

SYNTHESE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Problématique

Comment définir un soutènement par palplanches, ainsi que son moyen de mise en œuvre et tous ses coûts induits ?

Résumé : Etat de l'art du soutènement par palplanches en aide aux entreprises vis-à-vis du dimensionnement, de la mise en œuvre et des coûts induits.



Réalisée par :

Salim AID, (Apprenti ingénieur, Conseil général du Val de Marne, CRETEIL),
Corentin CHACE, (Apprenti ingénieur, Eiffage Travaux Public Réseaux, LISSES),
Adrien MOPIN, (Apprenti ingénieur, Campenon Bernard Sud Est, MARSEILLE),
Brian VIGOUROUX, (Apprenti ingénieur, DODIN IDF, EMERAINVILLE),

Tuteur du projet :
Nina AMOUROUX

AVANT-PROPOS

Cette synthèse scientifique et technique réalisée au bout de cinq mois de recherche n'aurait pas été possible sans l'investissement personnel de chacun dans ce projet qui réunit l'ensemble de leurs connaissances et de leur expérience.

Ainsi, nous voudrions remercier en premier lieu Nina AMOUROUX pour son encadrement en tant que tutrice de ce projet, elle nous a permis de déceler nos erreurs afin de produire un document de qualité à la hauteur de nos espérances.

De profonds remerciements à nos tuteurs Marc DHIERSAT, Fabrice MOUREY, Jean-Yves RICHARD et Philippe PETIT qui ont eu la gentillesse de prendre le temps de nous conseiller, de nous guider pour l'élaboration de cette synthèse et qui ont fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui grâce à leur enseignement.

Une sincère reconnaissance à Antoine MEDURI, maître d'œuvre du Tunnel Prado Sud au service de SETEC pour son savoir et ses explications qu'il a bien voulu nous faire partager concernant le dimensionnement et les études techniques.

Nos remerciements vont également aux professeurs du centre de formation du CESFA BTP qui nous ont inculqué un savoir précieux et pratique dans l'élaboration de cette synthèse.

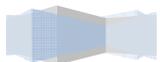
Des remerciements aux différents intervenants des entreprises contactées pour leurs réponses rapides et efficaces (PAJOT, ArcelorMittal, Altifer).

Enfin, des remerciements plus que sincères et mérités aux membres de ce groupe de travail, qui ont donné de leur temps, leur savoir et leur volonté pour atteindre un objectif commun, à savoir, la réalisation d'un outil que nous espérons de qualité regroupant la majorité des connaissances nécessaires à l'élaboration d'un chantier de palplanches dans les règles de l'Art de notre métier.

En espérant que vous trouviez dans ce guide les informations que vous cherchiez,

Bonne lecture,

Salim AID,
Corentin CHACE,
Adrien MOPIN,
Brian VIGOUROUX.



INTRODUCTION

Le développement urbain des villes dans le monde entier et la diminution progressive des espaces de travaux, due en particulier aux aménagements urbains ont mené les ingénieurs des derniers siècles à développer des méthodes de soutènement. Ces méthodes de soutènement remplacent aisément les fouilles talutées en offrant un avantage majeur, une emprise de travaux réduite au minimum.

Aujourd'hui, il existe une multitude d'ouvrages de soutènement, utilisés selon les contraintes et les besoins du chantier tels que les parois moulées, les murs poids ou cantilever, les parois parisiennes et berlinoises ou les palplanches. Nous avons choisi d'axer cette synthèse scientifique et technique sur les rideaux de palplanches qui se distinguent des autres méthodes par leurs propriétés d'étanchéité. De plus, les palplanches, retenant la poussée des terres, peuvent aussi servir de coffrage perdu ou constituer un ouvrage définitif comme une digue. La diversité des palplanches, aussi bien dans leurs matériaux, leurs formes, ou leurs modes de pose, offre des solutions aux entreprises en termes de rentabilité et de délais de construction. Néanmoins, ce sont les contraintes des sites concernés qui déterminent les modalités de mise en œuvre de ces rideaux étanches.

Nous nous attacherons dans cette synthèse scientifique et technique à apporter une aide à la décision pour les entreprises. Pour cela, nous étudierons les moyens de dimensionnement des palplanches, leur mise en œuvre et les coûts engendrés par les travaux. Ainsi un bilan sera réalisé sur la rentabilité de chaque méthode en fonction de l'environnement rencontré par l'entrepreneur.

Afin d'atteindre cet objectif, cette synthèse traitera en premier lieu la palplanche en elle-même concernant ses matériaux, ses profilés, et ses caractéristiques. Après un rappel des règles de calcul et des méthodes de dimensionnement d'une palplanche, les méthodes actuelles de mise en œuvre seront détaillées et comparées. Enfin, un rappel des règles spécifiques et des dispositions particulières à prendre en œuvre sur ce type de chantier sera mené et la dernière partie portera sur une étude de cas pratique permettant d'illustrer de manière claire et concise les informations contenues dans cette synthèse.



TABLES DES MATIERES

AVANT-PROPOS	2
INTRODUCTION	3
RESUME	5
ABSTRACT	5
TABLE DES ILLUSTRATIONS	6
1. La palplanche	7
1.1 Les différents types de palplanche	7
1.1.1 La palplanche en bois.....	7
1.1.2 La palplanche en béton armé.....	8
1.1.3 La palplanche en acier	9
1.1.4 La palplanche en PVC.....	15
1.1.5 La palplanche en fibre de verre.....	16
1.1.6 Tableau de synthèse et de comparaison des types de palplanche	17
1.2 Dimensionnement d'un rideau de palplanche	17
1.2.1 La méthode analytique de Blum ou de la poutre équivalente	17
1.2.1.1 Présentation du modèle de Blum	17
1.2.1.2 Détermination des coefficients de poussées et butées.....	18
1.2.1.3 Principe de la « poutre équivalente »	18
1.2.1.4 Détermination de l'effort dans le tirant et de la fiche.....	19
1.2.1.5 Choix d'une palplanche et vérification	19
1.2.2 Le logiciel ProSheet ®	20
1.3 Les modes opératoires	21
1.3.1 Choix d'un mode opératoire	21
1.3.2 Atelier de mise en fiche	22
1.3.2.1 Atelier de battage	22
1.3.2.2 Atelier de vibrofonçage	25
1.3.2.3 Atelier de vérinage.....	29
1.3.3 Tableau comparatif des différents ateliers de fonçage	33
2 Qualité sécurité environnement (QSE)	33
2.1 Analyse des risques	33
2.2 Moyens de prévention	33
2.3 Qualité.....	34
2.4 Environnement	34
3 Etude d'un cas pratique	37
3.1 Présentation de l'étude	37
3.2 Dimensionnement et vérifications	37
3.3 Analyse des coûts induits par chaque atelier	37
3.4 Analyse des devis et rendement	40
3.5 Bilan et retour sur expérience.....	41
CONCLUSION	42
GLOSSAIRE	43
BIBLIOGRAPHIE/WEBOGRAPHIE	45
TABLE DES ANNEXES	47

RESUME

La problématique de notre synthèse scientifique et technique vise à regrouper un maximum d'informations concernant les palplanches, le dimensionnement et leurs mises en œuvre afin de permettre à une tierce personne de comprendre le principe d'un rideau de palplanche et de prendre connaissance des différents paramètres nécessaires au bon déroulement d'un chantier tant sur l'étude préliminaire que sur l'exécution elle-même.

Tous ces paramètres exposés et détaillés dépendent bien évidemment du contexte d'exécution et de préparation du chantier mais les entrepreneurs, souvent pris en défaut par le temps d'étude, les connaissances spécifiques des contraintes, les rendements et la préparation de chantier, trouveront dans cette synthèse un rappel des règles de l'art pour la réalisation d'un chantier de palplanche.

L'entreprise, en utilisant cette synthèse, trouvera le cheminement aboutissant au choix d'un mode opératoire précis ou du moins un guide lui permettant de prendre en compte un maximum de paramètres pour la bonne réalisation de son chantier. En effet, le recul que nous avons eu en élaborant ce rapport a l'avantage de souligner toutes les contraintes qui se dressent face à l'entrepreneur dans la préparation d'un chantier de palplanches, et nous espérons avoir mis au mieux à profit notre expérience au service d'autrui.

Mots-clés : Palplanche, méthode de Blum, vibrofonçage, vérinage, battage.

ABSTRACT

The issue of our scientific and technical study aims to group together all the informations about the piles, in particular the design basis and the implementation. The objective is to enable any external person to understand the principles of a sheet pile wall in order to take into consideration every necessities parameters to ensure everything goes as smoothly as planned.

The report will first deal with a presentation of the sheet piles; the structural design, the components and the shaped. Then, It will introduce the methods of calcul to determine the size and the implementation of a sheet pile wall. Finally it will study a practical common case in order to simply illustrate all these information.

All these parameters to size a sheet pile depend on the data of the implementation and the schedule of the operation. So contractors are often exceeded with the time of study, the lack of specific knowledge, the return (financial results) and will find in this report a reference on the best practices to carry out a sheet piles working.

Contractors using this scientific and technical study will find the directions to follow in order to choose the good procedure. It consists in a guidebook to ensure the project is going well. The necessary distance we get to develop this report, underline the restrictions related to the planning of a sheet pile operation. We hoped to use our experience in the service of others.

Keywords: Sheet pile, Sheet pile Blum theory, Vibratory pile-driving, Water Jetting mode, Driving piles.

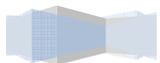
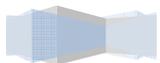


TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 Exemples de réalisation en palplanche bois/ protection de berge à gauche et droite et batardeau au centre. Source: De Ru Houtimport / ombret.wordpress.com/le-pont/pont-civil/	7
Figure 2 Profilé d'une palplanche bois. Source: cimage-ltd.com.....	7
Figure 3 Profilé d'une palplanche béton. Source : Université de Lille- Maîtrise en Génie Civil.....	8
Figure 4 Exemple de profil en Z. Source: ArcelorMittal	10
Figure 5 Exemple de profil en U. Source: ArcelorMittal	10
Figure 6 Exemple de profil oméga. Source: ArcelorMittal.....	10
Figure 7 Exemple de palplanche plate. Source: ArcelorMittal	10
Figure 8 Exemples de rideaux mixtes tubes et de caisson. Source: ArcelorMittal Ecluse, Evergem, Belgique	11
Figure 9 Exemple de rideaux mixtes HZ. Source: ArcelorMittal.....	11
Figure 10 Exemple de raccords existants pour profils U et Z. Source: Arcelor Mittal.....	12
Figure 11 Epaisseur sacrificielle recommandée pour les palplanches en fonction de la durée de vie souhaitée (valeur en millimètres). Source: fascicule 62 titre V.....	14
Figure 12 Mise en place de palplanche PVC. Source Altifer.com.....	15
Figure 13 Exemples de palplanche en vinyle profils Z et U (PVC). Source : jlinternational.nl.....	15
Figure 14 Rideau de palplanche en fibre de verre. Source : jlinternational.nl.....	16
Figure 15 Influence de la longueur de la fiche sur le moment et les déplacements dans l'écran de soutènement d'après Blum (1931), cité par Delattre (2001).....	18
Figure 16 Modélisation de Blum, d'après Schlosser	18
Figure 17 Résolution par la méthode de la poutre équivalente, d'après Balay.....	19
Figure 18 Détermination du nombre sans dimension « x » en fonction de l'angle de frottements internes du sol « ϕ° », d'après BLUM.....	19
Figure 19 Présentation du modèle logiciel ProSheet®. Source : ProSheet ®	20
Figure 20 Guide palplanche à 1 niveau sur le chantier de la rive droite du Vigueirat (Arles).....	22
Figure 21 Mouton Diesel. Source : Delmag.com	22
Figure 22 Mouton hydraulique. Source : IHC.fr.....	22
Figure 23 Trépideur Source : Pajot.com	22
Figure 24 Exemple de guide adaptable sur les Trépideurs Pajot Source : Pajot.com	24
Figure 25 Exemple de casque de battage pour marteau hydraulique IHC Source : IHC.fr	24
Figure 26 schéma de principe des résultantes engendrées par une paire de massettes. Source : ptc.fayat.com.	25
Figure 27 Exemple de vibrofonçeur à fréquence standard. Source : tecnoterra.ch.....	27
Figure 28 Exemple de vibrofonçeur à haute fréquence à moment variable monté sur une grue télescopique. Source : PTC-Fayat Group.....	27
Figure 29 Exemple de vibrofonçeur à fréquence standard monté sur une pelle hydraulique. Source : PTC-Fayat Group	27
Figure 30 Exemple de casque ou guide pour palplanche en U, en Z et pour tube.Source : PTC-Fayat group	28
Figure 31 Schématisation des phases de mise en fiche des palplanches par vérinage. Source : GIKEN.co.uk	30
Figure 32 Schématisation d'un atelier de vérinage avec grue à pince. Source : GIKEN.co.uk	31
Figure 33 Exemple de vérineur au sol. Source : PAJOT.com	32
Figure 34 Exemples de vérineurs silent piler giken ECO 700S. Source : GIKEN.co.uk	32
Figure 35 principes d'attache d'une pince de manutention (à gauche) et utilisation d'un enclencheur pour l'emboîtement de palplanches. Source :Pajot.com	34



1. La palplanche

La palplanche est une « pièce en bois, acier, béton, etc., de section spéciale, permettant de l'emboîter à une autre et généralement utilisée à la constitution de parois étanches en terrains meubles, aquifères ou immergés. » *Source : Larousse 2012*

Dans le langage courant, la palplanche est souvent définie comme un « profilé métallique » mais la palplanche ne désigne pas seulement le profilé acier mais bien un profilé de section spécifique fait dans divers matériaux tels que le béton, le bois, ou le PVC. De plus, il ne faut pas confondre « palplanche » et « rideau de palplanche » qui désigne l'ensemble structural formé par les palplanches assemblées entre elles.

Cette partie vise à faire la distinction entre les différents types de palplanches afin qu'aucune possibilité ne soit écartée de notre synthèse.

1.1 Les différents types de palplanche

1.1.1 La palplanche en bois

❖ Historique

La palplanche en bois est utilisée depuis des centaines d'années. Le bois est le matériau le plus ancien de la construction, il est régulièrement utilisé pour des structures légères. À cet effet, il peut être utilisé pour des rondins placés dans le sol afin d'agir comme barrage brut, ce qui correspond à l'ancêtre de la palplanche.

❖ Domaines d'utilisations

- Batardeau¹,
- Protection de berge,
- Barrage.



Figure 1 Exemples de réalisation en palplanche bois/ protection de berge à gauche et droite et batardeau au centre. *Source: De Ru Houtimport / ombret.wordpress.com/le-pont/pont-civil/*

❖ Domaine géotechnique

Le bois reste un matériau fragile notamment lors de sa mise en œuvre par battage. Il faut favoriser son utilisation dans des terrains homogènes et non rocheux.

❖ Mise en œuvre et profilés

Elles sont mises en œuvre par emboîtement les unes dans les autres au moyen de rainures ou « languettes ». De manière générale, elles sont taillées en biseau en pied pour faciliter l'emboîtement lors de la mise en place. Leur largeur varie entre 15 et 25 cm et la longueur d'une palplanche peut atteindre plus de 8 mètres.

Figure 2 Profilé d'une palplanche bois. *Source: cimage-ltd.com*



¹ Batardeau : « Digue ou barrage provisoire, établi en site aquatique pour mettre à sec la base d'une construction que l'on veut réparer ou l'emplacement sur lequel on veut élever un ouvrage. » *Source : Larousse 2012,*

❖ **Avantages**

- Matériau économique,
- Grande élasticité ce qui lui permet d'absorber l'énergie cinétique produite par un choc dans le cas de soutènement de voie fluviale où les chocs sont fréquents. (Module d'Young entre 10 000 et 15 000 MPa),
- Esthétique,
- Peu de maintenance.

❖ **Inconvénients**

- Faible durée de vie (environ 25 à 30 ans),
- Dégradation du bois,
- Résistance limite face à la poussée du sol (environ 20 à 30 MPa en flexion).

❖ **Solutions de traitement**

Application de solutions protectrices afin de garantir une certaine durée de vie contre les attaques d'agents d'altération. Ces applications peuvent être préventives ou curatives, par exemple par mise en place d'émulsions aqueuses ou organiques qui permettent de réduire la dégradation du bois dans son milieu d'utilisation. La plupart des produits de traitements sont composés d'une ou plusieurs substances actives fongicides ou insecticides, de liquides favorisant la pénétration de ces substances dans le bois comme l'eau et d'agents de fixation pour permettre la durabilité du traitement (pour de plus amples informations sur le traitement du bois, se référer également au manuel de l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) ED981, 12 pages).

1.1.2 La palplanche en béton armé

❖ **Historique**

Au début des années 1910, le béton armé fut utilisé pour concevoir des palplanches plus résistantes face à la flexion imposée par la poussée des terres. Ce n'est qu'à titre rétrospectif que nous en mentionnons l'existence dans notre synthèse scientifique étant donné que ce type de palplanches n'est plus utilisé de nos jours. En effet, il ne présente plus aucun avantage face à l'apparition des palplanches acier sur le marché au cours des années 1960.

❖ **Domaines d'utilisation**

- Soutènement,
- Batardeau.

❖ **Domaine géotechnique**

Pour éviter la fissuration lors du battage, il faut favoriser son utilisation dans des terrains homogènes et non rocheux.

❖ **Mise en œuvre et profilés**

Elles sont mises en œuvre par emboîtement les unes dans les autres au moyen de rainures ou « languettes ». Lors de la mise en œuvre par battage (seule technique fiable dans les années 1900 – 1960), il est nécessaire de protéger les têtes de palplanche par des « casques » afin de prévenir la fissuration lors du battage.

