

DISCUSSION SUR « Les fonds injectés dans la craie parisienne » de L. PAREZ (RFG N° 63)

par Yaël IAGOLNITZER
Bachy, France

Rev. Franç. Géotech. n° 64, pp. 71-77 (juillet 1993)

Nous avons lu avec grand intérêt l'article de L. Parez sur les fonds injectés dans la craie parisienne paru dans le numéro 63 de la *Revue Française de Géotechnique*. Il met en lumière certains points essentiels de la réussite d'un radier injecté dans cet horizon géologique complexe que l'on peut caractériser ainsi : un matériau hétérogène, composé de blocs pris dans une gangue plus ou moins marneuse, et pourtant très perméable ; un matériau enfin où le coulis de bentonite-ciment arrive, grâce à la compétence du personnel de chantier et au respect de dispositions précises, à former une barrière efficace au passage de l'eau en divisant la perméabilité du matériau par plus de 100.

Face à un sol aussi délicat, que l'on traite en aveugle par une technique non moins délicate, on ne peut que louer L. Parez pour ses recommandations rigoureuses qui ciment les principales caractéristiques d'un radier injecté dans la craie : dimensionnement vis-à-vis des débits et du soulèvement du fond de fouille, maillage, interface radier/paroi moulée ou structure, ...

Afin d'illustrer l'article de L. Parez par des exemples concrets, nous présentons ci-après trois chantiers récents dont les coupes-types et schémas de maillage d'injection se trouvent sur les figures 1 à 11 :

— SU1, Centre de recherche de l'Aérospatiale (1989-1990)

ZAC Louis-Blériot, Suresnes ;

— Îlot F1, nouveau siège de TF1 (1989-1990)

ZAC du Point-du-Jour, Boulogne-Billancourt ;

— Axe-Seine, bât. EFG (1990)

Issy-les-Moulineaux.

Sur ces trois chantiers, les mesures de perméabilité de radier ont montré des valeurs très satisfaisantes, inférieures à 2.10^{-6} m/s.

L'observation des schémas de maillage d'injection (fig. 1, 4, 7 et 9) amène les remarques suivantes : la maille d'injection est comprise entre 2,65 m et 2,80 m. Une seule ligne périphérique assure un collage efficace à la paroi moulée ; elle est distante de 1 m à 1,50 m de cette dernière et l'espacement entre forages est de 2 m. La distance à la deuxième ligne varie de 2 m à 2,75 m.

La présence d'un maillage renforcé (1,72 m par 1,84 m et même moins) sur le chantier de TF1 s'explique par la présence de tirants provenant des travaux de la fouille adjacente, comme le montre la figure 8. Leur sectionnement en force à la benne (après leur désactivation) pendant la phase de réalisation de la paroi moulée avait en effet provoqué la fissuration de leurs bulbes de scellement et la désorganisation du terrain ambiant, formant ainsi toute une zone de chemins privilégiés pour le passage de l'eau.

Outre les trois chantiers présentés, de nombreuses autres réalisations de radiers injectés dans la craie ont suivi des dispositions analogues avec des résultats tout aussi satisfaisants, comme le montre le tableau I.

L'objet des présents commentaires n'est évidemment pas d'opposer les écarts de la pratique de l'entreprise Bachy aux valeurs proposées par L. Parez. En effet, ces dernières, en tant que bornes inférieures des valeurs pratiquées par la profession, peuvent servir de règle générale permettant de garantir le succès d'un radier injecté dans la craie. Les valeurs présentées ici ont montré leur efficacité dans le cadre d'une pratique liée à une expérience et à un savoir-faire propre.

Le développement des points suivants, se rapportant aux caractéristiques de l'injection, à la méthodologie d'exécution et au dimensionnement, résume cette pratique et apporte parfois un complément à l'article de L. Parez :

1. Maillage d'injection

Dans la craie, le maillage d'injection est compris entre 2,65 m et 3 m (tableau I).

2. Injection périphérique

En périphérie de la fouille, la maille est toujours serrée, comme le préconise L. Parez, afin d'assurer un bon collage entre le radier et la paroi. C'est une des mesures essentielles à la réussite d'un radier d'une manière générale. La réalisation de ce collage constitue une opération préalable à l'injection, afin de bloquer cette zone de déperdition préférentielle de coulis.

