

La plate-forme flottante du monolithe de l'arteplage de Morat

Autor(en): **Menétrey, Philippe**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **127 (2001)**

Heft 20

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-80070>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

La plate-forme flottante du **monolithe** de l'artepilage de Morat

(EXPO 02)



Le groupe de concepteurs emmené par le bureau *Architectures Jean Nouvel* - le bureau *GIMM* pour l'architecture, le bureau *Emch+Berger SA* pour l'ingénierie et *Techdata SA* pour la coordination - a remporté le concours, qui avait été lancé sur le thème «Instant et éternité», pour l'artepilage de Morat.

Dans le but d'intégrer la vieille ville, le lac et la zone côtière, l'épine dorsale de cette artepilage est une longue promenade côtière le long de laquelle se dresseront plusieurs expositions¹. L'objet le plus spectaculaire est le monolithe, un cube de 34 m de côté situé sur le lac à 200 m de la rive, et qui n'est accessible que par bateau (fig.1).

Afin de réduire les coûts de construction, cette structure - qui devait initialement être fondée sur des pieux métalliques fichés dans le fond lacustre - a fait l'objet d'une variante flottante, justifiée par les conditions suivantes:

- la grande profondeur d'eau (entre 12 et 14 m) sous le monolithe;
- la faible hauteur maximale des vagues (max. 1 m) sur ce lac de surface modeste;
- les effets de résonance modérés exercés par les vagues sur cet objet, dont les dimensions demeurent en effet réduites par rapport à leur longueur d'onde.

¹ Pour plus de détails sur les grandes lignes ayant gouverné la composition des artepilages, voir HENRI ROCHAT: «Entre culture et nature, quatre partis pris paysagers pour l'Expo.02», dans *IAS* N° 6/2000, pp. 128-134

² Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

Ainsi - outre l'originalité de ses dimensions (34 m de hauteur correspondent à un bâtiment de 11 étages), sa forme, l'aspect inédit de sa façade rouillée et son caractère de structure démontable après l'exposition -, le monolithe présente encore la particularité d'être flottant.

Les risques inhérents à l'érection d'un tel bâtiment ont fait l'objet d'études spécifiques [1], [2]² et sont présentés succinctement dans le **tableau I**.

ANALYSE DES PRINCIPAUX RISQUES EXCEPTIONNELS PENDANT L'UTILISATION

N° Scénario	Mesures à prendre	Risque à accepter
1 Actes de malveillance	- Surveillance de la zone	- Dégâts à la structure
2 Choc de bateau	- Interdiction de circulation en dehors des bateaux d'accès - Élément de guidage pour les bateaux d'accès - Renforcements des murs extérieurs des pontons	- Dégâts locaux à la structure
3 Foudre	- Mise à terre	
4 Rupture d'un ponton	- Rupture d'un ponton ne doit pas entraîner la rupture de la plate-forme - Chaque ponton est indépendant	- Travaux de réparation
5 Fuite d'eau dans un ponton	- Chaque ponton est indépendant - Système de pompage des eaux d'infiltration - Possibilité de contrôle et de réparation des pontons	- Contrôle des pontons - Travaux de pompage - Travaux de réparation
6 Forts vents et fortes houles	- Possibilités de tension des amarres - Contrôles des amarres	- Travaux de tension des amarres - Gîte du monolithe

Fig. 1: Photomontage du projet de l'artéplage de Morat avec le monolithe (Document Architectures Jean Nouvel)

Tableau 1: Analyse des principaux risques exceptionnels pendant l'utilisation

Fig. 2: Coupe transversale du monolithe avec sa plate-forme flottante et ses panoramas

Fig. 3: Vue en plan de la plate-forme flottante du monolithe

Fig. 4: Vue des câbles de précontrainte aux angles de chaque ponton (Documents Emch+Berger)

Structures du monolithe

- Trois groupes de structures peuvent être distingués (fig. 2):
- la plate-forme, qui fait l'objet d'une description détaillée ci-après;
 - l'enveloppe, qui comprend une structure métallique légère faite de poutres franchissant d'une seule portée les 34 m du monolithe et s'appuyant sur des colonnes en acier fixées rigidement sur la plate-forme flottante, ainsi qu'une façade en tôle d'acier rouillée;
 - les éléments internes, soit les deux panoramas situés à l'intérieur du monolithe, qui présenteront la bataille de Morat - une toile de 100 m de longueur et de 10 m de hauteur suspendue à un anneau circulaire accroché sous la toiture - et une projection vidéo sur un écran cylindrique de 25 m de diamètre intitulée panorama CH 2.1.

Plate-forme flottante

Partiellement immergée, ancrée au fond du lac par des câbles et des chaînes reliés à des pieux et des corps-morts, la plate-forme flottante est l'élément clef du monolithe dont elle supporte le poids. Développée par les ingénieurs de *Emch+Berger SA*, elle devait être réalisée en moins de six mois, résister aux charges dues au vent et aux vagues, ainsi qu'aux 720 visiteurs qui y seront admis simultanément. De plus, pour créer l'impression que le monolithe pénètre dans le lac, la plate-forme doit épouser la surface de cet objet. En ce qui concerne l'équipement enfin, les exigences sont identiques à celles qui s'appliquent à un bâtiment: alimentation en eau et électricité, lignes de téléphone, escaliers roulants, ascenseur, évacuation des eaux usées sous pression jusqu'à la rive.