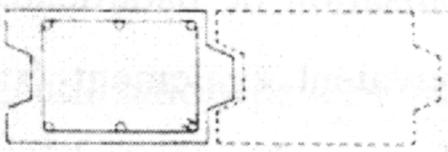
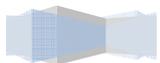


Figure 3 Profilé d'une palplanche béton. Source : Université de Lille- Maîtrise en Génie Civil

❖ **Avantages**

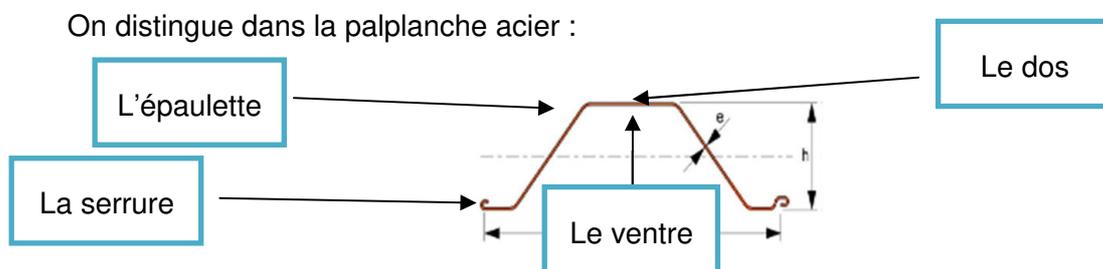
- Matériau économique,
- Géométrie adaptable aux besoins et contraintes du site,
- Pas de maintenance,



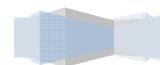
- Durée de vie (environ 50 ans).
- ❖ **Inconvénients**
- Fissuration lors du battage et détérioration de la palplanche si le terrain est trop résistant,
 - Serrures mal ajustées lors de la mise en place, il y a des problèmes d'étanchéité du rideau.
- ❖ **Solution de traitement**
- Elaboration de béton à forte teneur en ciment. Seule solution trouvée à l'époque car ces palplanches ne sont plus utilisées de nos jours.

1.1.3 La palplanche en acier

- ❖ **Historique**
- Pendant les années 1960, le cours du fer diminua de manière importante ce qui fit croître de manière exponentielle l'utilisation de l'acier dans les méthodes de soutènement. Ainsi, la palplanche acier qui existait depuis 1910 devint intéressante uniquement à partir de 1960 et remplaça aussitôt la palplanche béton dans tous ses domaines d'application.
- ❖ **Domaines d'utilisation**
- Batardeau,
 - Soutènement notamment en site aquatique,
 - Quai d'accostage,
 - Parois cylindriques appelées «gabions»,
 - Blindage de fouille,
 - Barrage,
 - Ouvrage portuaire,
 - Ecluse,
 - Protection de berge et canaux,
 - Culée de pont.
- ❖ **Domaine géotechnique**
- Tous types de terrain à l'exception des terrains rocheux.
- ❖ **Mise en œuvre et profilés**
- La palplanche acier est obtenue à partir d'une tôle laminée à froid (pour les épaisseurs inférieures à 9 mm) ou à chaud façonnée au profil désiré. Leur mise en œuvre se fait par emboîtement des extrémités de chaque palplanche appelée « serrures » ce qui constitue un rideau de palplanche.



Il existe différents profils de palplanches en acier (source : ArcelorMittal/voir annexe 1) :



- Les profils en Z :

Profil économique et rapide à mettre en place avec un bon rapport résistance/faible poids ainsi qu'un moment d'inertie élevé ce qui limite les déformations. Ces profilés sont le plus souvent utilisés pour le renforcement des berges. Ils s'utilisent principalement pour reprendre les efforts de flexion du fait de la continuité de l'âme dans le rideau et de la position spécifique des serrures qui sont symétriques par rapport à l'axe neutre.

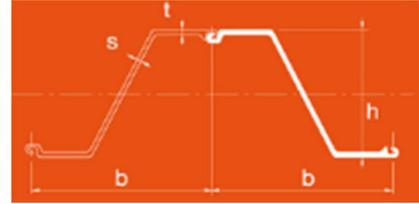


Figure 4 Exemple de profil en Z. Source: ArcelorMittal

La notion de profils PAZ désigne un profil de type Z obtenue par laminage à froid.

- Les profils en U :

Ce sont les profils les plus utilisés du fait de leur diversité et de leurs systèmes d'attaches hautement étanches. Ils offrent une bonne résistance à la corrosion favorisée par l'épaisseur d'acier au point critique. Ces profilés sont souvent utilisés pour un battage dans un espace réduit et peuvent être réutilisés facilement grâce à leur forme symétrique. Ils s'utilisent principalement pour reprendre les efforts de flexion.



Figure 5 Exemple de profil en U. Source: ArcelorMittal

Sur la gamme des profils U, certains profilés dérivés ont fait leur apparition pour répondre aux différentes contraintes des clients. On y trouve :

- ✓ Les profils PU :

Il s'agit des profils les plus optimaux dans le cas d'un fonçage difficile car elles possèdent des épaulettes renforcées. Elles possèdent un avantage considérable quant à la solidité pour le réemploi des palplanches.

- ✓ Les profils PU-R :

Profils développés pour remplacer les profils PU 6, 8 et 12 de la gamme ArcelorMittal.

- ✓ Les profils AU :

Le poids des profils AU est plus léger que celui des PU (réduction d'environ 10%). Ce profil plus large est adapté pour une facilité et une rapidité de mise en œuvre. Du fait d'une réduction des serrures au mètre linéaire, l'étanchéité est plus importante.

- ✓ Les profils Oméga (PAL/PAU) :

Profils obtenus par laminage à froid optimisé pour minimiser l'espace du rideau de palplanche. Ce profil possède deux boucles inversées ce qui permet donc de diviser par deux l'emprise des palplanches. Il conserve un excellent rapport module de flexion/poids.

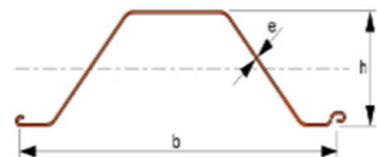
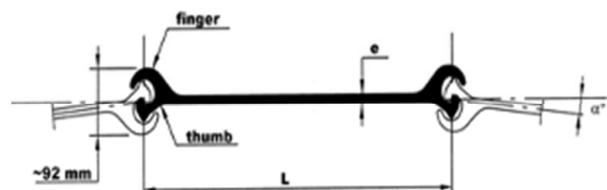


Figure 6 Exemple de profil oméga. Source: ArcelorMittal

- Les palplanches plates :

Ces palplanches trouvent leur utilité dans la stabilité des terres telles que le blindage des fouilles, la réalisation de rideaux cylindriques ou la mise en place de rideaux de grande profondeur. De plus, ces palplanches sont très utilisées dans le cas de terrain où l'ancrage est rendu difficile par la présence de roche. Elles s'utilisent principalement pour reprendre les efforts de traction horizontale de l'âme.

Figure 7 Exemple de palplanche plate. Source: ArcelorMittal



- Les rideaux mixtes tubes ou caisson :

L'assemblage de deux profilés de palplanches ou l'assemblage de palplanches et de tubes, donne un rideau mixte qui résiste à la haute pression donc aux hautes profondeurs. Les tubes ou caissons constituent les éléments principaux qui reprennent les efforts horizontaux mais aussi les charges verticales de structure. Les palplanches intercalaires permettent de transmettre les efforts horizontaux de la poussée des terres et hydrostatique aux tubes ou caissons.



Figure 8 Exemples de rideaux mixtes tubes et de caisson. Source: ArcelorMittal Ecluse, Evergem, Belgique

- Les rideaux mixtes HZ/AZ:

L'assemblage de profilés en Z et d'HEB forme un rideau mixte. Les profilés en H sont utilisés comme éléments porteurs et les palplanches intermédiaires AZ utilisées comme éléments intercalaires. Ce type d'assemblage permet non seulement de reprendre les efforts de poussée des terres et hydrostatiques, mais aussi de reprendre une charge verticale importante.



Figure 9 Exemple de rideaux mixtes HZ. Source: ArcelorMittal

Parmi tous ces profilés présentés, le laminage² se fait soit à chaud soit à froid. Bien que dans la majorité des chantiers de palplanches, celles-ci sont laminées à chaud, dans certaines conditions (contraintes du chantier, délais, géométrie de l'ouvrage,...) des palplanches laminées à froid peuvent être intéressantes (voir l'annexe 2 pour de plus amples informations). En effet, les profilés obtenus à froid offrent certains avantages :

- Une grande largeur des profilés soit une manutention et mise en place plus rapide,
- Un débattement³ de serrure de 10° contre 5° à chaud,
- Avantages économiques quant à la faible masse au m² de rideau,
- Une meilleure transmission des efforts horizontaux dans l'axe neutre,
- Le pliage des palplanches sur demande pour la réalisation d'angles.

Mais ce type de laminage présente aussi quelques inconvénients en comparaison au laminage à chaud :

- Une profondeur réduite des rideaux,
- Une nuance⁴ d'acier allant jusqu'à 355 MPa uniquement (420MPa max à chaud) soit une limite élastique (fy) plus faible donc une moins bonne résistance aux déformations,
- Profils Z ou U uniquement.

Enfin les palplanches acier possèdent des propriétés géométriques globales⁵ qui sont :

- Poids : entre 20 et 120 Kg/m,
- Epaisseur : entre 3 et 20 mm,
- Longueur : de 1 à 30 m,
- Nuance d'acier : de 240 à 420 MPa.

❖ **Système de raccord**

Un système de raccord au niveau des angles est nécessaire bien que les palplanches admettent un degré de rotation lors de leur mise en place. Il existe

²Laminage : « Action de faire subir à un produit, en général métallique, une déformation permanente par passage entre deux cylindres d'axes parallèles et tournant en sens inverse. » Source : Larousse 2012

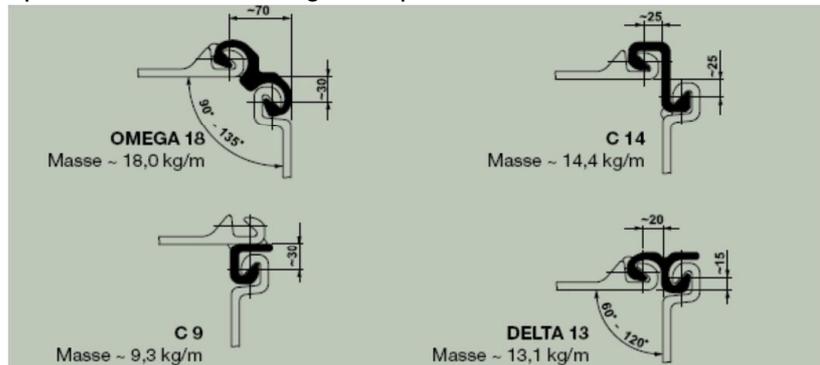
³Débattement : Rotation de la palplanche suivante par rapport à la précédente au niveau de l'axe d'emboîtement des serrures.

⁴ La nuance d'acier détermine la limite élastique (fy) mini en MPa

⁵ Sources : ArcelorMittal / SETRA / Larssen

principalement quatre clefs de fermeture qui s'utilisent en fonction du degré de l'angle ou de la position des palplanches pour la fermeture à savoir, Dos/Dos, Ventre/Dos ou Ventre/ventre. Il peut arriver que dans certains cas aucune clef de fermeture ne soit utilisée, l'utilisation d'une palplanche coupée sur toute une longueur qui sera soudée directement sur le rideau permettra sa fermeture, c'est une technique moins onéreuse mais généralement plus longue. Il est également possible de mettre en place des palplanches avec un raccord pré-soudé.

*Figure 10 Exemple de raccords existants pour profils U et Z.
Source: Arcelor Mittal*



❖ Avantages

- Forte aptitude au réemploi,
- Très bonne étanchéité,
- Très grande résistance,
- Large gamme de profilé,
- Très grande élasticité,
- 100% recyclable,
- Facilité et rapidité de mise en œuvre,
- Durée de vie (de 50 à 100 ans en fonction du traitement).

❖ Inconvénients

- Matériau onéreux suivant la variation du cours de l'acier,
- Dégradation avec le temps (corrosion),
- Fortes nuisances (sonore, vibration, espace de travail) dues aux méthodes de mise en œuvre.

❖ Solution de traitement

Les rideaux de palplanches sont le plus souvent utilisés dans des ouvrages provisoires. Pour ce type d'ouvrage, les palplanches sont de manière générale non traitées contre la corrosion puisqu'elles ne sont pas utilisées suffisamment longtemps pour commencer à avoir une corrosion préjudiciable pour les caractéristiques mécaniques du rideau de palplanche. En revanche, ces rideaux provisoires peuvent être traités pour une meilleure étanchéité dans le cas d'ouvrage en milieu aquifère.

À l'inverse, les rideaux de palplanches définitifs sont traités contre la corrosion puisqu'ici elle peut avoir avec le temps un effet préjudiciable sur les caractéristiques mécaniques de l'ensemble du rideau. Ces rideaux peuvent également être traités pour une augmentation de leur étanchéité si nécessaire ou si implantation en milieu aquifère. Nous allons tout d'abord présenter succinctement les méthodes de traitement anticorrosion, puis les méthodes d'amélioration d'étanchéité d'un rideau.

Le choix d'une méthode de traitement anticorrosion a été traité par le manuel technique d'ArcelorMittal (se référer à l'annexe 3) en fonction des différentes normes (comme la norme AFNOR A05-251 de Mars 1990) qui régissent le traitement sur l'acier. D'après ce manuel, ce choix est déterminé par :

- le type de surface (nature, état, préparation de surface),
- L'environnement (atmosphère, climat, conditions de service),
- Les conditions d'application (méthode d'application, lieu d'application, température et hygrométrie),
- La durée de service de la structure.

- La durabilité souhaitée du système de protection en fonction du budget et de la maintenance. (la durabilité du traitement de surface est définie par la norme ISO 12 944-1 en trois classes : durabilité limitée (L) 2 à 5 ans ; moyenne (M) 5 à 10 ans ; haute (H) + de 15 ans)
- L'aspect souhaité (brillance, état de surface, couleur).

De manière générale, les palplanches subissent une adjonction de cuivre qui permet de limiter à court terme la corrosion. Mais cette corrosion est dans certains milieux (zone d'alternance air / eau, site marin, zone polluée) fortement accentuée. Pour information, en France, les vitesses de corrosion admises⁶ sont de :

- 0,01 à 0,02 mm/an en eau douce,
- 0,10 à 0,14 mm/an en eau salée,
- Pour comparaison : 0,2 à 0,3 mm/an en zones tropicales ou équatoriales.

De nos jours, trois traitements principaux sont utilisés :

✚ Les protections par revêtement

- Nécessite une préparation de surface (sablage⁷ ou grenailage⁸),
- Utilisation de revêtements bitumineux ou de résines époxydes (époxyde brai⁹, époxyde zinc),
- Traitement le plus protecteur (durabilité moyenne à haute).

✚ Les protections cathodiques

- Obtenue par application d'un courant négatif du métal par rapport à une électrode de référence impolarisable (électrode de cuivre ou sulfate de cuivre),
- 1^{ère} méthode : production d'un courant à l'aide d'un générateur électrique pour éliminer la corrosion (protection ponctuelle),
- 2^{ème} méthode : constitution d'une pile où la cathode est le rideau et où l'anode (en zinc, aluminium ou magnésium) se consomme au cours du temps (protection constante),
- Solution coûteuse en entretien et installation,
- Très bon rendement, la durabilité dépend de la fréquence et de la durée de la protection cathodique.

✚ L'adaptation des profilés

- Utilisation de profilés à épaisseur plus importante (voir figure 11). La norme NF A 05-251 exige d'avoir une durée de vie minimale de 30 ans et une épaisseur minimale d'acier de 8 mm pour un sol fortement corrosifs,
- Utilisation d'un module plus élevé que nécessaire,
- Utilisation d'une nuance d'acier plus performante,
- La durabilité dépend de la surépaisseur d'acier et du temps de corrosion de cette surépaisseur.

⁶ Source : Techniques de l'ingénieur, traité construction/ Pieux et palplanches

⁷ Sablage : « Décapage d'une surface au moyen de sable, de silice ou de tout autre abrasif minéral projeté à l'aide d'air comprimé. » Source : Larousse 2012

⁸ Grenailage : « Projection de grenaille à la surface d'une pièce à l'aide d'une turbine, à des fins de décalaminage, durcissement superficiel et protection contre la corrosion. » Source : Larousse 2012

⁹ Brai : « Résidu de la distillation des goudrons de pétrole, de houille, de bois, ou d'autres matières organiques. (Utilisations : agglomération des fines de houille, fabrication de peintures, de vernis, d'électrodes, d'enduits d'étanchéité.) » Source : Larousse 2012

	25 ans	50 ans	75 ans	100 ans
Sols ou remblais peu corrosifs	0,25	0,60	0,70	0,80
Sols ou remblais moyennement corrosifs	1	1,60	2	2,50
Sols ou remblais fortement corrosifs	2,50	4	5	6

Figure 11 Epaisseur sacrificielle recommandée pour les palplanches en fonction de la durée de vie souhaitée (valeur en millimètres). Source: fascicule 62 titre V

Dans le cas de milieu aquifère, une attention particulière doit être portée à l'étanchéité du rideau afin de vérifier ses possibilités et si nécessaire d'appliquer une solution d'amélioration d'étanchéité.

Une palplanche métallique est totalement imperméable à proprement parlé mais dans le cas de rideaux de palplanches, les serrures constituent des zones d'infiltration, qui sous l'action de pression plus ou moins importante peuvent permettre l'infiltration d'eau. Afin de vérifier la nécessité d'utilisation de systèmes d'étanchement il est recommandé de réaliser des calculs de débits à travers le rideau, cela permettra également de sélectionner un système d'étanchéité adapté au rideau mis en place (les calculs et vérifications de débits à travers un rideau sont détaillée dans la documentation ArcelorMittal en annexe 4).

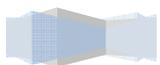
Dans cette partie nous traiterons uniquement les systèmes d'étanchement vertical de palplanche à palplanche et non horizontal, qui sont généralement de palplanche à ouvrage mitoyen et qui dépendent de dispositions constructives différentes aux palplanches.

Plusieurs techniques d'étanchement vertical sont possibles :

- ✚ La mise en place d'un produit dans les serrures, en usine ou sur site une fois la mise en fiche effectuée. Cette technique permet d'obtenir des performances étanchéité moyennes à élevées. Ces produits qui peuvent être à base de bitume + graisses lubrifiantes, de produits hydro gonflants ou d'huiles minérales+ cire de paraffine sont mis en œuvre à chaud dans les serrures.
- ✚ La soudure des serrures offre une étanchéité totale du rideau mais pour un coût très élevé. La soudure peut être réalisée sur site ou au préalable en usine, à ce moment-là, les palplanches seront livrées par paires. Cependant, la soudure des serrures est délicate sur chantier puisqu'il est nécessaire de prendre en compte plusieurs critères (pour de plus amples informations, consulter la documentation spécifique d'ArcelorMittal sur la soudure des rideaux de palplanches, 28 pages) tels que :
 - La possibilité d'accès à la palplanche,
 - La situation atmosphérique sur le chantier,
 - La résistance mécanique de la soudure,
 - Le degré d'humidité de la serrure,
 - L'écartement des serrures,
 - L'agressivité du milieu agissant sur les soudures.

