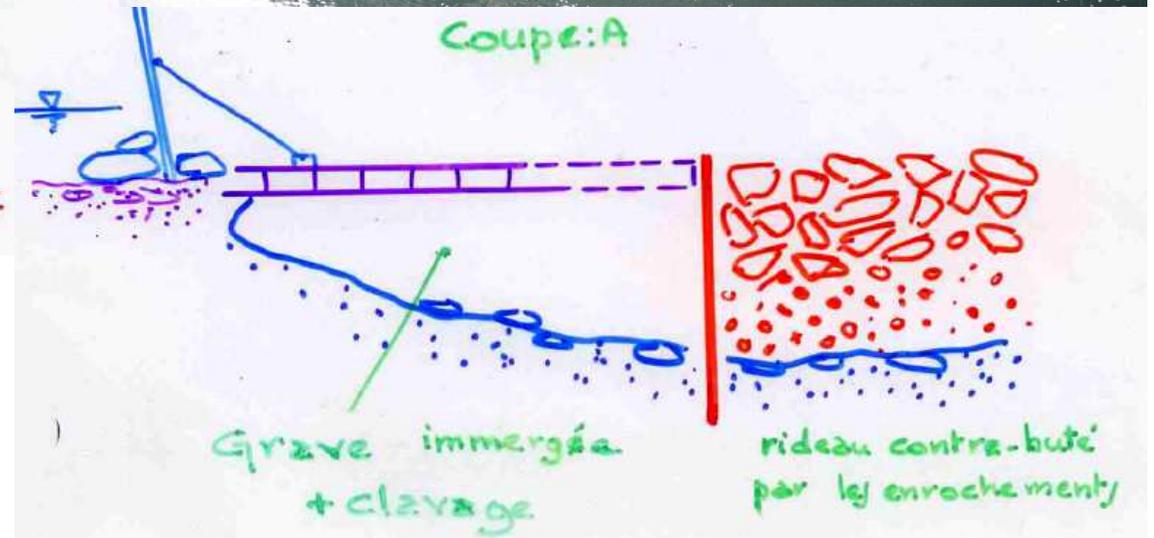
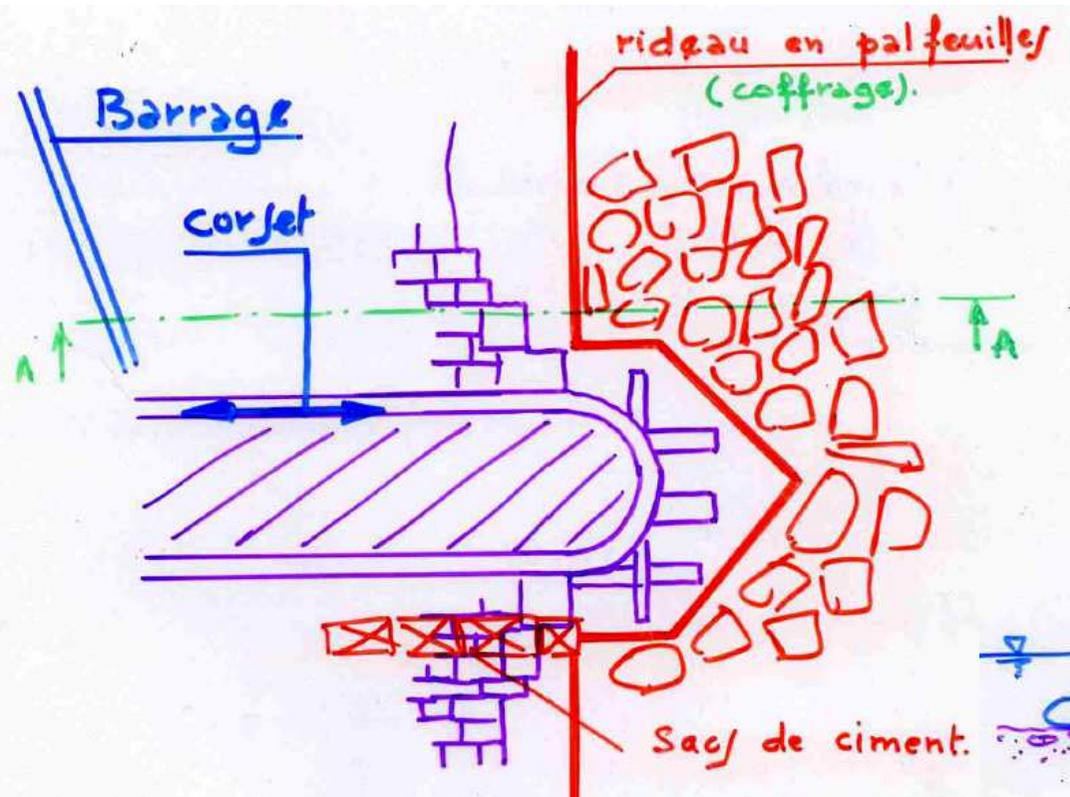


COMBLEMENT DE CAVITES SOUS APPUIS

LE CAS D'UN SUBSTRATUM DE CALCAIRE

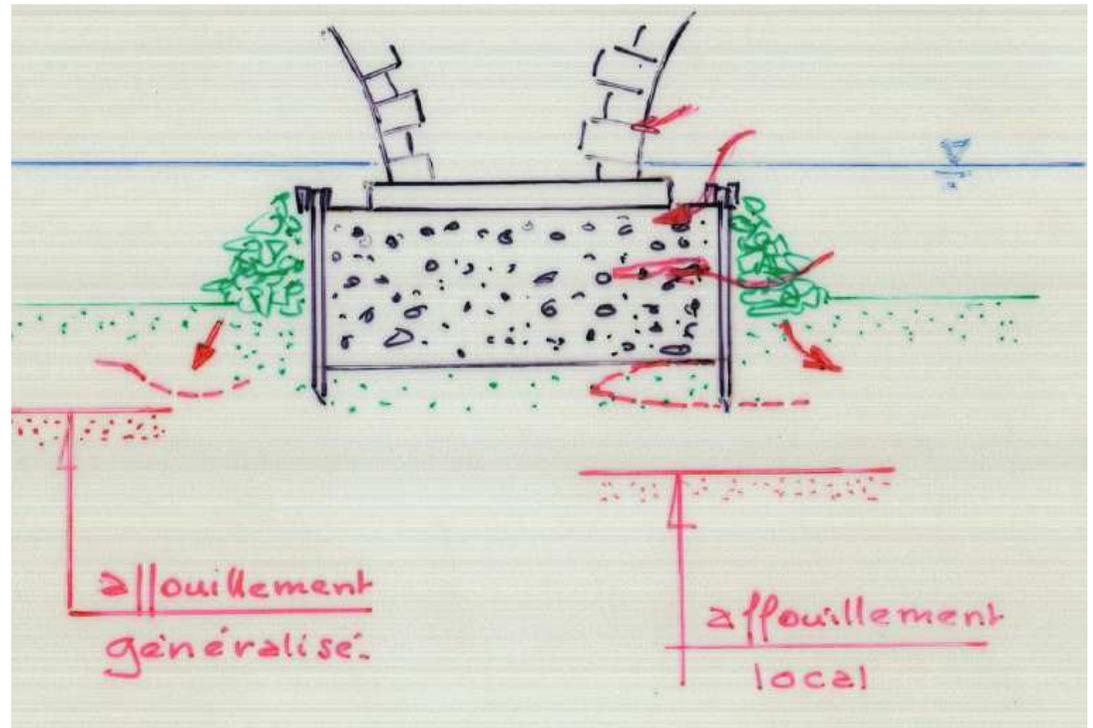
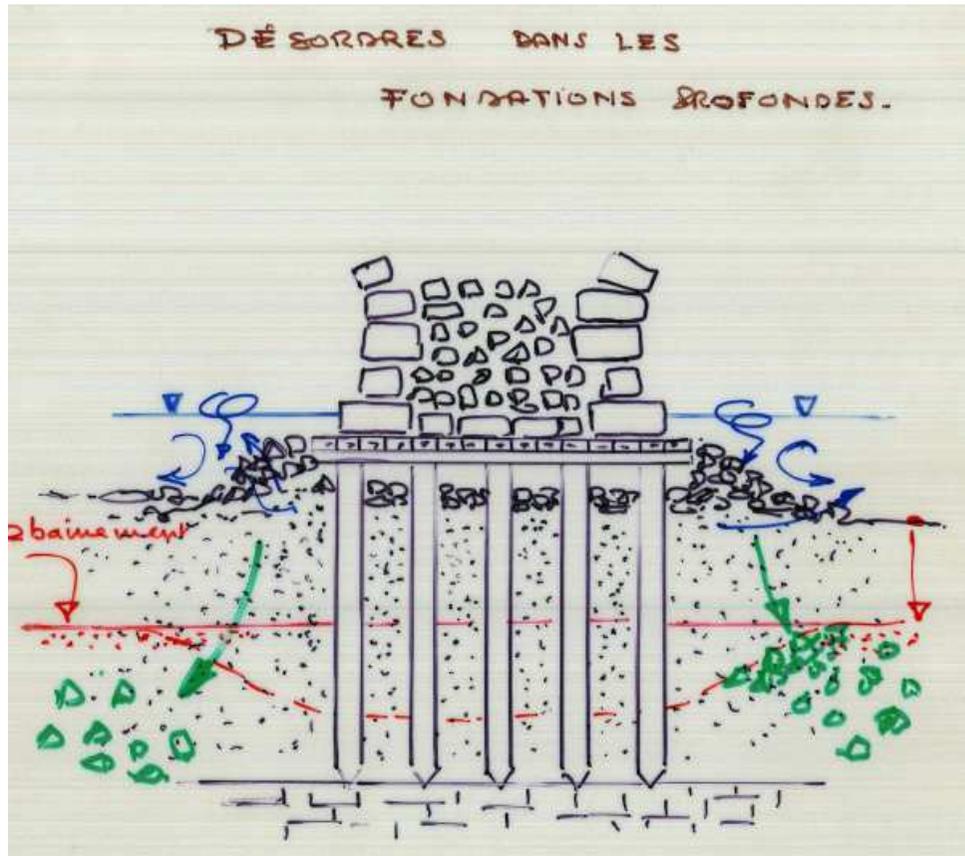


COMBLEMENT D'UNE CAVITE SOUS UN APPUI

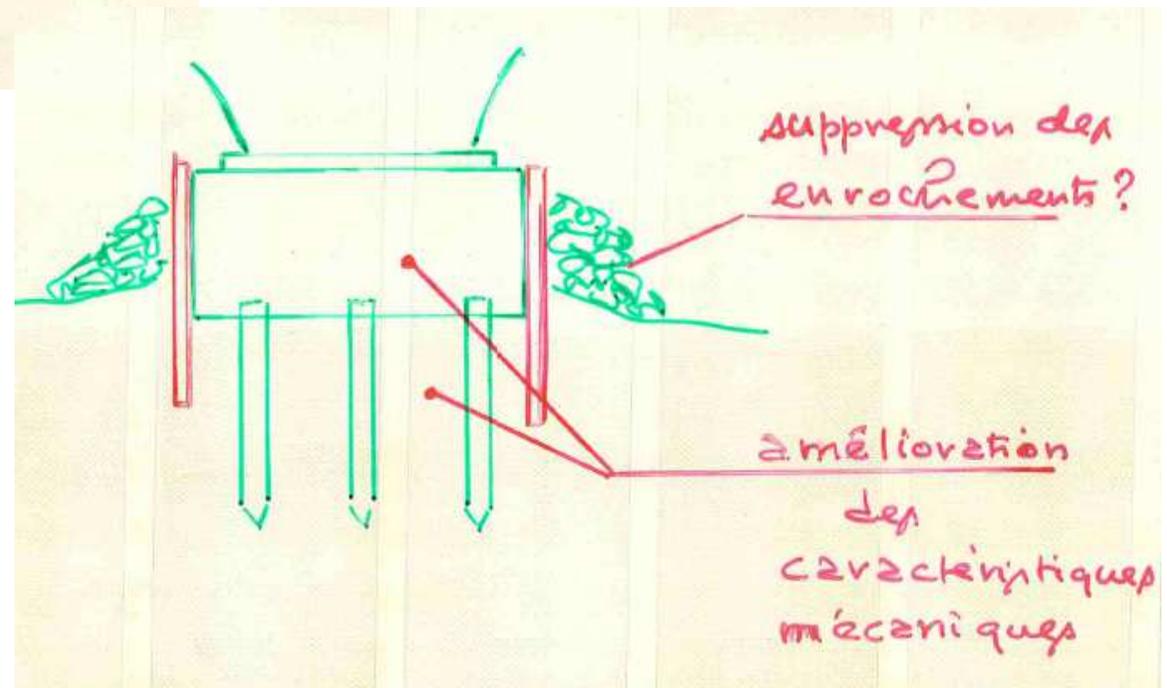
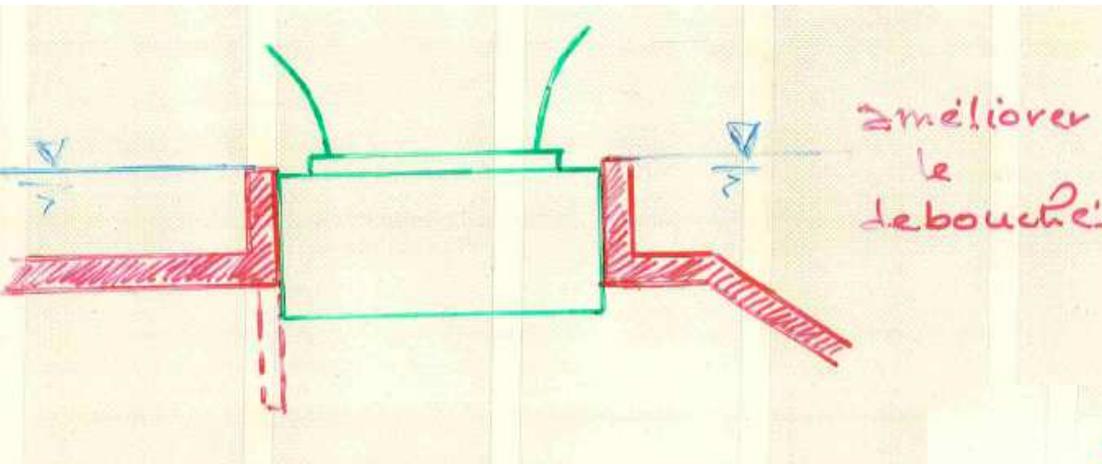


AGRESSIONS DE L'EAU SUR LES FONDATIONS

DÉSORDRES DANS LES
FONDATEMENTS PROFONDES.