Tableau 1. — Différents radiers injectés dans la craie parisienne.

Nom du chantier	Localisation	GÉOMÉTRIE		INJECTION	DATE	RÉSULTAT
		Surface (m ²)	Ep. radier (m)			
Aérospatiale SU1 SU2	Suresnes	3 800	3,0	2,80	1989	< 2.10 ⁻⁶
		5 120	3,0	2,80	1992	< 2.10 ⁻⁶
TF1	Boulogne	7 620	3,0	2,65	1989-1990	< 2.10 ⁻⁶
D1	Boulogne	1 440	3,0	2,65	1990	< 2.10 ⁻⁶
Axe SEINE Bât ABC Bât D Bât EFG Bât H	Issy-les-Moulineaux	4 400	2,5	3,00	1988	< 3.10 ⁻⁶
		1 670	3,0	2,75	1989	< 2.10 ⁻⁶
		3 870	3,0	2,75	1989-1990	< 2.10 ⁻⁶
		1 715	2,0	2,85	1990	< 2.10 ⁻⁶
Rossini	Paris	3 040	3,0	2,80	1991-1992	< 2.10 ⁻⁶

Une ligne périphérique s'avère suffisante, distante de 1 à 1,5 m de la paroi, les forages y étant espacés de 2 m environ, et l'espacement avec la deuxième ligne étant inférieur à la maille courante.

3. Epaisseur du radier

L'épaisseur du radier est souvent une valeur arbitraire tirée de l'expérience. On remarque d'après le tableau 1 que les épaisseurs de radiers dans la craie, utilisées par l'entreprise sont assez homogènes, 3 m, exceptionnellement 2,5 m. Il est possible, plus généralement, de fixer des limites à l'épaisseur d'un radier injecté : trop épais, c'est-à-dire au-delà de 5 à 6 m, le prix de revient devient trop élevé. A l'inverse, une épaisseur minimale de 1,5 à 2 m est nécessaire afin d'assurer la présence d'une lamelle de terrain injecté uniforme et continue.

4. Radiers de profondeur variable

L'exemple de la zone d'injection renforcée sur le chantier de TF1 (figure 7) est un cas rare qui a cependant le mérite de montrer la souplesse d'adaptation de la technique de l'injection aux obstacles souterrains. De plus, la forme « en escalier » que l'on peut observer sur l'exemple se retrouve assez fréquemment, notamment lors de variations sensibles du niveau de fond de fouille. Dans quelque horizon que se trouve le radier, mais à plus forte raison dans la craie, il convient de s'assurer que les venues d'eau horizontales au droit de la « marche » sont bien bloquées. On retiendra un minimum de trois lignes injectées entre les niveaux extrêmes.

5. Phasage d'injection en plan

La réalisation du radier est toujours conduite suivant un phasage d'injection « primaire-secondaire » d'une maille lâche dans un premier temps (1 forage sur 2).

Cette méthodologie permet, lors de l'injection des forages secondaires, de vérifier l'efficacité du traitement grâce à l'enregistrement des paramètres : on doit en effet observer une montée en pression due à l'agencement assuré par les forages primaires. L'analyse des paramètres d'injection permet le cas échéant de décider la reprise du traitement dans des zones suspectes.

6. Phasage d'injection au droit d'un forage

Dans la craie, le fond injecté est réalisé en deux phases, un toit et un cœur. Le toit, réalisé en premier, permet le blocage des déperditions de coulis, qui se fait vers le haut, le coulis circulant de façon préférentielle vers les zones les moins comprimées.

7. Quantités de coulis

Les quantités de coulis utilisées se trouvent toujours dans les limites inférieures de celles indiquées par L. Parez.