Tous ces facteurs sont variables et il est nécessaire de faire une bonne reconnaissance du site afin d'éviter tout problème lorsque la mise en fiche est réalisée.

- ✚ Une autre technique d'étanchéité consiste à réaliser des forages de faible diamètre au niveau de l'emplacement des futures serrures. Une fois les palplanches mises en fiche et les serrures dans les forages, une injection sur site de bentonite ou de ciment contre la serrure permet de réaliser l'étanchéité de celle-ci. Cette solution offre l'avantage d'apporter une aide au battage dans les terrains durs.



1.1.4 La palplanche en PVC

❖ Historique

La palplanche en PVC à base de résine de plastique est apparue au cours des années 2000 en complément de la palplanche acier dans certains domaines mais aussi comme alternative à la palplanche bois qui contribue à la déforestation et à la pollution des sols (à cause des traitements). De plus, elle apporte une solution à la corrosion des palplanches acier tout en conservant un domaine d'utilisation vaste et une facilité de mise en œuvre dans les zones de faibles profondeurs.

❖ Domaines d'utilisation

- Zone de fort courant et sur site pollué,
- Batardeau,
- Soutènement notamment en site aquatique,
- Quai d'accostage,
- Ouvrage portuaire,
- Ecluse,
- Protection de berge et canaux,
- Soutènement de talus,
- Bassin de rétention.

❖ Domaine géotechnique

Ce type de palplanches s'utilise dans des terrains non rocheux.

❖ Mise en œuvre et profilés

La mise en œuvre des palplanches PVC est la même que pour l'acier à savoir l'emboîtement de profilés grâce à des serrures pour former un rideau de palplanches.

La gamme de profilé est encore en plein développement et peu d'industriels proposent encore des palplanches PVC dans leurs catalogues puisque cela nécessite une toute nouvelle unité de production pour une demande encore faible dans le domaine de la palplanche.

Néanmoins on retrouve sensiblement les mêmes profilés c'est-à-dire des profils Z, U et plats.



Figure 12 Mise en place de palplanche PVC. Source Altifer.com

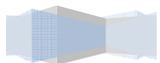


Figure 13 Exemples de palplanche en vinyle profils Z et U (PVC). Source : jinternational.nl



❖ Avantages

- Prix moins élevé que l'acier,
- Conserve les avantages des palplanches acier (facilité de mise en œuvre ; rapidité d'exécution),
- Très légère,
- Aspect esthétique,
- Très bonne étanchéité,
- Bonne résistance,
- Résistance aux UV,
- Matériau inerte,
- Large gamme de profilé,
- 100% recyclable,
- Durée de vie (environ 50 ans sans traitement),
- Aucun traitement nécessaire,



- Idéal en milieu agressif et pollué.

❖ Inconvénients

- Fortes nuisances (sonore, vibration, espace de travail) dues aux méthodes de mise en œuvre,
- Augmentation du prix du PVC constante.

❖ Solution de traitement

Aucune solution connue.

1.1.5 La palplanche en fibre de verre

❖ Historique

La palplanche en fibre de verre a suivi celle du PVC pour les mêmes raisons mais en apportant une résistance bien plus importante que celle du PVC.

❖ Domaines d'utilisation

- Zone de fort courant et sur site pollué,
- Batardeau,
- Soutènement notamment en site aquatique,
- Quai d'accostage,
- Ouvrage portuaire,
- Ecluse,
- Protection de berge et canaux,
- Bassin de rétention.

❖ Domaine géotechnique

Ce type de palplanche s'utilise dans des terrains non rocheux.

❖ Mise en œuvre et profilés

La mise en œuvre des palplanches en fibre de verre est identique à celle en PVC.

Figure 14 Rideau de palplanche en fibre de verre. Source : ilinternational.nl



❖ Avantages

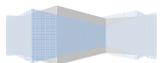
- Conserve les avantages des palplanches acier (facilité de mise en œuvre ; rapidité d'exécution),
- Très légère,
- Aspect esthétique,
- Très bonne étanchéité,
- Très bonne résistance,
- Très bonne résistance aux UV et à la température,
- 100% recyclable,
- Durée de vie (environ 75 ans sans traitement),
- Aucun traitement nécessaire,
- Idéal en milieu agressif et pollué.

❖ Inconvénients

- Fortes nuisances (sonore, vibration, espace de travail) dues aux méthodes de mise en œuvre,
- Peu de fournisseurs,
- Coût élevé.

❖ Solution de traitement

Aucune solution connue.



1.1.6 Tableau de synthèse et de comparaison des types de palplanche

Tableau synthétique et comparatif des types de palplanches

Types	Bois	Béton armé	Acier	PVC	Fibre de verre
Terrains	<ul style="list-style-type: none"> Sols pulvérulents et argileux 	<ul style="list-style-type: none"> Sols pulvérulents et argileux 	<ul style="list-style-type: none"> Schiste, calcaire, argiles et pulvérulents 	<ul style="list-style-type: none"> Schiste, calcaire, argiles et pulvérulents 	<ul style="list-style-type: none"> Schiste, calcaire, argiles et pulvérulents
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> Batardeau Quai d'accostage 	<ul style="list-style-type: none"> Employé avant l'utilisation des palplanches en acier 	<ul style="list-style-type: none"> Réalisation d'ouvrage en site aquatique ou en présence d'eau. Tous types d'ouvrages (batardeau, blindage, murs soutènements, ...) 	<ul style="list-style-type: none"> Réalisation d'ouvrage en site aquatique ou en présence d'eau. Principalement quai d'accostage et protection de berge 	<ul style="list-style-type: none"> Réalisation d'ouvrage en site aquatique ou en présence d'eau. Principalement quai d'accostage et protection de berge
Profils	<ul style="list-style-type: none"> Trapézoïdale, Rectangulaire 	<ul style="list-style-type: none"> Rectangulaire 	<ul style="list-style-type: none"> U, Z, plat, Mixte, Caisson, HZ 	<ul style="list-style-type: none"> U, Z, plat. 	<ul style="list-style-type: none"> U, Z, plat.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> Economique Esthétique Elasticité Réparation 	<ul style="list-style-type: none"> Résistance 	<ul style="list-style-type: none"> Solidité Durabilité Elasticité Facilité, Rapidité mise en œuvre 100% recyclable 	<ul style="list-style-type: none"> Très bonne résistance Esthétique Durabilité 100% recyclable Résistance à l'environnement 	<ul style="list-style-type: none"> Haute résistance Esthétique Durabilité 100% recyclable Résistance à l'environnement
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> Durabilité Résistance à l'environnement Résistance 	<ul style="list-style-type: none"> Fissuration lors du battage Faible étanchéité Poids important Non réutilisable 	<ul style="list-style-type: none"> Coût Corrosion Nuisances sonores à la mise en place 	<ul style="list-style-type: none"> Fluctuation du cours du PVC → augmentation des coûts de production Nuisances sonores à la mise en place 	<ul style="list-style-type: none"> Coût. Nuisances sonores à la mise en place
Longévité	<ul style="list-style-type: none"> Trentaine d'années sans traitement 	<ul style="list-style-type: none"> 50 ans 	<ul style="list-style-type: none"> De 50 à 100 ans en fonction de l'environnement et du traitement anticorrosion. 	<ul style="list-style-type: none"> + /- 50 ans 	<ul style="list-style-type: none"> +/- 70 ans
Solutions de traitement	<ul style="list-style-type: none"> Application préventives ou curatives de substance active 	<ul style="list-style-type: none"> Béton haute performance 	<ul style="list-style-type: none"> Contre corrosion (revêtements, protection cathodique, sur épaisseur) 	<ul style="list-style-type: none"> Aucune connue 	<ul style="list-style-type: none"> Aucune connue
Principaux fabricants	<ul style="list-style-type: none"> Aucun spécialisés dans les palplanches 	<ul style="list-style-type: none"> Aucun 	<ul style="list-style-type: none"> ArcelorMittal Larssen Altifer Sacilor Delmag France 	<ul style="list-style-type: none"> Altifer. 	<ul style="list-style-type: none"> Altifer, Jlinternational.

1.2 Dimensionnement d'un rideau de palplanche

La base du calcul d'un rideau de palplanches fait appel à des notions de poussées et butées, relatives aux articles de mécanique des sols consultables dans l'article [C242] *Ouvrages de soutènement. Poussée et butée. Techniques de l'ingénieur.fr.*

Les calculs peuvent être traités par méthode analytique ou graphique suivant les méthodes classiques de la loi de Coulomb ou de la méthode de Blum. D'autres méthodes de calcul faisant appel aux notions élastoplastiques se traitent par des programmes de calcul sur ordinateur qui font intervenir les modules de réaction (Rido, Talren, Denebola (Graitec), AMretain), ces méthodes sont en général utilisées par les bureaux d'études spécialisées dans le dimensionnement de palplanches car elles offrent des résultats plus précis qui diminuent les risques de sous dimensionnement.

Avant de mener à bien une étude de dimensionnement d'un rideau de palplanches, il est important de prendre en compte les données suivantes :

- Caractéristiques des sols,
- Coupes géotechniques,
- Les niveaux d'eau,
- Les surcharges,
- Les différents cas d'application des efforts pendant et après la construction,
- Les effets dus aux variations de niveau d'eau de part et d'autre du rideau,
- les résultats d'essais géotechniques (pénétrömètre, pressiomètre, essai Proctor),
- Les affouillements¹⁰ éventuels.

L'objectif du dimensionnement du rideau est de déterminer la fiche nécessaire aux palplanches ainsi que le module d'inertie nécessaire qui permettront le choix du type de profilé.

La vérification d'un rideau de palplanches peut se faire par de nombreuses méthodes qui dépendent généralement du type de rideau (batardeau, rideaux doubles, gabion, rideau simple). Cette synthèse ne nous permet pas de développer toutes ces méthodes¹¹ (méthodes de Terzaghi, Cummings, Schebili, Kilajima, Brinch, Hansen) qui ont donné lieu à d'importants ouvrages littéraires dans lesquels on peut retrouver les détails de ces méthodes.

Cependant, dans l'objectif de donner une approche d'un calcul de dimensionnement de palplanches nous avons choisi de développer partiellement la méthode analytique de Blum¹² et de présenter le logiciel de dimensionnement fourni par ArcelorMittal : ProSheet ®.

1.2.1 La méthode analytique de Blum ou de la poutre équivalente

Cette méthode s'applique dans le cas de sols pulvérulents, lorsque la fiche de la palplanche est suffisamment importante pour que le rideau soit complètement encastré.

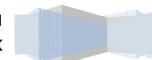
1.2.1.1 Présentation du modèle de Blum

Cette méthode permet d'analyser l'effet de l'allongement de la fiche sur la répartition de la pression des terres, du moment et du déplacement de l'écran. Blum remarque ainsi qu'un très grand allongement de la fiche ne produit pas d'augmentation significative de l'encastrement et estime que la longueur optimale d'encastrement est celle pour laquelle la tangente à la déformée en pied passe par le point d'ancrage (voir figures 15 et 16).

¹⁰ Affouillement : « Action de creusement due aux remous et aux tourbillons engendrés dans un courant fluvial ou marin butant sur un obstacle naturel (rive concave des méandres) ou artificiel (pile de pont, jetée), ou à l'activité des animaux benthiques. » *Source : Larousse 2012*

¹¹ *Source : Techniques de l'ingénieur, traité construction C140*

¹² D'après le *service central technique du ministère de l'équipement. Notice : STC N° 74-5 d'octobre 1974 et Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussée.*



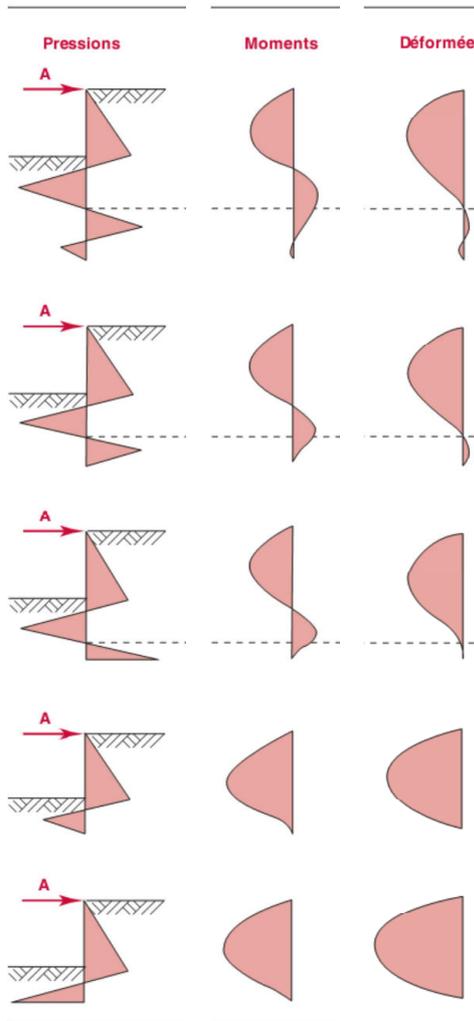


Figure 15 Influence de la longueur de la fiche sur le moment et les déplacements dans l'écran de soutènement d'après Blum (1931), cité par Delattre (2001)

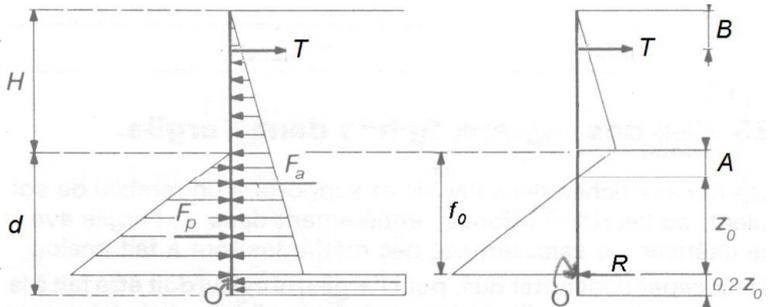


Figure 16 Modélisation de Blum, d'après Schlosser

Blum propose dans cette méthode, de simplifier les calculs en prenant pour hypothèse une force localisée passant par le centre de rotation qui représenterait les efforts de contre-butée (voir figure 16). Cette hypothèse est compensée par une majoration de la fiche déterminée notée « f0 » de 20% soit la fiche totale notée « f » :

$$f = f_0 \times 1,2$$

Le problème ainsi posé possède 3 inconnues : la force d'ancrage notée « T », la longueur de la fiche f0 et la résultante de contre butée « R ».

1.2.1.2 Détermination des coefficients de poussées et butées

Blum admet que le rideau est à l'équilibre, soit l'équation d'équilibre : $T + Fp = Fa + R$ où Fa est la résultante des efforts de poussée et Fp la résultante des efforts de butée.

Et considère le moment nul en pied d'ouvrage : $Fa \frac{(f_0 + H)}{3} = Fp \frac{f_0}{3}$

Blum admet également les hypothèses suivantes :

- Au-dessus de la contrebutée jusqu'au niveau d'ancrage, on a atteint de parts et d'autres du rideau des états d'équilibre limite (poussée et butée). La poussée des sols est obtenue à partir des tables de CAQUOT KERISEL (voir l'annexe 5) en prenant une inclinaison nulle : $\frac{\delta}{\varphi} = 0$
- La butée est déterminée par $\frac{\delta}{\varphi} = -2,3$ et affectée d'un coefficient de sécurité notée « F » : $F = 1,5$

A ce stade, il faut tout d'abord déterminer les coefficients de poussés (Ka) et de butée (Kp) du sol. Pour cela, on utilise les tables de Caquot Kérisel qui permettent de déterminer les coefficients Ka et Kp en fonction des caractéristiques techniques.

1.2.1.3 Principe de la « poutre équivalente »

Blum admet que dans un rideau, les point de moment nul « I » et de pression des terres nulles « E » sont voisins : il propose de les confondre, cette méthode s'appelle « la méthode de la poutre équivalente » de la méthode de Blum (voir figure 17).

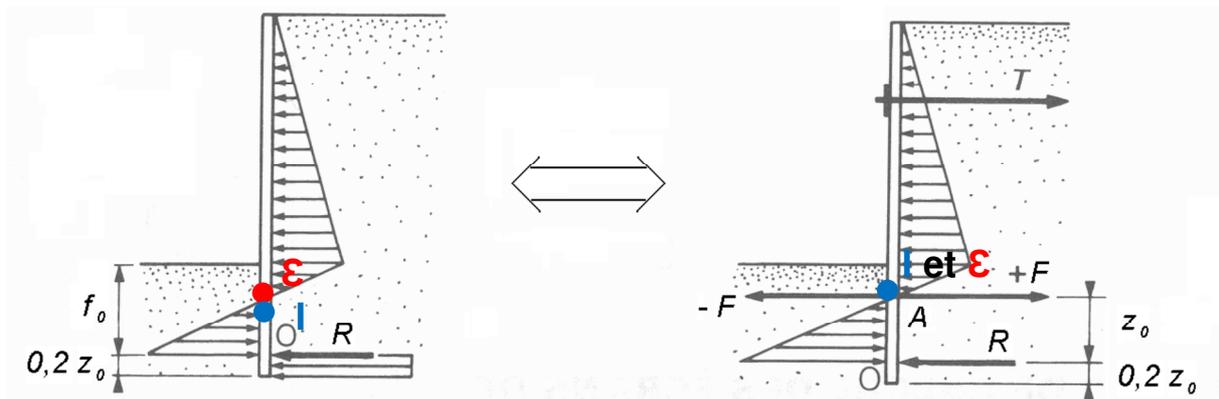


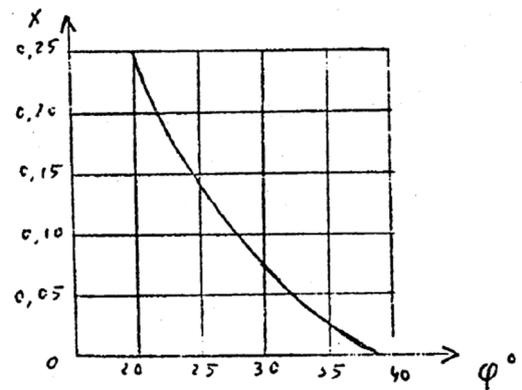
Figure 17 Résolution par la méthode de la poutre équivalente, d'après Balay

Par des études expérimentales, Blum a démontré que sa position définie par le nombre sans dimension « x » dépend de l'angle de frottements internes du matériau.

