

# 9 Construction



1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

## SOMMAIRE du Chapitre 9

<b>9.1</b>	<b>Préparation des travaux</b> .....	<b>1102</b>
9.1.1	Problématiques liées à la construction .....	1102
9.1.2	Problèmes divers concernant le site .....	1103
9.1.2.1	Emplacement .....	1103
9.1.2.2	Logistique .....	1104
9.1.2.3	Aspects légaux .....	1104
9.1.2.4	Aspects environnementaux .....	1105
<b>9.2</b>	<b>Préparation du site</b> .....	<b>1106</b>
9.2.1	Aire de stockage et de réparation .....	1106
9.2.1.1	Localisation, agencement et taille .....	1106
9.2.1.2	Conditions d'exploitation et de sécurité .....	1108
9.2.2	Installations de chargement et de déchargement .....	1108
9.2.2.1	Chargement des barges .....	1109
9.2.2.2	Chargement des caboteurs .....	1112
9.2.2.3	Chargement des camions et des trains .....	1113
9.2.2.4	Considérations supplémentaires pour le déchargement .....	1113
<b>9.3</b>	<b>Équipement</b> .....	<b>1115</b>
9.3.1	Généralités .....	1115
9.3.2	Équipement terrestre – déversement des matériaux .....	1116
9.3.3	Équipement terrestre – placement contrôlé .....	1119
9.3.4	Équipement flottant – déversement de matériaux .....	1122
9.3.5	Équipement flottant – placement contrôlé .....	1123
9.3.6	Conditions de travail .....	1128
9.3.6.1	Conditions de travail pour les travaux terrestres .....	1128
9.3.6.2	Conditions de travail pour les opérations nautiques .....	1130
9.3.7	Tolérances .....	1135
<b>9.4</b>	<b>Transport</b> .....	<b>1138</b>
9.4.1	Transport routier .....	1139
9.4.2	Transport ferroviaire .....	1142
9.4.3	Transport par voie d'eau .....	1143
9.4.3.1	Transport maritime .....	1144
9.4.3.2	Transbordement vers le rivage .....	1145
<b>9.5</b>	<b>Risques liés à la construction et sécurité</b> .....	<b>1147</b>
9.5.1	Introduction .....	1147
9.5.2	Sources principales de risques et leurs occurrences .....	1148
9.5.2.1	Un environnement instable .....	1148
9.5.2.2	Dynamique de l'environnement .....	1150
9.5.3	Principes et bonnes pratiques pour la gestion des risques .....	1151

9.5.3.1	Protection des ouvrages .....	1151	1
9.5.3.2	Protection des travailleurs .....	1154	
9.5.3.3	Protection du public pendant les travaux de construction .....	1155	
9.5.3.4	Choix et utilisation de l'équipement et du matériel .....	1156	