La solution retenue, réalisée par l'entreprise *Marti AG*, s'inspire de la construction des ponts flottants décrite par Tsinker [3] et fait appel à des pontons préfabriqués en béton, seuls capables de répondre aux délais de construction extrêmement courts (soit deux mois et demi pour ces seuls éléments).

Quant aux prescriptions de préfabrication, elles ont été dictées par les contraintes du transport: gabarit limité à 3,50 m sans dispositif policier d'accompagnement (les dimensions maximales des pontons ont été arrêtées à 3,40 m) et poids plafonné à trente tonnes, ce qui impliquait l'utilisation de béton léger. La plate-forme est ainsi constituée de cent pontons en béton préfabriqué (fig. 3).

Pour assurer leur comportement monolithique, les pontons sont reliés entre eux par des câbles de précontrainte disposés sur leurs faces inférieure et supérieure dans les angles (fig. 4). Alors qu'elles sont en équilibre avec la pression d'eau

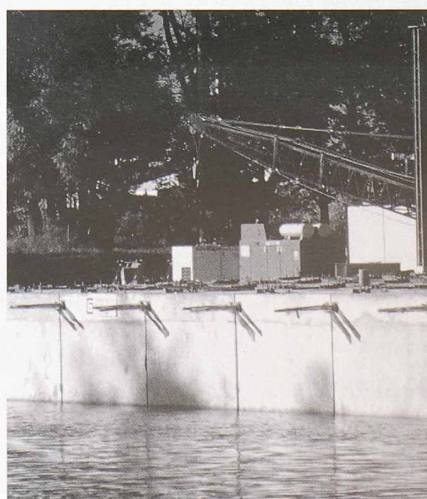
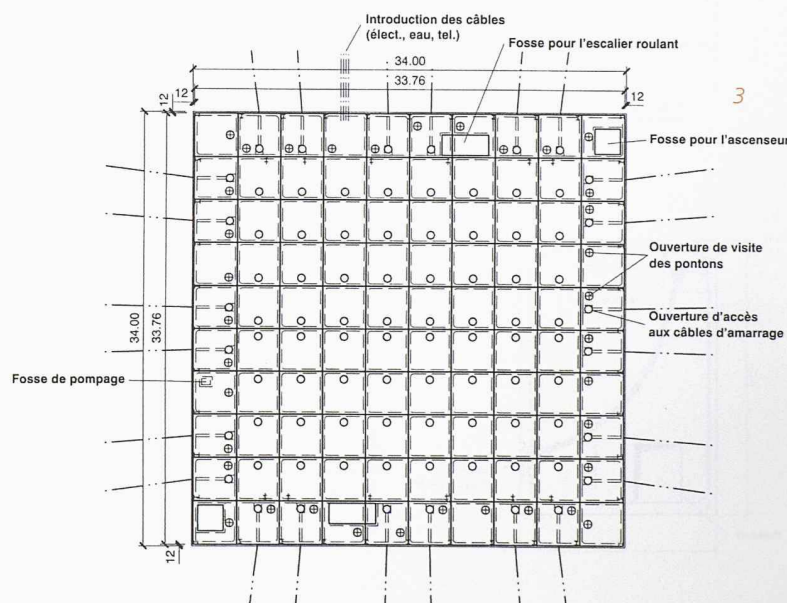
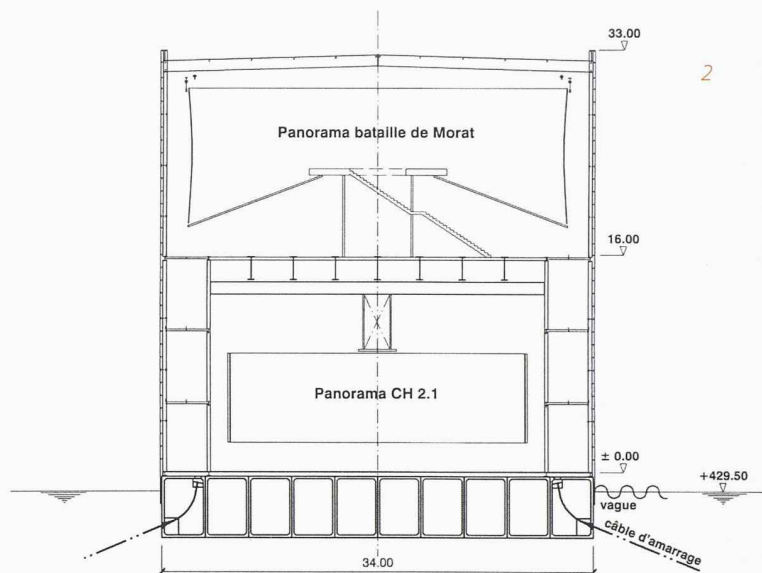