8. Calcul de stabilité du fond de fouille

Pour les radiers exécutés en deux phases, le calage du radier s'effectue en fonction des couches géologiques ainsi que d'un calcul de stabilité du fond de fouille basé sur les hypothèses suivantes :

- la perte de charge s'effectue en partie basse du fond injecté ;
- la fouille est supposée ouverte et vide ;
- le niveau de nappe pris en compte est celui des hautes eaux, à moins d'une prescription différente du maître d'ouvrage ;
- il est usuel d'admettre un coefficient de sécurité de 1,05 sur les masses volumiques des terrains.

AEROSPATIALE SU1

DETAIL 1

IMPLANTATION DES FORAGES

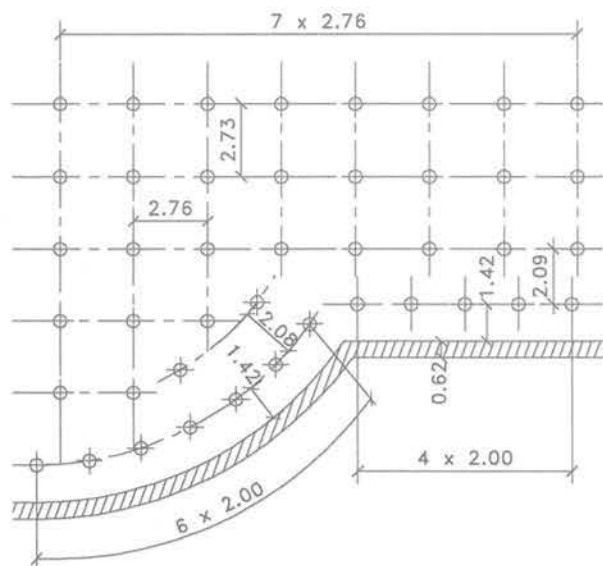


fig. 1

COUPE TYPE

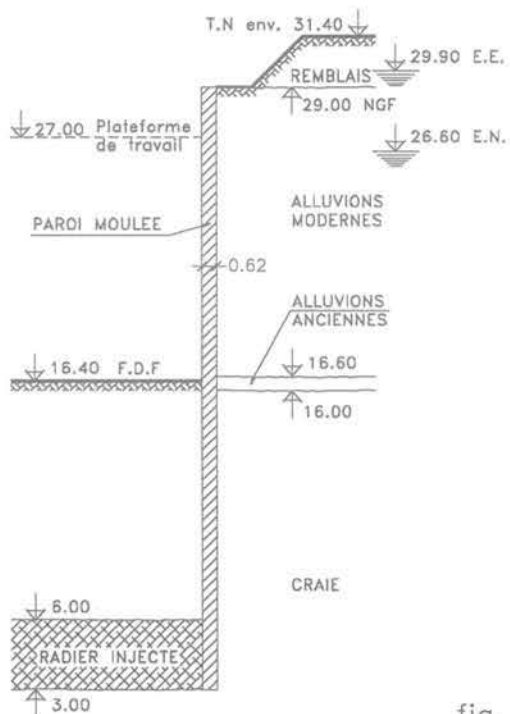
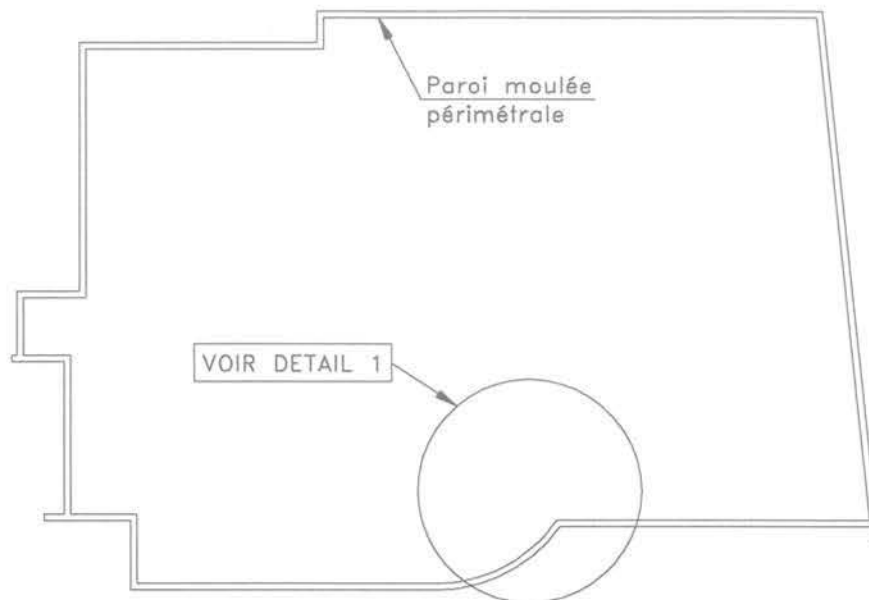