PROTECTION DE LA BASE DES APPUIS



CORSET OU ENCAGEMENT PERIPHERIQUE SANS AUCUNE DISPOSITION PARAFOUILLE

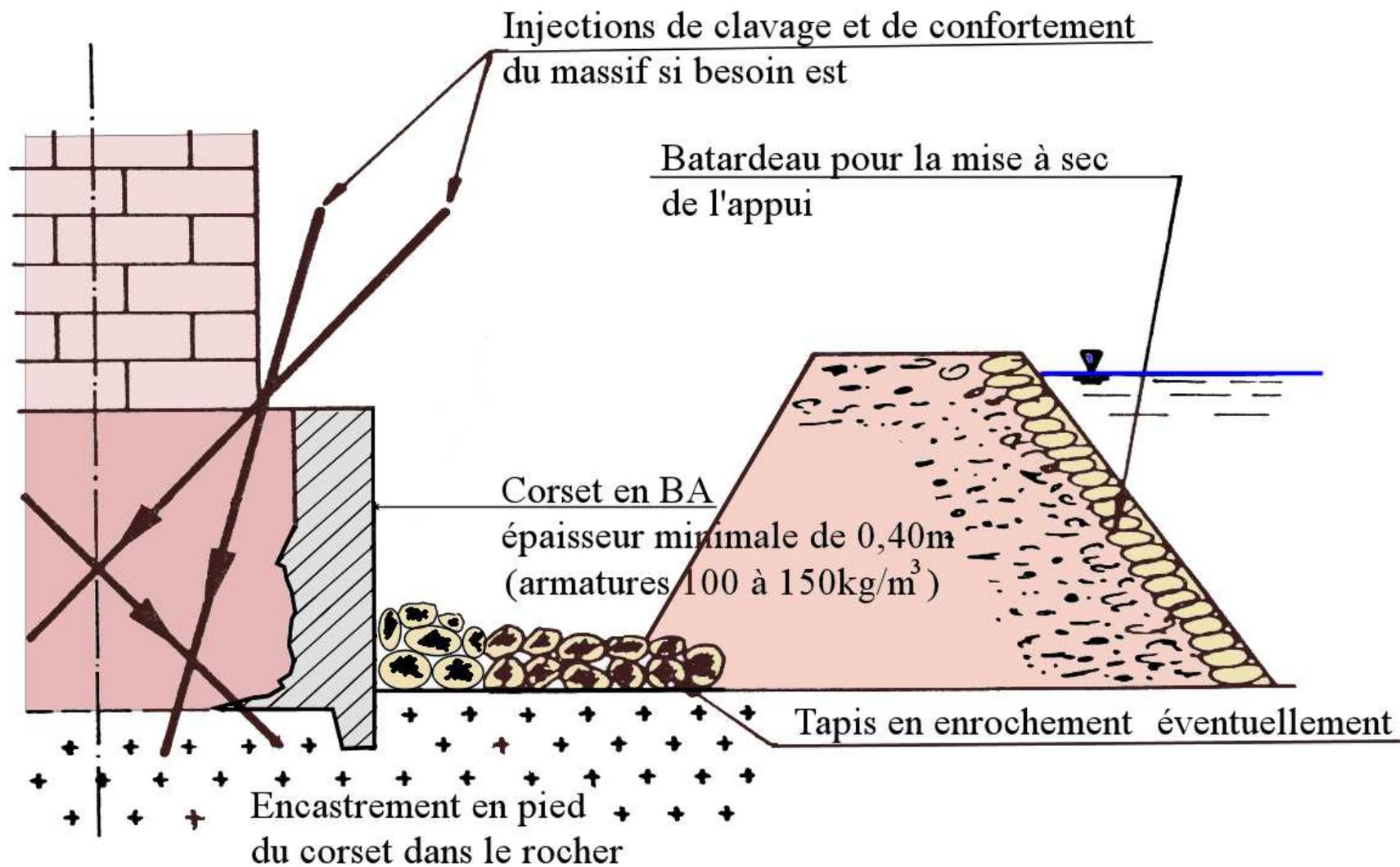


RUINE D'UN APPUI RESTAURE PAR VOILE PERIPHERIQUE SANS PARAFUILLE

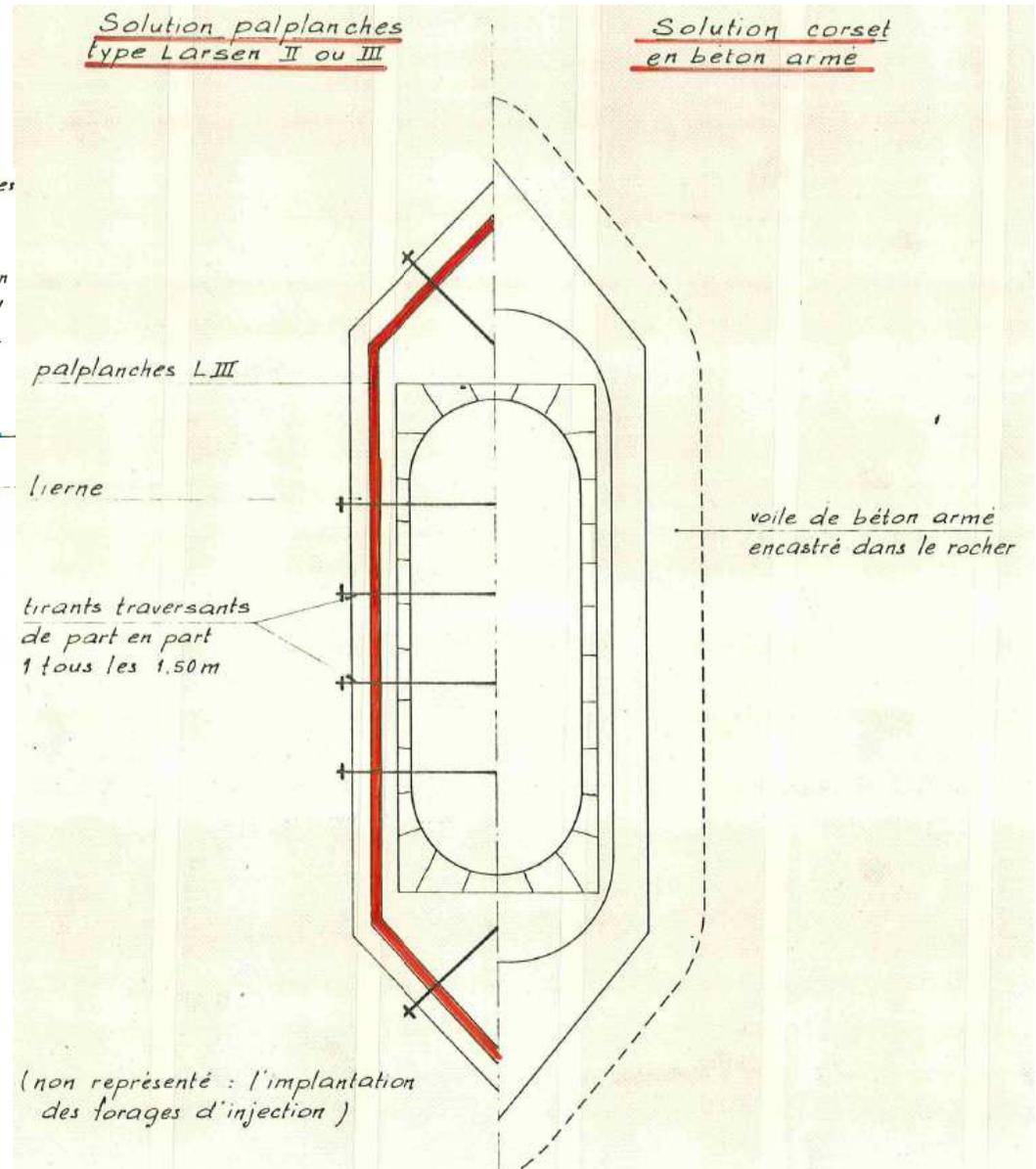
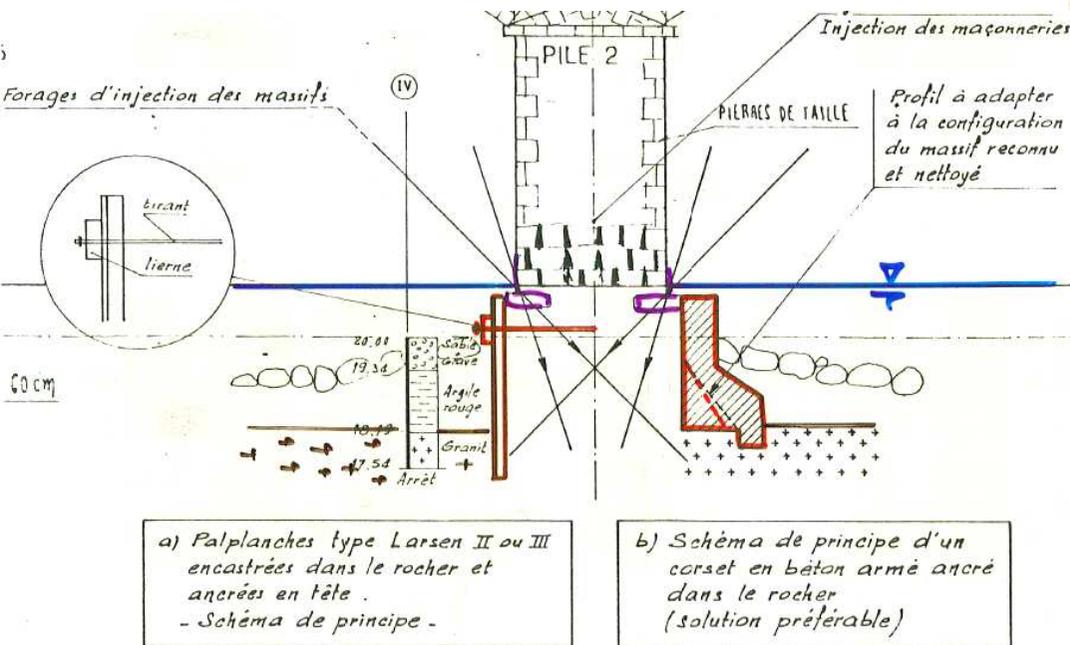


Protection des bases des appuis en matériaux altérables et dégradables par des massifs d'enrochement, par des encagements en béton armé ou en palplanches munis d'un parafeuille



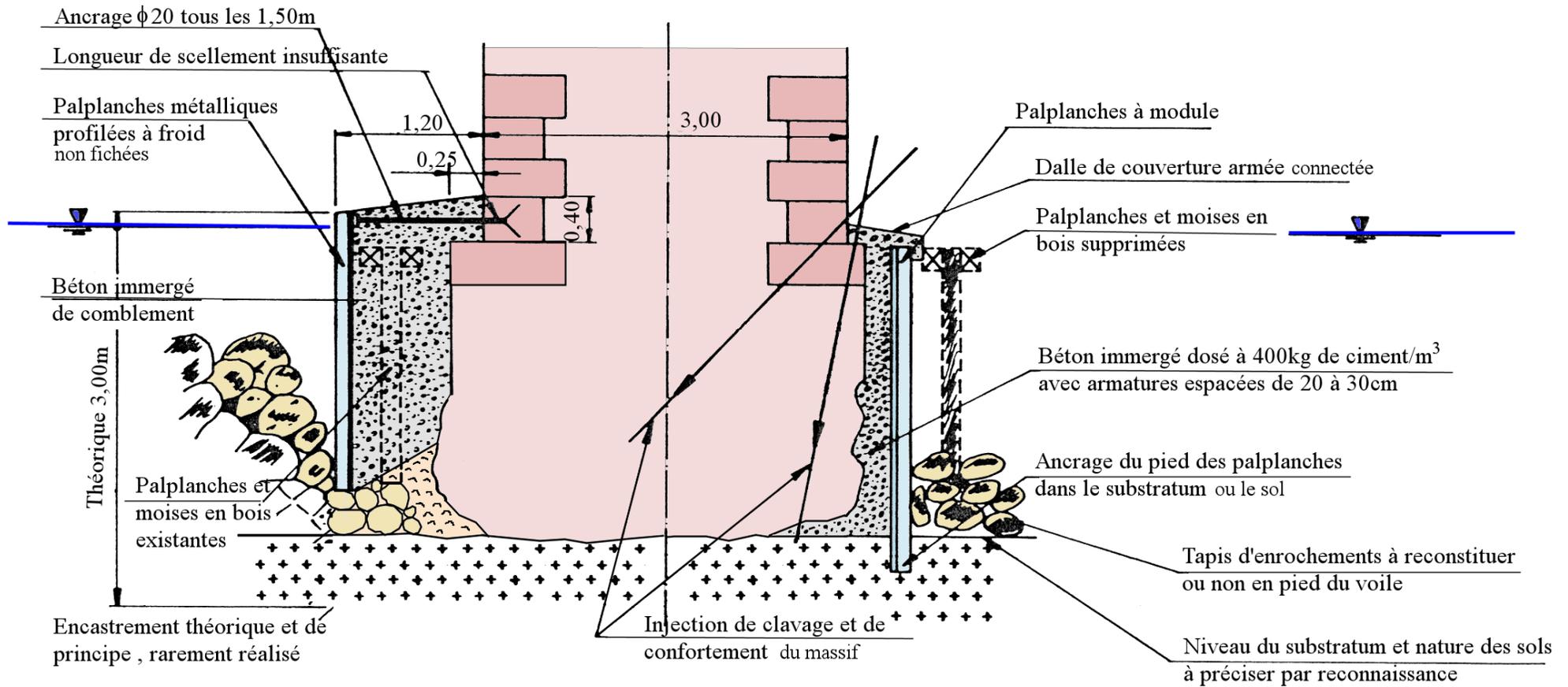


PROTECTION LATÉRALE D'UNE FONDATION PAR CORSET OU RIDEAU DE PALPLANCHES PÉRIPHÉRIQUE

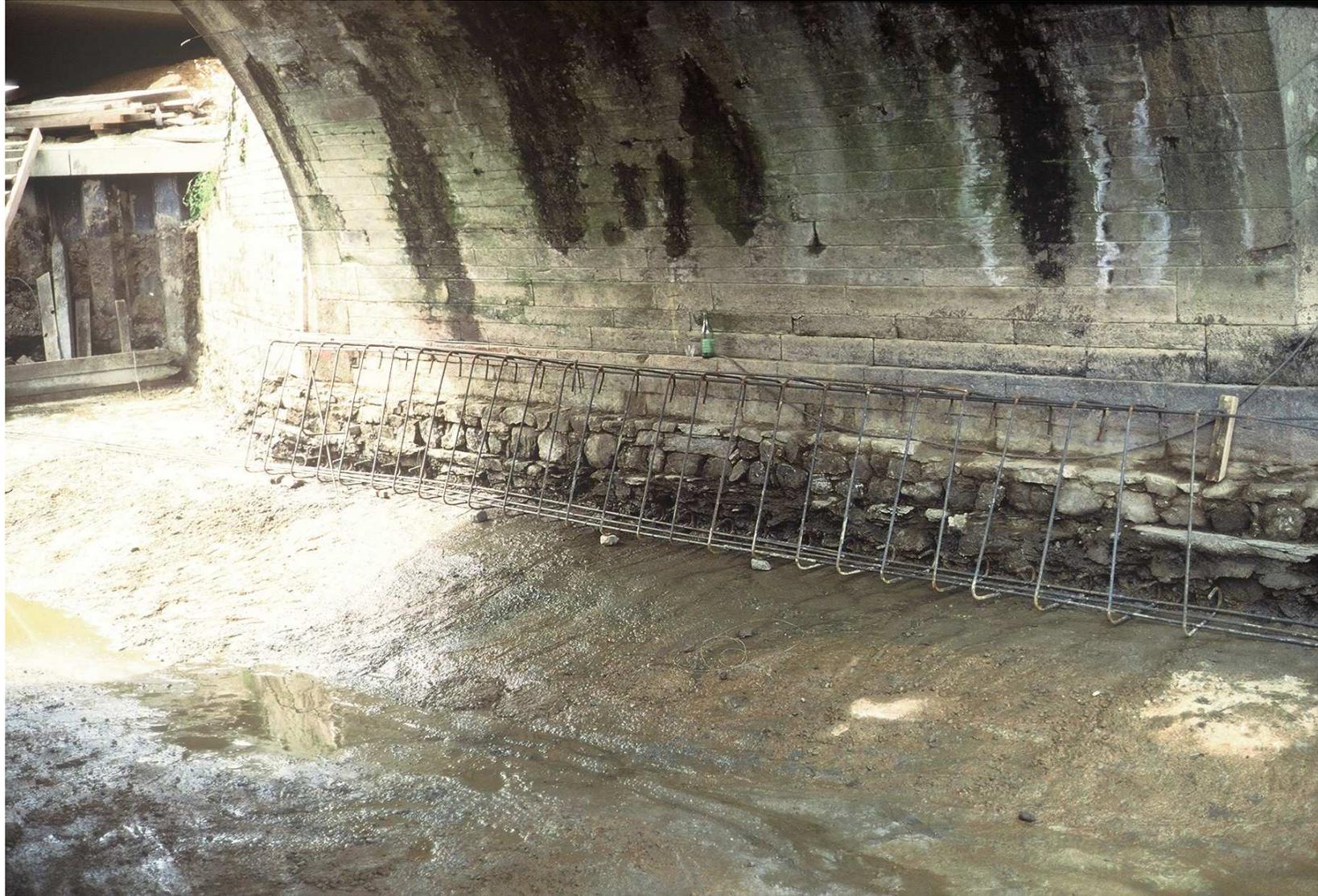


a) solution type proposée

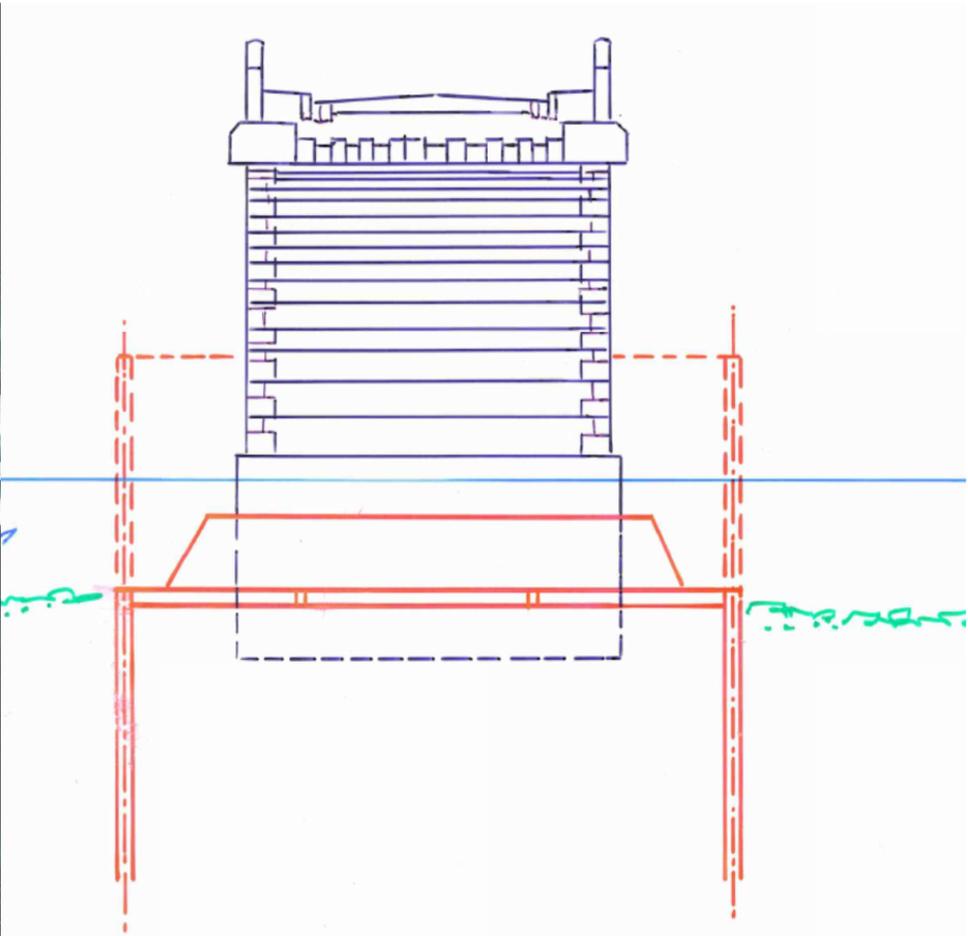
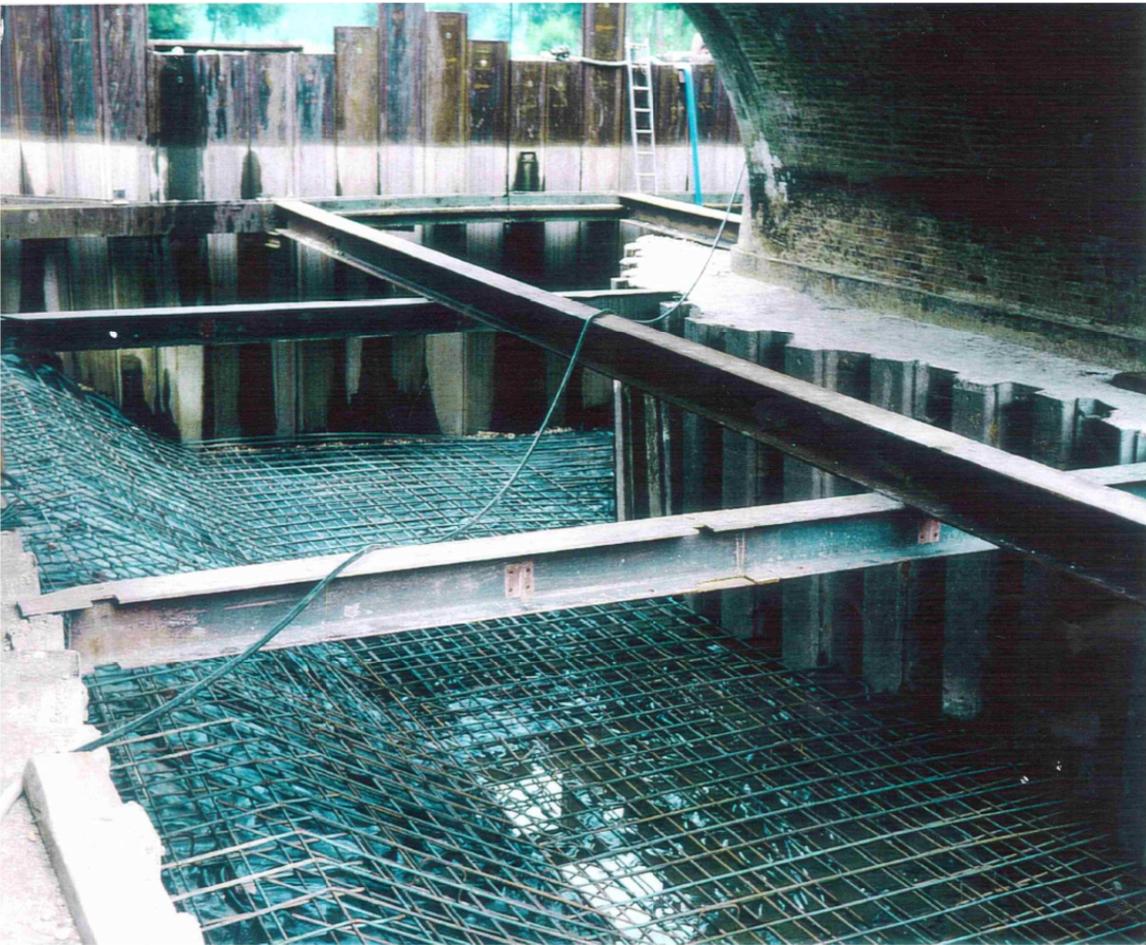
b) solution à préférer