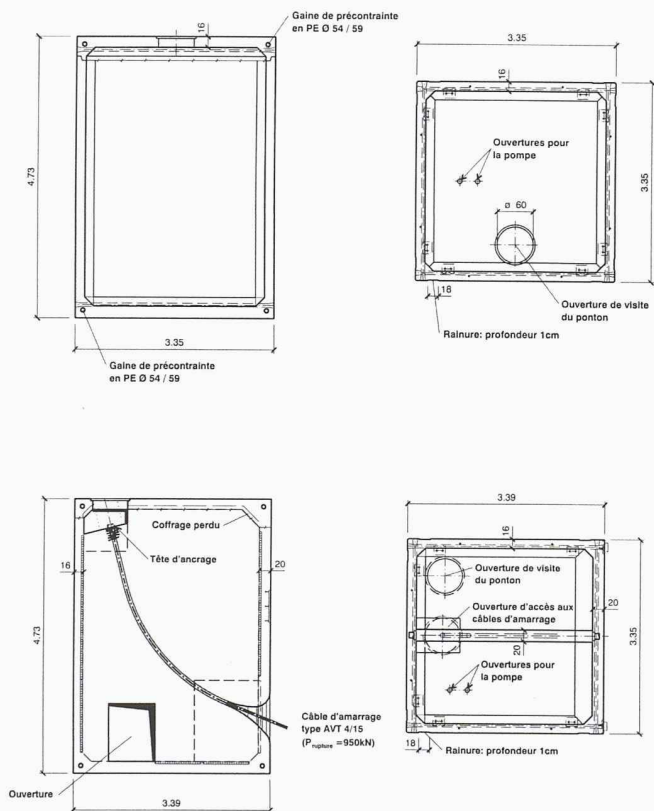
Fig. 5: Plan des pontons centraux

Fig. 6: Plan des pontons d'amarrage

Fig. 7: Esquisses de montage du monolithe
(Documents Emch+Berger)

Tableau II: Exigences et recettes du béton des pontons

Tableau III: Décomposition des masses du monolithe



5 - dont l'action est uniforme sur toute la surface - les diverses charges verticales qui s'exercent sur la plate-forme agissent sur son périmètre, si bien qu'elle subit une sollicitation flexionnelle. Les efforts intérieurs qui en résultent ont été déterminés sur la base d'un calcul en grille de poutres, celles-ci étant assimilées aux murs des pontons. La précontrainte a été dimensionnée pour que, sous charge verticale maximale cumulée avec une vague maximale, il y ait toujours une contrainte de compression entre les pontons. Aucune contrainte de traction n'est donc acceptée à l'état de service dans la plate-forme, afin d'exclure les dégâts qu'entraîneraient l'ouverture et la fermeture des joints.

Avant d'effectuer la liaison définitive des pontons, un contact a été créé entre eux à l'aide d'un mortier de ciment bétonné sous l'eau à l'intérieur d'un sac de jute. D'une largeur de 150 mm et d'une hauteur de 4,75 m, ce sac a été mis en place entre deux rainures de 1 cm de profondeur prévues à cet effet, puis injecté en remontant à l'aide d'un coulis de ciment. Celui-ci une fois durci, les pontons ont été connectés entre eux à l'endroit des rainures, et forment, après mise en place de la précontrainte, une poutre continue de 34 m de longueur et de 4,73 m de hauteur.

6

Pontons en béton

En béton armé de 3,40 m de côté pour une hauteur de 4,37 m, les pontons peuvent être groupés dans cinq classes différentes: les éléments centraux, ceux d'amarrage, de bord, d'angles et les pontons spéciaux.

Tous partagent cependant les cinq caractéristiques suivantes: ils sont autonomes du point de vue de l'étanchéité - ce qui forme une plate-forme flottante de cent compartiments étanches indépendants -, ils sont composés de béton étanche et léger, équipés d'une pompe pour évacuer les éventuelles eaux d'infiltration, ils présentent une épaisseur de murs d'au minimum 16 cm et 20 cm pour les murs extérieurs et sont tous dimensionnés de manière à demeurer totalement immergés (fig. 5 et 6).

Notamment destinés à amarrer le monolithe, les pontons de bord sont équipés d'un mur vertical médian, qui renferme une gaine de précontrainte courbe appelée à recevoir le câble d'amarrage. En cas de forte tempête, par exemple, cette disposition du câble permet en tout temps de corriger, depuis la plate-forme, la force qui s'y applique.

Pour assurer l'étanchéité des pontons, un béton spécial étanche et léger a été développé en collaboration avec l'entreprise *Element AG* (tableau II) et chaque élément a été contrôlé pour subir, au besoin, un traitement correcteur avant son transport.