La détermination du nombre sans dimension « x » nous permet d'obtenir le point d'application du moment nul en I. I se trouvera à $H + x \times H$ de la tête des palplanches.

Figure 18 Détermination du nombre sans dimension « x » en fonction de l'angle de frottements internes du sol « ϕ° », d'après BLUM

On peut alors couper l'écran en deux poutres isostatiques (du pied de palplanche à I et de I à la tête) sur appui simple au niveau de ce point, et résoudre le problème.



1.2.1.4 Détermination de l'effort dans le tirant et de la fiche

Par résolution de l'équilibre des forces sur les deux poutres, on détermine T, F, R et z_0 la valeur de la fiche non pondérée (ou f_0) obtenue en calculant la somme des moments par rapport à O qui doit être égale à 0.

Il faudra alors appliquer une pondération à la valeur de f_0 de 20% pour obtenir la valeur définitive de la fiche.

Un coefficient de 1,3 est appliqué à l'effort trouvé pour le tirant.

1.2.1.5 Choix d'une palplanche et vérification

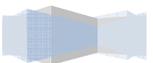
Le choix de la palplanche sera déterminé par la valeur du moment maximal que doit reprendre cette palplanche tel que :

$$M_{max} \leq M_{résistant\ palplanche}$$

$$\text{Avec, } \frac{I}{V} = \frac{M_{max}}{\sigma_{adm}} \quad \text{et, } \sigma_{adm} = \frac{2}{3} \sigma_e$$

Où σ_e est la limite élastique de l'acier (la nuance d'acier en MPa). La détermination de I/V mini ou WeI (moment d'inertie) permet de choisir une palplanche.

La méthode de Blum est une méthode qui se base sur des hypothèses nombreuses ce qui en fait une méthode approximative. Cependant, elle permet de comprendre le dimensionnement de la fiche et du type de palplanche pour un rideau de palplanche, voilà pourquoi nous avons choisi de présenter cette méthode de dimensionnement.



1.2.2 Le logiciel ProSheet ®

Le logiciel ProSheet ((C) ArcelorMittal Commercial RPS S.A.R.L), est un logiciel gratuit en accès libre sur le site d'ArcelorMittal. Il a été développé par ARBED¹³ et permet de définir de manière simple toutes les actions nécessaires au prédimensionnement d'un rideau de palplanche. Ce logiciel se base sur la méthode de Blum décrite précédemment, il convient donc de vérifier soigneusement ces résultats par un bureau d'étude spécialisé dans le dimensionnement de palplanches puisque la méthode de Blum ne prend pas en compte les effets de voûte, le phasage des excavations, l'apparition de charge en cours d'excavation et il ne permet pas de prendre en compte plusieurs lits de tirant.

Ce logiciel est utile uniquement dans le cas d'un pré-dimensionnement pour déterminer quel type de palplanche et quelles longueurs de fiche sont nécessaires pour un rideau afin de pouvoir réaliser les études de prix et le planning décisionnel.

ProSheet © se base sur l'un des trois systèmes statiques suivant :

- Rideau autostable,
- Rideau ancré ou butonné, simplement buté en pied (un seul niveau de tirants ou de butons),
- Rideau ancré et butonné, encastré en pied (un niveau de tirants ou de butons).

Les actions prises en compte pour le prédimensionnement du rideau sont les suivantes :

- Pression des terres à l'arrière du rideau (poussée, contre-butée),
- Pression des terres à l'avant du rideau (butée),
- Poussée hydrostatique à l'arrière du rideau,
- Poussée hydrostatique à l'avant du rideau,
- Surcharges uniformes infinies appliquées en surface (Caquot),
- Surcharges linéaires (maximum 5 surcharges) appliquées en surface ou à l'intérieur du massif (Boussinesq¹⁴),
- Efforts ponctuels appliqués en n'importe quel point du rideau (efforts concentrés),
- Pressions additionnelles à l'arrière du rideau.

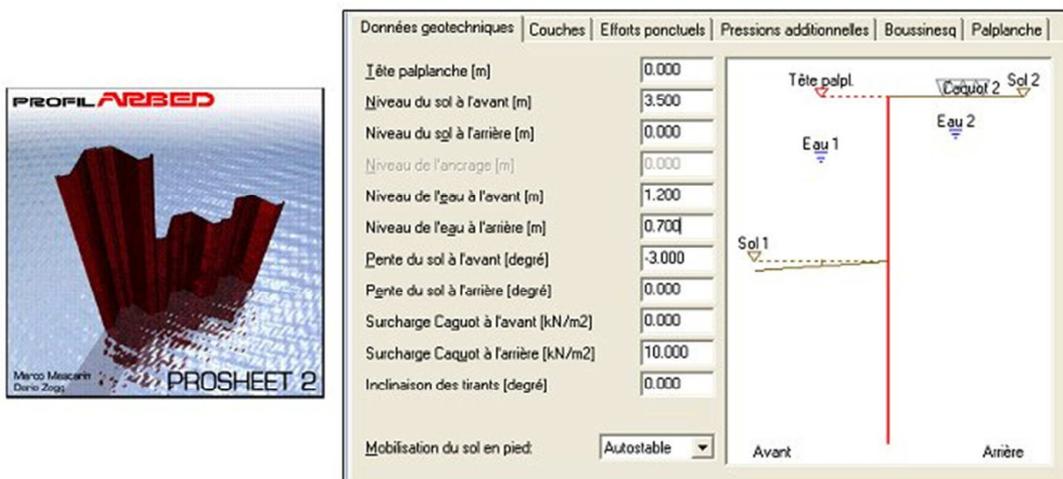


Figure 19 Présentation du modèle logiciel ProSheet®. Source : ProSheet®

¹³ Arbed : Acieries Réunies de Burbach-Eich-Dudelange / Groupe sidérurgique luxembourgeois fondé en 1911 qui a fusionné en 2002 puis 2006 pour former le groupe ArcelorMittal.

¹⁴ Boussinesq : Principe de répartition des contraintes d'une charge ponctuelle Q à partir de la surface du sol dans un massif semi infini.

1.3 Les modes opératoires

La fonction d'un rideau de palplanches est d'être fichée dans un terrain afin de reprendre des efforts verticaux et horizontaux. De façon typique, la fiche constitue 30 à 50 % de la hauteur totale du rideau si celui-ci est ancré (au moyen d'un ou plusieurs lits de tirants), cette valeur pouvant atteindre 70 % dans le cas de rideaux non ancrés (avec ceintures et/ou boutons en tête de rideau ou sans).

La mise en fiche d'un rideau de palplanches peut se faire à partir de trois méthodes :

- Le battage,
- Le vibrofonçage,
- Le vérinage.

Bien que le battage soit la méthode la plus ancienne, le vibrofonçage devient de plus en plus courant de nos jours. Le vérinage reste rare sur chantier. Dans cette partie, nous détaillerons avec précision chaque atelier de mise en œuvre sur différents critères comme les délais, les moyens déployés ou les avantages afin de mettre un maximum d'informations utiles en comparaison pour aider l'entrepreneur lors du choix d'un mode opératoire en fonction de ses contraintes propres à chaque chantier.

1.3.1 Choix d'un mode opératoire

Cette sous partie permet de mettre en avant les données importantes qui vont rentrer en jeu lors du choix de la mise en œuvre.

❖ **Condition in situ :**

- Présence de ligne haute tension,
- Présence de réseaux secs et humides à proximité (particulièrement les réseaux sous pressions sensibles aux vibrations et battage),
- Présence de bâtiments et état des bâtiments (vétuste ou aux normes sismiques actuelles),
- Place disponible dans l'emprise chantier,
- Travaux en site aquatique ou à terre,
- Nature des terrains.

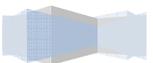
❖ **Conditions du marché/études :**

- Délais,
- Coût,
- Ouvrage définitif ou provisoire,
- Type de palplanche mise en place (matériau et type de profilé),
- Contraintes supportées par le rideau.

❖ **Conditions de l'entreprise :**

- Moyens humains alloués au chantier,
- Moyens matériels alloués au chantier,
- Machines disponibles.

Il est absolument nécessaire, avant de commencer un chantier de palplanches, d'analyser les conditions sur site, du marché et les possibilités de l'entreprise avant de faire un choix sur la méthode de mise en œuvre. Une bonne analyse de tous ces critères permettra de choisir la meilleure méthode non pas sur le critère du prix mais sur une analyse détaillée de tous les paramètres critiques qui permettront d'éviter les aléas chantier qui influenceront sur les rendements et donc sur le coût global du chantier.



1.3.2 Atelier de mise en fiche

1.3.2.1 Atelier de battage

❖ Principe de fonctionnement

Pour remplir au mieux sa fonction, un rideau de palplanches est battu bien à la verticale. La mise à l'aplomb permettra une meilleure pénétration dans le sol, de plus la palplanche sera également plus facile à arracher. Afin d'obtenir un aplomb et une implantation correcte du rideau, il est absolument nécessaire d'utiliser un guide à un ou deux niveaux si possible. De manière générale, la hauteur du guide est d'environ un tiers de la hauteur de la palplanche.

Figure 20 Guide palplanche à 1 niveau sur le chantier de la rive droite du Viqueirat (Arles)



Afin de favoriser la mise en œuvre, les palplanches seront entreposées par tas pour permettre un accès rapide lors de l'élingage.

Pour la mise en œuvre par battage, il existe trois types d'outils de battage qui sont :

- Le mouton¹⁵ hydraulique,
- Le mouton diesel,
- Le mouton sec / simple effet,
- le marteau trépideur¹⁶ ou double effet.

NB : Les chiffres renseignés dans les caractéristiques de chaque atelier de fonçage font référence aux fiches des constructeurs consultables à l'annexe 6.



← *Figure 22 Mouton hydraulique. Source : IHC.fr*

Figure 21 Mouton Diesel. Source : Delmag.com →



Figure 23 Trépideur Source : Pajot.com →



¹⁵ Ou marteau.

¹⁶ Trépider : Etre agité d'un tremblement saccadé. *Source : Larousse 1012*

Le mouton sec / simple effet

Le mouton sec, se caractérise par la chute d'une masse frappante sur la tête de palplanche au préalable protégée par une tête de battage. La remontée de la masse est assurée par un câble muni d'un crochet à déclic libérant cette masse d'une hauteur donnée ou par l'action d'un treuil à débrayage et embrayage rapides.

Dans le mouton simple effet, une masse frappante circulant à l'intérieur du cylindre est relevée grâce à ses fluides moteurs. Ainsi la masse frappante remonte et redescend sous l'action de son poids propre. L'énergie fournie (qui dépend de la masse et de la hauteur de chute) permet l'enfoncement de la palplanche.

❖ **Caractéristiques :**

- Cadence faible comprise entre 40 à 60 coups/min,
- Poids de la masse frappante entre une (pour les palplanches lourdes) à deux fois (pour les plus légères) le poids de la palplanche. Mise en place → entre 0,5 et 20 tonnes,
- Hauteur de chute entre 0,50 et 1,20m.

Le mouton pneumatique (trépideur) ou double effet

Le marteau à double effet est une amélioration du marteau hydraulique qui utilise l'air comprimé (ou de la vapeur) pour la remonter. La masse frappante, qui se trouve à l'intérieur du marteau, ne tombe plus de son propre poids mais est propulsée par air comprimé augmentant considérablement sa vitesse au moment du choc et donc l'énergie du coup. L'air ou la vapeur est acheminée dans le carter qui au moyen d'une vanne distribue alternativement la pression de part et d'autre de la masse mobile. 90 % de l'énergie du choc est transmise par air comprimé et seulement 10 % par le poids de la masse frappante

Le marteau trépideur est agrippé à la palplanche au moyen d'une ou plusieurs pinces en fonction du profilé. Cela permet non seulement de transmettre l'énergie du coup produit, mais aussi la vibration produite par la haute fréquence de frappe ce qui facilite la mise en fiche de la palplanche.

❖ **Caractéristiques :**

- Cadence de frappe élevée 150 à 600 coups/min,
- poids entre 100 à 4 000 kg,
- hauteur du marteau de 1 à 3,2 m,
- Fréquence entre 150 et 300 Hz,
- Poids de la masse frappante entre une (pour les palplanches lourdes) à deux fois (pour les plus légères) le poids de la palplanche mise en place,
- Energie du choc variable de 40 kg/m à 2500 kg/m par coup selon la taille du marteau,
- meilleur rendement parmi tous les types d'outils de battage,
- En position retournée, il peut être utilisé pour l'arrachage avec une position de battage de bas en haut.

Le mouton hydraulique

Le mouton hydraulique se compose d'une masse frappante enfermée dans un carter qui est soulevé par pression hydraulique. Il s'ensuit la chute de la masse frappante par l'action de l'apesanteur additionnée d'un surcroît d'accélération dû à une seconde pression hydraulique. L'accélération finale produite de 2g correspond à la chute de 1 m de la masse. Par cet apport d'énergie, l'opérateur peut contrôler l'énergie transmise à chaque coup dans la palplanche. De plus, il fonctionne aussi bien au-dessus que sous l'eau.

❖ **Caractéristiques :**

- Ne pollue pas comme le mouton diesel,
- Cadence de frappe variable entre 30 à 60 coups/min,
- Energie max/coup entre 35kNm à 3000kNm,
- Hauteur de chute réglable entre, 150 et 1,200m,
- Poids de la masse frappante entre 1,1 à 1,2 le poids de la palplanche + casque de battage, de 500kg à 8 tonnes.

Le mouton diesel

Un mouton diesel fonctionne selon les mêmes principes qu'un moteur thermique. La chute de la masse frappante provoque une compression et une explosion d'un volume d'air et d'une petite quantité de gazole. Il s'ensuit une détente des gaz et la remontée immédiate du piston. Ce mouvement cyclique permet l'enfoncement de la palplanche.

❖ **Caractéristiques :**

- Cadence faible comprise entre 40 à 60 coups/min,
- Poids de 1 à 30 t,
- Poids de la masse frappante de 0,5 (pour les plus lourdes) à une 1,5 fois (pour les plus légères) le poids de la palplanche mise en place → 500 kg à 20 tonnes environ,
- Energie du choc variable de 3000 à 24 200 kg/m,
- Hauteur de chute jusqu'à 4m,
- Outil entièrement autonome, ne nécessite aucun groupe électrogène car équipé d'un réservoir de gazole, d'une pompe à injection et d'un dispositif de graissage.



Tous les types de mouton, à l'exception du mouton sec (qui n'est plus utilisé), sont équipés d'un guide ou « pince » situé entre le mouton et la palplanche qui permet de maintenir la palplanche au moyen de pinces hydrauliques. Ce guide assure ainsi la transmission des efforts du mouton vers la palplanche, et permet le maintien de l'engin de battage sur la tête de palplanche. (Fiches techniques de mouton batteur disponibles à l'annexe6)

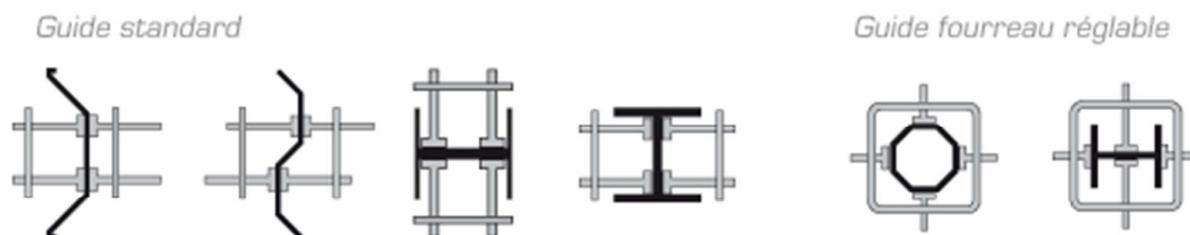


Figure 24 Exemple de guide adaptable sur les Trépideurs Pajot Source : Pajot.com

Dans tous les cas, le battage de palplanches nécessite la mise en place d'un casque sur la tête des palplanches mises en fiche. Ce casque évite ainsi la dégradation des palplanches sous l'action du battage répétitif de la masse frappante. Il est généralement fait d'acier moulé et sa partie inférieure s'adapte au profilé à mettre en place. Sur la partie supérieure du casque se trouve le martyr ou « tête de Turc » qui est un amortisseur dans le but de diminuer la détérioration du casque et qui permet de réduire les rebondissements du mouton. Ce martyr est en général constitué de bois ou de résine synthétique. (Pour de plus amples informations, se référer à l'annexe 7).



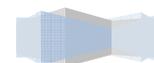
Figure 25 Exemple de casque de battage pour marteau hydraulique IHC Source : IHC.fr

Casque de battage ou « martyr »

- ❖ **Conditions du site**
 - Zone dégagée ou pleins champs,
 - Fortement déconseillé en zone urbaine à cause des fortes nuisances sonores.
- ❖ **Domaine géotechnique**
 - Sols pulvérulents à faible porosité¹⁷ (20 %) et fort angle de frottement (35 à 40 %),
 - Idéal dans les terrains où la résistance de pointe est élevée.
- ❖ **Délais/coûts**
 - Rendement¹⁸ de 11 à 14m/jour avec guide et 7 à 10m/jour sans (trépideur et diesel),
 - Coût élevé, **409.17 €/m² (selon étude de cas)**.
- ❖ **Moyens matériel**
 - Pelle hydraulique pour hauteurs (palplanches + outils de battage) de moins de 6 m,
 - Pelle à mât pour des hauteurs allant de 6 à 20 m,
 - Casque de battage,
 - Grue sur chenilles pour les grandes hauteurs,
 - Engins de battage (mouton batteur, mouton diesel,...),
 - Groupe électrogène.
- ❖ **Moyens humains**
 - 1 chef d'équipe,
 - 1 grutier ou pelleur,

¹⁷ La porosité d'un sol est définie comme étant le rapport de volume des vides sur le volume total. Source : Cours géotechnique CESFA BTP

¹⁸ Les rendements et prix sont obtenus avec l'entreprise DODIN IDF



- 1 manœuvre,
- 1 soudeur si nécessité de finition d'étanchéité au niveau des serrures.

❖ **Avantages**

- Rendement correct,
- Très efficace dans les terrains durs,
- Possibilité de passer du fonçage à l'arrachage après adaptation de l'outil (mouton pneumatique).