fig. 2

VUE EN PLAN



Périmètre extérieur : 275 m

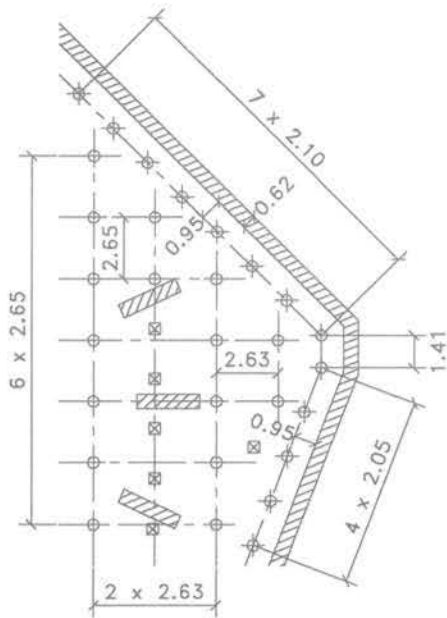
Surface : 3756 m²

Echelle : 0 10 20 30m

fig. 3

TF1

DETAIL 1
IMPLANTATION DES FORAGES



▨ Barrette
⊗ Forage déplacé

fig. 4

COUPE TYPE

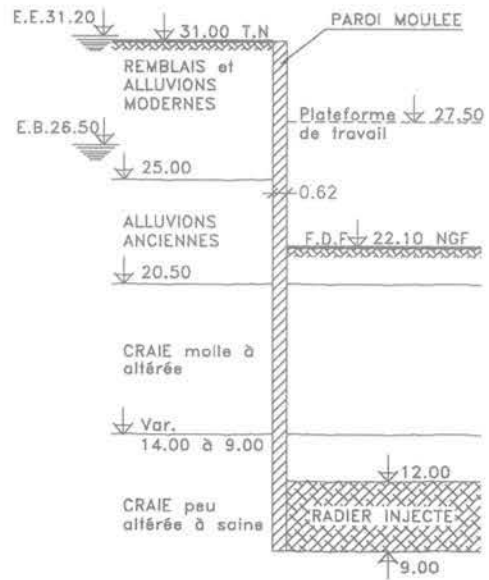
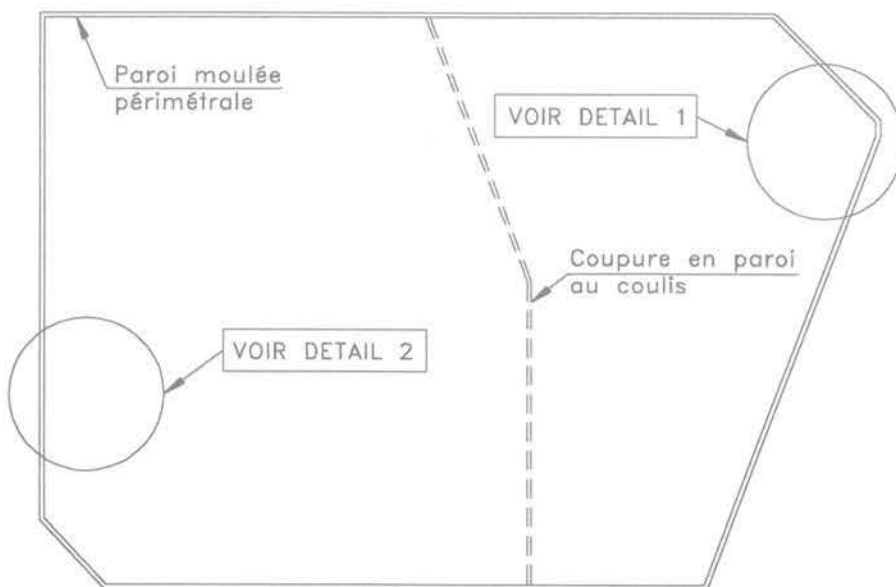


fig. 5

VUE EN PLAN



Périmètre extérieur : 347 m
Surface : 7588 m²

Echelle : 0 10 20 30m

fig. 6

TF1

DETAIL 2

IMPLANTATION DES FORAGES (Zone Renforcée)