EXIGENCES ET RECETTES DU BÉTON DES PONTONS

Exigences du béton:

Résistance	BL 35/25
Profondeur de pénétration d'eau (DIN 1048)	$e_{\text{moy}} < 30 \text{ mm}$
Masse volumique:	$\sim 1750 - 1800 \text{ kg/m}^3$

Recette de béton:

Ciment CEM II 52.5 R	300 kg/m ³
Pouzzolane (cendres volantes naturelles)	125 kg/m ³
Sable naturel 0/4 mm	269 kg/m ³
Granulat léger Lytag 0/12 mm	981 kg/m ³
E/L	0.45

L = liant = ciment + 100% cendres volantes

E = eau - 13% masse des granulats légers
(absorbée directement par les granulats légers)

Superfluidifiant 0.9 % (poids ciment)

Montage

Le montage du monolithe est présenté à la figure 7 sous forme de quatre esquisses.

Une fois préfabriqués et testés en usine, les pontons ont été transportés par route et mis à l'eau à l'aide d'un camion grue dans le canal de la Broye à Sugiez. Les éléments y ont été liés de manière provisoire et on a solidarisé la plate-forme ainsi montée dans les deux directions à l'aide des câbles de précontrainte pour l'amener en une seule pièce à sa place devant la ville de Morat. Là, elle a été amarrée au fond du lac par des câbles et des chaînes fixés à des pieux métalliques et à des corps-morts. La structure métallique a ensuite été montée à l'aide d'une grue disposée au centre de la plate-forme et la construction du monolithe s'achèvera par la pose de la façade et la construction des deux panoramas à l'intérieur.

L'espace nécessaire à la mise en place des pontons en vue de leur assemblage - de l'ordre de 45 m - a requis l'usage d'une grue à flottaison partielle (fig. 9). Une fois placés, les pontons ont été provisoirement fixés à l'aide de pièces métalliques (fig. 10), puis lorsque les cent éléments furent montés, des câbles de précontrainte furent enfilés dans les gaines. La liaison entre les éléments a ensuite été réalisée avec le coulis de ciment injecté à l'intérieur des sacs de jute, puis, après durcissement, la plate-forme a été solidarisée dans les deux directions avec les câbles de précontrainte.

Limitée à 2,6 m, la hauteur d'immersion de la plate-forme non chargée a permis son transport en une seule pièce dans le canal de la Broye jusqu'à son emplacement final. Malgré son poids de 2900 tonnes, son transport a été assuré par trois bateaux seulement, à raison de deux à l'arrière et un à l'avant. L'opération a nécessité la fermeture du canal de la Broye à toute circulation fluviale pendant une matinée (fig. 11).

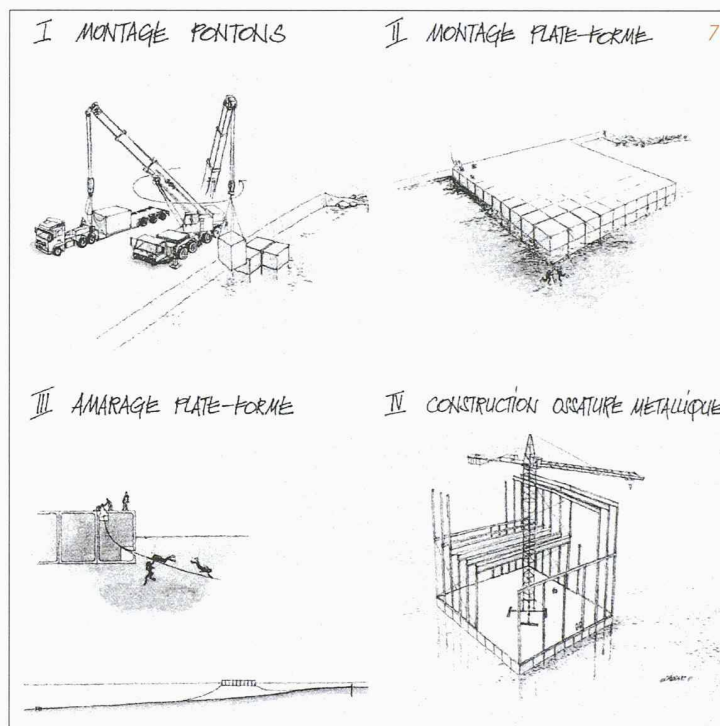
Actuellement en phase de montage (septembre 2001), la structure métallique, réalisée par l'entreprise *Nüssli Special Events AG*, atteint un niveau de 16 m, soit environ la moitié de la hauteur finale du monolithe (fig. 12).

Comportement

Flottabilité

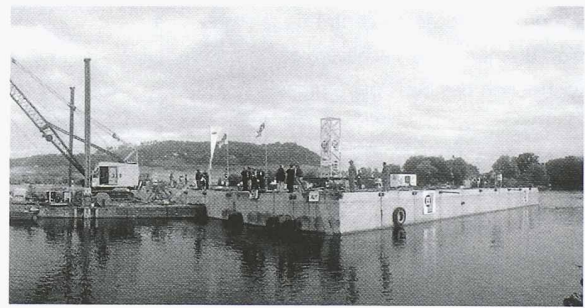
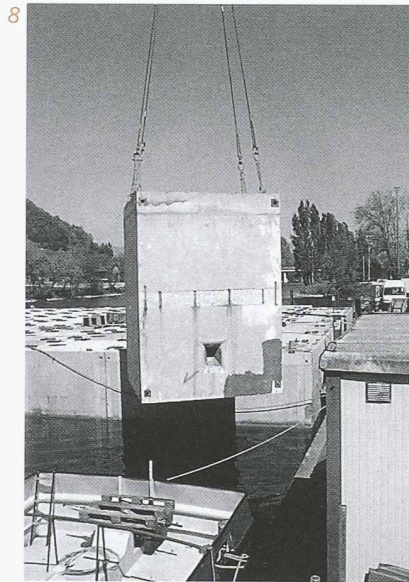
La flottabilité de la plate-forme a été analysée en détail et la décomposition de la masse totale du monolithe (41 220 kN à pleine charge) est résumée au tableau III. La masse de la plate-forme elle-même (29 500 kN) représente 71% du poids total, ce qui permet d'abaisser le centre de gravité de l'ensemble et d'augmenter sa stabilité.

