

CH-3001 Bern
Gartenstrasse 1
Postfach 6025
Telefon 031 / 385 61 11
Telefax 031 / 385 61 12
bern@emchberger.ch



Emch+Berger AG
Ingenieure und Planer

www.emchberger-be.ch

Expo.02
Arteplage de Morat

Le projet des amarrages du monolithe flottant

Ph. Menétrey

Contribution à la journée d'étude de la société suisse de mécanique des sols
et des roches le 18 mai 2001 à Bienne : Expo.02 et travaux en sites lacustres.

Le projet des amarrages du monolithe flottant

Philippe Menétrey, Emch+Berger AG Berne

1 Introduction

L'exposition nationale Expo.02 est prévue de mai à octobre 2002 sur quatre Arteplages. Pour chacune de ces Arteplages, un concours de design a été organisé. Les designers menés par le bureau Architectures Jean Nouvel à Paris en collaboration avec GIMM à Berne pour l'architecture, Tachtada pour la coordination et Emch+Berger pour l'ingénierie ont remporté le concours pour l'Arteplage de Morat dont le thème est : « instant et éternité ».

L'arteplage de Morat est prévue comme une vaste exposition intégrant la vieille ville, le lac et la zone côtière. La longue promenade côtière constitue l'épine dorsale le long de laquelle se dresseront plusieurs expositions. L'objet le plus spectaculaire sera le monolithe, comme illustré à la Figure 1. Il s'agit d'un cube de 34 m de côté, situé sur le lac à 200 m de la rive et accessible que par bateau.

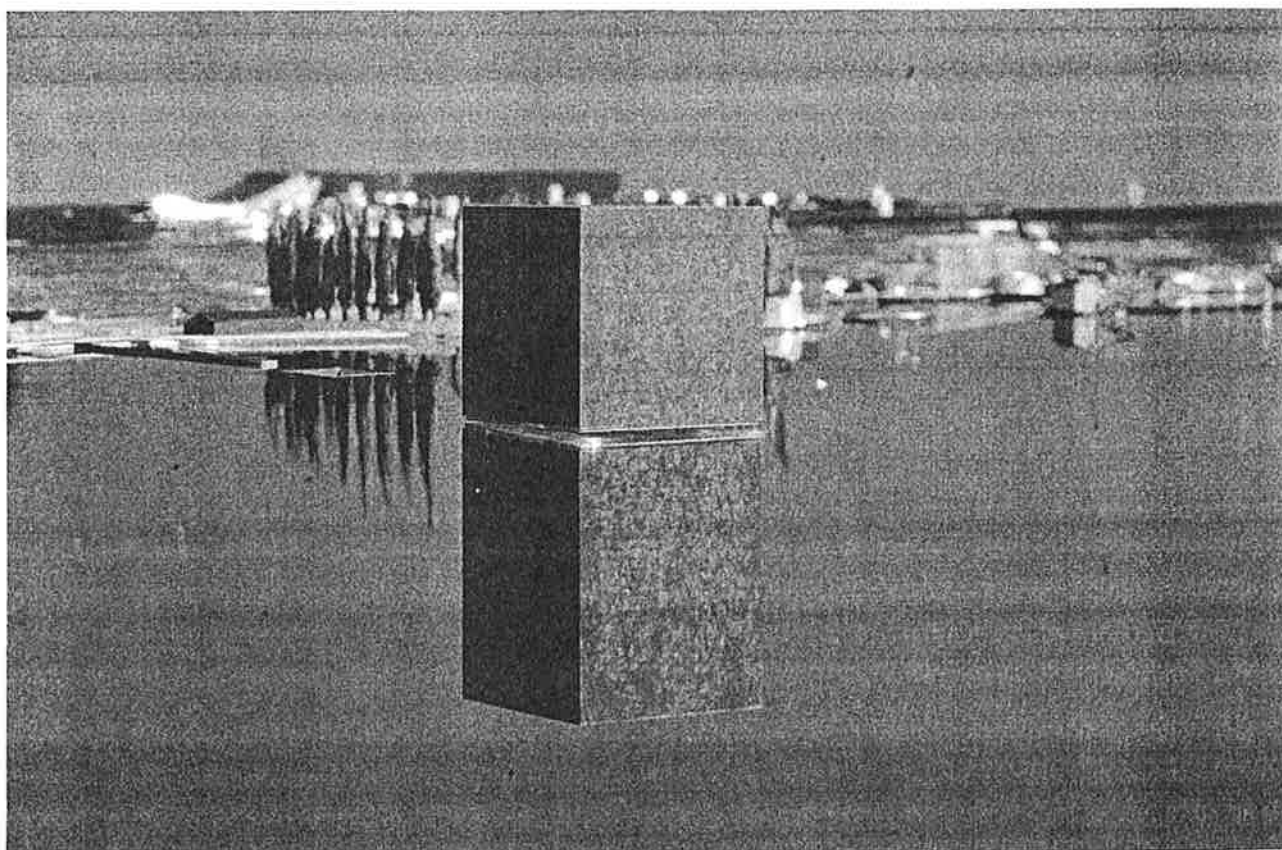


Figure 1: photomontage du monolithe (Architectures Jean Nouvel)