❖ **Inconvénients**

- Fortes nuisances sonores (environ 90 à 115 dB(A) à 7m),
- Mise en place de protections particulières sur les têtes de palplanches,
- Risque de déchirement des palplanches,
- Coût élevé,
- Difficultés pour faire la mise en fiche initiale de la palplanche, nécessité d'utiliser un vibrofonçeur dans certains cas.

❖ **Informations pratiques**

- Rien de particulier

1.3.2.2 Atelier de vibrofonçage

❖ **Principe de fonctionnement**

L'objectif d'une technique de mise en fiche par vibrations est de diminuer les frottements internes des sols non cohérents ce qui a pour effet de réduire les efforts latéraux des palplanches mises en place.

Ainsi le vibrofonçeur remplit ce rôle puisqu'il provoque une vibration énergétique à haute fréquence qui est transmise aux palplanches lors du fonçage ou de l'arrachage puisqu'ils y sont rigidement solidarités. « Les vibrations sont produites par les composantes verticales des forces d'inertie centrifuges, tandis que les composantes horizontales de ces mêmes forces s'annulent. » *Source : techniques de l'ingénieur, traité construction.*

Ces composantes sont produites par des masses excentriques appelées masselottes ou « balourds ». Elles sont disposées symétriquement par rapport à l'axe vertical du vibreur et tournent à vitesse constante mais en sens inverse les unes des autres.

Il en résulte une force centrifuge f_c dont les composantes horizontales « f_h » s'annulent et les verticales « f_v » s'additionnent ce qui donne une force centrifuge résultante notée « F_c ». Cette résultante crée une excitation sinusoïdale transmise à la palplanche qui s'enfonce progressivement dans le sol sous l'action de la gravité de la masse du vibreur.

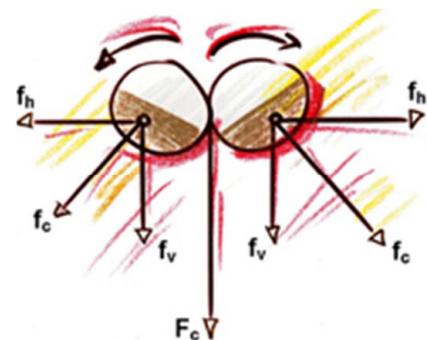


Figure 26 schéma de principe des résultantes engendrées par une paire de masselottes. *Source : ptc.fayat.com*

Le choix d'un vibrofonçeur pour un atelier de palplanches dépend de plusieurs paramètres :

- La profondeur de fiche,
- La porosité du sol,
- La nature des couches de terrain,
- Le poids de l'élément,
- Les caractéristiques géométriques de l'élément à mettre en place.

Le choix d'un type de vibrofonçeur est relativement plus complexe que pour un engin de battage puisqu'il dépend de paramètres plus techniques liés aux fréquences et aux

moments excentriques. Avant de donner les caractéristiques des vibrofonçeurs, il semble opportun de rappeler quelques notions de physique élémentaire¹⁹.

✚ Un moment d'excentricité notée «Mt » en Nm est le produit de la masse (m) par la distance (r) entre son sens de gravité et son axe de rotation. Dans le cas du vibrofonçeur, le moment d'excentricité résultant pour le vibrateur est égal à la somme des moments excentriques pour chaque masselotte :

$$Mt = \sum(m \times r) \text{ en Nm}$$

✚ Une force centrifuge notée «Fc » en kN est une force agissant sur un corps et une trajectoire curviligne et qui tend à le pousser vers l'extérieur. Comme précédemment, dans le cas d'un vibrateur, les composantes horizontales de cette force s'annulent tandis que les verticales s'additionnent. Pour chaque masselotte, la force unitaire (fc) est donnée par la formule :

$$fc = m \times r \times w^2 \text{ (où } w \text{ est la vitesse angulaire radian/s)}$$

✚ Pour le vibrofonçeur, la force centrifuge résultante est donnée par la formule suivante :

$$Fc = 1,118 \times Mt \times n^2 \times 10^{-5} \quad (Fc \text{ en kN, } Mt \text{ en m.kg, } n \text{ en tr/min)}$$

✚ L'amplitude notée «A » en mm dans le cas du vibrofonçeur, est le déplacement vertical total de l'ensemble vibrant durant une révolution complète des masses excentriques. Cette amplitude est donnée par la formule suivante :

$$A = \frac{2 \times Mt}{mv} \quad \text{où } mv \text{ est la somme des masses excentriques du vibrateur en tonnes.}$$

(A en mm, Mt en m.kg, mv en t)

Le fonctionnement des masses excentriques est assuré par des moteurs hydrauliques qui présentent un bon rapport poids/puissance, une vitesse de rotation variable des balourds, une grande souplesse d'utilisation et des performances élevées.

Une formule du fournisseur ArcelorMittal permet quant à elle de choisir un vibrofonçeur non pas en fonction des conditions géotechniques, mais en fonction de la masse du profilé à mettre en œuvre et de la profondeur de fonçage. D'après la formule d'ArcelorMittal :

$$F = 15 \times \left(\frac{t+2G}{100} \right)$$

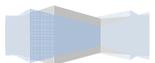
Avec :

- F la force centrifuge en kN,
- t la profondeur de fonçage en m,
- G la masse de la palplanche en kg.

Ainsi, la force centrifuge permet de choisir un vibrofonçeur adapté aux conditions de mise en fiche. (Fiches techniques de vibrofonçeurs disponibles en annexe 8)

❖ **Caractéristiques :**

- Vitesse de rotation des masselottes entre 1200 et 3000 tr/min,
- Fréquence comprise entre 20 à 50 hz,
- Moment d'excentricité entre 0 et 270 m.kg,
- Puissance hydraulique entre 18 et 1600 kw,
- Force centrifuge maxi entre 70 et 6200 kN,
- Traction maxi entre 25 et 1800 kN,
- Amplitude maxi entre 0 et 31 mm,
- Dimensions : environ 2500× 1000× 2800 (L×l×h),
- Poids hors guide d'attache (ou casque) entre 200 et 30000 kg.



¹⁹ D'après cours de physique du CESFA BTP et de notions élémentaires personnelles.

Enfin, parmi l'ensemble des vibrofonçeurs existants, on distingue trois gammes :

- Les vibreurs à fréquence standard comprise entre 1400 et 1700 t/min. Ces vibrateurs ont une amplitude importante et sont utilisés dans le cas d'environnements non sensibles à la vibration. Ils développent des puissances très élevées,
- Les vibreurs à haute fréquence comprise entre 2000 à 2300 t/min. Ils ont une très faible amplitude. Ils sont utiles dans le cas d'environnement sensible aux vibrations,
- Les vibreurs à moment variable qui permettent la mise en vibration de la palplanche uniquement lorsque la fréquence maximum est atteinte. Ce type de vibreurs permet de travailler au plus près de bâtiment ou d'ouvrages sensibles aux vibrations puisqu'il évite la mise en vibration progressive du terrain.



Figure 27 Exemple de vibrofonçeur à fréquence standard. Source : tecnoterra.ch→

←Figure 28 Exemple de vibrofonçeur à haute fréquence à moment variable monté sur une grue télescopique. Source : PTC-Fayat Group



← Figure 29 Exemple de vibrofonçeur à fréquence standard monté sur une pelle hydraulique. Source : PTC-Fayat Group



❖ Conditions de site

- Zones urbaines,
- Zones à proximité d'ouvrages sensibles aux vibrations,
- Pleins champs.

❖ Domaines géotechniques

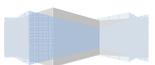
- Sol sableux ou sablo-argileux ayant une porosité comprise entre 25 et 40 %,
- Sols argileux si utilisation de vibreurs à fortes amplitudes,
- Peu conseillé dans les terrains où la résistance de pointe est élevée.

❖ Délais/coûts

- Rendement optimal de 22 à 25 m/jour,
- Coût relativement faible en comparaison du battage et du vérinage, **296.26 €/m² (selon étude de cas)**.

❖ Moyens matériels

- Pelle hydraulique pour les petites hauteurs de moins de 6 m,
- Pelle à mât pour engins de battage de 6 à 20 m,
- Grue sur chenilles pour des hauteurs de plus de 20 m,
- Vibrofonçeur,
- Groupe électrogène.



❖ **Moyens humain**

- 1 chef d'équipe,
- 1 grutier ou pelleur,
- 1 manœuvre,
- 1 soudeur si nécessité de finition d'étanchéité au niveau des serrures.

❖ **Avantages**

- Forts rendements,
- Mise en œuvre rapide,
- Adaptation de la fréquence de vibration à la nature du sol,
- Nuisances sonores plus faibles que par battage (environ 70 à 90 dB(A) à 7m),
- Vibreurs adaptables directement sur le système hydraulique d'une pelle,
- Passage instantané de la mise en fiche à l'arrachage par inversement de la rotation des masselottes.

❖ **Inconvénients**

- Les vibrations peuvent être préjudiciables pour les bâtiments existants à proximité,
- Nécessité d'engins de manutention importants et onéreux pour les vibrofonçeurs performants.

❖ **Informations pratiques**

✚ Les améliorations techniques concernant les systèmes de vibrofonçage réduisent considérablement les nuisances dues aux vibrations. De nouvelles améliorations permettent de contrôler avec précision les fréquences vibratoires. Elles réduisent au maximum les vibrations préjudiciables transmises au terrain au démarrage et à l'arrêt du vibrateur puisque l'excentricité des masselottes n'est effective qu'une fois la fréquence de travail atteinte.

✚ Afin d'assurer l'implantation et la mise à l'aplomb, il est nécessaire d'utiliser un système de guidage. C'est un guide mis en place au niveau de l'alignement du rideau, ou l'utilisation d'une machine avec mât de battage sur lequel sera installé le vibrofonçeur.

✚ Il est nécessaire d'associer au vibrateur un guide ou casque, qui, au moyen de pinces hydrauliques, maintiendra la palplanche afin d'assurer la bonne mise en fiche et la transmission des vibrations produites par le vibrofonçeur à la palplanche.

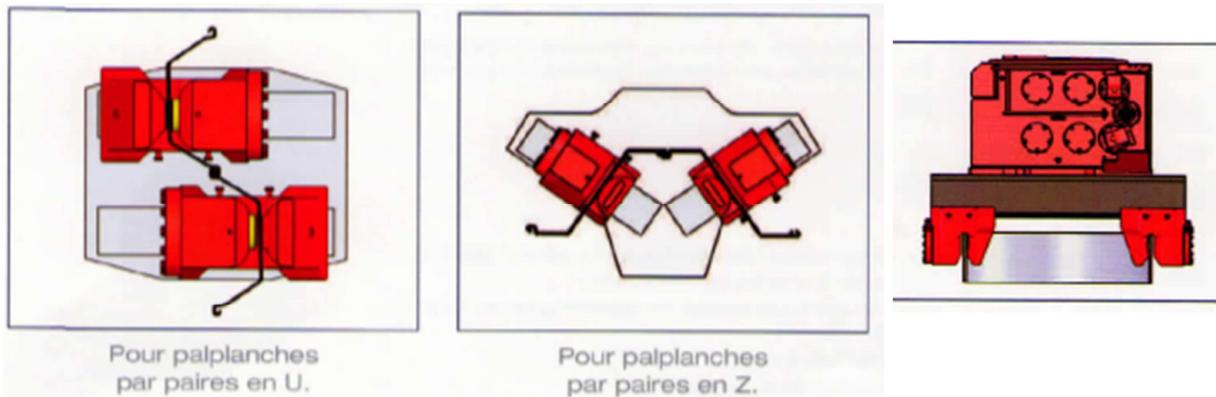


Figure 30 Exemple de casque ou guide pour palplanche en U, en Z et pour tube. Source : PTC-Fayat group

✚ Afin de prévenir tout préjudice à l'entreprise, un relevé des bâtiments proches du lieu mis en place peut être demandé par la direction de travaux ou le maître d'ouvrage. Si un relevé n'est pas imposé, il est grandement conseillé d'en faire un avant pendant et après la mise en œuvre ce qui permet, en cas de litige avec le voisinage, de déterminer la part des responsabilités.

✚ Il est absolument primordial de déterminer la valeur de vibration limite pour les constructions et bâtiments environnants donnée par la norme *SN EN 12 063, Exécution de travaux géotechniques spéciaux - rideaux de palplanches*.

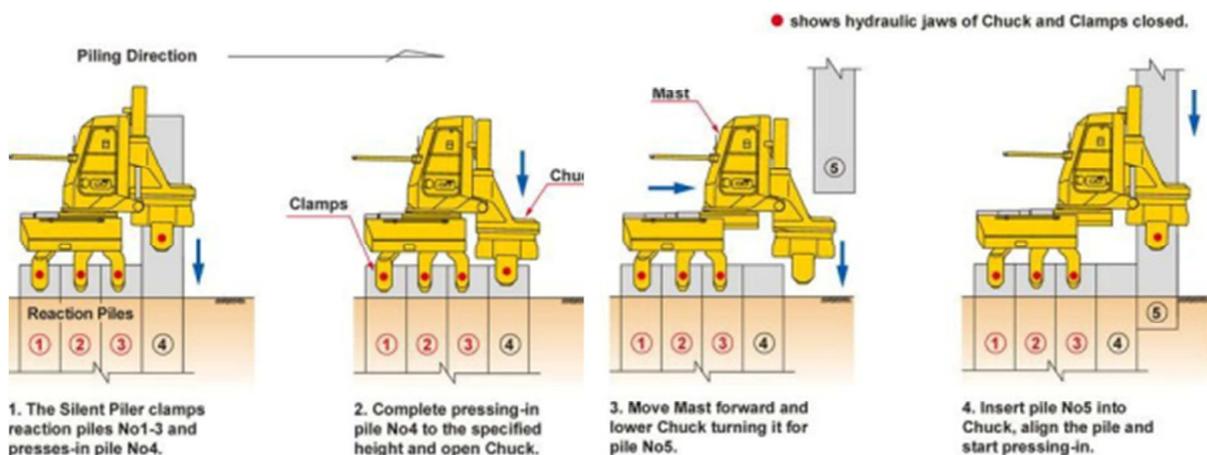
1.3.2.3 Atelier de vérinage

❖ Principe de fonctionnement

Un vérineur est une machine hydraulique utilisée pour le fonçage des palplanches mais également pour l'extraction de celles-ci. Cet appareil de vérinage est complètement télécommandé par un opérateur et utilise la force de réaction des palplanches dans le sol pour la mise en fiche de la palplanche suivante. Cette opération de fonçage est composée de huit phases qui permettent la réalisation d'un rideau de palplanches (voir figure 31).

- **1^{ère} phase** : La machine s'accroche sur les palplanches (n°1 à 3) mises en fiche grâce à plusieurs pinces avec un système de blocage qui se verrouille verticalement sur la partie supérieure des palplanches. Une fois l'appui réalisé, une palplanche (n°4) est mise en place dans le guide de la machine au moyen d'une grue légère. La machine procède à l'enfoncement progressif de cette palplanche par pression dans le terrain à la suite des palplanches déjà fichées. Afin que la poussée verticale exercée par l'engin soit efficace et ne détériore pas la mise en fiche des palplanches précédentes, il est nécessaire de procéder à la soudure des palplanches au fur et à mesure de l'avancée du rideau.
- **2^{ème} et 3^{ème} phases** : Une fois la palplanche mise en fiche à la profondeur souhaitée (2^{ème} phase), la machine coulisse sur son support et est alimentée en palplanches par une grue pour la mise en fiche suivante.
- **4^{ème} phase** : Le vérineur procède à la mise en fiche de la palplanche (n°5).
- **5^{ème} et 6^{ème} phases** : Au cours de la mise en place de la deuxième palplanche, les pinces d'appui du support se déverrouillent, l'engin prenant appui sur la palplanche partiellement mise en fiche se soulève d'une soixantaine de centimètres.
- **7^{ème} phase** : une fois le vérineur et le support soulevés, le support se rapproche de la palplanche (n°5) mise en fiche partiellement.
- **8^{ème} phase** : Le vérineur et le support redescendent sur les palplanches (n°2,3 et 4) et les pinces viennent se verrouiller sur les dernières palplanches mises en œuvre. Le fonçage de la palplanche (n°5) reprend.

La répétition de ces huit phases permet la réalisation complète d'un rideau de palplanches.



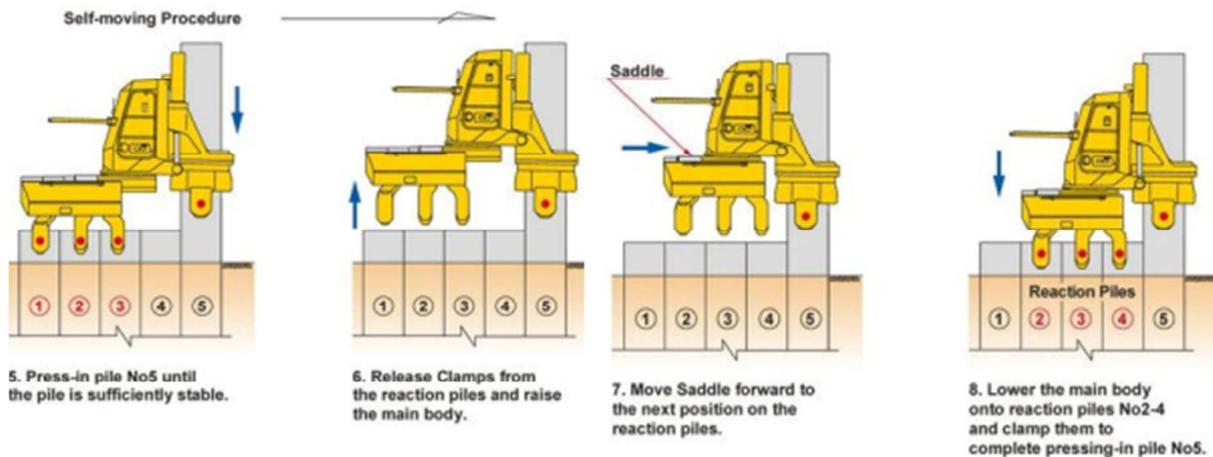


Figure 31 Schématisation des phases de mise en fiche des palplanches par vérinage. Source : GIKEN.co.uk

❖ Caractéristiques :

- Force d'enfoncement max de 100 à 1000 tonnes,
- Force d'extraction max de 100 à 1000 tonnes,
- Dimensions : environ 3×1×2,5m (L×l×h),
- Poids de 8 à 25 tonnes.