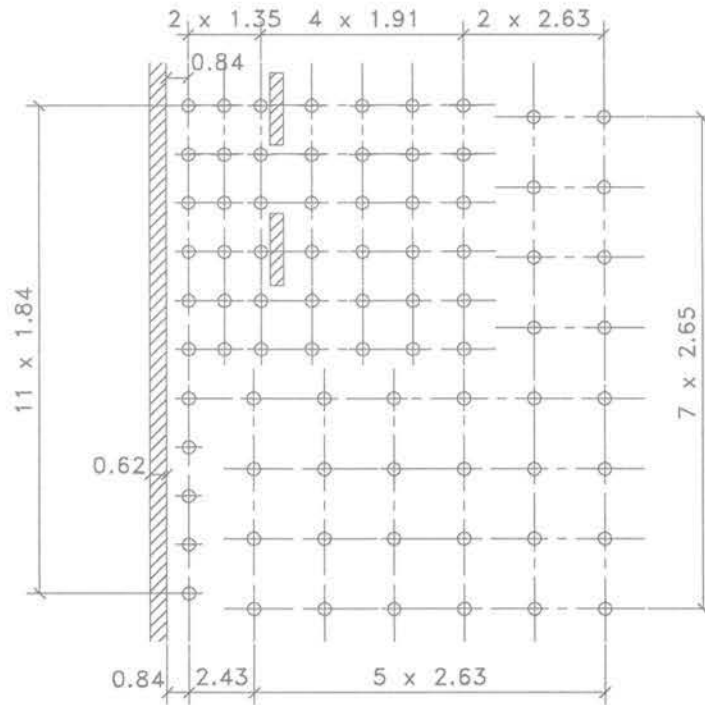


fig. 7

COUPE TYPE (Zone Renforcée)