A l'intérieur du monolithe, deux expositions : l'une présentera le panorama de la bataille de Morat ; l'autre une projection vidéo en trois dimensions intitulée « Schweiz 2.1 ». En plus, une bande de fenêtres disposée sur tout le périmètre du monolithe à 16 m de hauteur permettra de visualiser la ville de Morat, les berges du lac et l'Arteplage.

2 Description du projet du monolithe flottant

Une description succincte et donnée ci-dessous et pour plus de détails, se référer à Menétrey [1] ou encore aux rapports [2] et [3]. L'enveloppe du monolithe est constituée d'une ossature métallique qui est recouverte

d'une façade en acier rouillé. Cette ossature métallique est composée de profilés métalliques dont les poutres franchissent d'une seule portée les 34 m du monolithe.

La plate-forme flottante conçue par le bureau Emch+Berger est constituée de 100 pontons en béton armé préfabriqués illustré par une coupe à la Figure 2. Ces pontons mesurent environ 3.4 de côté et 4.75 de hauteur et sont constitués de béton léger de telle manière que chacun de ces pontons soit transportable par camion. Chaque ponton forme un compartiment indépendant et étanche ceci grâce à l'utilisation de béton étanche comme utilisé pour la construction de ponts flottants (voir Tsinker [4]). Par souci de sécurité, chacun des pontons est équipé d'une pompe afin d'éliminer les eaux d'infiltration. Une fois que les pontons ont été préfabriqués en usine, ils sont transportés par camion et mis à l'eau à l'aide d'un camion grue dans le canal de la Broye à Sugiez. Les pontons sont liés ensemble provisoirement à l'aide de tiges métalliques et une fois que toute la plate-forme est montée elle est solidarisée dans les deux directions à l'aide de câbles de précontrainte.

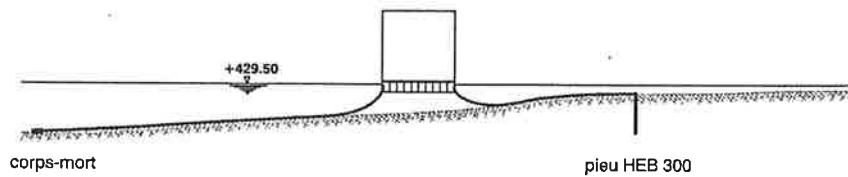


Figure 2: coupe du monolithe avec ses amarres

La profondeur immergée de la plate-forme à vide est de 2.5 m permettant son transport en une seule pièce dans le canal de la Broye. Une fois positionnée devant la ville de Morat, la plate-forme est amarrée au fond du lac avec des câbles de précontraintes et des chaînes qui sont fixés à des pieux métalliques ou à des corps-morts comme illustré par une vue en plan à la Figure 3. Une fois que la plate-forme est amarrée, la structure métallique est montée à l'aide d'une grue disposée au centre de la plate-forme.