(Fiches techniques de vérineurs disponibles en annexe 9)

Toutefois, pour la mise en place des premières palplanches ou pour la mise en place d'un raccord d'angle suivi des palplanches qui le suivent, il est nécessaire que le vérineur prenne appui sur un châssis de démarrage lesté suffisamment pour pouvoir permettre la mise en place des premières palplanches du rideau.

Pour ce qui est de l'extraction des palplanches, la machine adopte le même principe de fonctionnement mais en sens inverse.

❖ Conditions de site

- Zones urbaines à proximité de bâtiments,
- Idéal pour les proximités avec des bâtiments anciens ou fragiles,
- Sites à proximité de voies ferrées.

❖ Domaines géotechniques

- Sols sableux ou sablo-argileux,
- Sols argileux pour les vérineurs performants,
- Peu conseillé dans le terrain rocheux.

❖ Délais/coûts

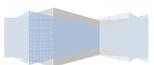
- Vitesse d'enfoncement et d'extraction d'environ 1,5 à 32 m/min (en fonction des terrains, de la machine, du profilé),
- Coût de réalisation moyen, **301.35 €/m² (selon étude de cas)**.

❖ Moyens matériels

- Presse hydraulique,
- Groupe électrogène,
- Pelle hydraulique ou grue.

❖ Moyens humains

- 1 chef d'équipe,
- 1 opérateur pour télécommander le vérineur,
- 1 grutier ou pelleur,
- 1 manœuvre,
- 1 soudeur.



❖ **Avantage**

- Aucune vibration,
- Idéal pour les endroits peu accessibles,
- Nécessite une grue de petit gabarit (uniquement pour la manutention des palplanches),
- Très faibles nuisances sonores, produites uniquement par le groupe hydraulique qui alimente le vérineur (environ 60 à 75 dB(A) à 7m),
- Idéal à proximité de bâtiments,
- Possibilité de fonçage d'un grand type de profilés (tube, caisson, mixte HZ, H, Z, plat) selon la machine utilisée,
- Double utilisation : mise en fiche/extraction.

❖ **Inconvénients**

- Utilisation d'un engin uniquement pour l'approvisionnement des palplanches,
- Difficultés de mise en œuvre dans les terrains durs,
- Rendement faible.

❖ **Informations pratiques**

✚ Bien tenir compte dans l'installation de chantier qu'un engin de levage est nécessaire pour guider les palplanches dans la presse hydraulique. Il faudra donc vérifier la possibilité d'accessibilité de l'engin de levage à la presse ainsi que le dimensionnement de la pelle ou de la grue pour la manutention du vérineur et du groupe électrogène.

✚ La précision de l'alignement est assurée par un viseur laser installé dans l'alignement du rideau de palplanche quelques mètres devant le vérineur. La verticalité est vérifiée au niveau avant et pendant la mise en fiche.

✚ Dans certains types de terrain (sols cohésifs et granuleux), un bouchon de résistance important se forme au pied de la palplanche. Cela réduit le rendement de la machine et obstrue bien souvent les serrures des palplanches. Une méthode récente consiste à équiper la palplanche mise en place d'une lance en acier résistant ou d'un flexible et d'injecter de l'eau sous pression au niveau du pied de la palplanche. Cela permet de réduire l'effort de pointe en ameublissant temporairement le terrain. Cette méthode est appelée le « lançage ».

✚ Pour les gros chantiers de palplanches (plus de 100 ml de palplanches), il est intéressant d'utiliser un système de grue à pinces. Ce système est entièrement mis en place sur le rideau de palplanche, il est composé d'un groupe électrogène sur pinces qui alimente le vérineur et la grue, une grue sur pinces qui alimente en palplanches le vérineur, et d'un chariot transportant les palplanches également sur pinces. Tous ces éléments sont à la suite du vérineur. Ce procédé permet de réduire considérablement l'emprise du chantier et est très efficace dans le cas de rideau linéaire type protection de berges.

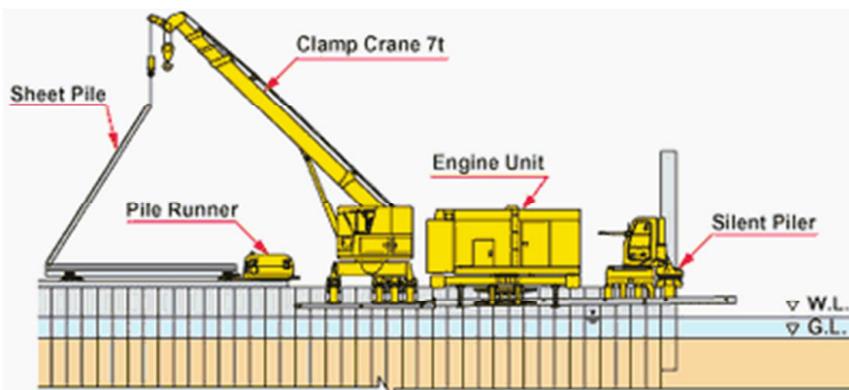


Figure 32 Schématisation d'un atelier de vérinage avec grue à pince. Source : GIKEN.co.uk

Dans le cas de sol à forte cohésion pour l'extraction de profilés de grandes dimensions, il est possible d'avoir recours à un vérineur au sol équipé de deux vérins qui peuvent fournir un effort très important compris entre 400 et 1000 tonnes (uniquement pour l'extraction des palplanches). (Fiche technique à l'annexe 10)

Pour la mise en place de caisson ou de plusieurs palplanches en simultanément, il existe un système appelé «push pull system » fourni par Dawson. (Fiche technique à l'annexe 10)

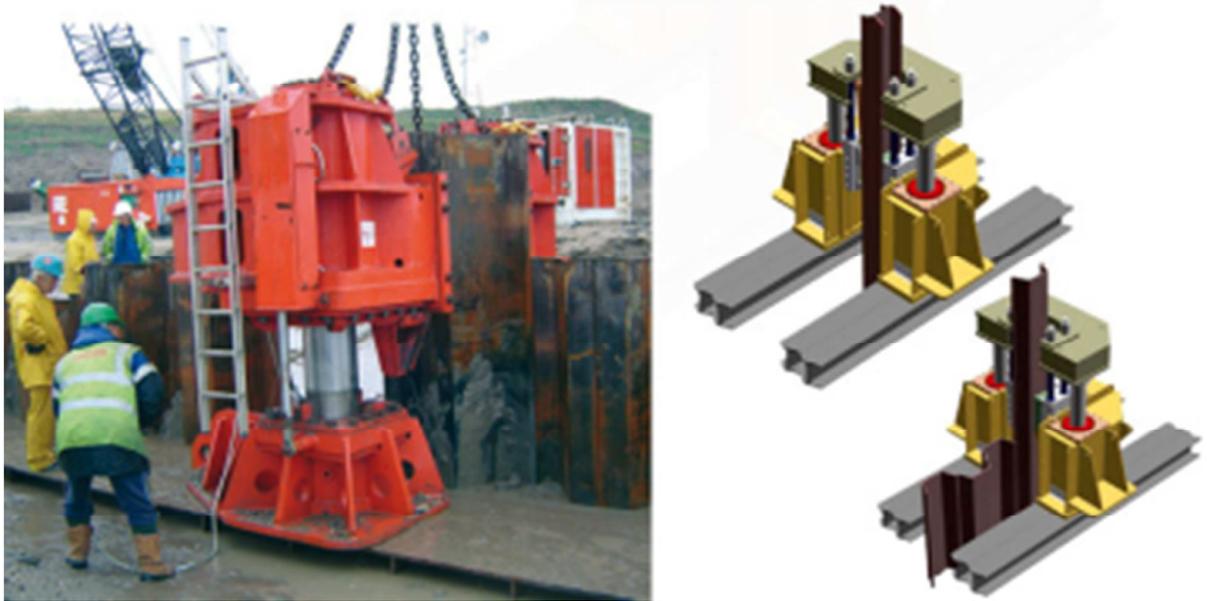
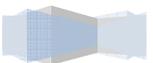


Figure 33 Exemple de vérineur au sol. Source : PAJOT.com



Figure 34 Exemples de vérineurs silent piler giken ECO 700S. Source : GIKEN.co.uk



1.3.3 Tableau comparatif des différents ateliers de fonçage

Tableau comparatif des différents ateliers de fonçage			
Ateliers de fonçage	Atelier de battage	Atelier de vibrofonçage	Atelier de vérinage
Types d'engins utilisés	<ul style="list-style-type: none"> Mouton sec/simple effet, Mouton hydraulique, Mouton diesel, Marteau trépideur. 	<ul style="list-style-type: none"> Vibreux à fréquence standard, Vibreux à haute fréquence, Vibreux à moment variable. 	<ul style="list-style-type: none"> Vérineur à pinces, Système vérineur + grue à pinces, Vérineur au sol, Push Pull System.
Valeurs caractéristiques du rendement	<ul style="list-style-type: none"> Cadence de frappe, Energies du choc. 	<ul style="list-style-type: none"> Force centrifuge, Moment excentrique, Amplitude, Vitesse de rotation. 	<ul style="list-style-type: none"> Force d'enfoncement, Force d'extraction.
Conditions favorables du site	<ul style="list-style-type: none"> Zone dégagée, 	<ul style="list-style-type: none"> Zone urbaine, Proximité d'ouvrages sensibles, Zone dégagée. 	<ul style="list-style-type: none"> Zone urbaine, Idéal pour la proximité de bâtiments anciens ou fragiles, Sites à proximité de voies ferrées
Domaines géotechniques	<ul style="list-style-type: none"> Sols pulvérulents, Faible porosité, Fort angle de frottement, Idéal terrain dur. 	<ul style="list-style-type: none"> Sols sableux, Sols sablo-argileux à faible porosité, Sols argileux pour vibreur de forte amplitude. 	<ul style="list-style-type: none"> Sols sableux, Sols sablo-argileux à faible porosité, Sols argileux pour vérineur performant (vérineur au sol).
Délais/coûts	<ul style="list-style-type: none"> 100 à 150 m²/ jour, Coût élevé. 	<ul style="list-style-type: none"> 150 à 200 m² /jour, Coût environ 15 % moins cher que battage. 	<ul style="list-style-type: none"> 60 à 80 m²/jour, Vitesse d'enfoncement de 1,5 à 25 m/min, Coût moyen entre le vibrofonçage et le battage.
Moyens matériels	<ul style="list-style-type: none"> Pelle hydraulique (-6m), Pelle à mât (6 à 20m), Grue à chenilles (+ 20m), Engin de battage, Groupe électrogène. 	<ul style="list-style-type: none"> Pelle hydraulique (-6m), Pelle à mât (6 à 20m), Grue à chenilles (+ 20m), Vibrofonçeur, Groupe électrogène. 	<ul style="list-style-type: none"> Presse hydraulique, Groupe électrogène, Pelle hydraulique ou grue.
Moyens humains	<ul style="list-style-type: none"> 1 chef d'équipe, 1 grutier ou pelleur, 1 manœuvre, 1 soudeur si finition étanchéité 	<ul style="list-style-type: none"> 1 chef d'équipe, 1 grutier ou pelleur, 1 manœuvre, 1 soudeur si finition étanchéité 	<ul style="list-style-type: none"> 1 chef d'équipe, 1 opérateur, 1 grutier ou pelleur, 1 manœuvre, 1 soudeur impératif.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> Bon rendement, Efficace en terrain dur, Fonçage/arrachage possible après adaptation 	<ul style="list-style-type: none"> Fort rendement, Adaptation de la fréquence au sol, Nuisances sonores admissibles (70 à 90 dB(A)), Fonçage/arrachage possible sans adaptation. 	<ul style="list-style-type: none"> Aucune vibration, Très faible dans nuisances sonores (60 à 75 dB(A)), Fonçage/arrachage sans adaptation, Idéal pour les endroits peu accessibles.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation d'un guide à palplanches, Fortes nuisances sonores (90 à 115 dB(A)), Casque en protection, Détérioration des palplanches. 	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation d'un guide à palplanches, Engins de manutention important pour vibrofonçeur performant, Vibrations peuvent être préjudiciables. 	<ul style="list-style-type: none"> Difficultés dans les terrains durs, Rendement plus faible.
Principaux fabricants	<ul style="list-style-type: none"> IHC, PAJOT, DELMAG. 	<ul style="list-style-type: none"> PAJOT, PTC (FAYAT GROUP), IHC 	<ul style="list-style-type: none"> DAWSON, GIKEN, PAJOT.
Informations particulières	<ul style="list-style-type: none"> Mise en place casque de battage. 	<ul style="list-style-type: none"> Relevé topographique + mesure vibrations 	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation d'un châssis de démarrage.

2 Qualité sécurité environnement (QSE)

Sur un chantier de palplanches, comme tout autre chantier, il est demandé de faire au préalable une analyse des risques et de définir les actions préventives et correctives qui seront mises en œuvre pour assurer la sécurité, la qualité et le respect de l'environnement. En dehors des risques courants rencontrés sur la plupart des chantiers, on trouve sur les chantiers de palplanches des risques particuliers liés notamment aux différentes méthodes de mise en fiche qu'elles soient sur voies terrestres ou fluviales.

2.1 Analyse des risques

Les principaux risques rencontrés d'après le manuel de l'OPPBTP fiche de sécurité D2 F 02 94 (se référer à l'annexe 11) sont :

- Effondrement par sous-dimensionnement,
- Risques liés au terrain,
- Chutes de hauteur du personnel,
- Heurts au cours des manutentions,
- Coincement des mains,
- Risques propres au matériel de fonçage,
- Renversement de l'engin porteur,
- Renversement de matériels mal entreposés,
- Bruit,
- Risques dus au chalumeau.

Cette liste est non exhaustive et demande une approche plus détaillée du site en question et du matériel présent sur le chantier. Une bonne reconnaissance du site permettra de pallier à un défaut de dimensionnement, à des risques dus à la présence de réseaux souterrains ou aériens non renseignés.

2.2 Moyens de prévention

Une attention toute particulière sera portée au bureau d'études qui sera de préférence un bureau d'études spécialisé. Les précautions particulières liées aux études sont :

- Prise en compte de charges spécifiques au chantier telles que la circulation d'engins ou des surcharges importantes en tête de rideau,
- Vérification de l'étanchéité du rideau en milieu aquifère, qui est un point important et ne doit pas être négligé. Il est important de vérifier que la profondeur de fiche est suffisante ou éventuellement de procéder à un étanchement du fond de fouille par injection ou réalisation de dalle en béton,
- Mise en place d'une ceinture de profilés en tête de palplanches ou de butons provisoires afin de limiter les déplacements en partie supérieure (pour les faibles hauteurs de rideau, la mise en place d'un simple rideau encastré peut être suffisante). Dans le cas de rideau de grande profondeur ou reprenant des charges importantes, la mise en place d'ancrage intermédiaire (tirant d'ancrage actif ou passif) est nécessaire et devra être calculée selon les règles en vigueur.

Précautions particulières spécifiques liées à la manutention, fonçage et stockage :

- Utilisation de pinces de manutention systématique et adaptées au profilé. Elles permettent d'éviter le décrochage accidentel du profilé en cours de manutention. Les pinces de manutention par friction sont prohibées car elles peuvent entraîner une chute accidentelle du profilé,
- Eviter au maximum la présence de salariés dans les zones de manutention,
- Mettre à disposition des protections auditives adaptées à la nature et l'intensité du bruit. Si les nuisances sonores sont importantes (cas du battage) mettre en place des

systèmes de réduction sonore (écrans antibruit, housse antibruit autour des moutons) dans le cas de chantiers urbains,

- Attribution d'une aire de stockage adaptée et mise en place de calage correct et adapté au profilé de palplanches de telle sorte que les caractéristiques mécaniques ne sont pas altérées,
- Les guides doivent être stabilisés par un contrepoids ou par fixation à des points autre que le rideau de palplanches,
- Utilisation si possible d'un enclencheur lors de l'emboîtement de deux palplanches qui permet aux manœuvres l'enclenchement à plusieurs mètres de hauteur des profilés au moyen d'une corde.

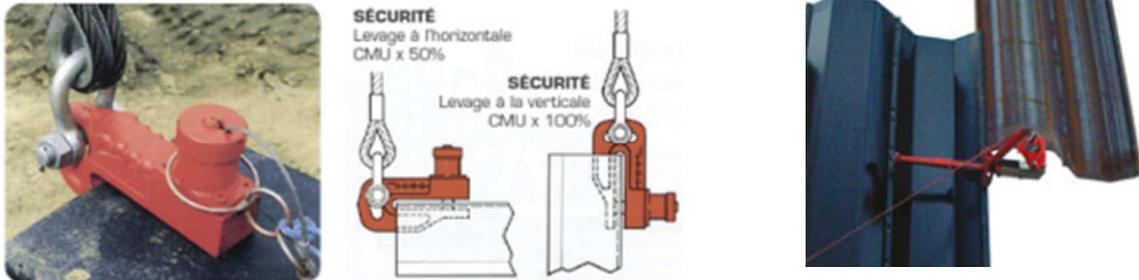


Figure 35 principes d'attache d'une pince de manutention (à gauche) et utilisation d'un enclencheur pour l'emboîtement de palplanches (à droite). Source :Pajot.com

2.3 Qualité

Pour assurer la bonne qualité d'exécution d'un rideau de palplanches, il est nécessaire d'établir un plan d'action qualité (PAQ), qui reprend les principaux critères concernant la qualité d'exécution telle que l'implantation, la mise à l'aplomb, la profondeur de fonçage, la pose selon les plans des liernes et butons ou la réalisation correcte des ancrages.

Dans le cas d'un atelier de vibrofonçage, il est obligatoire de respecter la norme SN EN 12 063, *Exécution de travaux géotechniques spéciaux - rideau de palplanches*, concernant les valeurs limites de vibrations pour les bâtiments et constructions environnantes. Pour cela il est conseillé de mettre en place un appareil de mesure des vibrations durant toute la mise en œuvre des palplanches ou de faire des relevés réguliers afin de veiller au respect de la norme. Les levés servent aussi de preuve en cas de préjudice (voir l'annexe 12).

2.4 Environnement

Les palplanches sont dans la plupart des cas utilisées pour des ouvrages provisoires et dans ce cas l'utilisation de l'acier est optimale puisqu'il est 100 % recyclable et qu'on peut l'extraire facilement après sa mise en fiche.