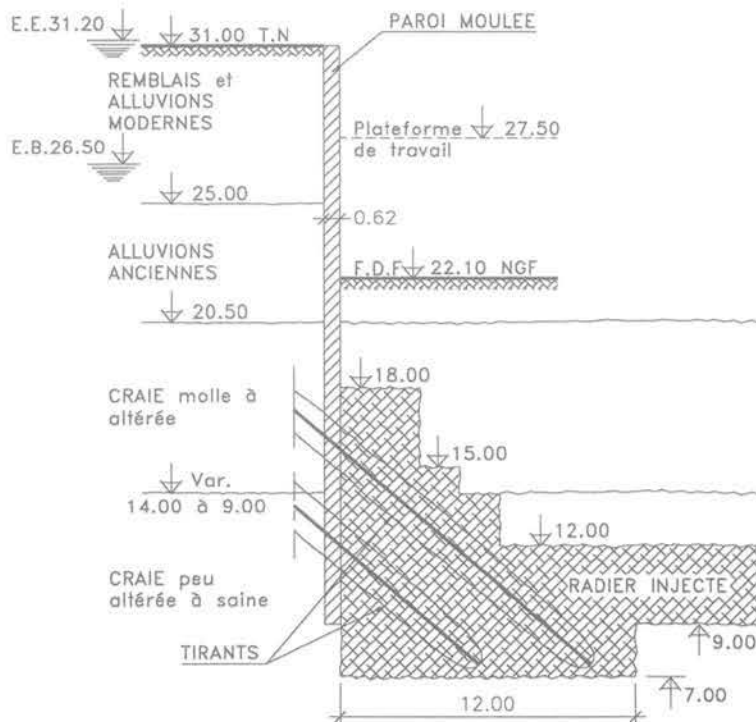


fig. 8

AXE SEINE BAT. E.F.G

DETAIL 1 IMPLANTATION DES FORAGES

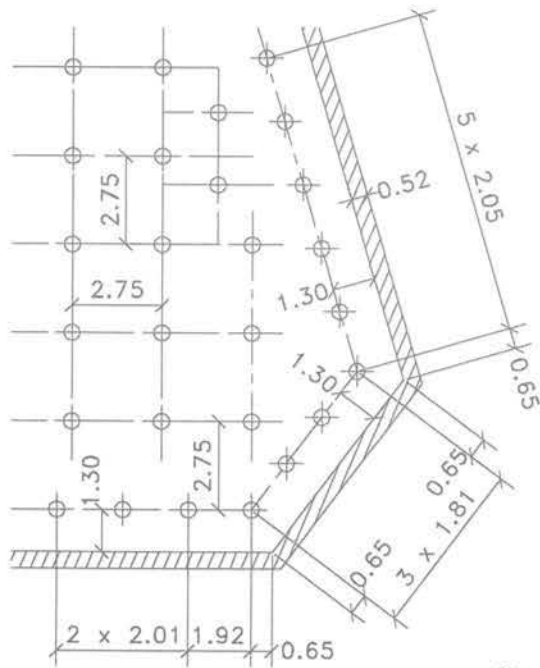


fig. 9

COUPE TYPE

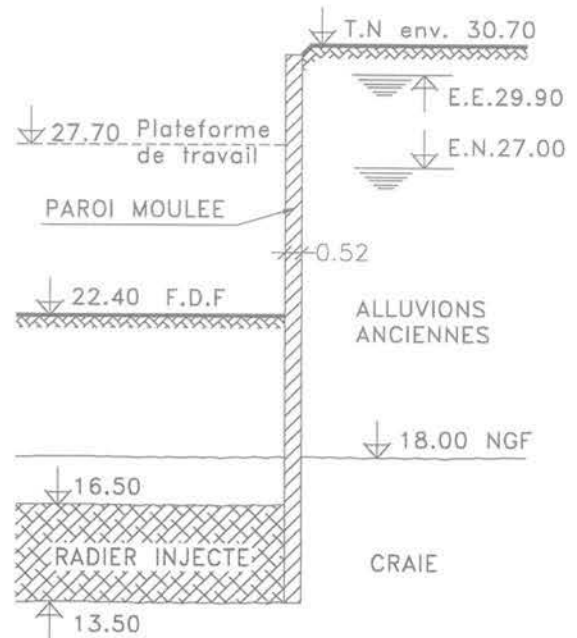
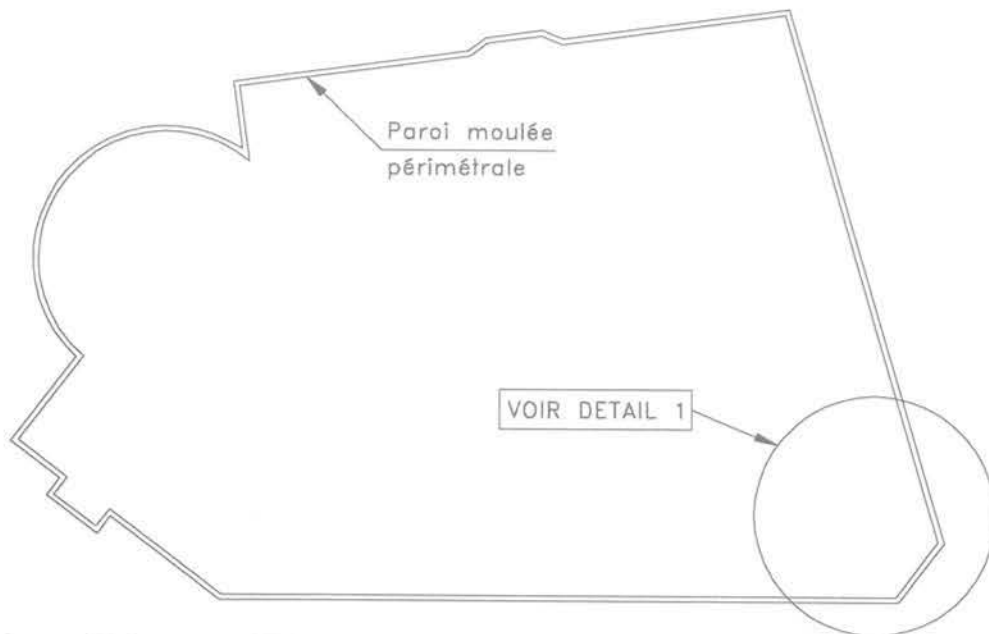