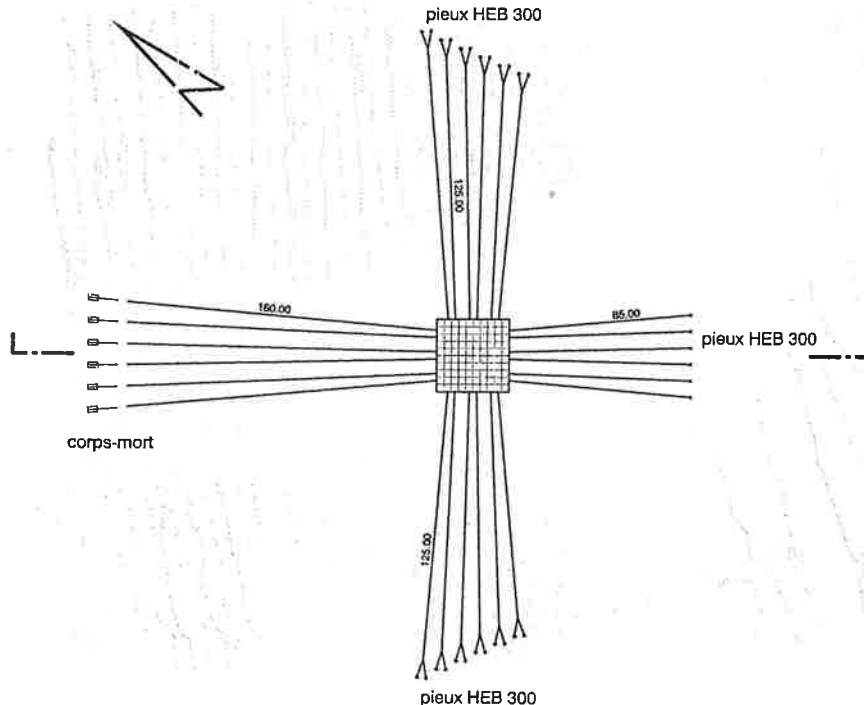


Figure 3: vue en plan du monolithe avec ses amarres

Le poids total du monolithe est d'environ 4'100 t dont 2'900 t pour la plate-forme flottante. Le poids élevé de la plate-forme flottante permet d'abaisser le centre de gravité du monolithe. De plus, la grande largeur de la plate-forme permet d'élever le métacentre (voir Comolet [5]) du monolithe offrant ainsi une grande stabilité. Le nombre de visiteurs est limité à 720 personnes pour des raisons de sécurité lors d'évacuation et ces visiteurs feront varier le niveau de flottaison de la plate-forme de seulement 5 cm.

La force statique due au vent sur les façades du monolithe est déterminée selon la norme SIA 160 [6] en considérant la pression dynamique du vent de 1.4 kN/m^2 (aspiration et pression). Le gîte résultant du monolithe est de l'ordre de 3.3%.

La pression statique due aux vagues sur la plate-forme du monolithe a été déterminée sur la base des mesures données dans le rapport [7]. Les vagues considérées pour une période de retour de 50 ans ont une hauteur de 1.0 m correspondant à un vent de secteur sud-ouest. La force horizontale équivalente a été déterminée selon la méthode de Mulder [8] et vaut 20 kN/m de largeur du monolithe.

La situation de risque la plus défavorable considérée pour les charges horizontales est le cumul du vent maximum et de l'impact maximal dû aux vagues. La force résultante par câble d'amarrage a été déterminée de plusieurs manières :

- Charges statiques équivalentes comme décrit ci-dessus : $F = 380 \text{ kN}$.
- Par des essais sur modèle réduit (selon le rapport [9]) ; $F = 410 \text{ kN}$. Pour les essais, la charge de vent statique a été considérée et une réduction du vent instantanée d'une valeur maximale à zéro a été appliquée ce qui est une hypothèse située du côté de la sécurité.
- Par des simulations numériques (selon le rapport [10]) pour un vent avec une période de retour de 50 ans (selon le rapport [11]) : $F = 260 \text{ kN}$. La force dans les amarres correspond donc à une valeur de service.

La force de dimensionnement considérée est de 380 kN .

Les conditions géologiques des fonds lacustres selon le rapport géologique [12] sont:

- couche supérieure: sédiments lacustres; limons argileux moux
 - couche intermédiaire: fluvio-glaciaire; sable graveleux
 - couche inférieure: complexe morainique; moraine
- et les caractéristiques géotechniques sont données dans le Tableau 1.

L'ancrage au fond du lac est prévu de deux manières:

1. A l'aide de pieux à proximité du bord du lac où le complexe morainique est peu profond.
2. A l'aide de corps-mort en béton dans les zones d'eau profondes.

Ces deux types d'ancrages sont décrits ci-dessous.

3 Amarrage par pieux

Une seule rangée de pieux est prévue du côté de la ville de Morat, car comme établi dans le rapport [11] les vents dans cette direction ne sont pas dominants. De plus, les vagues ne sollicitent pas le monolithe dans cette direction, car la longueur de génération de vague est trop courte. Dans la direction des forts vents, soit la bise et le vent de secteur sud-ouest, les pieux ont été dédoublés comme illustré à la Figure 3.

Les pieux prévus sont de type HEB 300 et mesurent entre 18 et 30 m de longueur. Ces pieux sont renforcés dans la partie supérieure par des plaques en acier afin de former une section carrée. La fixation des câbles et des chaînes sur les pieux est effectuée à l'aide de tube en acier pivotant autour de pieux afin d'assurer une transmission des efforts dans l'axe des câbles.