Mais dans le cas d'ouvrages définitifs tels que les protections de berges, la réalisation de quais maritimes ou de barrages, l'acier est peu recommandé car il se corrode de même que le bois, qui ayant subi des traitements préalables à base de solvants, peut rejeter des matières nocives. Pour limiter l'impact sur l'environnement, les ingénieurs se sont tournés, ces dernières années, vers de nouveaux matériaux innovants qui ne nécessiteraient pas de traitements toxiques pour l'environnement et qui ne réagiraient pas ou très peu aux agressions des agents extérieurs.

Ainsi sont apparues sur le marché les palplanches en PVC et en fibre de verre qui sont idéales pour les ouvrages définitifs à profondeur moyenne (environ 10 m) et qui ne subissent aucun traitements ni rejets toxiques pour l'écosystème. De plus les palplanches ont une excellente durabilité de plus de 50 ans. On utilise les mêmes méthodes de mise en œuvre que les palplanches en acier.

3 Etude d'un cas pratique

3.1 Présentation de l'étude

Dans le but d'illustrer et de mettre en application ce guide technique concernant la mise en place d'un rideau de palplanche, nous avons décidé de réaliser l'étude d'un cas pratique en partant des hypothèses et contraintes imposées pour un chantier standard, afin de réaliser le dimensionnement de cette étude. S'en suivra une analyse du choix du mode opératoire avec devis et rendement. Enfin cette étude mettra en comparaison directe la réalisation de ce cas pratique en fonction des trois méthodes de fonçage en prenant en compte l'ensemble des facteurs du chantier (délais, rendement, planning, mains d'œuvre, étude de prix, retour sur expérience).

❖ Hypothèses envisagées

Notre étude de cas portera sur un cas standard d'utilisation de palplanche, à savoir une utilisation provisoire pour le remplacement ou la pose d'équipement et de réseaux (utilisation en blindage pur). Dans notre cas, nous aurons à réaliser un chantier pour le remplacement d'un séparateur d'hydrocarbure (voir l'annexe 13 pour le plan d'exécution). Notre cahier des charges définit le projet par les hypothèses suivantes :

- Zone industrielle,
- Aucune contrainte environnante (présence de réseaux, d'habitation,...)
- Linéaire du blindage = 32,4ml,
- Mise en place de 4 raccords d'angles à 90°,
- Profondeur de mise en place du séparateur=5m,
- Mise en place d'une ceinture en HEB à 1m de profondeur,
- Mise en place de palplanche acier en U (vis-à-vis du recyclage futur de ces palplanches une fois le chantier fini),
- Déformation maximum tolérée d'une palplanche=20mm.

❖ Conditions géotechniques

Dénomination	γ_h (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ϕ_u (°)	C_u (kN/m ²)	Epaisseur (m)	Kph (T/m ² /m)	Kah (T/m ² /m)
Remblai	18	10	25	1	3	3,103	0,449
Alluvion moderne	18	11	30	1	20	4,8	0,402

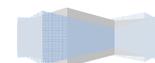
3.2 Dimensionnement et vérifications

❖ Dimensionnement avec PROSHEET

Nous avons utilisé le logiciel ProSheet fourni par le groupe ArcelorMittal, car nous ne possédons pas de logiciel de dimensionnement dans notre entourage et que celui-ci était gratuit à l'inverse des logiciels standard de calcul qui sont très onéreux.

L'utilisation de ProSheet nécessite la connaissance de certains paramètres, qui sont :

- La profondeur de la nappe,
- Le profil de la palplanche souhaitée,
- Les différentes couches dans le sol et leurs caractéristiques (voir conditions géotechniques),
- Les charges d'exploitation ainsi que les charges de chantier. (Grues, circulation, matériels,...),
- Les charges de Caquot et Boussinesq si présentes,
- La position d'un éventuel tirant avec son inclinaison ou d'une ceinture.



La modélisation de ProSheet nous donne (consulter l'annexe 14):

- Le type de palplanche recommandée d'après les profils en U,
- Les diagrammes des déformations
- Les moments fléchissant,
- Les efforts tranchant,
- La longueur de fiche pondérée.

L'analyse de ces diagrammes nous permet de déterminer l'effort repris par un tirant ou la ceinture dans notre cas en calculant la différence des efforts tranchant à 1m de profondeur.

On obtient :

- $F_t = 114.84kN$ à 1m de profondeur,
- $M_{max} = -119.5 kN/m$ à 3.5m de profondeur,
- $T_{max} = -151.52 kN$ à 8.497 m de profondeur,
- fH (fiche pondéré) = 3.497m,
- ProSheet recommande une palplanche en U de type PU22 (consulter l'annexe 1)
- La déformation maximale est de 4mm à 3.75m de profondeur ce qui vérifie la condition du cahier des charges puisque c'est bien inférieur à 20mm.

❖ Méthode analytique et comparaison des résultats

Dans l'objectif de fournir une synthèse enrichissante et scientifique, nous avons réalisé cette même étude au moyen de la méthode de Blum afin de vérifier et de comparer ces résultats obtenus avec ProSheet. La note de calcul est disponible à l'annexe 15.

La méthode analytique de Blum nous donne :

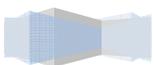
- $F_t = 112.75kN$ à 1m de profondeur,
- $M_{max} = -124 kN/m$ à 3.16m de profondeur,
- fH (fiche pondéré) = 5.47m,
- Un moment statique mini de $783cm^3 = Wel$ en théorie, une PU18 suffirait car $Wel = 1055cm^3$, (consulter l'annexe 1),

❖ Analyse des résultats

A la suite de ce double dimensionnement, on peut observer que les résultats de la méthode de Blum sont supérieurs à ceux de ProSheet, cela est en partie dû aux approximations de la méthode analytique mais aussi aux paramètres de poussée (K_a) et de butée (K_p) qui ne sont pas les mêmes dans l'étude de ProSheet.

On valide les résultats obtenus avec ProSheet puisqu'ils nous semblent cohérents avec l'étude analytique. Il nous faudra donc mettre en place des palplanches type PU22. Nous avons choisi de prendre des longueurs de palplanche de 10 mètres (Fiche + Hauteur d'excavation + garde-corps) afin de pouvoir laisser les palplanches dépasser en tête pour servir de garde-corps. Une ceinture en HEB est également à mettre en place à 1 mètre de profondeur afin de faciliter le phasage lors de l'excavation (mise en place de la ceinture dès le premier terrassement juste après la fin du fonçage des palplanches ce qui nous permet d'assurer une continuité de travail au soudeur). La ceinture sera faite en HEB 500 d'après la note de calcul en annexe 16 et selon la disposition schématique de cette même annexe.

Sachant qu'une PU22 fait 0.6 m de large, nous souhaitons les mettre en place par paires ce qui est envisageable (emboîtement directement chez le fournisseur avant livraison). Le linéaire de palplanche étant de 32.4ml, il nous faudra alors $\frac{32.4}{0.6} = 54$ palplanches, soit 27 paires pré-assemblées de 10m de longueur. Il faudra également lors de la commande prendre 4 raccords (2 raccords Oméga18 de 10 m de long et 2 raccords C14



de 10 m également) selon la disposition particulière présentée dans le plan d'exécution à l'annexe 14.

Dans le cadre de notre synthèse, nous avons souhaité réaliser une étude prix comparative des trois méthodes de la même manière que nos tableaux comparatifs présents dans la synthèse. Pour cela, nous avons eu besoin de contacter et de demander des devis à chacun des fournisseurs principaux (PAJOT, PTC, ArcelorMittal) afin d'appuyer notre étude de cas sur des valeurs fiables et mises à jour pour la période juillet – octobre 2011.

3.3 Analyse des coûts induits par chaque atelier

❖ Atelier Bureau d'étude

Nous avons demandé l'ordre de prix pour ce genre de dimensionnement ainsi que la réalisation des plans d'exécution à un bureau d'étude. (SOECO²⁰) Le devis estimatif qui nous a été fourni est de 2200 € pour 4 jours de délai. (Rappel : Le dimensionnement définitif d'exécution d'une palplanche ne peut se faire soit même au moyen de ProSheet ou d'une méthode analytique mais par un bureau spécialisé).

❖ Atelier Palplanche

Pour un total de 27 paires de PU 22 (Nuance d'acier S355) de longueur 10 mètres.

Les tarifs des palplanches et raccords sont donnés à la tonne d'acier afin que chacun puisse trouver le tarif adapté à son cas pratique (longueur de la palplanche).

Pour cela, il nous faut :

- Masse linéique des PU22²¹ : 86,1 kg/m,
- Masse linéique des raccords Oméga 18 : 18,0 kg/m,
- Masse linéique des raccords C14 : 14,4 kg/m.

Suite à notre demande faite auprès du fournisseur ArcelorMittal, celui-ci nous a transmis ses prix à la tonne, donnés dans le tableau suivant.

Dénomination	Prix à la tonne	Quantités	Masse linéique kg/m	Longueur mètre	Sous - Total
PU22	905€/T	54	86,1	10	42 077,1 €
Raccord C 14	2835€/T	2	14,4	10	816,5€
Raccord Ω 18	2835€/T	2	18,0	10	1020,6 €
TOTAL					43 915 €

Le choix de mode opératoire dépend dans certains cas de conditions limites (terrain dur, bâtiments sensibles aux vibrations,...) définies dans le tableau comparatif des ateliers de fonçage, mais dans notre cas d'étude, compte tenue de la localisation (zone industrielle) du domaine géotechnique (sol alluvionnaire) et des contraintes environnantes (supposées nulles dans nos hypothèses) nous ferons une analyse des coûts et des rendements avec les trois ateliers de fonçage afin de déterminer lequel sera le plus adapté à notre cas.

❖ Atelier de battage

D'après la synthèse faite en partie 1 de ce rapport, il existe plusieurs types de moutons (simple effet, sec, hydraulique, trépideur et diesel). Le mouton sec n'étant plus utilisé pour les palplanches, le simple offrant des avantages nuls, le diesel étant polluant et développant des forces de frappe très importantes, notre choix se porte soit entre un marteau hydraulique ou un marteau trépideur. Compte tenu de la comparaison faite de ces deux marteaux on prendra comme choix de marteau pour le battage un marteau trépideur

²⁰ SOECO : Bureau d'étude interne de DODIN IDF basé à EMERAINVILLE

²¹ Masses linéiques tirées du catalogue général sur les palplanches 2011 d'ArcelorMittal.

qui offre le meilleur rendement et une large gamme de choix et de disponibilité chez les fournisseurs (cas le plus courant).

Afin de choisir le trépideur le mieux adapté nous avons besoin de connaître :

- La profondeur de fiche des palplanches → 10m,
- La largeur de la palplanche → 1200mm (par paire).

Notre synthèse nous a permis de savoir qu'un marteau pneumatique se dimensionne par rapport au poids de la palplanche à mettre en place. Ainsi, dans notre cas il faut compter 1.5 fois le poids de la palplanche à mettre en place comme masse du trépideur nécessaire. Pour 10m de palplanche en double, le poids est de de 1722kg fois 1.5 soit 2583kg, d'après les documentations Pajot un marteau type Pajot 2800 suffi (voir l'annexe 6). Par sécurité et pour être sûr de notre choix, nous avons contacté la société Pajot pour nous donner une gamme de trépideur nécessaire à la mise en fiche pour notre cas mais aussi pour obtenir un devis estimatif de la location d'un marteau pneumatique. Pajot, que nous avons contacté en juillet, nous a recommandé de choisir un marteau Pajot 2800.

Le devis demandé nous a été renvoyé (voir récapitulatif dans le tableau suivant). Il comprend la location d'un marteau Pajot 2800 + enclume rectangulaire de 500mm + guide standard pour PU22 en double + graisseur + flexible diamètre 50mm (longueur 20m).

Désignation	MAP type 2800	MAP type 1400
Location jours ouvrés	300 € H.T/j	224 € H.T/j
Location flexible + pince + enclencheur	82 € H.T/j	82 € H.T/j
Assurance jours calendaires	15 € H.T/j	15 € H.T/j
Transport	820 € H.T	560 € H.T
Forfait préparation	310 € H.T	295 € H.T
Housse antibruit	11 € H.T/j	11 € H.T/j

❖ Atelier Vibrofonçeur

Le dimensionnement d'un vibrofonçeur peut se faire selon la formule donnée par ArcelorMittal : $F = 15 \times \frac{(T+2G)}{100}$ avec T=8.5m, G=86.1*10*2 (en double)=1722kg

Soit : $F = 517.88kN$ qui est la force centrifuge minimum nécessaire.

D'après les fiches techniques des fournisseurs (voir l'annexe 8), nous avons choisi un type de vibrofonçeur parmi la gamme des vibreurs à fréquence standard (moins onéreux que les autres et les vibrations ne sont pas préjudiciables dans notre cas)

D'après la gamme PAJOT, le vibreur 14.20 en annexe a une force centrifuge de 620 kN et une masse totale de 1900 kg avec le casque de battage de 340 kg. La force centrifuge du vibreur est supérieure à la force centrifuge nécessaire pour enfoncer les palplanches, donc il est compatible avec notre étude. Le groupe associé sera un groupe Volvo de puissance 200/268 kW avec un poids de 3400 kg.

Nous avons demandé à Pajot en juillet le prix de location de son matériel ainsi que pour le vibrofonçeur à la capacité juste au-dessus pour avoir un ordre de prix. De plus, nous avons demandé si dans le cas d'extraction pour ces palplanches nous pouvions utiliser la même machine. Ils nous ont confirmé ce point. Le devis s'applique pour 1 Vibreur type 14.20 HF et un 23.15 HF équipé d'un casque standard et d'un groupe hydraulique avec 1 jeu de flexibles.

Désignation	Type 14.20	Type 23.15
Location jours ouvrés	520 € H.T	580 €
Forfait chargement/déchargement	135 € H.T	135 € H.T
Assurance jours calendaires	17 € H.T	25 € H.T
Transport	1 200 € H.T	1 300 € H.T

❖ Atelier de Vérinage

Le choix d'un vérineur n'est pas aisé car il est difficile d'estimer la force d'enfoncement et d'arrachage. Nous avons soumis notre étude de cas au fournisseur Pajot afin d'obtenir un modèle nécessaire ainsi qu'un devis estimatif en août. Celui-ci nous a recommandé un vérineur sur mât de fonçage et nous a transmis ses prix correspondants qui sont cités dans le tableau suivant.

Désignation	Vérineur sur mât DAWSON
Location jours ouvrés (Porteur LRB125 et un vérineur avec chauffeur et chef batteur)	400 € H.T/h
Transport	8 000 € H.T
Assurance	A la charge du client, valeur à déclarer : 1 200 000 € H.T
Frais supplémentaires	- transport du chauffeur et du chef batteur - vol ou ferry les weekends end du chauffeur et du chef batteur - pension complète (hôtel + restaurant) du chauffeur et batteur

❖ Atelier Main d'œuvre et matériel nécessaire

Pour ce chantier, nous aurons besoin d'un grutier et de deux manœuvres pour l'exécution et d'encadrement donc un chef de chantier et un conducteur de travaux. L'entreprise DODIN IDF, nous a fourni ses prix pour tout ce personnel que nous avons intégré dans notre étude de prix.

Etant donné la longueur de palplanche à mettre en œuvre et le poids des engins de fonçage, l'entreprise DODIN IDF nous a conseillé d'utiliser une grue à treillis de 35 tonnes. Elle a pris soin de nous mettre en garde également contre une erreur fréquente lors du choix de la grue, qui est de ne pas prendre en compte la force nécessaire à la traction pour l'arrachage des palplanches.

Cette force est égale à : $P_{\text{vibreur(ou mouton)}} + P_{\text{palplanche}} + \frac{1}{4} F_{\text{centrifuge}}$

C'est cette force qu'il faut bien prendre en compte comme la force sous crochet de grue. Pour notre cas, nous avons une force de 4500 kg pour le cas du vibrofonçeur et 6300 kg pour le cas du battage.

Le coût obtenu pour une grue à chenille de 35 t est de 500€/jours calendaires.

D'après les chantiers DODIN IDF, les temps unitaire obtenue pour chaque atelier en fonction du phasage (voir le planning global du chantier à l'annexe 17) sont de :



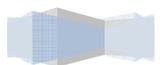
Atelier de vérinage

- Installation : 1 journée,
- Mise en œuvre au vérineur : 2 jours,
- Manutention de la lierne : 2 jours,



Atelier de vibrofonçage

- Installation : 1 journée,
- Mise en fiche au vibreur : 3 jours,
- Mise à la côte au vibreur : 2 jours,
- Manutention de la lierne : 2 jours,



- Soudage de la lierne : 2 jours,
- Replie du matériel : 1 jour.
- Soudage de la lierne : 2 jours,
- Replie du matériel : 1 jour.



Atelier de battage

- Installation : 1 journée,
- Mise en fiche au vibreur : 3 jours,
- Installation du trépideur : ½ jour,
- Mise à la côte au trépideur : 4 jours,
- Manutention de la lierne : 2 jours,
- Soudage de la lierne : 2 jours,
- Replie du matériel : 1 jour.

❖ **Atelier de mise en place de la ceinture en HEB**

D'après la note de calcul en annexe 16, la ceinture mise en place à 1m de profondeur sera faite en profilé HEB 500. Nous avons demandé un prix de revient pour ce type de profilé à Point P. Ils nous ont donné un prix à la tonne de 930€/tonne, sachant qu'un HEB 500 fait 187kg/m, nous aurons un prix global pour les HEB de 5 077€ pour 5 460kg (32.4mètres de rideau – 4*0.50 – 4*0.3 soit 29.2ml). Pour la mise en place, la soudure sera faite par une équipe de soudeur présente sur place, le prix pour un poste à souder est de 25€/jour et il nous faudra environ 10 paquets de baguettes de soudure pour un total de 670€. (Voir l'annexe 19)

❖ **Rendement estimatif de chaque atelier**

Nous avons demandé à l'entreprise DODIN IDF des rendements de vibrofonçage, de battage et de vérinage estimatif listés ci-dessous :



Marteau pneumatique

- Temps de mise en fiche : 11-14m/jour avec un guide et 7-10m/jour sans utiliser de guide, (Les palplanches sont d'abords fichés avec un vibrofonçeur),
- Temps de Battage : 8-11m/jour.



Vibrofonçage

- Temps de mise en fiche : 11-14m/jour avec un guide et 7-10m/jour sans utiliser de guide
- Temps de mise à la côte : 22-25m/jour.