La surface des pontons pénétrant dans l'eau et activant la poussée d'Archimède s'élève à 1128 m². Elle est légèrement



DÉCOMPOSITION DES MASSES DU MONOLITHE

1	Plate-forme flottante en béton	29 500 kN	///
2	Ossature métallique	4 600 kN	
3	Enveloppe (façade et toiture)	2 700 kN	
4	Plancher et aménagements intérieurs	1 560 kN	
5	Équipement (escalier roulant, ascenseur, pompe à chaleur)	770 kN	
6	Panorama de la bataille de Morat	630 kN	
7	Panorama Schweiz 2.1	410 kN	
8	Eau à l'intérieur des pontons (5 cm)	450 kN	
9	Visiteurs (720 personnes)	600 kN	
10	Total	41 220 kN	



inférieure à celle du monolithe, car les joints entre les pontons et l'espacement des façades ont été soustraits. La profondeur d'immersion à pleine charge est donc de 3,63 m, ce qui laisse émerger environ un mètre de la hauteur totale de la plate-forme. Ce bord libre pourrait supporter une charge verticale supplémentaire de 11 280 kN, soit à peu près la masse de la superstructure. Relevons dans cette perspective que la masse des visiteurs et de leur équipement (qui a été compté à 80 kg/personne, soit un total de 600 kN) ne fera varier que de 53 mm le niveau de flottaison de l'ensemble.

Comme la disposition des masses du monolithe peut-être considérée comme symétrique en plan, leur analyse peut être effectuée sur une coupe (fig. 13). Pour ce faire, on a eu recours à la terminologie de Comolet [4]:

- le centre de gravité de la plate-forme flottante est désigné par S_P , celui de la superstructure du monolithe par S_M et celui de l'ensemble par S_K ;
- le centre de poussée, ou centre de carène, s'écrit S_V ;
- le métacentre du monolithe est noté M .

On remarquera qu'à 3,27 m en dessus du niveau du lac, le

centre de gravité de l'ensemble demeure bas, tandis que la grande largeur de la plate-forme assure la position élevée du métacentre, ce qui confère une haute stabilité à l'ouvrage.

Amarrages

Le monolithe n'ayant pas de liaison rigide à la rive ou aux fonds lacustres, il doit être amarré afin de limiter ses déplacements lors de forts vents et de vagues (fig. 14). Comme cela se pratique pour les bateaux, les câbles d'amarrage ne sont pas tendus complètement, mais présentent une flèche destinée à amortir les efforts. Afin d'assurer leur alignement avec la direction de sollicitation maximale, ils sont placés perpendiculairement à chaque face du monolithe (fig. 15) et légèrement disposés en éventail pour augmenter la résistance de l'ouvrage à la torsion.

Le rapport géologique [15] fait état de fonds lacustres constitués d'une couche supérieure de sédiments de type limons argileux mous, d'une couche intermédiaire fluvioglaciale de type sable graveleux et d'une couche inférieure de moraine. L'amarrage dans le lac est prévu de deux manières: à l'aide de pieux à proximité de la rive, où le complexe morainique est peu profond, et par des corps-morts en béton dans les zones d'eau profondes. Si une seule rangée de pieux est prévue du côté de la ville de Morat, où les vagues ne sollicitent pas l'ouvrage, ceux-ci ont été dédoublés dans la direction des forts vents (fig. 15).

Le cumul du vent et de l'impact des vagues exprime les sollicitations maximales subies par les amarres. Les efforts pris en compte sont les suivants:

- la force statique due au vent sur les façades du monolithe est déterminée selon la norme SIA 160 [8] en considérant une pression dynamique du vent de $1,4 \text{ kN/m}^2$ (aspiration et pression);
- la pression statique exercée par les vagues sur la plate-forme a été déterminée sur la base des mesures données dans le rapport [9]: les vagues considérées pour une période de retour de cinquante ans atteignent une hauteur d'un mètre sous un vent de secteur sud-ouest et la force horizontale équivalente, qui vaut 20 kN/m de largeur du monolithe, a été déterminée selon la méthode de Mulder [10].

La force maximale résultante par amarre s'établit ainsi à 380 kN .