Les pieux ont été testés par un essai in-situ afin de déterminer la capacité portante sous charge horizontale. L'appareillage utilisé est présenté à la Figure 4. Trois pieux ont été vibro-foncés au fond du lac. Deux de ces pieux ont été chargés horizontalement à l'aide d'un câble de précontrainte et d'un vérin. La charge dans le vérin a été augmentée par palier et le troisième pieu a servi de référence pour les mesures. La courbe charge-déplacement résultante est présentée à la Figure 6 pour les déplacements en tête du pieu au niveau des fonds lacustres. Il est clairement observé que les pieux peuvent supporter de grandes charges horizontales, soit environ 400 kN même pour des déplacements atteignant l'ordre de grandeur du mètre.

L'essai de pieux a été simulé numériquement afin de contrôler le comportement des pieux et d'en obtenir les efforts internes. La simulation numérique a été effectuée à l'aide du programme Z-soil [13]. La surface de rupture considérée pour modéliser le comportement mécanique des sols est la surface de Mohr-Colomb arrondie selon le modèle de Menétrey et Willam [14]. Le maillage d'élément finis considéré ainsi que la géométrie du modèle sont présentés à la Figure 5. Une simulation numérique bi-dimensionnel a été considérée par simplification.

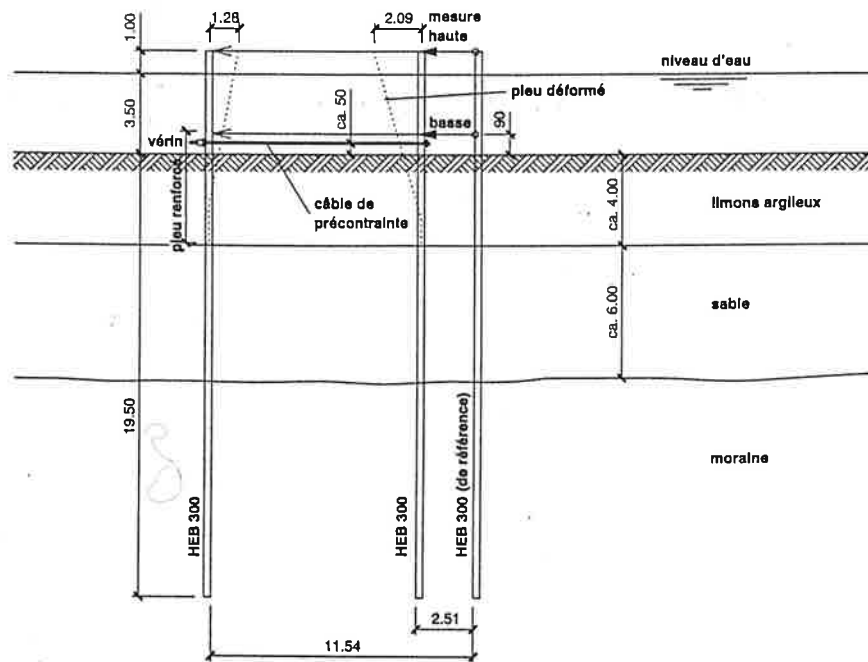


Figure 4: coupe transversale de l'essai de pieux

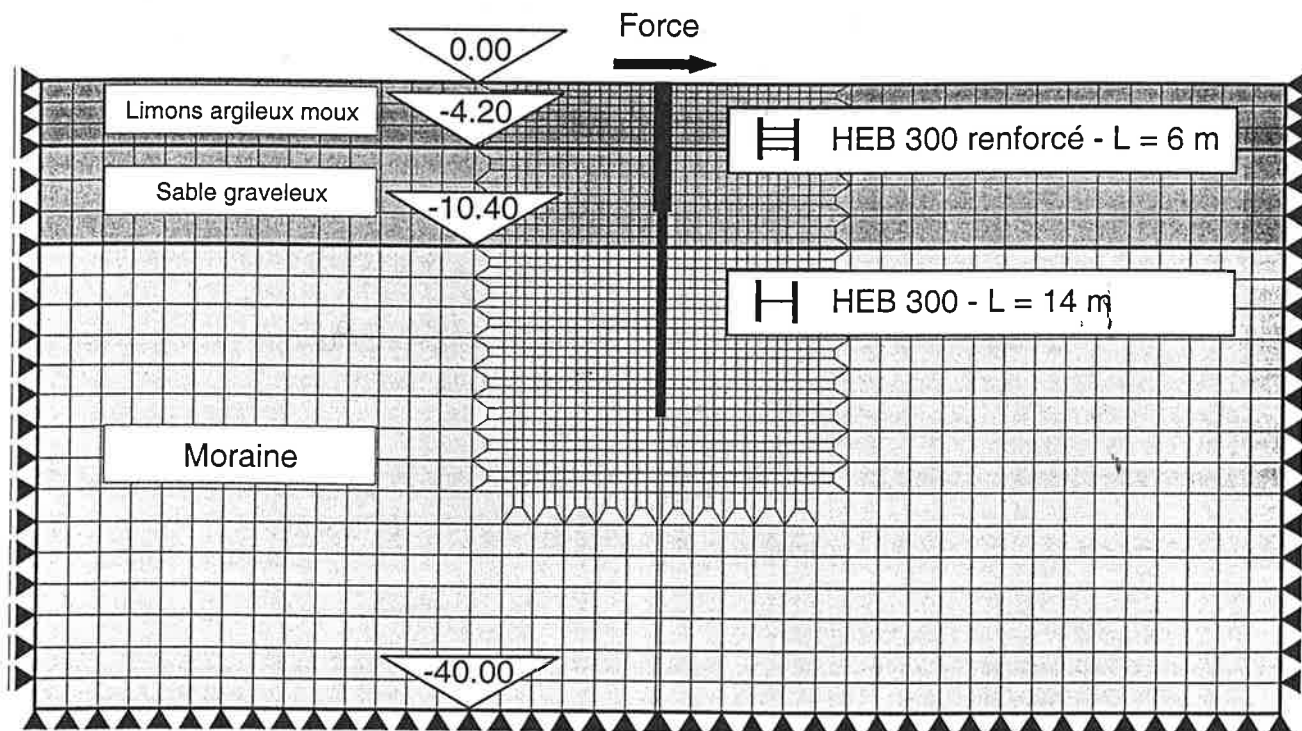


Figure 5: maillage d'éléments finis pour la simulation de l'essai de pieux

La réponse de l'essai de pieux in-situ ainsi que celle obtenue par simulation numérique sont présentées à la Figure 6 permettant de les comparer. Deux simulations numériques ont été effectuées ; une première sur la base des caractéristiques du sol données par le géologue et une deuxième avec des caractéristiques de sols augmentées. Il ressort très clairement que la simulation numérique permet de reproduire l'essai de pieu in-situ.

	E [kN/m ²]	v	γ' [kN/m ³]	φ [°]	c [kN/m ²]
Limons argileux moux	4'000 (5'200)	0.32	9	20 (25)	5 (6.5)
Sable graveleux	21'000 (27'300)	0.32	10	30 (36)	0
Moraine	35'000 (45'500)	0.32	11	30 (36)	10 (13)

* () valeur entre parenthèse : caractéristiques augmentées des sols

Tableau 1: caractéristiques géotechniques des sols lacustres

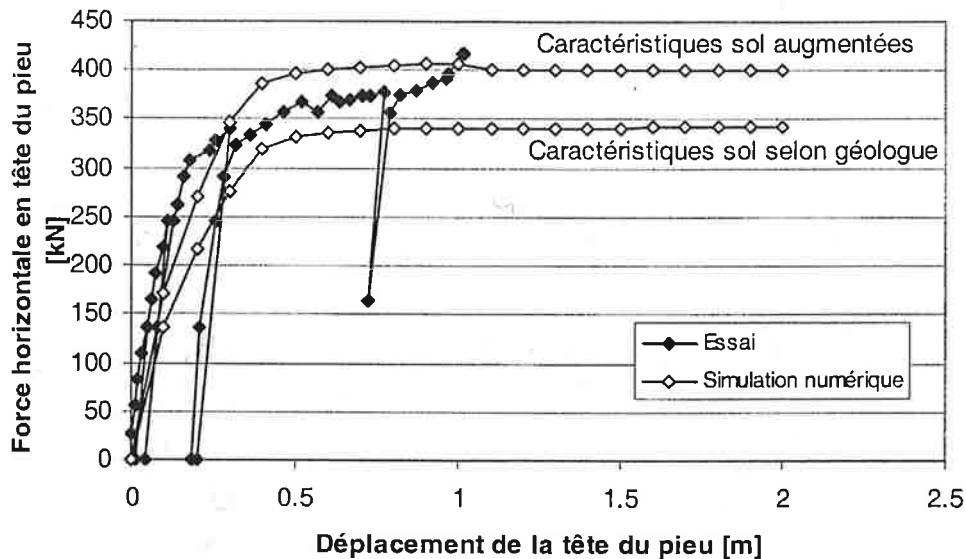


Figure 6: courbe charge-déplacement de l'essai de pieux

La mise place des pieux et les contrôles qualité effectués sont décrits dans le Tableau 2.