CORSET EN BETON ARME ET PARAFOUILLE HORIZONTAL FORMANT RADIER



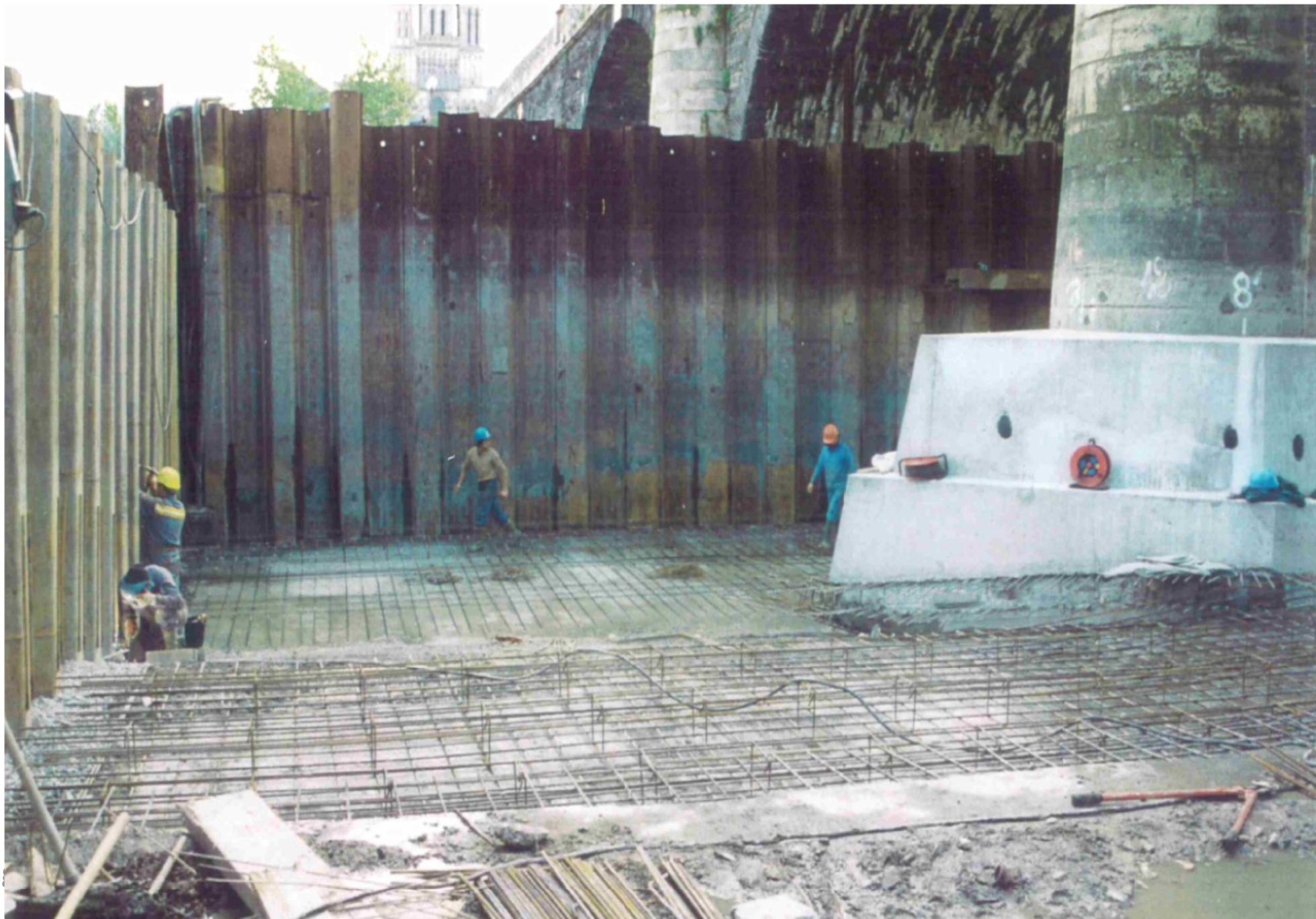
PROTECTION DES SOLS PAR RADIER GENERAL



RADIER GENERAL EN CONTINUITE DES CORSETS BA



RADIER GENERAL REMONTANT EN CORSET SUR L'APPUI





Angers (49), le 12 octobre 2015

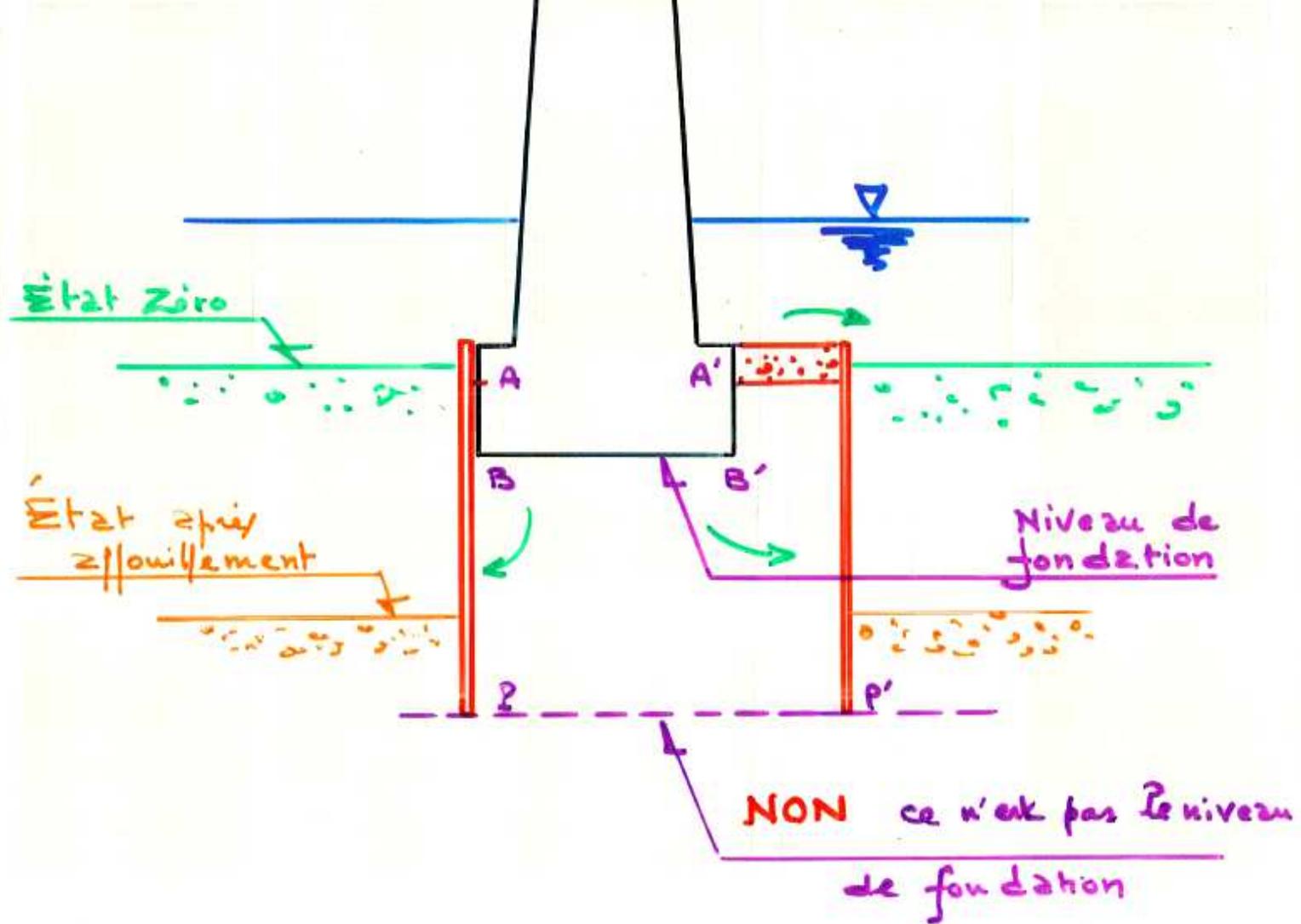




Angers (49), le 12 octobre 2015

UTILISATION DES PALPLANCHES METALLIQUES

- coffrage pour la restauration de la base d'un appui à l'aide de palplanches plates,
 - para fouille, le module est à adapter aux conditions de mise en œuvre,
 - encagement de la base d'un appui,
 - enceinte étanche,
 - batardeau pour mise à sec des appuis
 - renforcement de structures complémentaire de la fondation



Les palplanches n'augmentent pas ρ_{sF} quant à la résistance mécanique du sol.



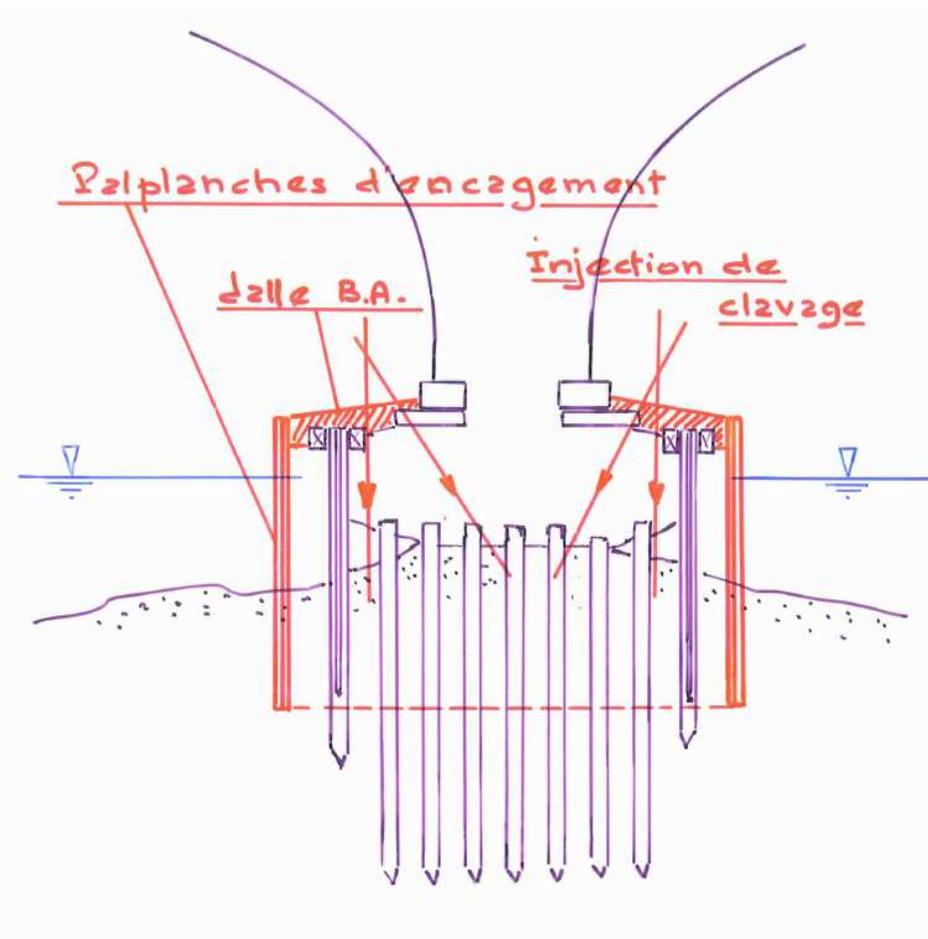
Angers (49), le 12 octobre 2015



Angers (49), le 12 octobre 2015

Protection de fondations sur pilotis et massifs de béton de chaux par un encagement de palplanches

par un encagement de palplanches





Angers (49), le 12 octobre 2015

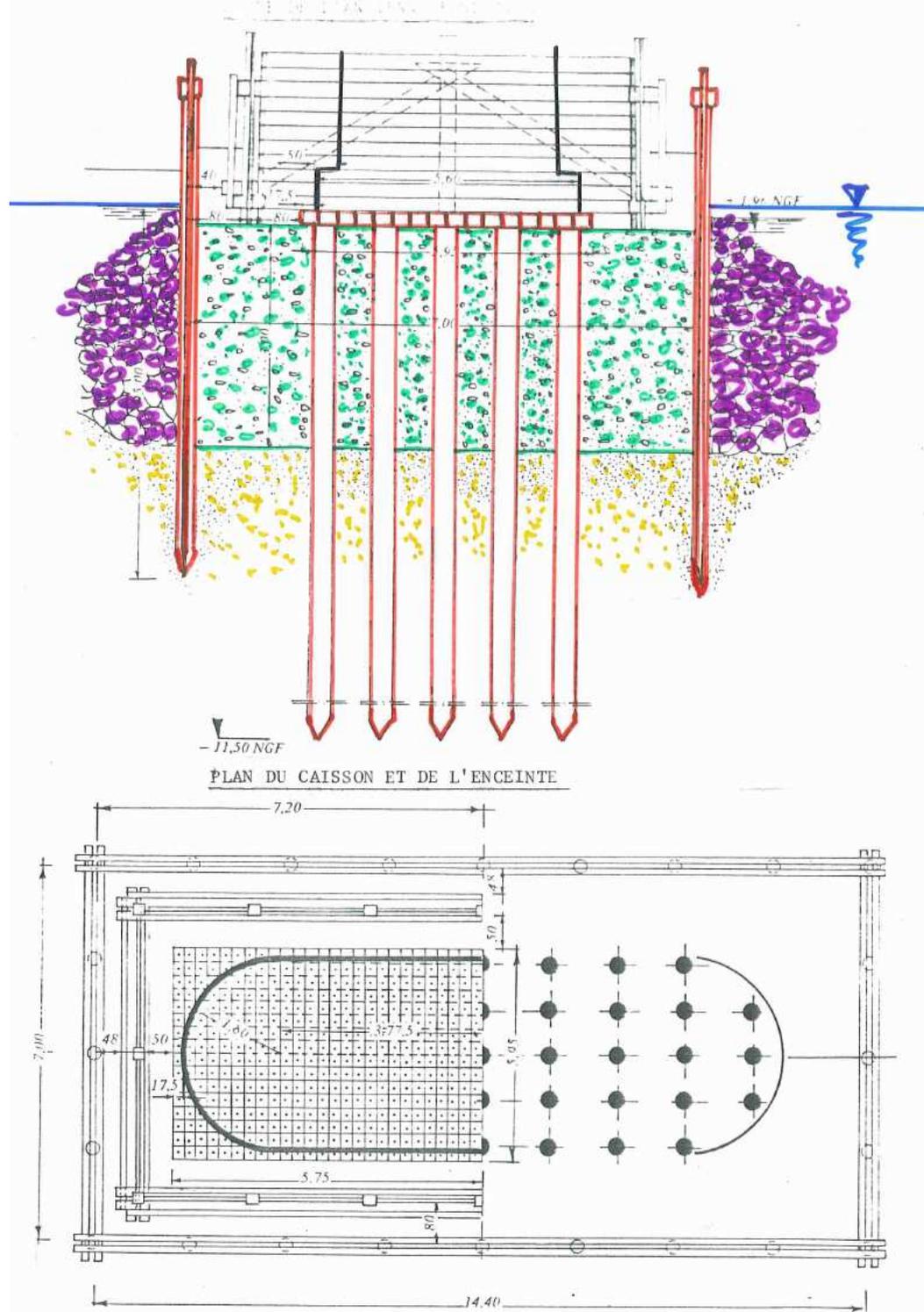
Modification de la fondation pour l'adapter aux nouvelles conditions morphologiques de la rivière – le cas du pont de Thouaré