Vérineur

- Mise directement à la côte : 35-40m/jour (nous aurons un rendement un peu moins important car nous avons 4 angles donc le système devra être manutentionné, il faudra rajouter une journée en conséquent).

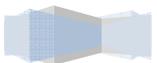


Raccords

- La mise en place est très simple pour ce type de raccords : 2h/raccord.

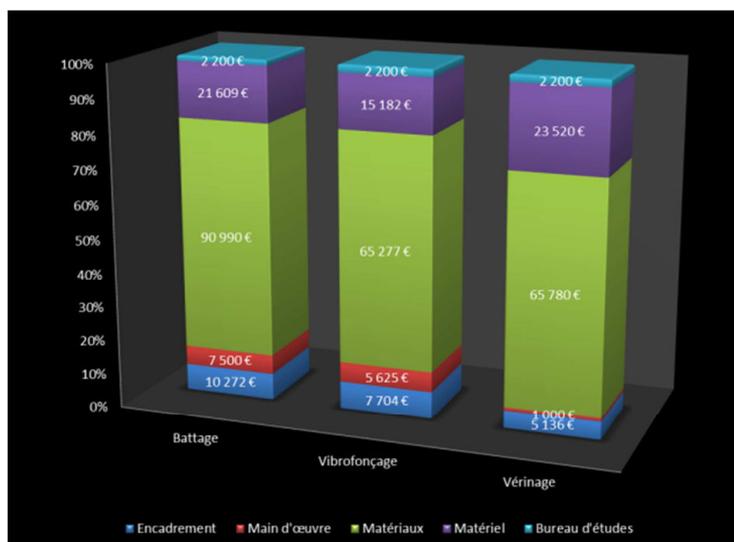
3.4 Analyse des devis et rendement

Tous ces devis et rendement, nous ont permis d'établir des devis estimatifs pour chaque atelier qui sont présentés à l'annexe 18.



Le plus coûteux dans un chantier de palplanche reste avant tout les matériaux, représentant à peu près 60% du coût final, ensuite vient le matériel. Là tout dépendra de la technique choisie. Rapide mais coûteuse, lente mais moins chère. Tout dépendra des délais et du type de terrains sur lesquels se dérouleront les travaux.

Donc si l'on regarde les résultats du cas pratique on en retient ceci :



✚ Atelier de battage

- Avantages : efficacité dans les terrains durs,
- Inconvénients : Coût d'utilisation ; nécessité d'utiliser un vibrofonçeur pour mettre en fiche ; rendement assez faible ; risque de déchirement des palplanches,
- **Rendement : 4 092 €/ml soit 132 572 € pour 12 jours.**

✚ Atelier de vibrofonçage

- Avantages : domaine d'application ; utilisation sur tous les terrains ; coût relativement faible ; rapidité d'exécution ; possibilité d'extraction rapide ; moins nuisances sonores,
- Inconvénients : Utilisation restreinte par le type de sol ; Attention au dimensionnement du moyen de levage ; vibrations peuvent être préjudiciables,
- **Rendement : 2 963 €/ml soit 95 989€ pour 9 jours.**

✚ Atelier de vérinage

- Avantages : rapidité d'exécution ; faible main d'œuvre ; mise en place et extraction instantanée ; très faible nuisances sonores ; aucune vibrations,
- Inconvénients : Coût très élevé ; utilisation impossible dans les terrains durs,
- **Rendement : 3 014 €/ml soit 97 637€ pour 6 jours.**

3.5 Bilan et retour sur expérience

Il est indispensable d'analyser toutes les méthodes de mise en place des palplanches avant de prendre une décision sur le choix de mise en fiche. Il est très important d'effectuer une visite sur site avant de choisir une méthode de fonçage. Toutes les remarques et les observations faites lors de cette synthèse sont à prendre en compte de manière sérieuse. En effet, il serait dommage de choisir la méthode la moins chère et ainsi d'avoir une perte dans le rendement due à un paramètre qui aurait pu être facilement évité avec une étude plus basée sur les conditions du chantier que sur les rendements et devis prévisionnels.

A contrario, il ne faut pas se précipiter vers la méthode la plus rapide car elle pourrait sûrement être aussi la plus chère. La meilleure façon de choisir reste la comparaison du chiffrage des méthodes possibles et de prendre en compte la durée globale du chantier ainsi que les paramètres in situ.

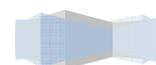
Au vu des différents paramètres de notre étude et de nos connaissances acquises lors de cette synthèse, notre choix du mode opératoire se porterait sur une mise en place au vibrofonçeur en partie grâce à son coût de revient, mais surtout vis-à-vis de la disponibilité des machines chez les fournisseurs puisque c'est une technique très répandue. L'utilisation d'un vérineur est plus complexe car il y a peu de machines disponibles en France, cela demande donc un délai et un coût supplémentaires. Enfin le battage est vraiment recommandé pour les terrains durs ce qui n'est pas le cas sur ce chantier, le vibrofonçeur nous permettant également d'adapter la vibration au terrain.

CONCLUSION

Cette synthèse scientifique et technique nous a permis d'élargir nos connaissances vis-à-vis du soutènement par palplanche mais surtout de synthétiser chaque information (rapports de fin d'étude, ouvrages spécifiques, thèses, normes, cours,...) que nous avons étudié et analysé. Elle n'est certes pas exhaustive, mais elle apporte des connaissances importantes et utiles à toute personne qui chercherait des réponses vis-à-vis du soutènement par palplanche.

Les cinq mois de préparation, de recherche et d'étude en commun sur ce projet, nous ont permis de fournir ce rapport de synthèse scientifique et technique comportant autant d'informations pratiques que nous avons jugé nécessaires afin de ne pas être seulement une synthèse mais un guide technique.

Dans l'objectif de répondre à cette problématique, nous avons synthétisé et vérifié l'ensemble des informations présentes dans ce rapport afin d'apporter une aide si nécessaire aux professionnels recherchant des informations pertinentes et clair sur les possibilités, les rendements et les coûts d'un chantier de palplanche.



GLOSSAIRE

AFFOUILLEMENT : (n.m) Action de creusement due aux remous et aux tourbillons engendrés dans un courant fluvial ou marin butant sur un obstacle naturel (rive concave des méandres) ou artificiel (pile de pont, jetée), ou à l'activité des animaux benthiques. *Source* : Larousse 2012

BATARDEAU : (n.m) Digue ou barrage provisoire, établi en site aquatique pour mettre à sec la base d'une construction que l'on veut réparer ou l'emplacement sur lequel on veut élever un ouvrage. *Source* : Larousse 2012

BATTAGE : (n.m) Procédé de forage dans lequel le trépan, animé d'un mouvement de va-et-vient, frappe contre le fond du trou sans aucune rotation. (Utilisé surtout pour enfoncer les pieux de fondation.) *Source* : Larousse 2012

BLINDAGE : (n.m) Paroi destinée à maintenir un terrain peu stable et à éviter tout éboulement. *Source* : Larousse 2012

BOUSSINESQ : Principe de répartition des contraintes d'une charge ponctuelle Q à partir de la surface du sol dans un massif semi infini. *Source* : Cours géotechnique CESFA BTP

BRAI : (n.m) Résidu de la distillation des goudrons de pétrole, de houille, de bois, ou d'autres matières organiques. (Utilisations : agglomération des fines de houille, fabrication de peintures, de vernis, d'électrodes, d'enduits d'étanchéité.) *Source* : Larousse 2012

COHESION : Aptitude d'un matériau à maintenir entre ses parties une attraction intermoléculaire lorsqu'il est soumis à un effort de traction. *Source* : editions-eyrolles.com/Dico-BTP

CULEE DE PONT : (n.m) Appui d'extrémité d'un pont. (Les culées comportent généralement un mur de front et des murs latéraux, dits en aile ou en retour suivant leur implantation.) *Source* : Larousse 2012

ENERGIE CINETIQUE : L'énergie cinétique d'un solide de masse m est l'énergie qu'il possède du fait de son mouvement. Pour un solide en translation à la vitesse v : $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ (E_c : Energie cinétique en joules (J) ; m : masse en kg et v : vitesse du centre d'inertie en $m \cdot s^{-1}$). *Source* : cours physique élémentaire de terminal

FONCAGE : (n.m) Creusement d'un puits de mine, en descendant à partir de la surface ; tout creusement d'ouvrage fortement incliné. (Le fonçage d'un puits comprend l'abatage des terrains, l'évacuation des déblais et la mise en place d'un revêtement.) *Source* : Larousse 2012

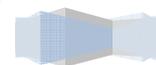
GABION : (n.m) Caisse à carcasse métallique que l'on remplit de sable ou de cailloux et servant à protéger les berges d'un cours d'eau ou à constituer une enceinte étanche au cours de la construction d'un aménagement hydraulique. *Source* : Larousse 2012

GRENAILLAGE : (n.m) Projection de grenaille à la surface d'une pièce à l'aide d'une turbine, à des fins de décalaminage, durcissement superficiel et protection contre la corrosion. *Source* : Larousse 2012

LAMINER : (v) Faire subir à un produit, en général métallique, une déformation permanente par passage entre deux cylindres d'axes parallèles et tournant en sens inverse. *Source* : Larousse 2012

LIMITE ELASTIQUE : La limite élastique est la contrainte à partir de laquelle un matériau commence à se déformer de manière irréversible. *Source* : techno-science.net

MATERIAU INERTE : Déchets minéraux non pollués. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne se détériorent pas au contact d'autres matières d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. *Source* : Agence Régionale d'évaluation Environnement et Climat (arecpc.com)



MISE EN FICHE (FICHER): (v) Faire entrer quelque chose par la pointe, enfoncer : Ficher des pieux en terre. *Source : Larousse 2012*

NUANCE D'ACIER : La nuance d'acier, détermine la limite élastique (f_y) mini en MPa. *Source : extrait de la synthèse*

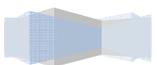
PALPLANCHE : (n.f) Pièce en bois, acier, béton, etc., de section spéciale, permettant de l'emboîter à une autre et généralement utilisée à la constitution de parois étanches en terrains meubles, aquifères ou immergés. *Source : Larousse 2012*

POROSITE : (n.f) Rapport du volume des pores d'un corps au volume occupé par ce corps. *Source : Larousse 2012*

PROTECTION CATHODIQUE : Un métal en contact avec un milieu conducteur, eau ou sol, est le siège de réactions électrochimiques appelées effet de pile. Ce phénomène entraîne une dissolution du métal de l'anode vers la cathode, c'est-à-dire de la canalisation vers le milieu ambiant : c'est la corrosion ou oxydation. *Source : CCTA.fr*

SABLAGE : (n.m) Décapage d'une surface au moyen de sable, de silice ou de tout autre abrasif minéral projeté à l'aide d'air comprimé. *Source : Larousse 2012*

SOL PULVERULENT : Se dit d'un sol ou d'un matériau granulaire dont les éléments ne présentent aucune cohésion. *Source : editions-eyrolles.com/Dico-BTP*



BIBLIOGRAPHIE/WEBOGRAPHIE

- Giken: Entreprise spécialisé dans le vérinage - documentations techniques. (2011). Consulté le Août 2011, sur Giken.co.uk:
<http://www.giken.co.uk/france/subpage.asp?subpageid=9>
- Point.P: Tarifs des différents outillages et consommables. (2011). *Point P*. Consulté le Septembre 2011, sur <http://www.pointp.fr/quincaillerie-outillage/baguette-de-soudure-33-etain-200g-A1796941p84S684R688m76>
- ArcelorMittal: Documents techniques sur les profilés de palplanches à chaud/ à froid, é. d. (2011). Consulté le Août 2011, sur ArcelorMittal.com:
<http://www.arcelormittal.com/palplanches/page/index/name/fabrication-program>
- Balay Jean. (s.d.). *Parois moulées, ancrages*. Paris: Techniques de l'ingénieur: traité construction. C252-1 et C252-12.
- CAQUOT, KERISEL, ABSI. (1973). *Tables de butée et de poussée*. 2ème édition bilingue - Gauthier Villars Ed.
- Courtois Bruno. (2006). *Produits de traitement du bois - Composition, dangers, mesures de prévention*. Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) - ED 981.
- Da Costa J-L, Kenzeddine K, Man W. (s.d.). *Soutènement par palplanches*. Université de Lille 1 - Maîtrise en génie Civil.
- DAWSON: constructeur de vérineurs. (2011). Consulté le Août 2011, sur [dcpuk.com](http://www.dcpuk.com/products-list-pushpullsheet.asp):
<http://www.dcpuk.com/products-list-pushpullsheet.asp>
- Delannoy, Dagba. (juillet 2003). *Ouvrages de soutènement - Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des rideaux de palplanches métalliques*. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - ISSN 1151 - 1516.
- Delmag: Constructeur de mouton pour le battage. (2011). Consulté le Août 2011, sur [Delmag.com](http://www.delmag.com/moutons-diesel.html): <http://www.delmag.com/moutons-diesel.html>
- Destrac, Lefavre, Maldent, Vila. (1 juillet 2000). *Mémotech - Génie Civil*. Casteilla ISBN-10: 2713516439.
- François, Schlosser. (s.d.). *Murs de soutènement*. Paris: Techniques de l'ingénieur: traité construction. C244-1 et C244-22.
- IHC: Constructeur de mouton et vibrofonçeur. (2011). Consulté le Août 2011, sur [IHC.fr](http://www.ihc.fr/fr/genie.html):
<http://www.ihc.fr/fr/genie.html>
- Jezequel Jean François, Amar Samuel. (s.d.). *Propriété mécaniques des sols déterminées en place*. Techniques de l'ingénieur: traité construction. C220.
- Le nouveau fascicule 62 Titre V - Document de synthèse*. (s.d.). Profil ARBED.
- Loxam: tarifs des différents consommables et outillages. (2011). Consulté le septembre 2011, sur [Loxam.be](http://www.loxam.be/fr/location/Soudage/Postes-de-soudure-electriques/): <http://www.loxam.be/fr/location/Soudage/Postes-de-soudure-electriques/>
- Luc, Delattre. (Septembre - Octobre 2001). *Un siècle de méthode de calcul d'écrans de soutènement*. Laboratoires de Ponts et Chaussées, n°234 / pages 35,55.
- Magnan Jean Pierre. (2006 - 2007). *Cours de mécanique des sols 2 - Rideaux de palplanches*. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE).

- Corrosion par les sols - Evaluation de la corrosivité - Ouvrage en acier enterrés (palplanches et pieux).* (Mars 1990). Norme AFNOR A05-251.
- Calcul des rideaux de palplanches ancrés par les méthodes de Rowe et de Blum.* (Octobre 1974). Compiègne: Centre d'études techniques maritimes et fluviales - Notice STC n° 74-5.
- OPPBT. (Octobre 2010). *Fiche de prévention - D2 F 02 10 - Fonçage de palplanches.* OPPBT.
- PAJOT. (s.d.). *Stage de battage du 11 au 15 mars 1985.* MONTERGON: PAJOT.
- PAJOT: constructeur de vérineurs, v. e. (2011). Consulté le Août 2011, sur [pajot.com](http://www.pajot.com/verineurs.html): <http://www.pajot.com/verineurs.html>
- Philipponnat Gérard, Hubert Bertrand. (2007). *Fondations et ouvrages en terre.* Paris: Eyrolles / Coyne & Bellier Bureau d'ingénieurs conseils.
- Pierre, B. (s.d.). *Pieux et palplanches.* Techniques de l'ingénieur: traité construction - C140.
- Plumelle C. (17/12/2002). *Action du sol sur un écran.* Paris: CNAM.
- Projet National. (2006). *Vibrofonçage - Guide technique 2006.* ISBN: 2-8597B-423-3.
- PTC - FAYAT: constructeur de vibrofonçeur. (2011). Consulté le Août 2011, sur [ptc-fayat.com](http://www.ptc-fayat.com): <http://www.ptc-fayat.com/1-2-70-1836-1669/Power-Packs.htm>
- PVC/acier, A. c. (2011). Consulté le Août 2011, sur [altifer.com](http://www.altifer.com): <http://www.altifer.com/protection-de-berges/index.php?page=9>
- Rime Nicolas. (2007, Novembre 23). Consulté le Juillet 2011, sur [TECHNI.CH](http://www.techni.ch): http://www.techni.ch/technifin/haupt/travaux/sujet_0012/pdf/palplanches_1_2007.pdf
- Steelbizfrance: tarifs des profilés type HEB. (2011). Consulté le septembre 2011, sur [Steelbizfrance.com](http://www.steelbizfrance.com): <http://www.steelbizfrance.com/prog/lamine/lstlamine.aspx?IdProfil=8#>

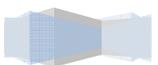


TABLE DES ANNEXES

- Annexe 1 Extrait : Palplanches profilées à chaud, catalogue général 2011, ArcelorMittal. 16 pages
- Annexe 2 Extrait : Palplanches profilées à froid, catalogue général 2011, ArcelorMittal. 7 pages
- Annexe 3 Extrait : Systèmes de revêtement et application, ArcelorMittal. 4 pages
- Annexe 4 Extrait : Etanchéité des rideaux de palplanches, ArcelorMittal. 9 pages
- Annexe 5 Extrait des tables de Caquot - Kérisel. 1 page
- Annexe 6 Fiches techniques moutons batteurs. 8 pages
- Annexe 7 Extrait : Documentation sur les casques de battage, ArcelorMittal, 2 pages
- Annexe 8 Fiches techniques vibrofonçeur. 4 pages
- Annexe 9 Fiches techniques vérineurs. 3 pages
- Annexe 10 Fiches techniques du système de vérin au sol et Push & Pull, Dawson. 5 pages
- Annexe 11 Fonçage des palplanches, OPPBTP. 7 pages
- Annexe 12 Fiches techniques du système de mesure des vibrations « Vibra », Pajot. 2 pages
- Annexe 13 Plan d'exécution du séparateur d'hydrocarbure et du rideau. 1 page
- Annexe 14 Diagrammes des sollicitations et déformations de la palplanche, ProSheet. 2 pages
- Annexe 15 Note de calcul par la méthode de Blum pour vérification du modèle. 3 pages
- Annexe 16 Note de calcul pour la ceinture du rideau. 2 pages
- Annexe 17 Planning prévisionnel. 1 page
- Annexe 18 Devis estimatifs des ateliers de fonçage. 3 pages
- Annexe 19 Fiche technique du HEB 500, steelbizfrance. 1 page