Contrôles des pieux	Responsabilité des contrôles	Mesures à prendre lorsque les exigences ne sont pas remplies
1. Contrôle des dimensions et spécification Tolérances selon SIA 161	Entreprise	à corriger
2. Contrôle de la mise en place Tolérances: hauteur et position ± 20 cm	Entreprise	à corriger
3. Capacité portante verticale Fiche de battage	Entreprise Ingénieur	à voir avec l'ingénieur éventuellement pieux sup.
4. Capacité portante horizontale Essai in-situ sur une paire de pieu ; force horizontale imposée par un vérin, mesure de la force et des déplacements, charge et décharge	Ingénieur Entreprise	Modifications de projet
5. Contrôle de la capacité portante Essai de charge lors de la mise en tension des câbles d'amarrage au niveau de la charge de service	Entreprise Ingénieur	à voir avec l'ingénieur

Tableau 2: contrôles qualité des pieux

4 Amarrage par corps-mort

Dans la partie profonde du lac la construction de pieux n'a pas été considérée et l'utilisation de corps-mort a été préférée. Les corps-morts sont constitués d'une cuve en béton à l'intérieur de laquelle viennent disposés des éléments de ballast en acier. La cuve en béton des corps-morts est illustrée à la Figure 7. La partie inférieure de la cuve est taillée en biseau afin qu'elle pénètre dans les fonds lacustres sous son seul poids propre. Une fois la cuve mise en place, des éléments de ballast en acier sont déposés à l'intérieur afin d'augmenter le poids et ainsi permettre la transmission des efforts au fond du lac. Le poids total de chacun des corps-morts dans l'eau est de 540 kN. Ce poids vertical important est à mettre en comparaison avec la charge horizontale maximale à transmettre qui est de 380 kN.

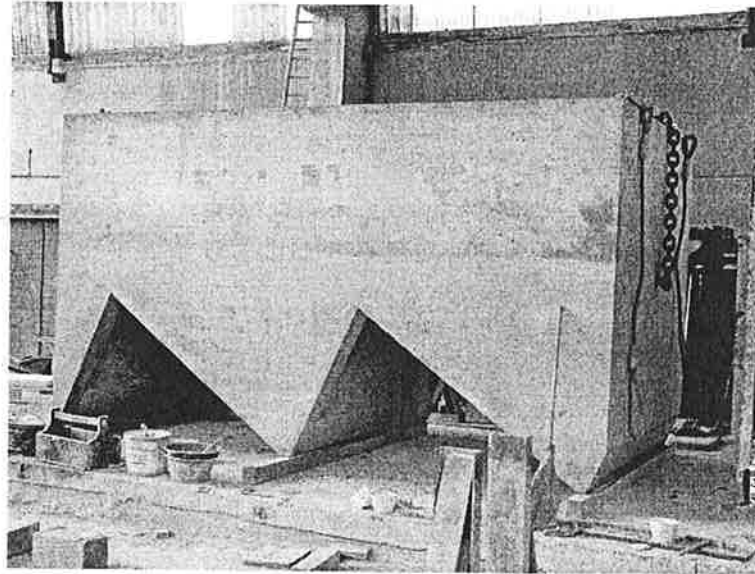


Figure 7: photo d'un corps-mort

Comme il n'est pas envisageable de tester la résistance des corps-morts in-situ, des simulations numériques ont été effectuées afin de cerner leurs comportements. Le programme Z-soil [13] a été utilisé et un modèle bi-dimensionnel a été considéré. Plusieurs modèles avec différentes hauteurs de sol faisant butée sur le corps-mort ont été analysés. Pour une hauteur de sol au devant du corps-mort de 1 m sur une longueur de 5 m comme visible à la Figure 8, la charge de rupture vaut 575 kN. Cette charge de rupture correspond à une sécurité globale vis-à-vis de la charge horizontale sous charge de vent et de vague de 1.6.