9.5.3.5	Résumé des bonnes pratiques .....	1156	
<b>9.6</b>	<b>Problèmes géotechniques .....</b>	<b>1157</b>	<b>2</b>
9.6.1	Conditions de sol .....	1157	
9.6.2	Érosion et sédimentation .....	1158	
<b>9.7</b>	<b>Techniques de mise en œuvre .....</b>	<b>1158</b>	<b>3</b>
9.7.1	Travaux de protection de fond et des berges .....	1158	
9.7.1.1	Types et fonctions .....	1158	
9.7.1.2	Travaux de protection de fond .....	1159	
9.7.1.3	Travaux de protection des berges .....	1164	
9.7.2	Construction des digues à talus .....	1166	<b>4</b>
9.7.2.1	Généralités .....	1166	
9.7.2.2	Construction des digues par voie terrestre .....	1167	
9.7.2.3	Construction de digues avec du matériel embarqué .....	1172	
9.7.2.4	Combinaison de construction par voie terrestre et par voie nautique .....	1174	
9.7.2.5	Résumé des conditions d'utilisation du matériel terrestre comparé au matériel embarqué .....	1176	<b>5</b>
9.7.2.6	Pose des blocs d'enrochement artificiel .....	1177	
9.7.3	Construction des perrés .....	1178	
9.7.4	Ouvrages de fondation et offshore .....	1180	
9.7.4.1	Construction des ouvrages de fondation .....	1180	<b>6</b>
9.7.4.2	Construction d'ouvrages de protection de canalisations et de câbles .....	1181	
9.7.5	Ouvrages courants de rivière .....	1182	
9.7.5.1	Protection en enrochement d'une berge sur un remblai de sable .....	1182	
9.7.5.2	Épi et ouvrage d'alignement de rivière .....	1183	
9.7.6	Exécution de réparations urgentes .....	1184	<b>7</b>
<b>9.8</b>	<b>Contrôle qualité .....</b>	<b>1185</b>	
9.8.1	Méthodes de pose et d'agencement .....	1185	
9.8.1.1	Enrochement naturel .....	1185	
9.8.1.2	Enrochement artificiel .....	1188	<b>8</b>
9.8.2	Vérification de la densité de pose à l'aide d'une planche d'essai et par comptage des blocs .....	1188	
9.8.3	Contrôle qualité pendant la construction .....	1189	
9.8.3.1	Considérations générales sur l'assurance qualité .....	1189	
9.8.3.2	Contrôle qualité des matériaux sur le chantier de construction .....	1192	
9.8.4	Calculs sur une planche d'essai et problèmes de paiement .....	1194	<b>9</b>
<b>9.9</b>	<b>Techniques de levés et de mesures .....</b>	<b>1196</b>	
9.9.1	Contrôle des levés .....	1196	
9.9.2	Levés avant construction .....	1197	
9.9.3	Alignement de l'ouvrage .....	1197	<b>10</b>