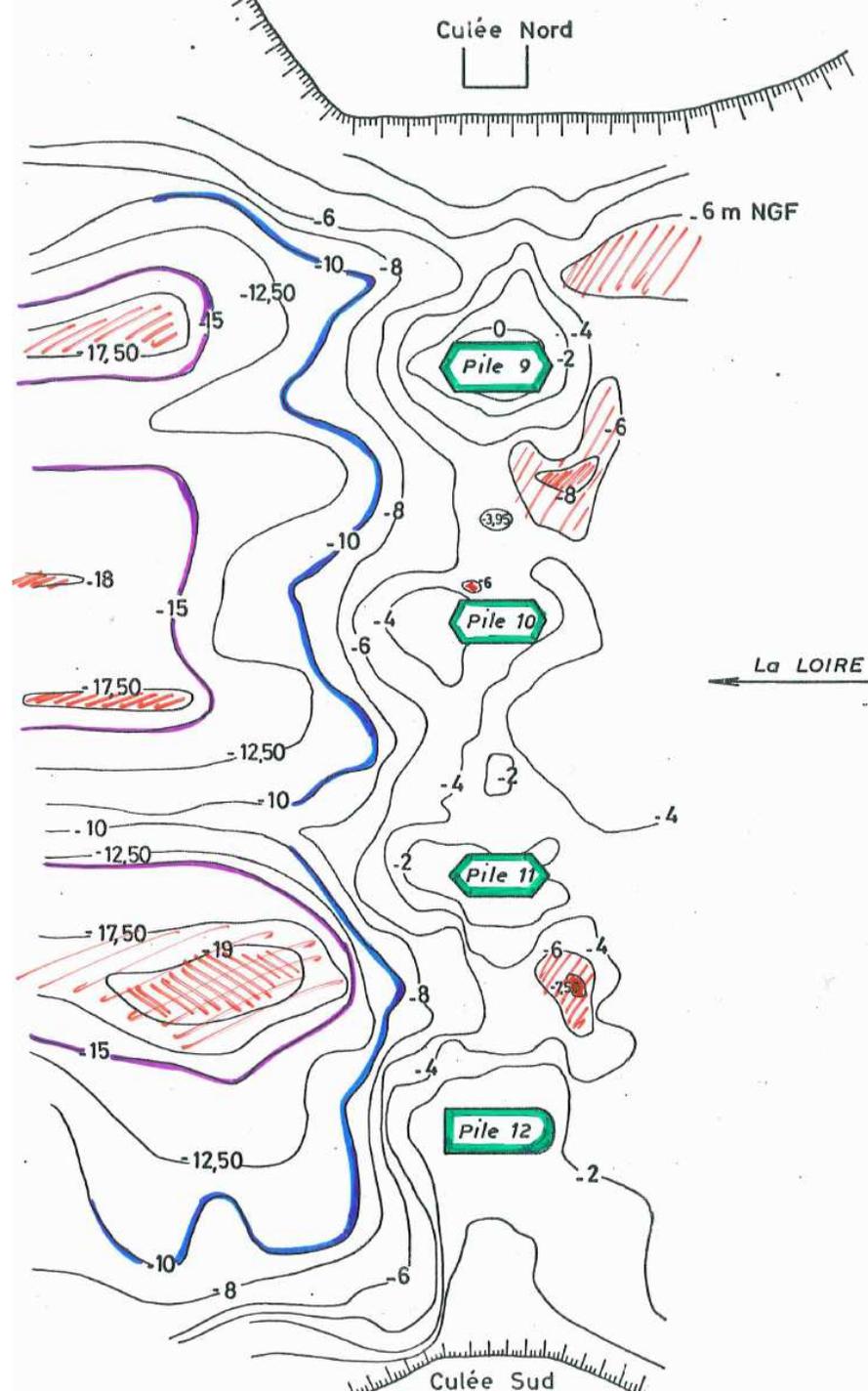
Elévation – coupe

sur appui

Plan de 1878



Bathymétrie mettant
en évidence
le surcreusement en aval



Etat des fondations

en 1978

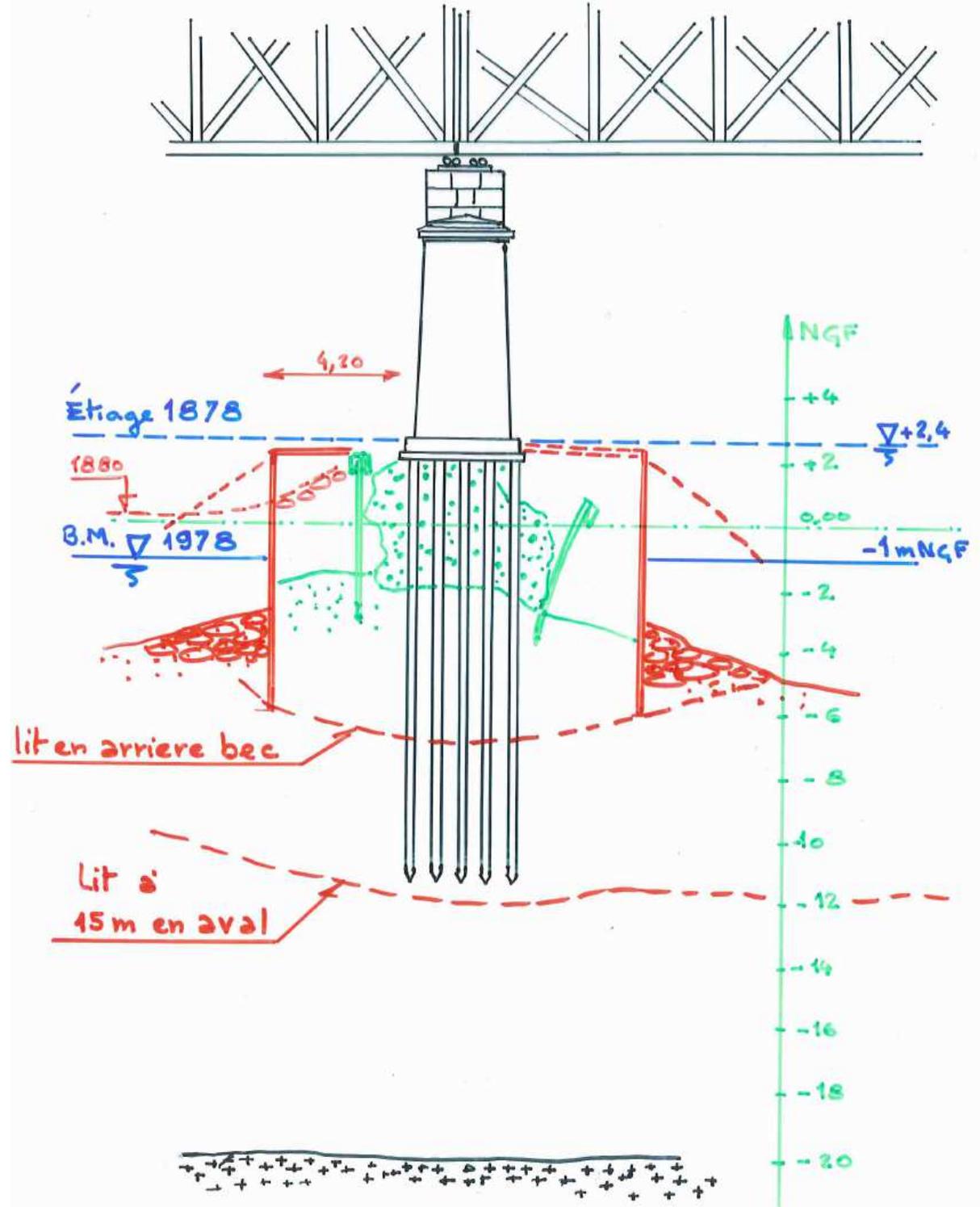
après abaissement du lit

L'encagement en

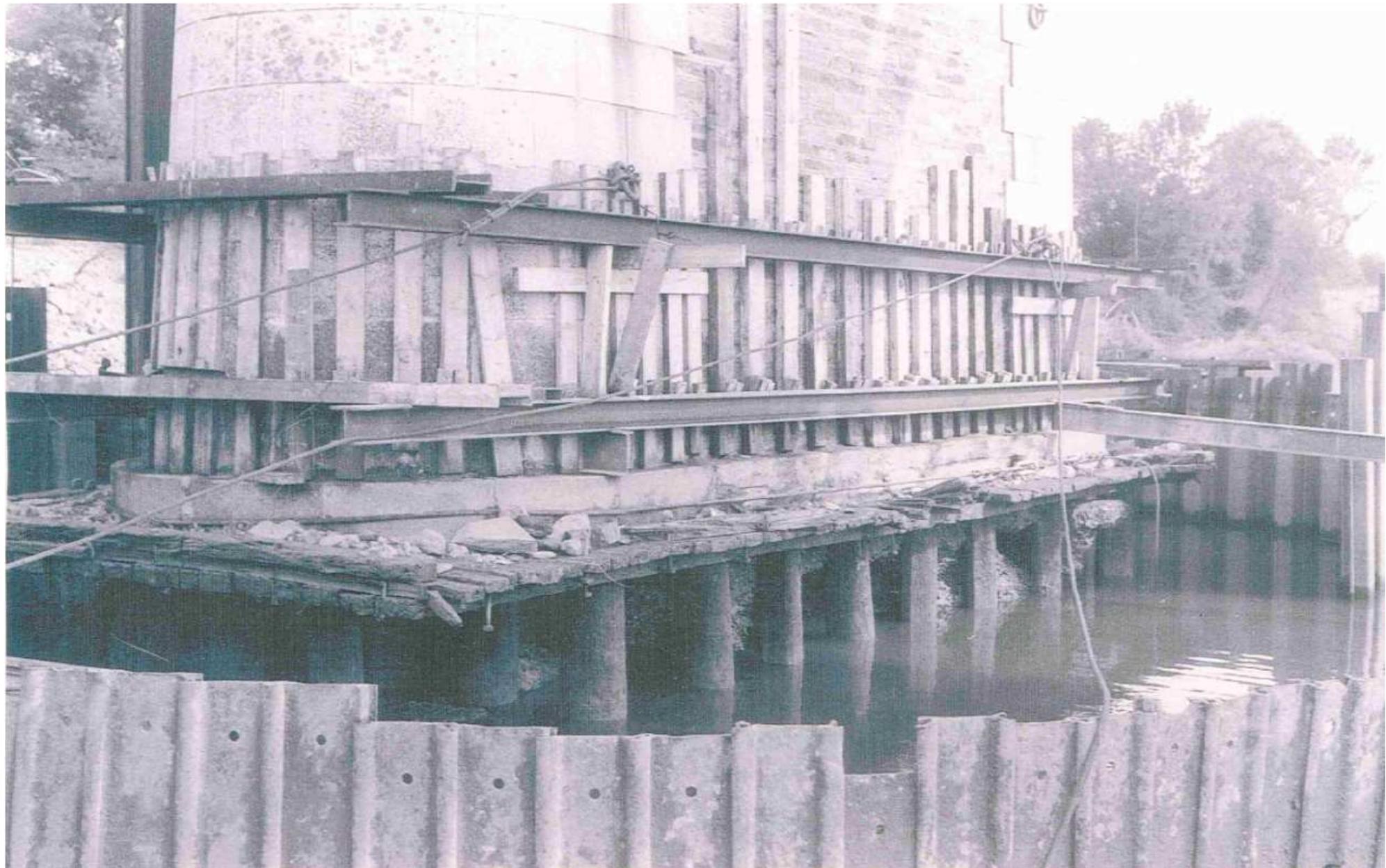
palplanches plates

date des premiers travaux de

restauration en 1965



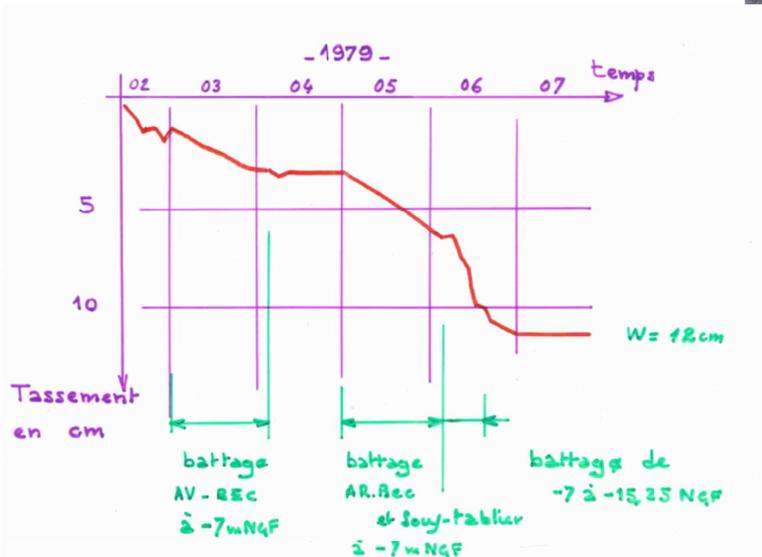
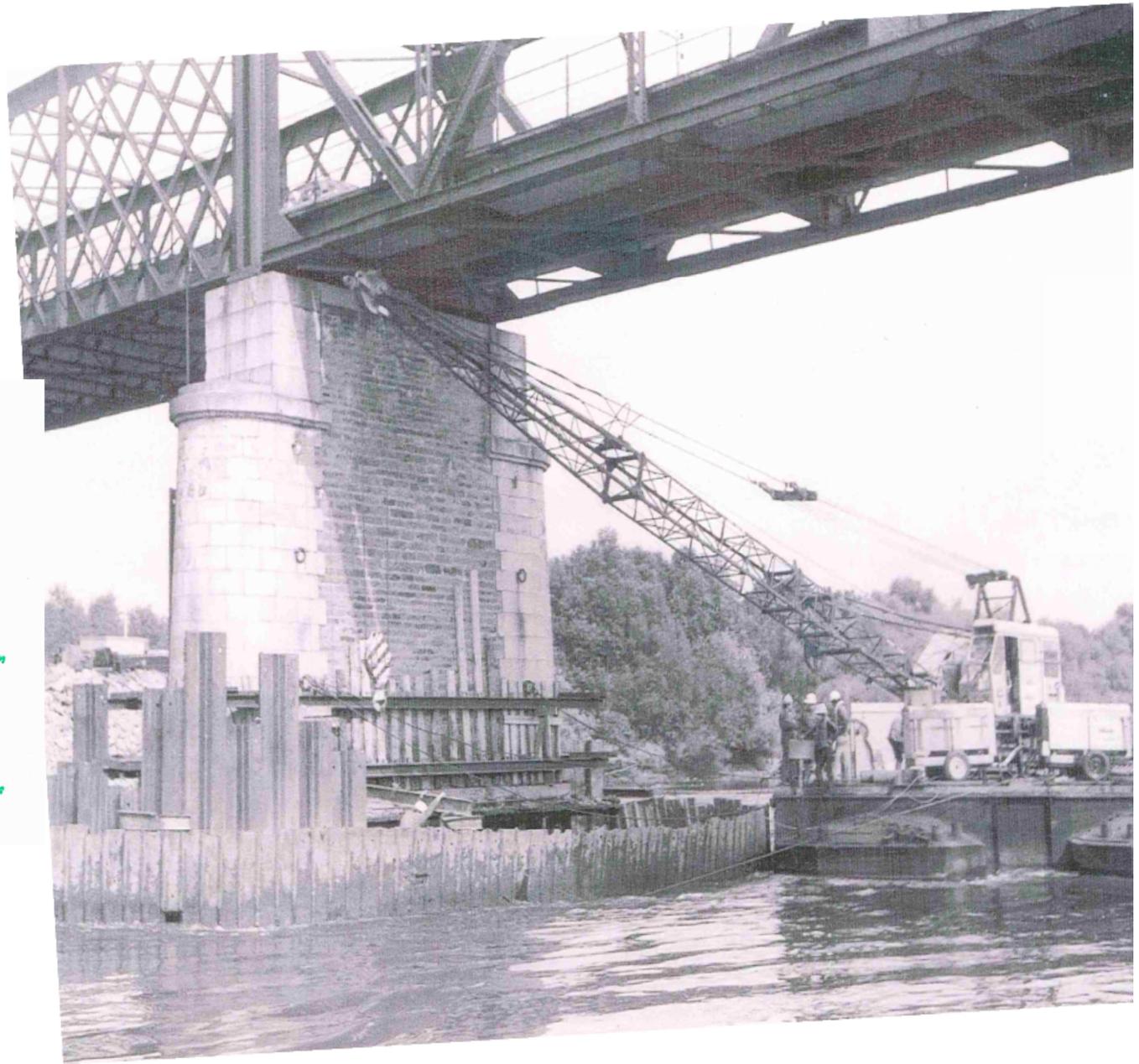
Début des travaux de confortement par ceinturage de l'appui
et dégagement des matériaux de bois et béton de chaux effondrés