fig. 10

VUE EN PLAN



Périmètre extérieur : 266 m
Surface : 3923 m²

Echelle : 0 10 20 30m

fig. 11

Ce calcul à l'équilibre comporte, outre la sécurité sur les masses volumiques, un coefficient de sécurité naturel provenant de plusieurs facteurs :

— la pression d'eau sous le radier est surestimée, la perte de charge due à l'écoulement de l'eau vers la fouille n'étant pas prise en compte. En effet, la réalisation d'un radier implique le pompage permanent d'un débit résiduel devant rester dans des limites économiques acceptables ;

— ces calculs de stabilité sont menés par des niveaux de nappe hautes eaux, dont la probabilité d'occurrence en phase de terrassement au fond de fouille avant réalisation de l'infrastructure est faible (cette probabilité augmentant naturellement avec la durée d'ouverture de la fouille) ;

— l'effet stabilisateur de la paroi moulée et la résistance du terrain traité, d'autant plus importants que la fouille est étroite, sont rarement pris en compte.

L. Parez propose deux calculs, l'un supposant un niveau de perte de charge en partie haute du fond injecté associé à un niveau de crue chantier, l'autre avec la crue maximale et le poids mort du bâtiment s'il est réparti sur le fond de fouille. Par rapport au calcul exposé ci-dessus, cela implique souvent un approfondissement du radier et, par conséquent, une surprofondeur équivalente de paroi moulée sur toute sa périphérie, dans la mesure où, comme L. Parez l'a très justement indiqué dans son article, la base de l'un et de l'autre doivent être au même niveau.

Par ailleurs, pour les radiers réalisés en trois phases, comme c'est le cas dans les alluvions, le niveau de perte de charge est pris au niveau inférieur de la partie médiane. Le toit et la base de ces radiers dénommés « sandwich » sont traités avec des coulis granulaires moyennement pénétrants, et délimitent la partie médiane qui est alors injectée avec des coulis plus péné-

trants. La différence de perméabilité entre cette partie médiane et la base justifie, dans ce cas, l'hypothèse d'une perte de charge au niveau intermédiaire pris en compte.

9. Comportement des radiers à long terme

Ajoutons encore qu'à long terme, on observe généralement une diminution des débits résiduels, liée à un phénomène de colmatage du radier, complété par la recompression du terrain sous la charge de l'ouvrage.

Il convient d'évoquer les progrès réalisés dans le domaine de l'injection, notamment avec les systèmes informatiques de gestion développés récemment. Ainsi, le système EPICEA permet de piloter le traitement en fonction d'instructions préenregistrées telles que le choix du coulis, l'asservissement débit-pression des presses, ou leur arrêt sur des critères d'absorption. L'acquisition et le stockage des paramètres d'injection (pression, débit, volume) permet ensuite leur exploitation et leur interprétation grâce à une visualisation en temps réel sur écran dans un premier temps, mais également grâce à des traitements graphiques et statistiques. Ainsi peuvent être visualisés, entre autres, diagraphies de zones injectées, diagrammes des volumes absorbés en liaison avec les pressions, histogrammes de répartition des volumes, ou encore perspectives en 3-D pour les cas géométriques complexes. Cependant, malgré l'importance que constituent ces apports pour la technique de l'injection, celle-ci reste dans une certaine mesure empirique et difficile à théoriser. Ainsi, aucune formule ne permet à ce jour de relier les quantités injectées aux débits résiduels, ... et aucun système informatique ne remplacera les injecteurs, sans l'expérience, le sens et le doigté desquels, les radiers injectés ne sauraient voir le jour.