9.9.4 Implantation des profils .....1197

9.9.5 Pose de blocs d'enrochement suivant un plan de pose .....1198

9.9.6 Implantation d'un musoir .....1198

9.9.7 Construction sous-marine .....1199

9.9.8 Techniques de levé .....1199

    9.9.8.1 Au-dessus de l'eau .....1199

    9.9.8.2 Sous l'eau .....1201

**9.10 Références bibliographiques .....1206**

# 9 Construction

Le **Chapitre 9** présente les **méthodes** et le **matériel de construction**.

Données des autres chapitres:

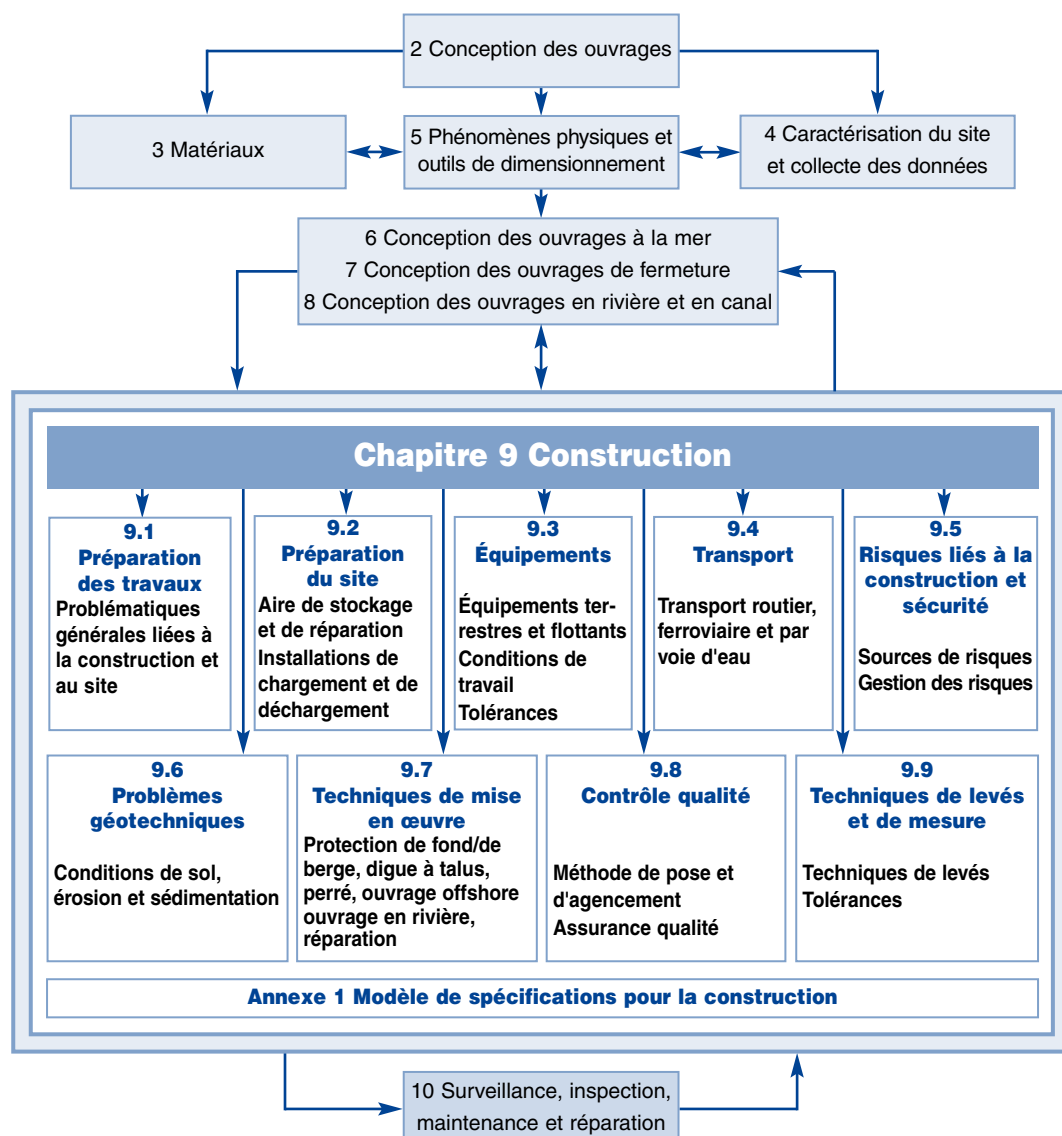
- **Chapitre 2** ⇒ Les **exigences de projet**
- **Chapitre 3** ⇒ Les **propriétés des matériaux**
- **Chapitre 4** ⇒ Les **conditions hydrauliques et géotechniques**
- **Chapitre 6, 7 et 8** ⇒ La **conception des ouvrages**

Résultats pour les autres chapitres:

- **Méthodes de construction** ⇒ Chapitres 6, 7, 8 et 10.

**NOTE:** le processus de conception est **itératif**. Le lecteur est invité à **se référer au Chapitre 2** tout au long du cycle de vie de l'ouvrage pour se remémorer les problématiques importantes.

Ce logigramme indique où trouver l'information dans ce chapitre et les liens avec les autres chapitres. Il peut être utilisé en parallèle aux sommaires et à l'index pour naviguer dans le guide