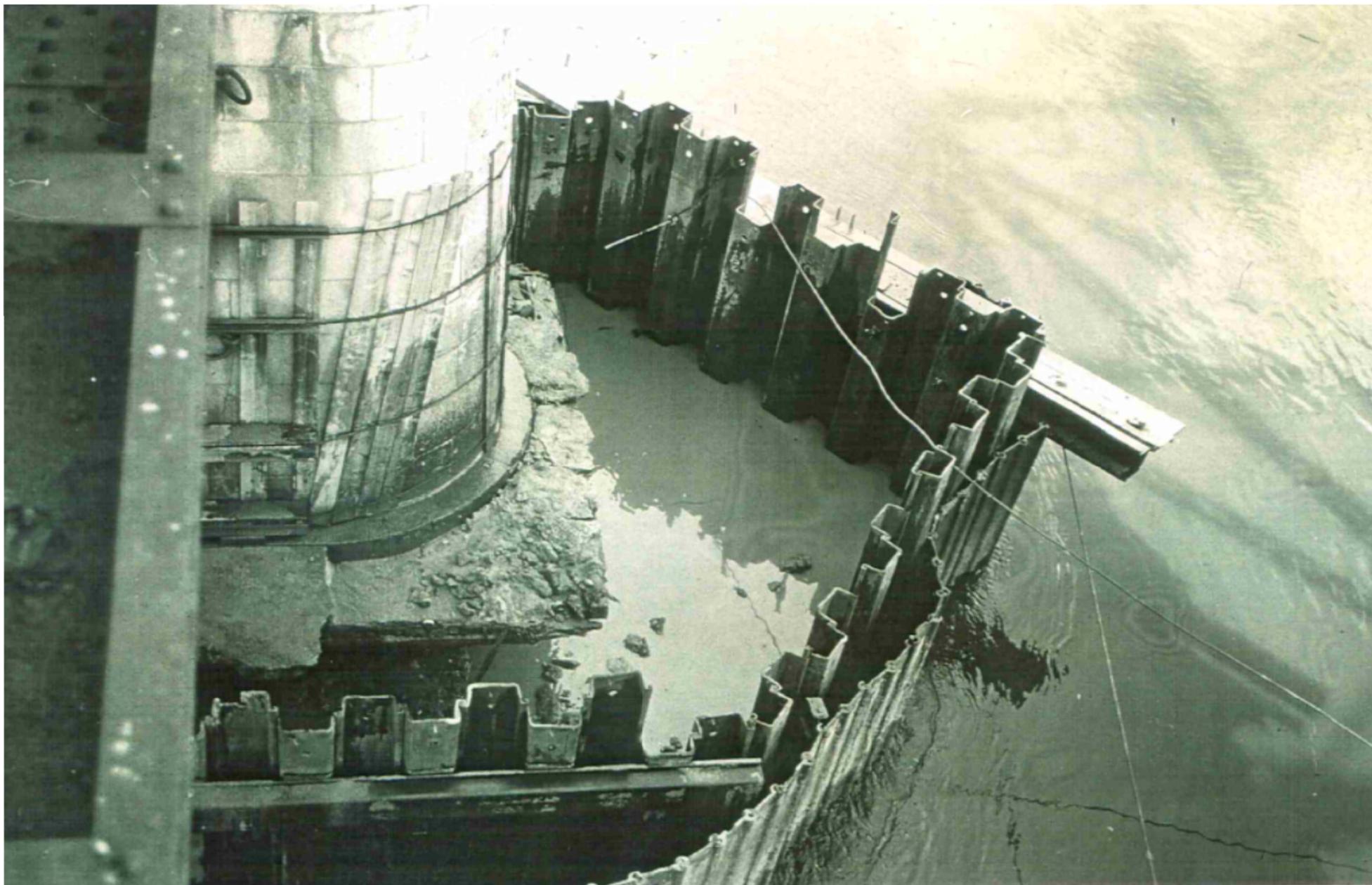
Angers (49), le 12 octobre 2015

Battage des palplanches à module de 17,75 m de longueur

et.... tassement de l'appui



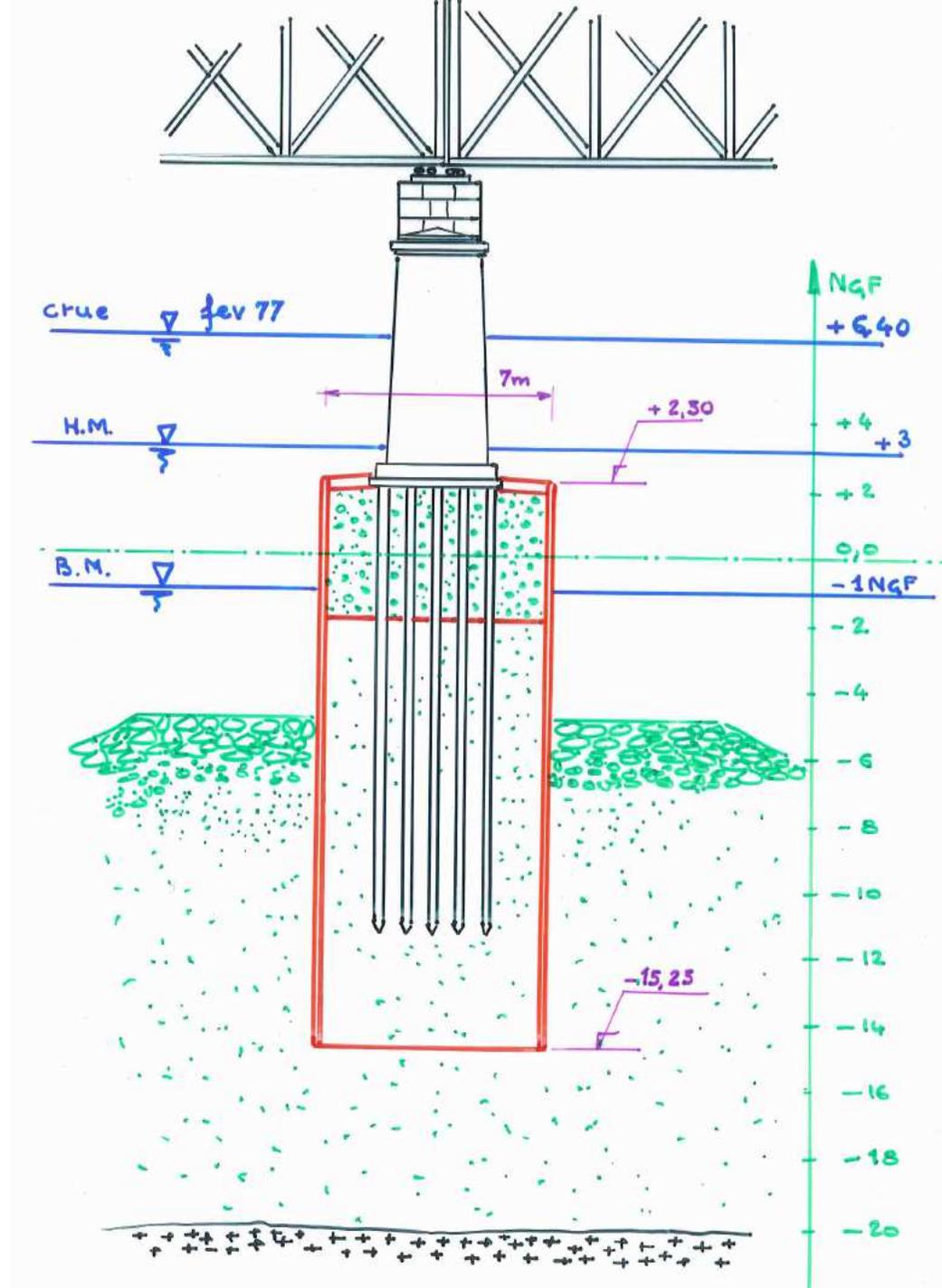
Battage des palplanches à module, vue de l'arrière bec



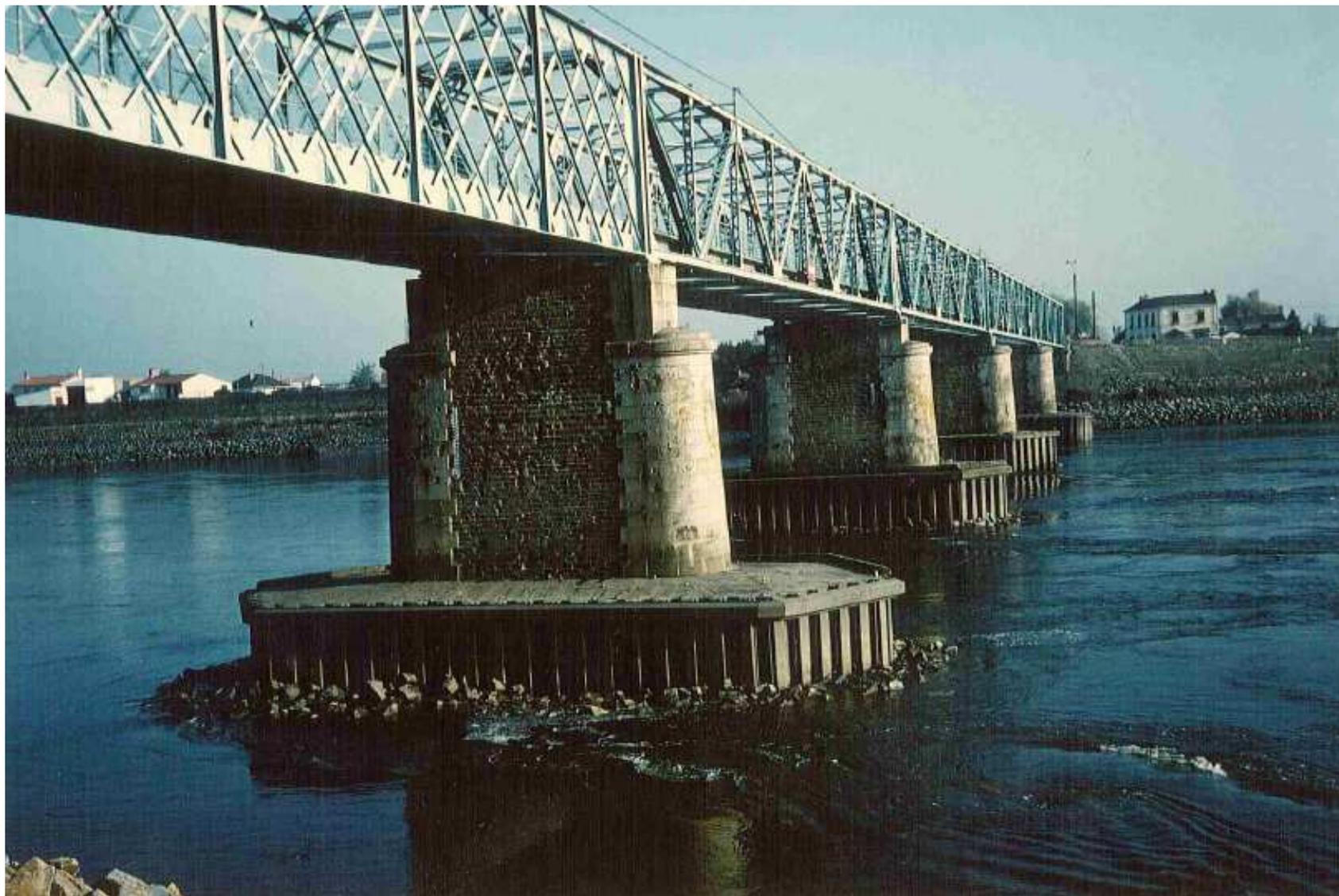
Fondation initialement sur pieux de grande longueur

Transformée en caisson massif porteur après injection des sols encagés

un encastrement minimum est à conserver dans le sol au pourtour pour garantir la portance et la tenue structurelle du caisson



Vue générale de l'ouvrage conforté



Traitement par radier déversoir long en protection des sols

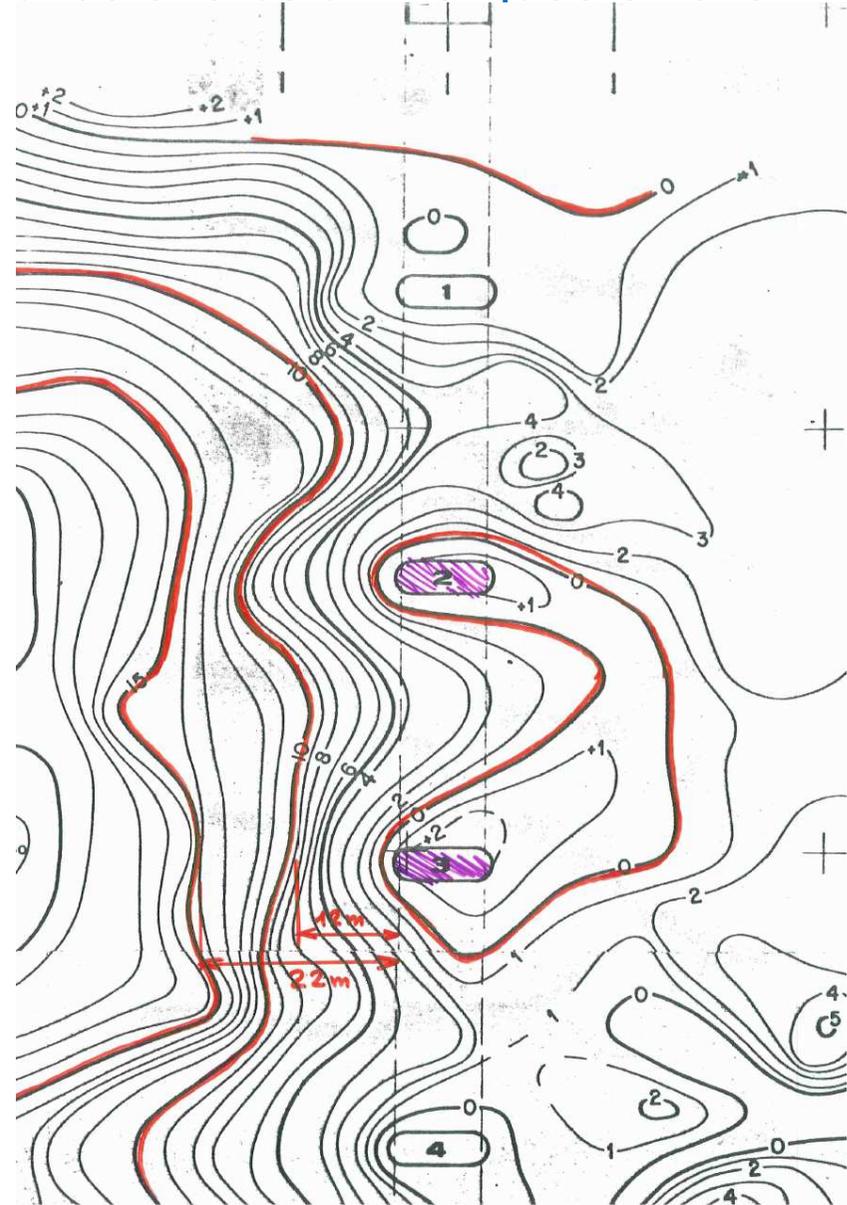
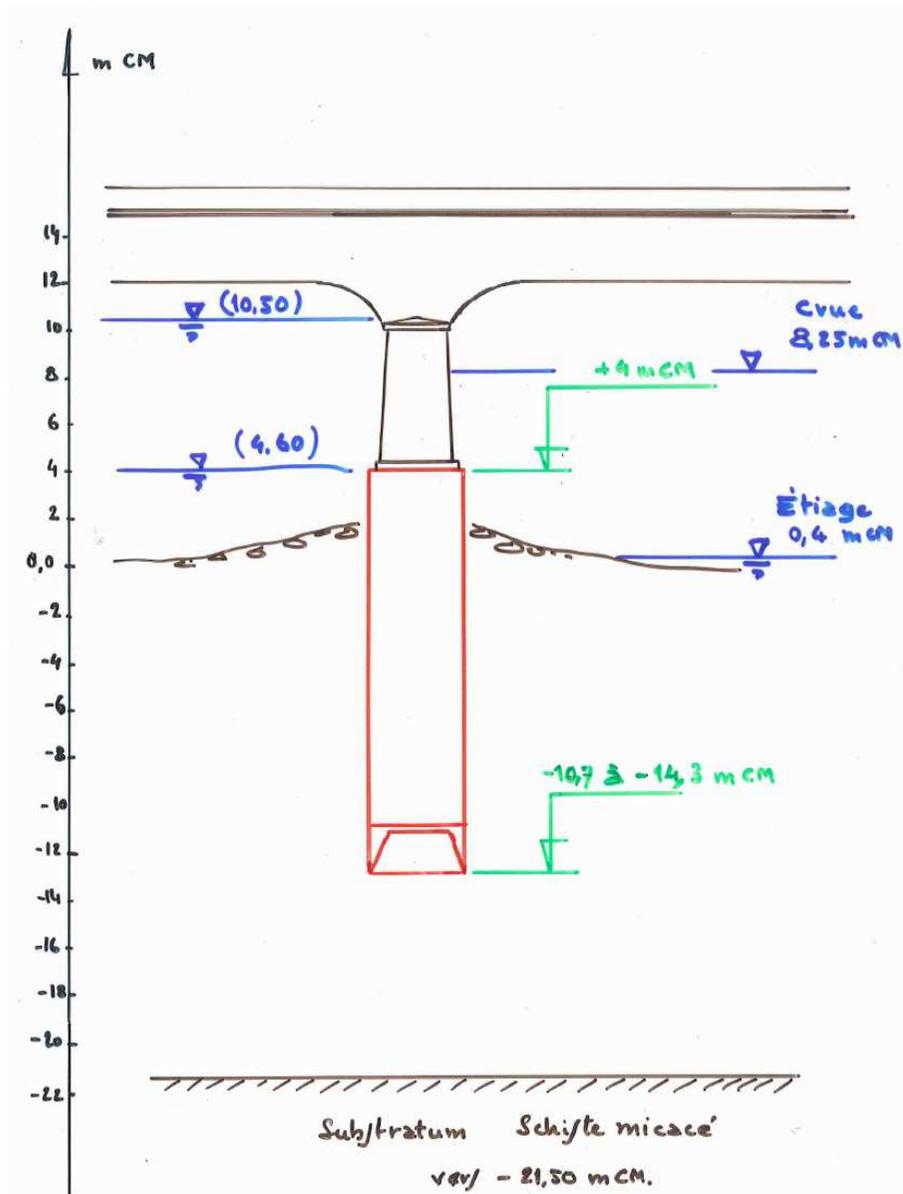
Le cas des ponts de la Vendée sur la Loire, à l'amont de Nantes



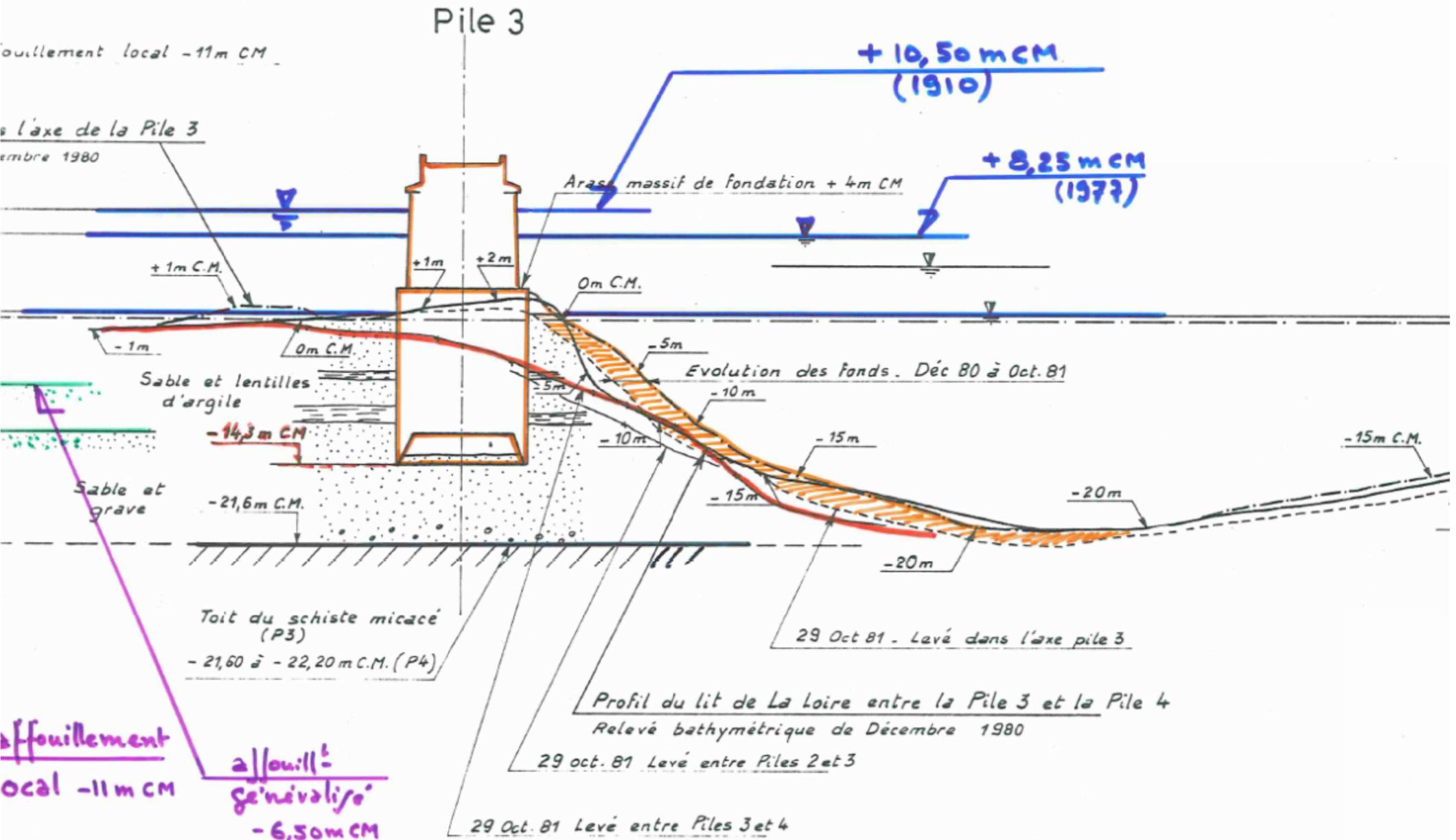
Angers (49), le 12 octobre 2015

Les fondations de 1863 sont des caissons havés sous air comprimé.