Les pieux en profilés HEB 300 mesurent entre 20 et 30 m de longueur, et leur partie supérieure est renforcée de plaques en acier afin de former une section carrée. La fixation des câbles et des chaînes fait appel à des tubes en acier qui pivotent autour du pieu afin d'assurer une transmission des efforts dans l'axe des câbles.

Dans le cadre d'un essai *in situ* pour déterminer leur comportement sous charge horizontale, trois pieux ont été vibro-foncés au fond du lac. Deux d'entre eux ont été reliés horizontalement à l'aide d'un câble de précontrainte disposé au fond de l'eau, puis chargés par paliers à l'aide d'un vérin, tandis que le troisième a servi de référence pour les mesures de déplacement. La courbe charge / déplacement obtenue a permis d'établir que les pieux peuvent supporter de fortes charges horizontales allant jusqu'à environ 400 kN et ce, même pour des déplacements atteignant l'ordre de grandeur du mètre.

L'essai de pieux a en outre fait l'objet d'une simulation numérique pour contrôler leur comportement et calculer les efforts internes, le programme *Z-soil* [16] étant appliqué afin de prendre en compte le comportement elasto-plastique du sol. Cette opération a très clairement permis de reproduire les tests *in situ*.

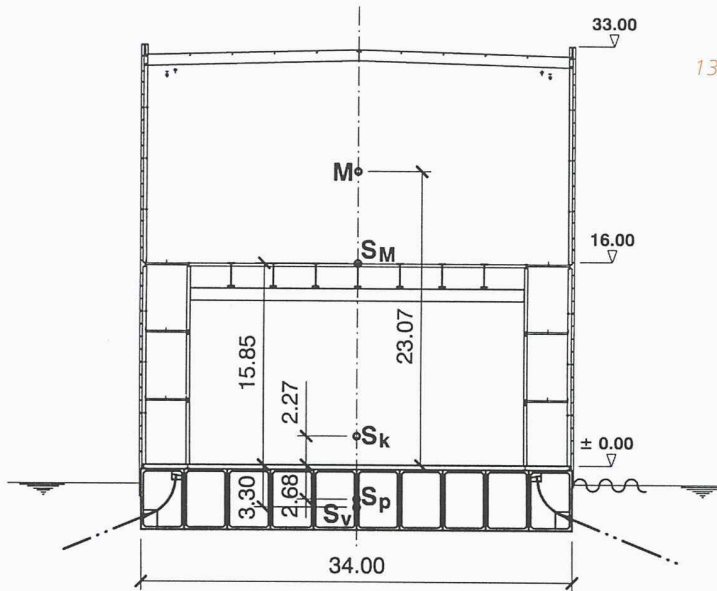
Comme indiqué plus haut, c'est un amarrage à des corps-morts qui a d'emblée été retenu dans la partie profonde du lac. D'un poids total de 540 kN , ces derniers sont constitués d'une cuve en béton, qui contient des éléments de ballast en acier, et dont la partie inférieure est taillée en biseau pour qu'elle pénètre dans les fonds lacustres sous son seul poids propre.

Le test de la résistance des corps-morts *in situ* n'étant pas envisageable, des simulations numériques ont été effectuées afin de cerner leur comportement et l'on a à nouveau fait appel au programme *Z-soil* [16] pour prendre en compte le comportement élasto-plastique du sol. Plusieurs modèles impliquant différentes hauteurs de sol faisant butée sur le corps-mort ont été analysés.

Les résultats ont non seulement montré qu'un coefficient de sécurité global de 1,6 est garanti, mais la simulation a encore révélé que les corps-morts soumis à une force horizontale ont tendance à pivoter et à pénétrer dans le sol, un phénomène qui accroît d'autant la sécurité qu'il fait augmenter la hauteur de sol s'accumulant devant ces éléments en béton.

Enfin, de nombreux contrôles de qualité ont été effectués pour s'assurer d'un bon comportement des pieux, des corps-morts et des câbles d'amarrage. Une des vérifications essentielles a consisté à tester l'ensemble du système d'amarrage. Tous les câbles ont été mis en tension pour une force de 200 kN correspondant à une charge de service pouvant se produire. Cet essai a permis de vérifier le bon comportement de tous les corps-morts et de la plupart des pieux. Quelques pieux situés dans les zones à grande profondeur ayant montré des rotations importantes ont ainsi été renforcés.

Fig. 13: Centre de gravité, centre de poussée et métacentre du monolithe



13

Fig. 14: Coupe du monolithe avec ses amarres

Fig. 15: Vue en plan des amarres du monolithe

Tableau IV: Le monolithe en chiffres (Documents Emch+Berger)

Analyses expérimentales et numériques

Comme le monolithe est un prototype, des essais expérimentaux en laboratoire et des simulations numériques ont été menés pour déterminer son comportement dynamique et détecter d'éventuels risques de mise en résonance. Deux instituts de recherche différents, ainsi que deux méthodes d'investigation distinctes ont été sollicités pour couvrir un large spectre dans la détection des effets dynamiques.