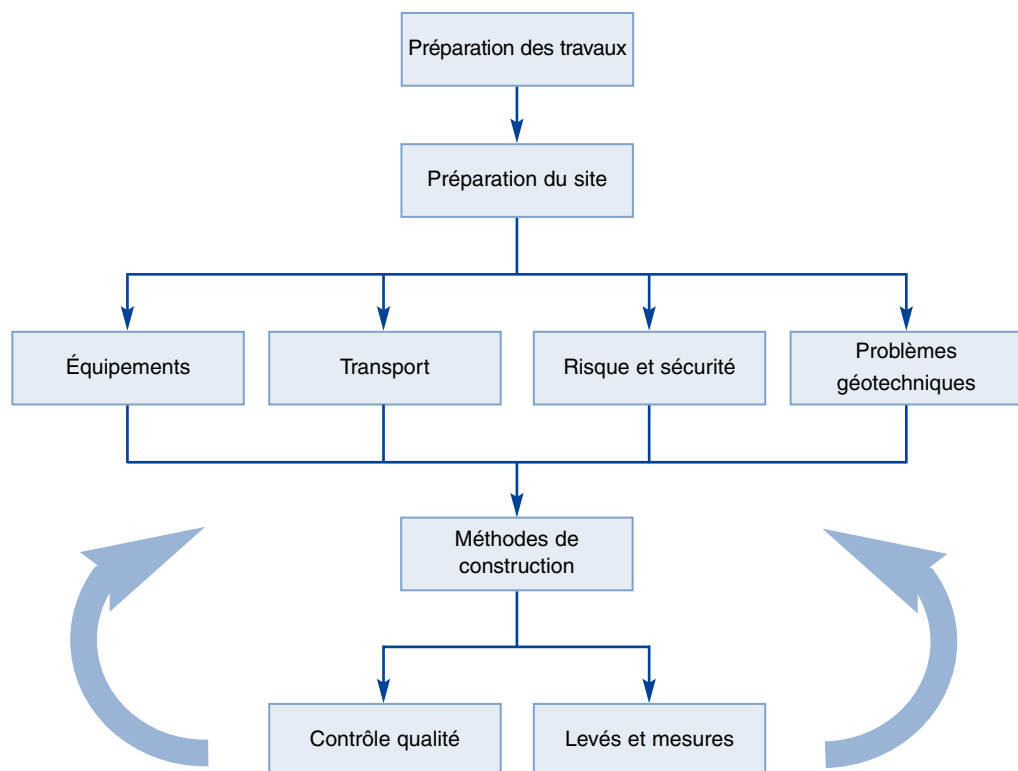


Ce chapitre couvre les aspects de la construction des ouvrages hydrauliques construits complètement ou partiellement en enrochement. L'accent est mis sur les aspects pratiques des constructions en enrochement naturel, étudiés conjointement avec les aspects théoriques de la production de ces matériaux en carrières, sujet couvert à la Section 3.9. Le logigramme général au début de ce chapitre montre comment ce chapitre est lié aux autres chapitres de ce guide.

Les principaux sujets traités dans ce chapitre sont :

- la préparation des travaux ;
- la préparation du site ;
- la description de l'équipement habituellement utilisé ;
- le transport des enrochements ;
- les risques et la sécurité des opérations de construction ;
- les problèmes géotechniques ;
- les méthodes de construction d'ouvrages hydrauliques courants ;
- les techniques de levé et mesures ;
- le contrôle qualité, y compris les aspects concernant la pose des enrochements.

Les principales sections de ce chapitre, de la préparation des travaux aux méthodes de construction, les levés et les mesures, sont présentées dans le logigramme à la Figure 9.1.



**Figure 9.1** Lien entre les différentes sections de ce chapitre

Les méthodes de construction présentées concernent les ouvrages hydrauliques en enrochement suivants :

<b>Catégorie</b>	<b>Références aux autres sections</b>
Ouvrages de protection de fond	Sections 6.1, 6.2 et 6.3; Section 8.3
Ouvrages de protection de berges et revêtements	Sections 6.2 et 6.3; Sections 8.2 et 8.3
Digues à talus	Section 6.1
Ouvrages de protection côtière	Section 6.3
Protections de canalisations et fondations	Section 6.4
Épis, ouvrages d'alignement de rivières	Section 8.2
Protections de culées et de piles	Section 8.5

Ces ouvrages sont construits avec des moyens terrestres et/ou nautiques. Lors du choix des équipements et de la méthode de construction, les ouvrages doivent être évalués suivant les éléments ci-dessous :

- les dimensions et le tracé en plan ;
- les volumes et le type d'enrochement requis ;
- les possibilités de stockage temporaire des enrochements sur le site ;
- l'emplacement de la carrière et sa production ;
- le transport de la carrière au site ;
- l'accessibilité du chantier aux équipements terrestres et flottants ;
- les conditions externes affectant les conditions de travail : l'effet de la profondeur d'eau sur l'accès et la construction, le climat de houle et le régime des vents et leurs variations saisonnières, les marées et les courants, la température et la visibilité ;
- la stabilité de l'ouvrage en cours de construction.

Comme chaque ouvrage est sujet à des conditions spécifiques, la méthode de construction choisie doit être adaptée spécifiquement. Ce chapitre est illustré par des exemples, mais les méthodes changent souvent d'une entreprise à l'autre, en fonction du type d'équipement qu'elle possède et de ses expériences antérieures.