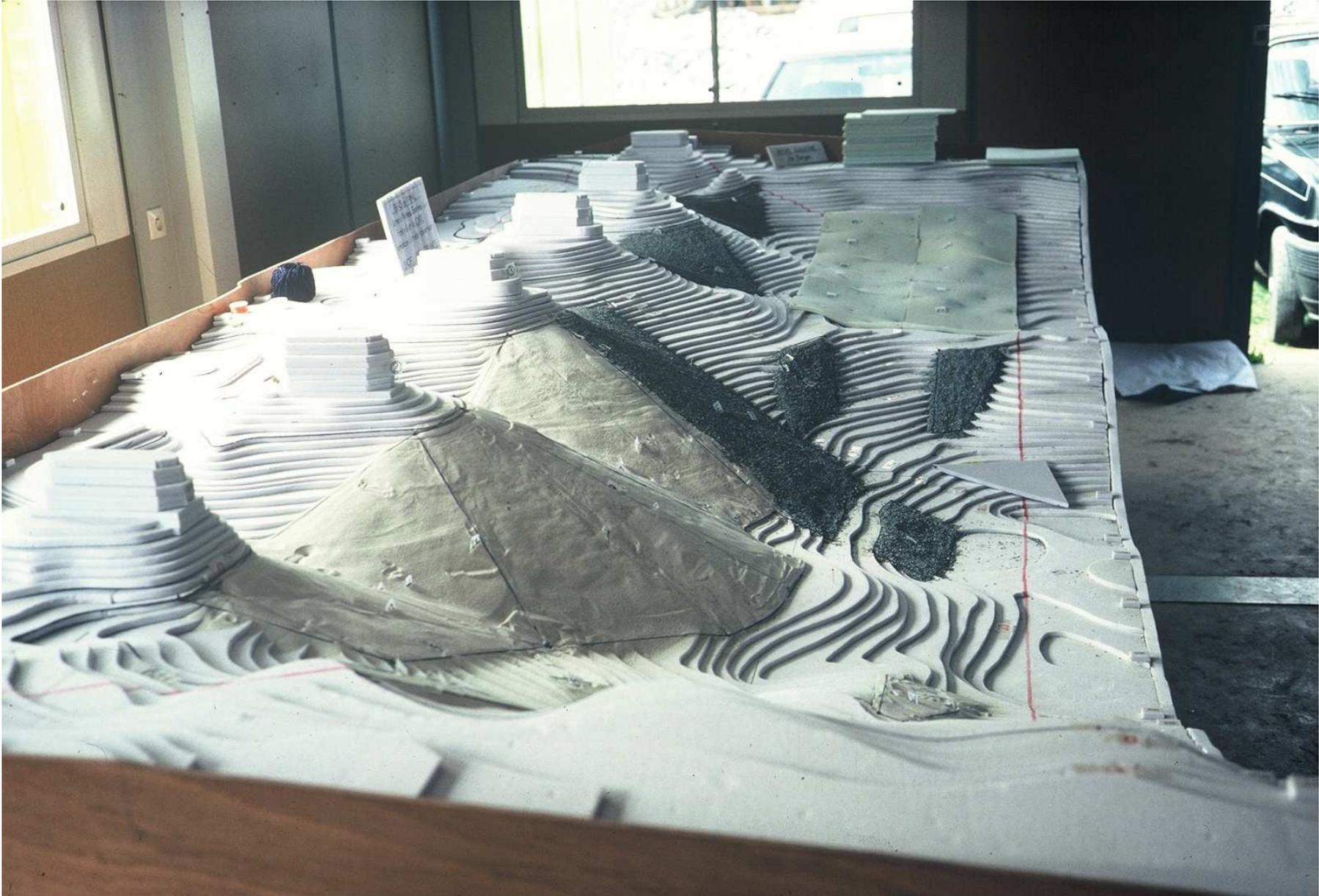
Depuis les années 1960 abaissement des fonds et érosion marquée en aval



Évolution des fonds entre décembre 1980 et octobre 1981

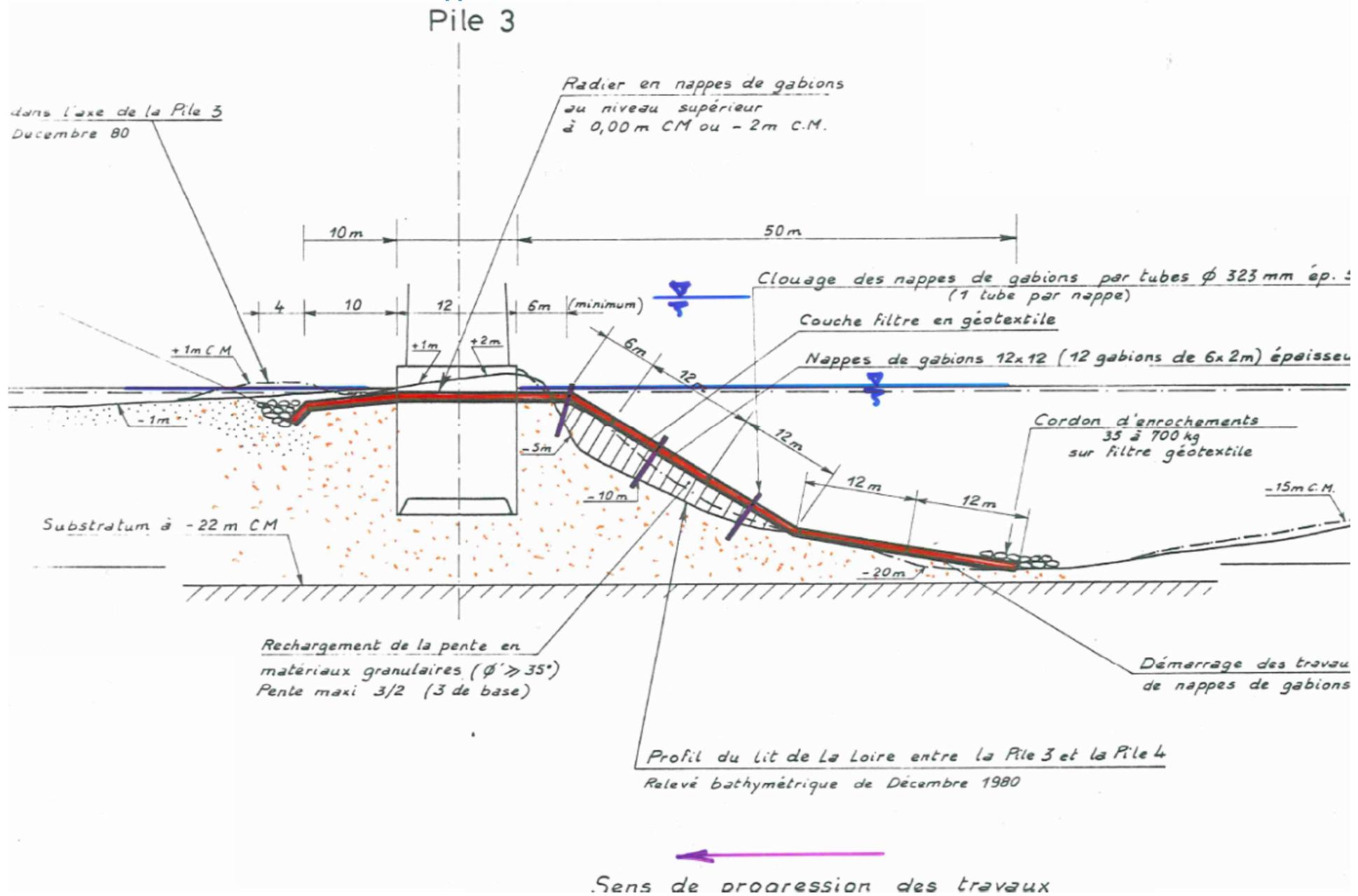


en 1982, exécution des travaux de protection des fonds par une couverture
continue de tapis de gabions plats de 0,50 m d'épaisseur

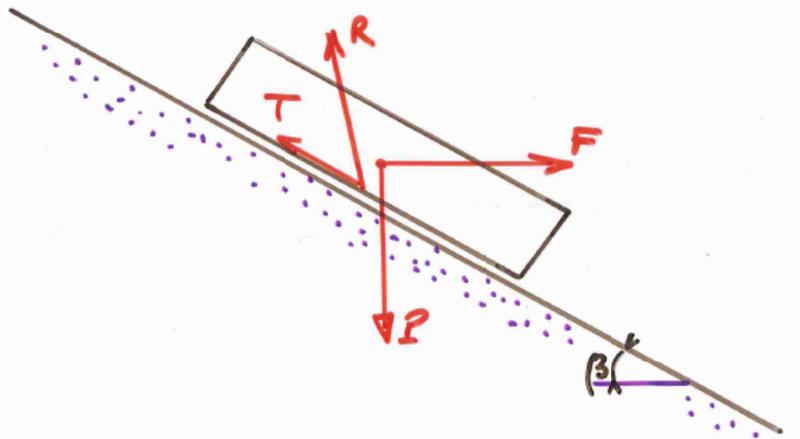
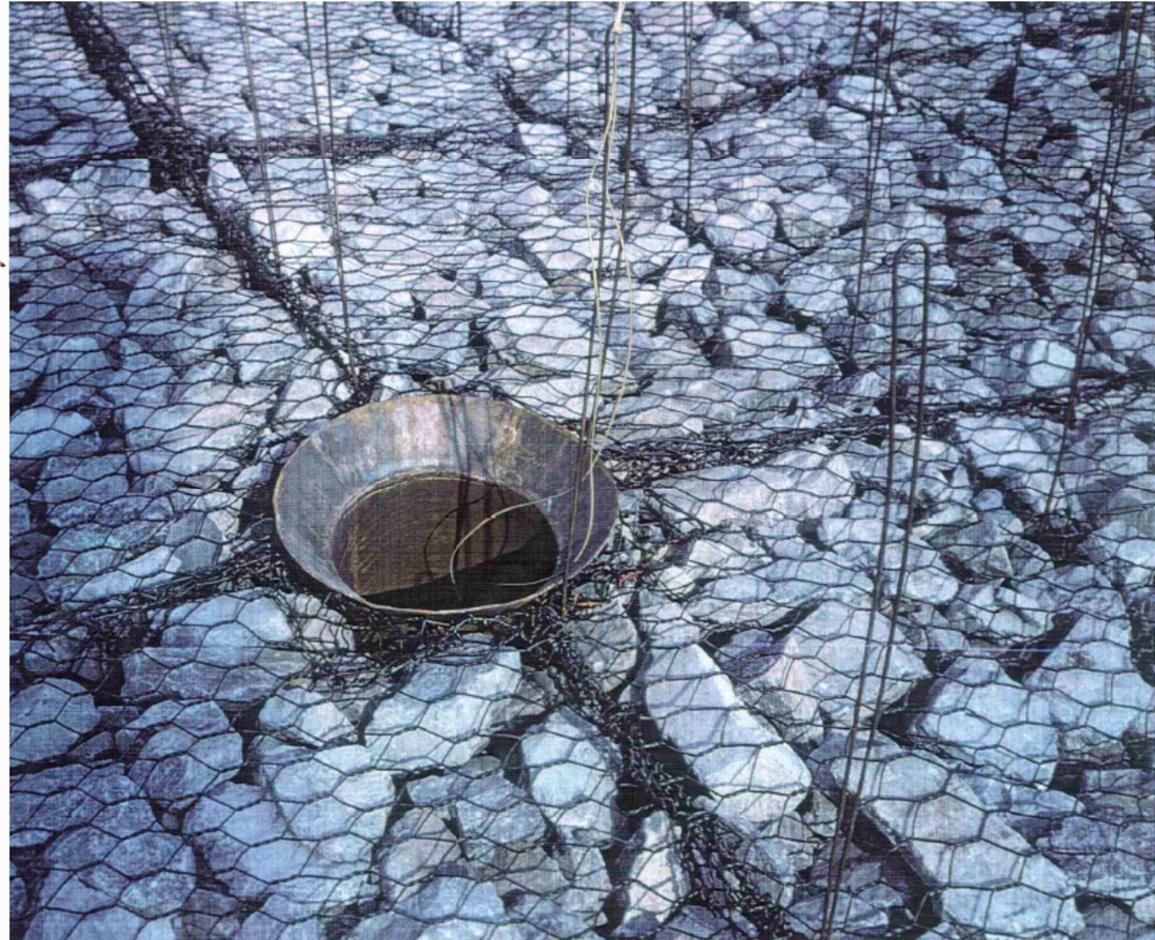
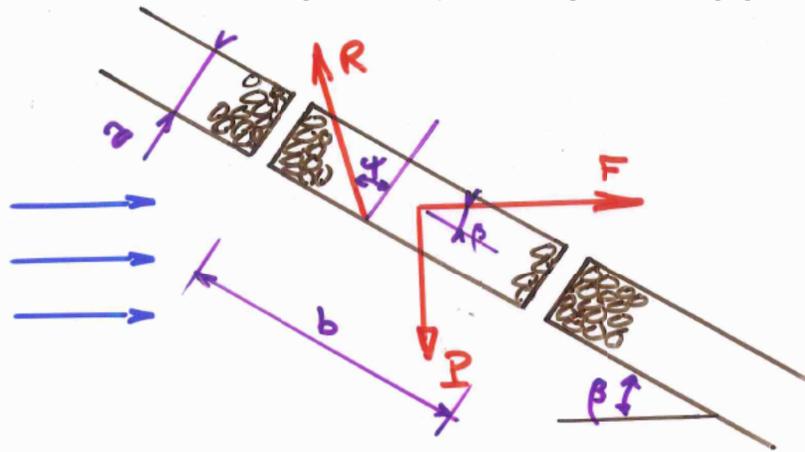


Couverture de 14 400 m² du lit par un assemblage

de 120 gabions de 120 m² de surface unitaire

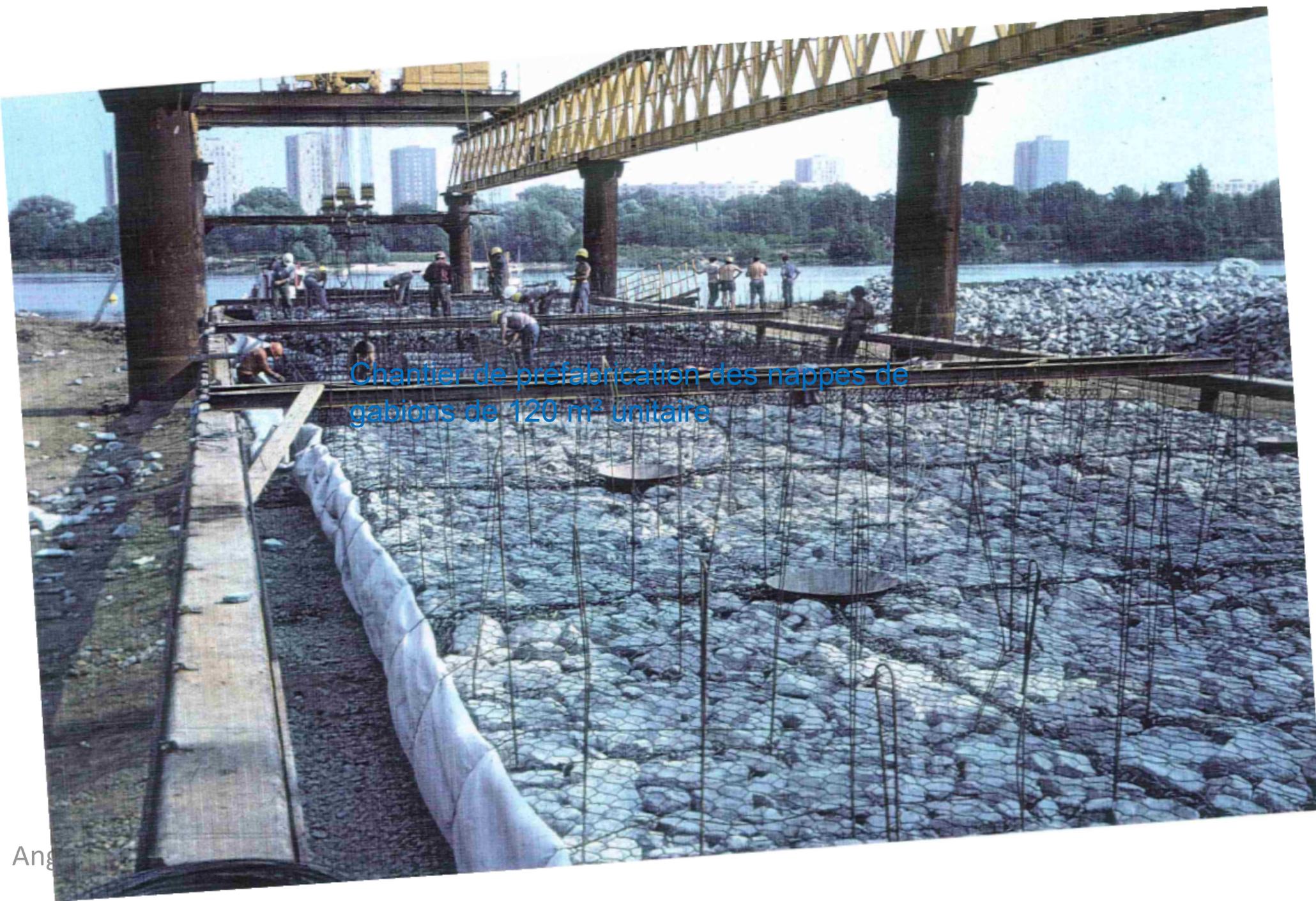


mise en œuvre d'un comblement pour adoucir la pente du talus de pose à une valeur inférieure à 3/2
sur la pente, chaque nappe de gabions est clouée par 4 pieux battus