Des essais sur modèle réduit ont été effectués dans le bassin à houle du Laboratoire de constructions hydrauliques de l'EPFL [11], où la houle est générée par des cloches à air alimentées par des soufflets à fréquence et amplitude réglables. Pour une période de retour de cinquante ans [13] les vagues maximales ont été caractérisées comme suit: hauteur de un mètre, période de 3,4 s et longueur d'onde de 18 m. Le vent maximum, qui correspond à une pression totale de 1,4 kN/m² selon la norme SIA 160 [8], a été appliqué statiquement en faisant pivoter le monolithe pour cette valeur de pression, puis en le relâchant au début de l'essai. Ce cas de charge est du côté de la sécurité, puisqu'il représente un vent maximum qui se réduit instantanément à zéro.

Une maquette du monolithe à l'échelle 1/50 a été construite en PVC de différentes densités en fonction des masses à reproduire. Quant aux amarres, constituées de fils métalliques enrobés d'une gaine en plastique, elles ont été attachées rigidement au fond du bassin. Dans ce modèle, elles n'assurent donc pas de réduction des forces par amortissement, comme le déplacement des pieux et des corps-morts le permet en réalité. Les essais ont montré que:

- le cumul des vagues et du vent représente le cas de charge le plus défavorable;
- le monolithe sollicité par les vagues seules est très stable et ses mouvements très faibles;
- le monolithe sollicité par les vagues et le vent (hypothèse défavorable de vent se réduisant instantanément) conserve un comportement acceptable avec une accélération de cavalement (déplacement dans le sens de propagation de

la vague) de 1,35 m/s², soit un chiffre légèrement supérieur à la limite de 1,2 m/s² fixée pour des bateaux de croisière offrant un haut niveau de confort selon [14];

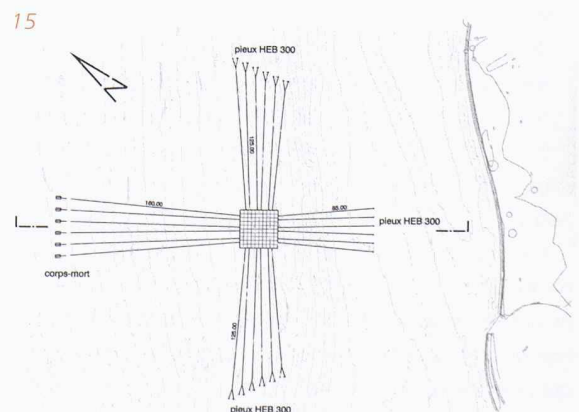
- la force maximale dans les câbles d'amarrage est de 263 kN pour un des câbles d'angle et de 405 kN pour l'autre (valeur moyenne de 334 kN);
- les vagues générées par le monolithe sont jusqu'à deux fois plus hautes que les vagues incidentes.

De son côté, l'institut hollandais MARIN (« Maritime Research Institute ») [12], a effectué des simulations numériques sur une modélisation 3D du monolithe en prenant en compte les vagues et le vent selon [13]. Le vent a été considéré pour une période de retour de cinquante ans avec une vitesse moyenne de 18,9 m/s pour une durée d'une heure et des pointes allant jusqu'à 27,5 m/s. Les résultats de ces études s'établissent comme suit:

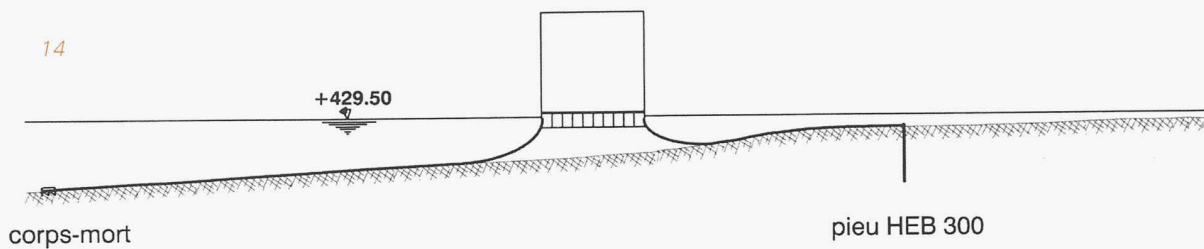
- même sous des conditions d'utilisation sévères et statistiquement rares, les mouvements du monolithe demeurent faibles, car il est court et ne réagirait qu'aux vagues d'une période supérieure à 4 s, alors que la période maximum des vagues se limite à 3,4 s;
- pour le cumul des charges dues au vent et aux vagues, la force maximale dans les amarres vaut 246 kN;
- lorsque le vent souffle perpendiculairement sur une des façades du monolithe, la sollicitation des amarres dans sa direction est similaire pour toutes les amarres;
- un ballastage du câble avec diminution de la force de pré-contrainte qui s'y exerce permet de réduire la force dans les amarres.

Quant aux calculs analytiques, essais expérimentaux et simulations numériques, ils ont permis de conclure que:

- le monolithe se distingue par un bon comportement et aucun effet dynamique de mise en résonance n'a été observé;



15



corps-mort

pieu HEB 300

- la force d'amarrage de 380 kN déterminée analytiquement est une valeur de service utilisable pour le dimensionnement. Les câbles de précontrainte et les chaînes employés pour l'amarrage offrent une résistance supérieure à 850 kN, donc une sécurité globale supérieure à 2,0;
- les câbles d'amarrage doivent reposer au fond du lac sur une partie de leur longueur, afin d'augmenter l'amortissement et de réduire les efforts de traction.