La conception peut être affectée par un certain nombre de contraintes, parmi lesquelles :

- l'obligation d'empêcher la pollution de l'eau et de l'air, ce qui inclut les aspects écologiques, le contrôle du bruit et les restrictions de la circulation (voir la Section 2.5) ;
- la disponibilité du matériel et de la main-d'œuvre ;
- le niveau d'expérience locale sur des travaux comparables ;
- les infrastructures (routes, voies ferrées, ports) ;
- les installations pour les futurs travaux de maintenance ;
- les contraintes financières ;
- les saisons pendant lesquelles les travaux auront lieu ;
- la disponibilité des enrochements appropriés.

Il est important de noter que les méthodes de construction ne peuvent pas être apprises avec ce seul guide. Une expérience en condition réelle est aussi nécessaire. Pour comprendre tous les aspects de la gestion de chantier, il faut une expérience acquise sur de nombreux chantiers, avec un personnel d'encadrement expérimenté.

## 9.1 PRÉPARATION DES TRAVAUX

### 9.1.1 Problématiques liées à la construction

Les problèmes listés au Tableau 9.1 doivent être considérés selon le type et la localisation de l'ouvrage (p. ex. zone rurale ou urbaine). Cette liste n'est pas exhaustive et tous ces éléments ne sont pas nécessairement appropriés au démarrage des travaux.

**Tableau 9.1** *Problématiques liées à la construction*

Catégorie	Problèmes posés
<b>Équipement</b> (voir la Section 9.3) Navires et barges, matériels auxiliaires, pontons, camions, pelles hydrauliques, bureaux de chantier	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité de l'équipement prévu</li> <li>• Cahier des charges techniques</li> <li>• Disponibilité de pièces détachées</li> <li>• Sécurité</li> <li>• Zone de maintenance, personnel de maintenance</li> </ul>
<b>Sous-traitants et fournisseurs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveau d'expérience et d'expertise</li> <li>• Équipement disponible</li> <li>• Couverture d'assurance en place</li> <li>• Fiabilité</li> </ul>
<b>Personnel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rôles et responsabilités (organigramme)</li> <li>• Disponibilité de personnels qualifiés</li> <li>• Niveaux adéquats du personnel</li> <li>• Pas d'interruption entre équipes de jour et équipes de nuit</li> <li>• Nécessité d'adopter des longues heures de travail</li> </ul>
<b>Carrière(s)</b> (voir la Section 3.9)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Étude de gisement</li> <li>• Carrière existante ou à ouvrir</li> <li>• Adéquation avec le cahier des charges</li> <li>• Disponibilité des équipements</li> <li>• Capacité de production et programme d'exploitation</li> </ul>
<b>Transport</b> (voir la Section 9.4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité du matériel nécessaire</li> <li>• Capacité (équilibrer l'offre et la demande)</li> <li>• Manœuvrabilité</li> <li>• Tirant d'eau</li> <li>• Plans d'urgence</li> <li>• Compilation et analyses des données de transport</li> </ul>
<b>Stockage sur le site et à la carrière</b> (voir la Section 9.2.1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacité</li> <li>• Stabilité</li> <li>• Plan de circulation efficace pour améliorer la performance</li> <li>• Environnement</li> <li>• Le public</li> </ul>
<b>Construction</b> (voir les Sections 9.6 et 9.7)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Étude du site</li> <li>• Accès</li> <li>• Infrastructures – routes, téléphones, eau, assainissement, proximité des accès à des terrains de jeux pour enfants et écoles etc.</li> <li>• Moyens de construction et méthodes de travail</li> <li>• Sécurité</li> <li>• Houle, marée, courants</li> <li>• Vents et conditions météorologiques</li> <li>• Période de l'année</li> <li>• Levés topographiques et bathymétriques (méthodes approuvées par le client) et niveaux de tolérance</li> <li>• Ouvrages provisoires</li> <li>• Turbidité de l'environnement</li> <li>• Contamination</li> <li>• Pression hydrostatique</li> <li>• Consolidation et tassement</li> </ul>
<b>Levés</b> (voir la Section 9.9)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Choix et calibrage des moyens de levé</li> <li>• Accord avec le client sur le système ou utilisation du même équipement que le client</li> </ul>