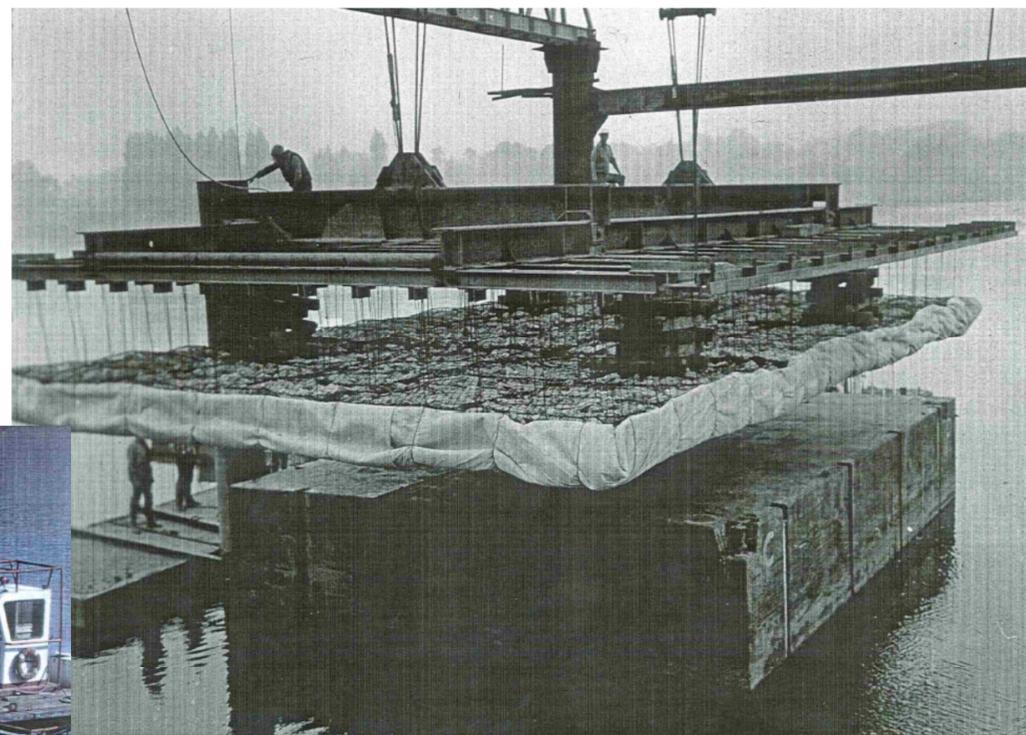
Effort de cisaillement T repris
par clouage

Chantier de préfabrication des nappes de gabions de 120 m² unitaire



Chantier de préfabrication des nappes de gabions de 120 m² unitaire

Transport de chaque nappe de gabions de 110 tonnes



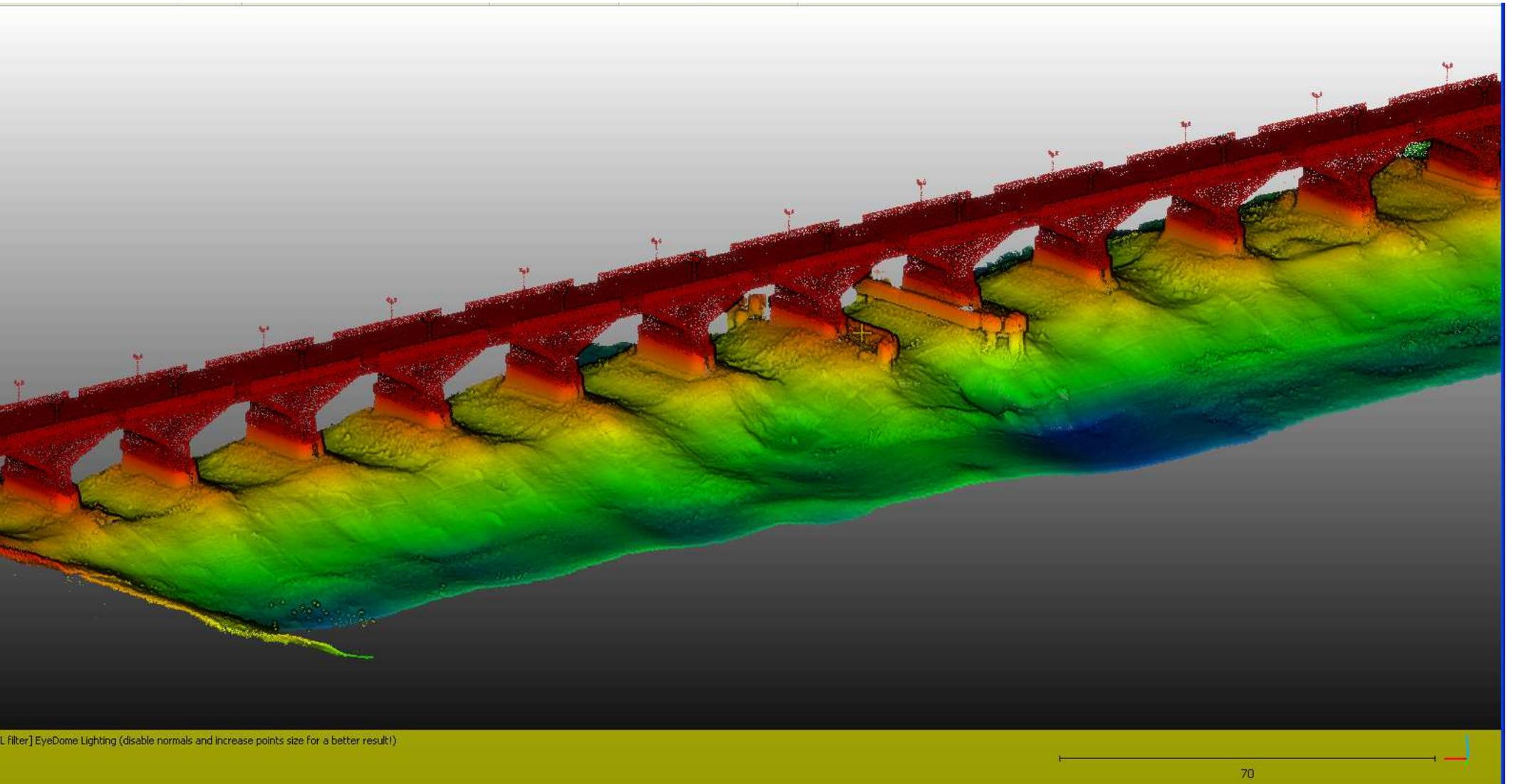
Utilisation d'une maquette au 1/50° pour suivre les travaux en site aquatique, au premier plan les gabions posés



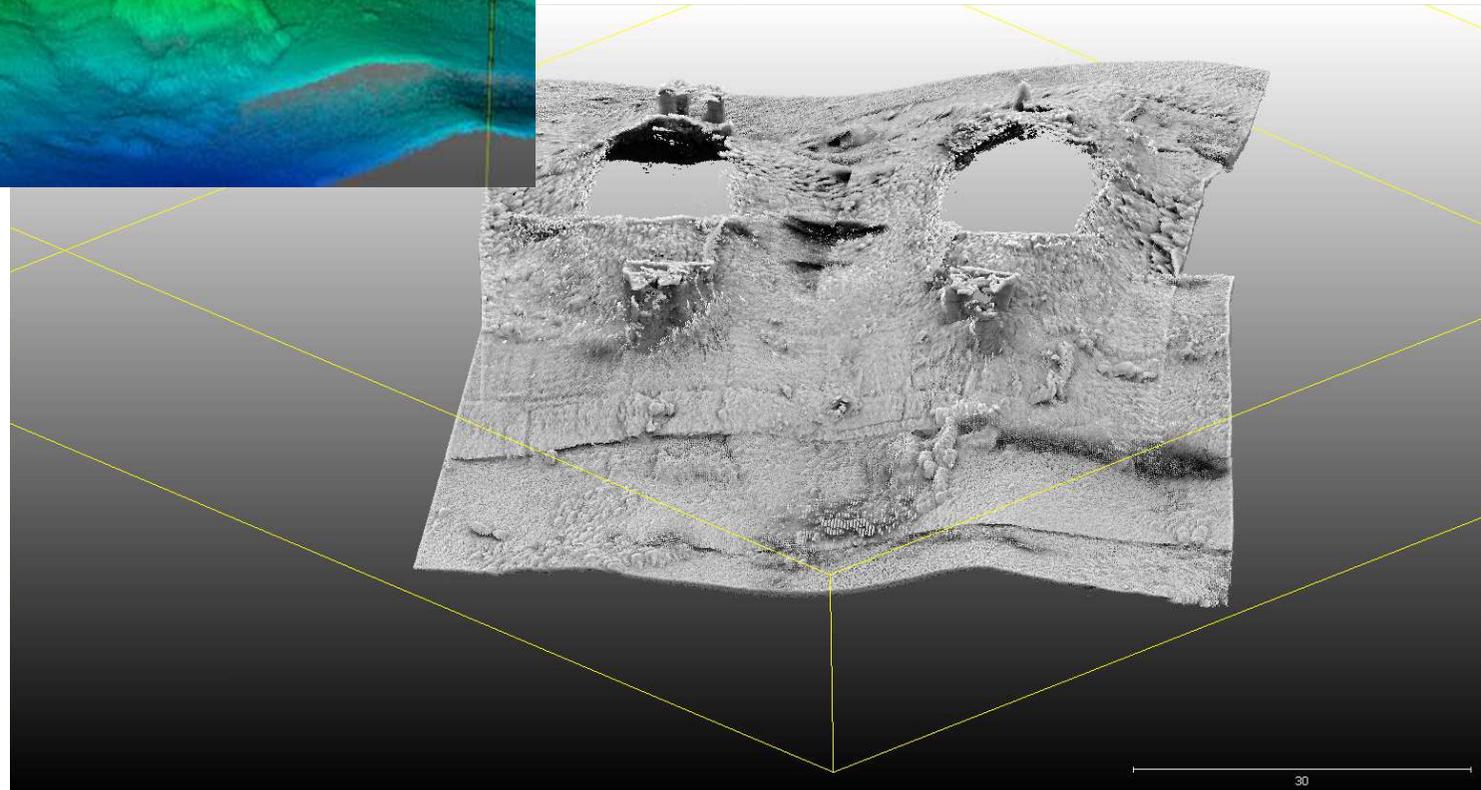
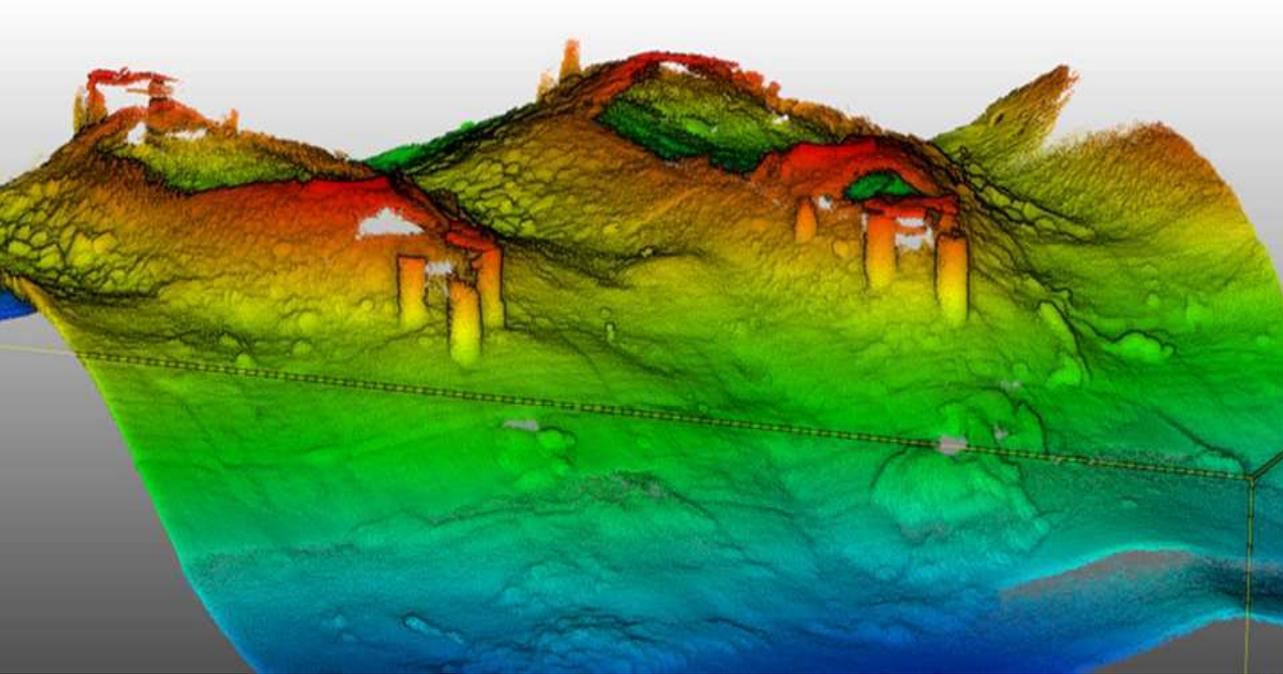
Ponton de pose des nappes de gabions



Élévation de l'aval vue de la rive droite

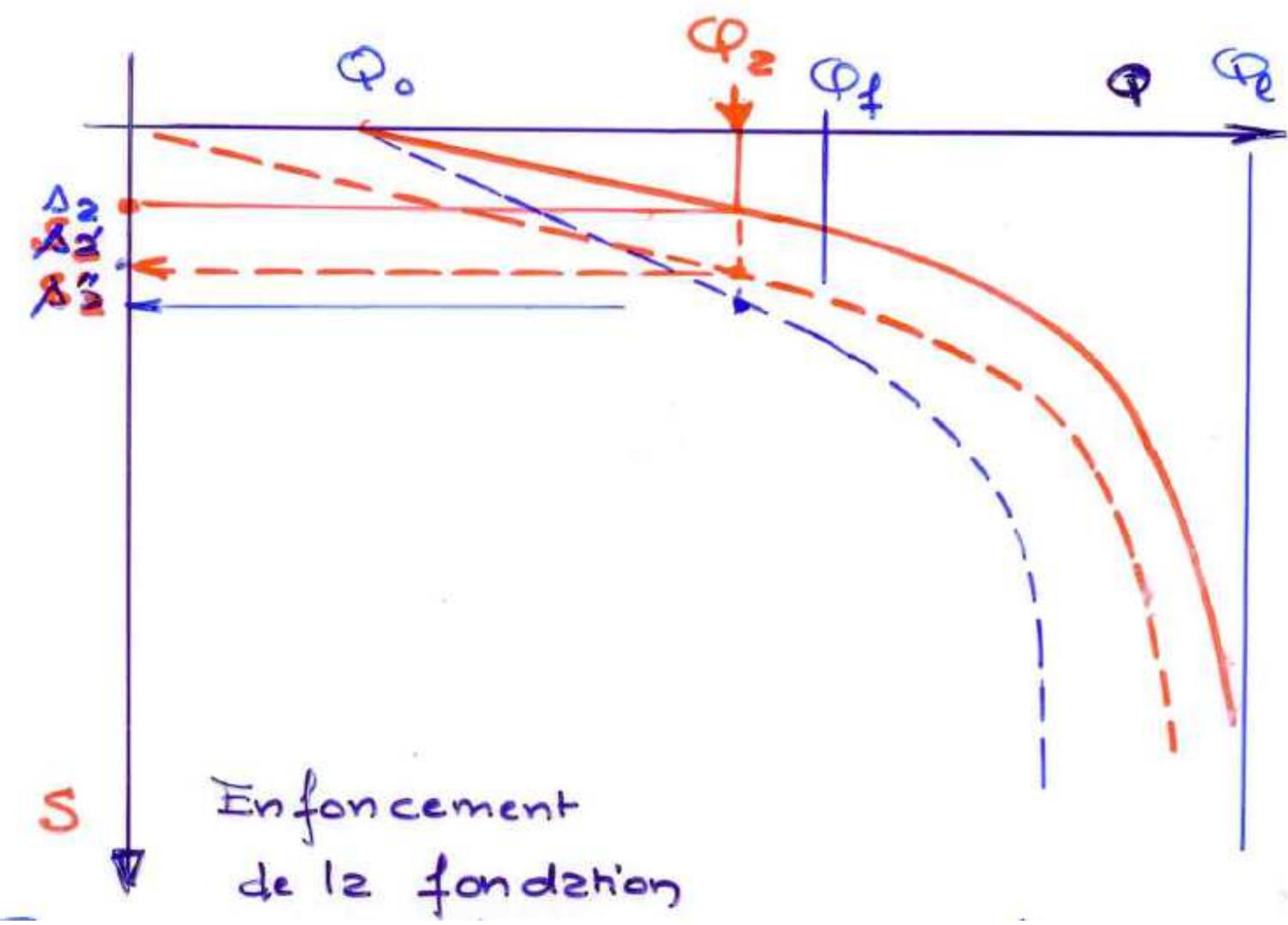


Deux vues du même site amont de la passe 8-9 mettant en évidence une anomalie par rupture de pente dans la protection de gabions

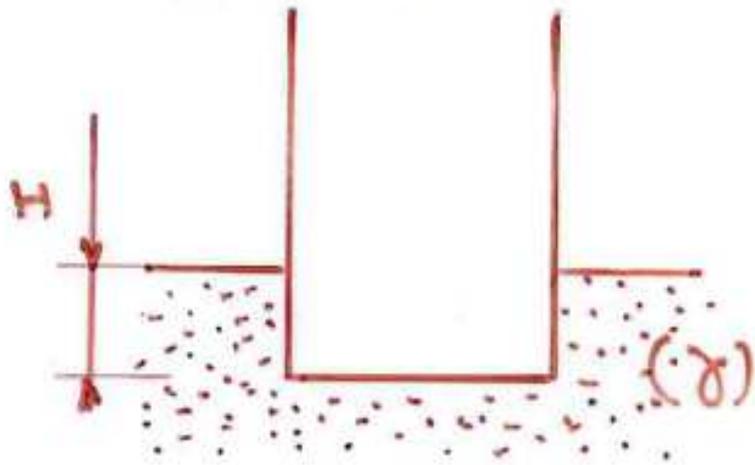


COURBE DE CHARGEMENT D'UNE FONDATION.