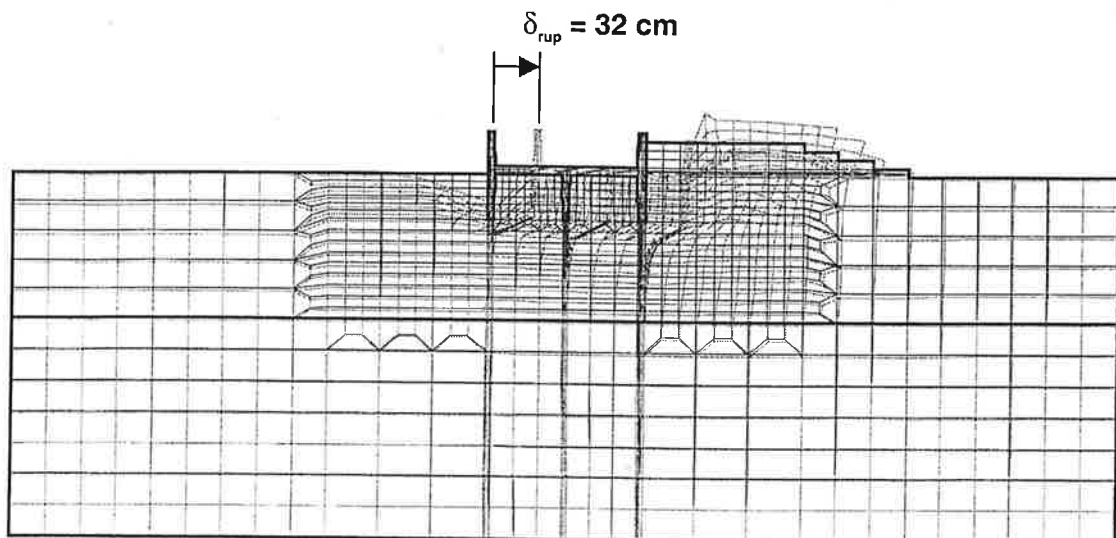


Figure 8: déplacement d'un corps-mort à la rupture (simulé numériquement)

Le champ de déplacement autour d'un corps-mort sous une force horizontale maximale de 575 kN est présenté à la Figure 8. Il est clairement visible que le sol faisant butée à l'avant du corps-mort se soulève. De

plus, il peut être distingué que le corps-mort sous charge horizontale a tendance à pivoter et à pénétrer à l'intérieur du sol. Ce phénomène de pivotement augmente la sécurité globale des corps-morts puisque la hauteur de sol s'accumulant à l'avant de ces derniers a tendance à augmenter.

Le cisaillement du sol au alentour du corps-mort est présenté à la Figure 9 pour un niveau de charge proche de la rupture. Une surface de rupture de forme arrondie correspondant à une surface de glissement de l'ensemble du corps-mort est distinguée à l'avant et à l'arrière de ce dernier.

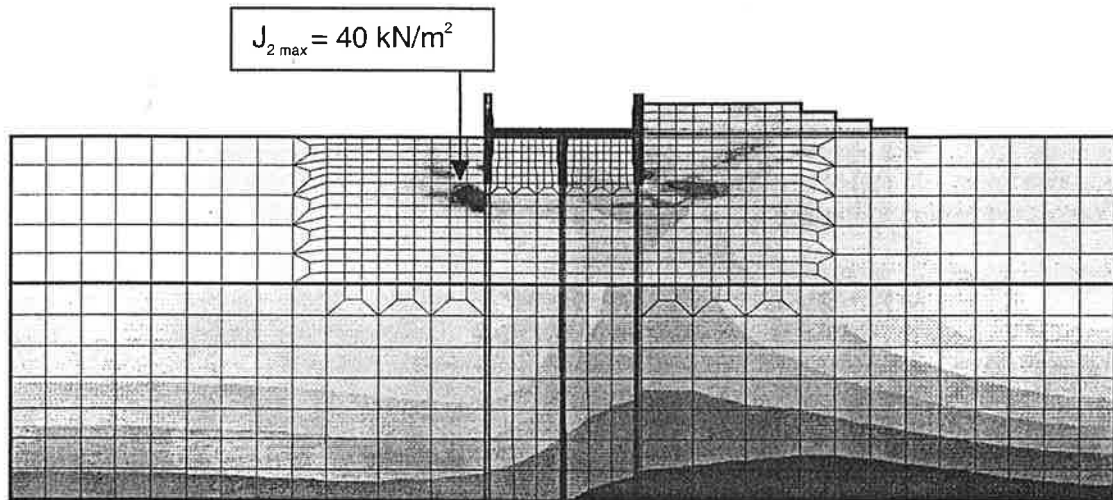


Figure 9: cisaillement du sol autour d'un corps-mort à la rupture (simulé numériquement)

Les contrôles effectués sur les corps-morts lors de leur mise en place sont présentés dans le Tableau 3.