Pour augmenter l'effet d'amortissement des câbles, ils ont été ballastés sur environ 50 m de longueur à l'aide de pièces métalliques. Sur les derniers mètres, ils ont en outre été remplacés par de grosses chaînes d'amarrage. Les câbles ont été calculés à l'aide du programme d'élément fini ANSYS [17]. Le comportement non-linéaire géométrique du câble a pu être pris en compte pour intégrer sa configuration déformée. De plus, les conditions d'appuis non-linéaires dues au fait que la longueur du câble reposant sur les fonds lacustres dépend de la force qui s'y exerce ont été considérées. Après plusieurs analyses, la force de précontrainte des câbles d'amarrage a pu être fixée à 20 kN: cette valeur correspond à un câble reposant sur environ un tiers de sa longueur au fond du lac, ce qui a été confirmé par les plongeurs.

Résumé

Dans ses dimensions, sa forme et son aspect, le monolithe de l'Arteplage de Morat représente une structure inédite, dont l'originalité est encore renforcée par son caractère flottant.

La superstructure repose sur une plate-forme constituée de cent pontons en béton armé, indépendants les uns des autres. L'amarrage de l'ensemble est assuré par des câbles et des chaînes, qui sont reliés à des pieux dans les zones de faible profondeur d'eau et à des corps-morts en zone profonde. L'ossature du monolithe est composée d'une structure métallique légère, sa façade est faite de plaques d'acier rouillé, et des méthodes de construction originales ont été mises au point pour réaliser un tel objet dans des délais très courts.

Nonobstant une structure très exposée, le comportement du monolithe à l'état de service est satisfaisant et présente une grande sécurité. Plusieurs innovations techniques, de nombreux essais en laboratoire, des simulations numériques, des essais sur place et des contrôles de la qualité ont été nécessaires pour s'assurer du bon comportement de l'ouvrage. L'ensemble de ces innovations et développements font l'intérêt d'un tel projet pour ces concepteurs, pour les professionnels qui ont participé à sa construction, et ils stimuleront à coup sûr l'intérêt des visiteurs.

Références

- [1] «Plan d'utilisation, de sécurité et de contrôles du monolithe», *Emch+Berger*, mai 2000
- [2] «Plan d'utilisation, de sécurité et de contrôles de la plate-forme flottante du monolithe», *Emch+Berger*, octobre 2000
- [3] G.P. TSINKER: «Floating Ports, Design and construction practices», GPC, 1986
- [4] R. COMOLET: «Mécanique expérimentale des fluides», *Masson*, 1985
- [5] M. IRVINE: «Cable structures», *Dover*, 1981
- [6] M. M. LWIN: «Floating bridges», in «Bridge Engineering Handbook», édité par W.-F. Chen, L. Duan, *CRC Press*, 1999
- [7] *Fib Bulletin 8*: «Leightweig Aggregate Concrete; Part 3 case studies: The Nordhordland floating bridge», p. 358-359, 2000
- [8] SIA 160: «Actions sur les structures porteuses», 1989
- [9] «Niveaux d'eau et vagues sur les sites lacustres de l'Expo.01», LCH-EPFL, rapport 14, juillet 1999
- [10] H. MULDER: «Interaction water motion and closing elements - The closure of tidal basins», Delft University, 1983
- [11] «Etude sur modèles du comportement dynamique du monolithe, essais en bassin à houle», LCH-EPFL, rapport 2/01, mars 2001
- [12] «Motion and mooring analysis »monolithe«, Report No 16623-1-CPO, *Marin*, Netherlands, 2000
- [13] «Analyse des vents extrêmes et de leur persistance pour les sites des Arteplages d'Yverdon, Neuchâtel, Bienne et Morat», LASSEN-EPFL, rapport 507.193, juillet 1999
- [14] «Assessment of ship performance in a Seaway, Nordic co-operative project: Seakeeping Performance of Ships»
- [15] «Ancrage de la plate-forme flottante du monolithe», *Siber Cassina + Partner*, Berne, 2001
- [16] *Z-Soil, Zace Services Ltd*, CH-1015 Lausanne
- [17] ANSYS, Inc. Canonsburg, PA, USA

LE MONOLITHE EN CHIFFRES

Volume intérieur:	38 000 m ³
Surface au sol:	1150 m ²
Poids du monolithe à pleine charge:	4122 t
Poids de la plate-forme flottante:	2950 t
Poids de la superstructure :	1172 t
Poids de la structure métallique:	460 t
Poids d'un ponton en béton:	25 à 31 t
Longueur totale des câbles de précontrainte de la plate-forme:	2700 m
Longueur totale des câbles et chaînes d'amarrage:	3300 m
Épaisseur de béton des parois des pontons:	16 à 20 cm
Profondeur d'eau sous le monolithe:	12 à 14 m

IV