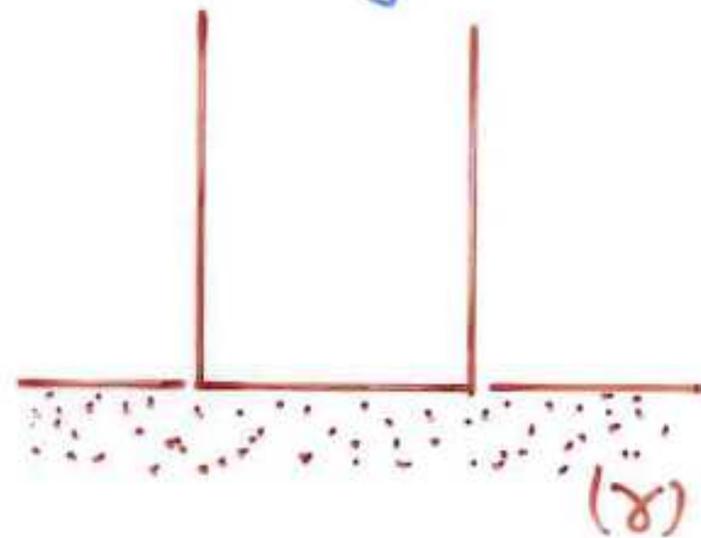
($\varphi_2 = P + \varphi$ de l'ouvrage)



- Réduction de l'encastrement - enfoncement ρ_2'



$$\varphi_0 = \gamma H$$



$$\varphi_0 = 0$$

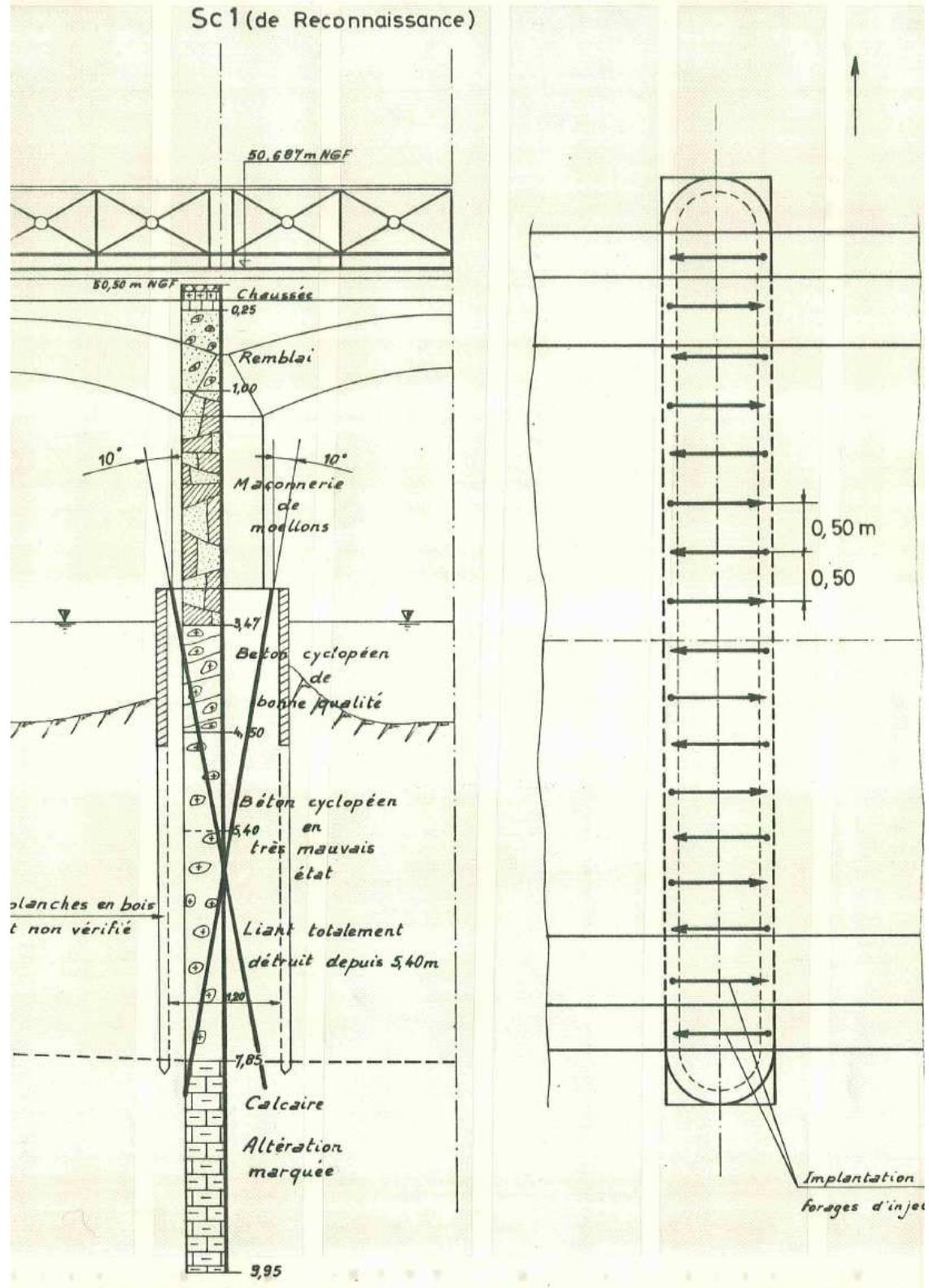
- Réduction des propriétés mécaniques

$\varphi_1 \rightarrow$

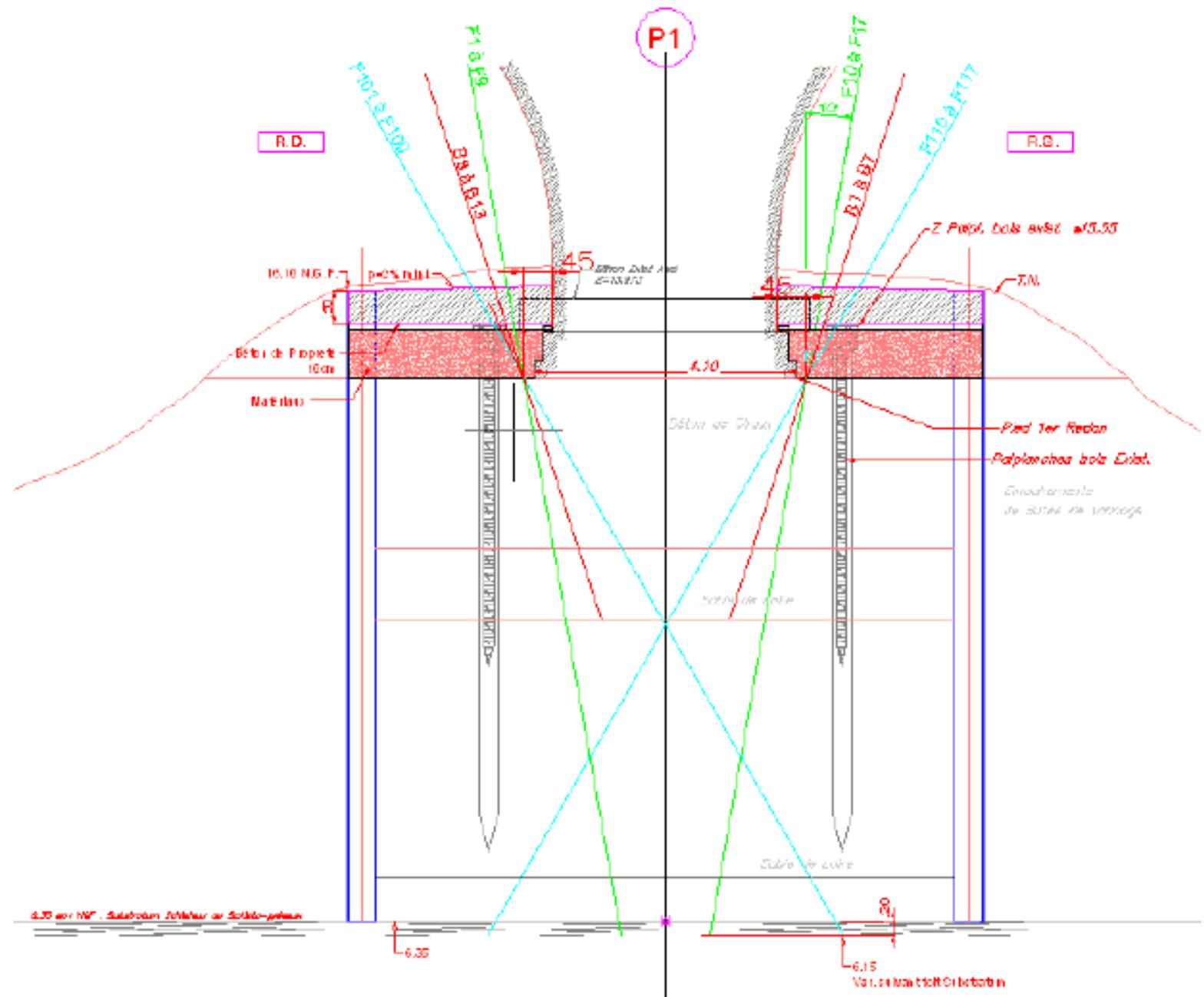
par affaiblissement et
érosion interne

enfoncement ρ_2''

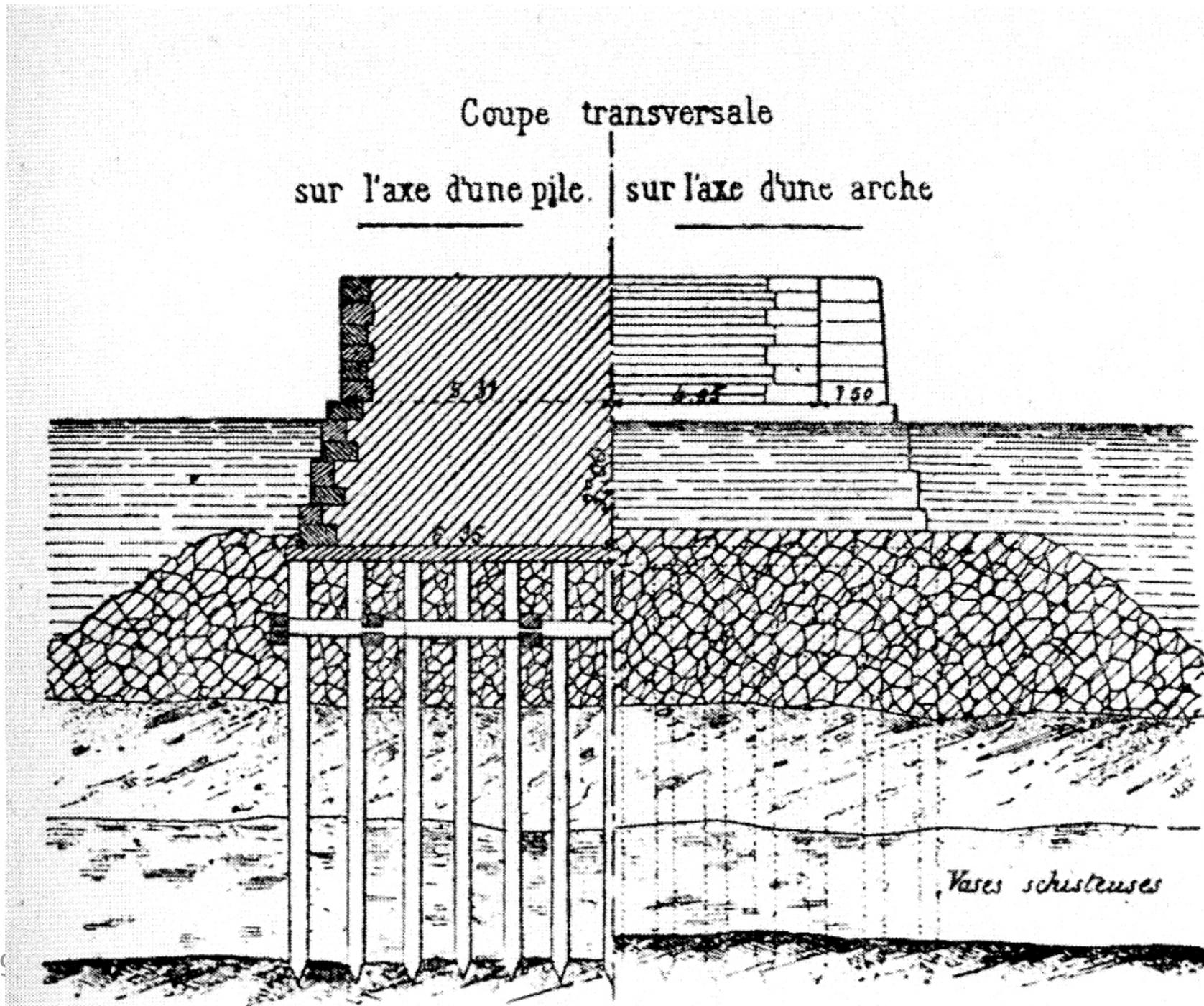
Implantation de forages
d'injection pour renforcement des
caractéristiques mécaniques
du massif de béton de chaux



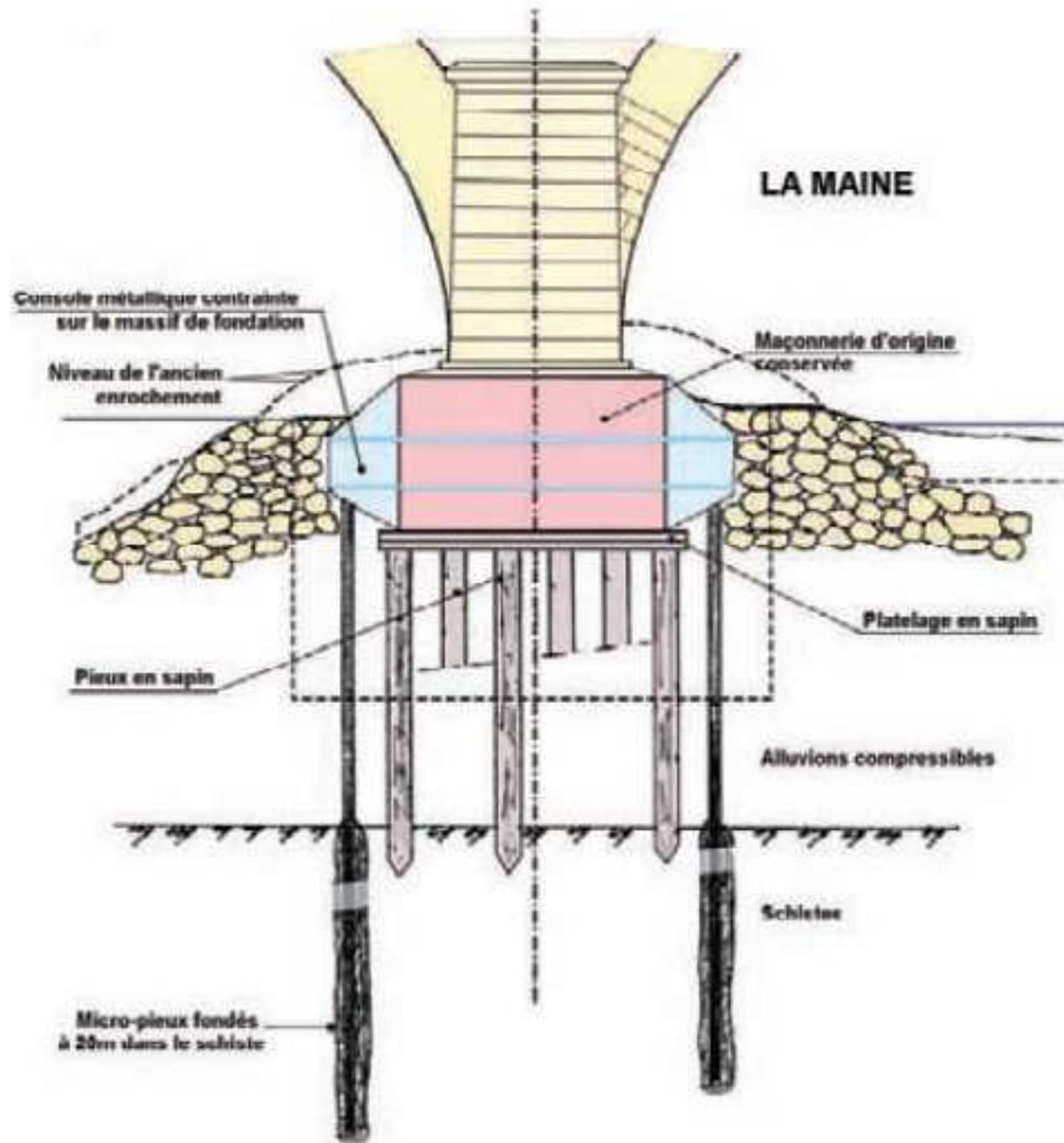
Traitement du massif de fondation et des sols de fondation par injection

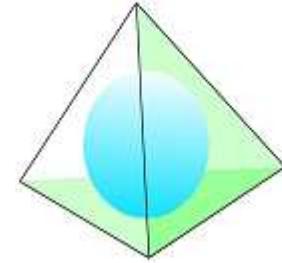


FONDATION D'UNE PILE DE PONT SUR PIEUX TRAVERSANT DES ARGILES



Renforcement de la
fondation
par une série de
micropieux





ADSTD

Merci de votre attention