Contrôles des corps-morts	Responsabilité des contrôles	Mesures à prendre lorsque les exigences ne sont pas remplies
1. Contrôle des dimensions et spécification Tolérances selon SIA 162	Entreprise	à corriger
2. Contrôle de la mise en place <ul style="list-style-type: none"> • Implantation à $\pm 1 \text{ m}$ • Orientation en direction du monolithe $\pm 5^\circ$ • Profondeur de pénétration dans le sol min. 1.5 m avec ballast 	Entreprise	à corriger
3. Contrôle de la capacité portante Essai de charge lors de la mise en tension des câbles d'amarrage au niveau de la charge de service	Entreprise Ingénieur	à voir avec l'ingénieur

Tableau 3: contrôles qualité des corps-morts

5 Conclusion

Le projet du monolithe flottant a été décrit permettant de montrer qu'il s'agit d'une structure de grande dimension puisqu'il fait 34 m de côté. L'ossature est composée d'une structure métallique et la façade est faite en plaques d'acier rouillées. La plate-forme flottante supportant le monolithe est constituée de 100 pontons en béton armé qui sont chacun indépendants. L'amarrage du monolithe est assuré par des câbles et des chaînes qui sont reliés à des pieux et des corps-morts. Les pieux ont été disposés dans les zones de faibles profondeurs d'eau et les corps-morts dans les zones de grande profondeur d'eau.

La capacité portante des pieux a été contrôlée à l'aide d'un essai de pieux in-situ et de simulations numériques. Ces deux méthodes sont concordantes permettant d'affirmer que la capacité portante des pieux est assurée.

La capacité portante des corps-morts a été appréhendée à l'aide de plusieurs simulations numériques. Plus le corps-mort est sollicité par des charges horizontales plus il se déplace horizontalement et plus la hauteur de terre s'accumulant à l'avant de ce dernier est augmentée et de ce fait plus la capacité portante est élevée. De plus, ces simulations ont permis de montrer que les corps-morts ont tendance à pénétrer à l'intérieur du sol permettant d'affirmer que l'effet d'ancrage est encore augmenté.

Le projet du monolithe flottant ainsi que sa construction ont nécessité plusieurs innovations. De nombreux essais en laboratoires, des simulations numériques, des essais sur place et des contrôles de la qualité ont été nécessaires afin de s'assurer d'un bon comportement de l'ouvrage. Toutes ces innovations et ces développements font l'intérêt d'un tel projet pour ces concepteurs et stimuleront certainement l'intérêt des visiteurs.

Participants :

Maître de l'ouvrage :	Expo.02
Architecture :	Architectures Jean Nouvel (AJN) à Paris Gauer Itten Messerli Maria (GIMM) à Berne
Ingénieur de la plate-forme et des structures :	Emch+Berger AG à Berne
Coordination :	Techdata AG à Berne
Géologue :	Sieber Cassina + Partner AG à Berne
Entreprise pour la plate-forme :	Marti AG à Moosseedorf
Entreprise générale pour l'enveloppe :	Nüssli Special Events St. Gallen AG

Toutes les personnes ayant participé à la réalisation de ce projet et à sa construction sont vivement remerciées.

Références :

- [1] Ph. Menétrey. Le projet du monolithe flottant, Ingénieurs et architectes suisses, à paraître, 2001.
- [2] Plan d'utilisation, de sécurité et de contrôles du monolithe ; Emch+Berger, mai 2000.
- [3] Plan d'utilisation, de sécurité et de contrôles de la plate-forme flottante du monolithe ; Emch+Berger, octobre 2000.
- [4] G.P. Tsinker. *Floating Ports, Design and construction practices*, GPC, 1986.
- [5] R. Comolet. *Mécanique expérimentale des fluides*, Masson, 1985.
- [6] SIA 160. Actions sur les structures porteuses, 1989.
- [7] Niveaux d'eau et vagues sur les sites lacustres de l'Expo.01. LCH-EPFL, rapport 14, juillet 1999.
- [8] H. Mulder ; Interaction water motion and closing elements. *The closure of tidal basins* ; Delft University, 1983.
- [9] Etude sur modèles du comportement dynamique du Monolithe, essais en bassin à houle. LCH-EPFL, rapport 2/01, mars 2001.
- [10] Motion and mooring analysis « monolithe ». Report No. 16623-1-CPO, Marin, Netherlands, 2000.
- [11] Analyse des vents extrêmes et de leur persistance pour les sites des arteploges d'Yverdon, Neuchâtel, Bienne et Morat. LASSEN-EPFL, rapport 507.193, juillet 1999.
- [12] Ancrage de la plate-forme flottante du monolithe. Siber Cassina + Partner, Bern, mai 2001.
- [13] Z-Soil. Zace Services, Lausanne.
- [14] Ph. Menétrey et K.J. Willam. A triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*, 92 (2) : 311-318, 1995.

Dr. sc. tech. Ph. Menétrey
Emch+Berger AG
Gartenstrasse 1
3007 Bern
tel. 031.385.61.11
fax. 031.385.61.12