**Tableau 9.1** Problématiques liées à la construction (suite)

Catégorie	Problèmes posés
<b>Planification</b> (voir la Section 9.8.2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapport régulier</li> <li>• Planification claire communiquée à toutes les parties impliquées</li> <li>• Calendriers flexibles détaillés, 24 heures à l'avance</li> </ul>
<b>Analyse des risques</b> (voir la Section 9.5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matériaux</li> <li>• Main-d'œuvre et équipement</li> <li>• Financement</li> <li>• Planification</li> <li>• Risques pour l'ouvrage en cours de construction</li> <li>• Plan d'urgence et provisions</li> </ul>
<b>Hygiène et sécurité</b> (voir la Section 9.5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Respect des règles de l'entreprise et des règlements nationaux en matière de sécurité</li> <li>• Sécurité du public</li> </ul>
<b>Aspects environnementaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poussière</li> <li>• Bruit</li> <li>• Pollution de l'eau, de l'air, du sol</li> <li>• Écologie</li> <li>• Qualité de l'eau et contamination</li> <li>• Habitats de la faune locale</li> </ul>
<b>Institutions réglementaires et autres organismes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Industrie de la pêche</li> <li>• Services de secours tels que les gardes côtes, ambulances, sauveteurs en mer et la police</li> <li>• Défenseurs de la nature</li> <li>• Conservateurs du patrimoine</li> <li>• Autorités maritimes et portuaires</li> <li>• Usagers des équipements de loisirs</li> <li>• Consultations et débats publics</li> </ul>

## 9.1.2 Problèmes divers concernant le site

Toute construction nécessitera un site temporaire près du chantier pour y installer les bureaux de chantier, les aires de service et de réparation, des zones temporaires de fabrication et des équipements sanitaires et sociaux pour le personnel. Les enjeux de sa localisation sont légaux et financiers, comme l'obtention d'un permis de construire ou d'une autorisation de travaux, la proximité d'équipements sanitaires et sociaux existants, la location d'un terrain et l'existence de servitude. Le site temporaire doit donc être prévu dès les premières étapes de la planification des travaux.

### 9.1.2.1 Emplacement

Quels que soient la taille et le site du chantier, il faut étudier les contraintes externes et la capacité de l'infrastructure existante. Il faut également choisir une zone pour l'installation des bureaux de chantier, des équipements sanitaires et sociaux, le stationnement des voitures, les activités de fabrication, les aires de réparation, etc.

Les infrastructures sont :

- les routes, les ports et les voies ferrées ;
- les télécommunications ;
- l'eau, le système d'égouts et l'électricité ;
- la sécurité ;
- l'éclairage pour le travail 24 h/24.

Les facteurs externes à considérer incluent :

- le **bruit** – connaître toutes les restrictions concernant le bruit avant la date de soumission, parce que celles-ci peuvent limiter le temps de travail et augmenter ainsi le coût de construction ; les questions de bruit peuvent affecter l'utilisation ou le positionnement des groupes électrogènes ;
- les **aménagements** locaux – peuvent devoir être déplacés ou une compensation devra être payée s'ils ne peuvent plus être utilisés ;
- la **poussière** ou les autres émissions (du chantier ou des travaux) – peuvent rendre le site temporaire choisi inutilisable (NOTE : ne pas confondre avec le secteur du chantier lui-même) ;
- la **sécurité** sur le site ou temporaire choisi ;
- la **planification** – un permis de construire est nécessaire pour le site temporaire comme pour le site du chantier de construction.

La consultation des usagers et des autorités compétentes dès le début doit permettre de réduire au minimum le risque de problèmes ultérieurs et de trouver le meilleur emplacement pour le site temporaire.

### 9.1.2.2 **Logistique**

La logistique englobe tous les éléments et activités essentiels pour un transport efficace des matériaux de construction, et couvre :

- les machines et les équipements ;
- les essais sur les matériaux en laboratoire et *in situ* ;
- le personnel ;
- les consommables, y compris le carburant et autres approvisionnements ;
- les programmes de travail ;
- les études et les expertises.

### 9.1.2.3 **Aspects légaux**

Il est possible qu'il y ait des taxes à payer ou des autorisations particulières à obtenir pour le transport des matériaux et la conduite des travaux. Il s'agit souvent :

- **des droits de port** – les navires marchands déchargeant, chargeant ou transbordant des marchandises ou des passagers dans la zone portuaire peuvent avoir à payer des droits ;
- **des coûts de navigation** – les bateaux entrant dans un port ou dans une zone de navigation contrôlée peuvent être obligés de recourir à des pilotes. Ils peuvent aussi devoir se conformer aux règles locales de navigation qui peuvent affecter le programme de la livraison ;
- **de la rémunération des lamaners** – les bateaux mouillant dans un port peuvent être obligés d'utiliser une société de batellerie ou de lamanage pour l'amarrage du bateau et de la cargaison ;
- **des autorisations de navigation** – pour l'entrée et le passage dans un chenal, le mouillage et la notification de navigation ;
- **des avis aux navigateurs.**

**9.1.2.4 Aspects environnementaux****Poussière**

Les activités d'extraction en carrière produisent souvent de la poussière, en particulier pendant la manipulation des stocks d'enrochement et pendant le transport sur des pistes non goudronnées. La quantité de poussière produite dépend de la qualité de la roche, des méthodes de concassage et de tri, et de la manutention. Pour protéger les environs contre la poussière, les tas d'enrochement doivent, dans la mesure du possible, être situés sous le vent des secteurs sensibles avec des systèmes d'arrosage ou d'alimentation en eau pour les maintenir humides. Il faut modérer l'arrosage, car cela peut produire de la boue et poser problème si celle-ci atteint la voie publique. Les pistes non goudronnées peuvent aussi être arrosées.

**Bruit**

À l'instar des carrières, le transport et la manutention sont également sources de nuisances sonores. Des restrictions locales peuvent être imposées et peuvent inclure des interdictions la nuit et/ou le week-end. Ces restrictions peuvent varier en fonction de l'environnement rural ou suburbain et peuvent également affecter le transport par voie d'eau.

**Écologie**

Toutes les roches contiennent une petite proportion (0.25 à 0.5 % du volume) de fines qui peuvent être incrustées dans les enrochements. Quand les enrochements sont déchargés et immergés, elles peuvent provoquer une certaine turbidité. Après l'immersion elles seront diluées et se disperseront ; il faut en contrôler les conséquences sur l'écologie et les conditions hydrauliques locales. Le problème s'aggrave lors de travaux dans des retenues d'eau fermées et des voies d'eau à écoulement lent. Pour éviter les plaintes, le public doit être averti que la poussière peut entraîner un changement temporaire de la couleur de l'eau. L'utilisation de matériaux provenant de déchets peut également affecter l'écologie. Noter que dans certains pays il peut être nécessaire de faire une déclaration d'immersion avec les spécifications particulières des niveaux de turbidité.

**Qualité de l'eau**

L'utilisation de matériaux secondaires et recyclés, y compris certains types de laitiers et de déchets de mines (voir la Section 3.13) peut être interdite à certains endroits pour éviter la pollution de l'eau de surface et des eaux souterraines et la perte d'agrément de la zone. Les risques de pollution des eaux et d'autres types de contamination doivent également être réduits au minimum.

**Le public**

L'expérience montre que si le public est tenu régulièrement informé il est plus enclin à accepter les travaux. L'information peut être passée par des réunions publiques et des visites de site, ou par des bulletins d'information, des articles de presse ou des annonces dans les journaux, des sites internet dédiés, des panneaux d'affichage, des réunions et des visites dans les écoles. Pour assurer la sécurité du public, il faut envisager de clôturer la zone de chantier (c'est une obligation dans de nombreux pays). Bien qu'il soit parfois impossible d'éviter les désagréments causés à la circulation locale, il est souvent possible d'établir des itinéraires alternatifs, qui doivent être clairement indiqués et le public doit en être informé.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

## 9.2 PRÉPARATION DU SITE

### 9.2.1 Aire de stockage et de réparation

#### 9.2.1.1 Localisation, agencement et taille

Le stockage des enrochements peut être fait dans la carrière, au dépôt ferroviaire ou sur les lieux de chargement et de déchargement, dans le port et sur le chantier de construction. Le stockage dans l'eau près du chantier de construction est aussi une option, mais dans ce cas il faut savoir que les blocs de moins de 300 kg peuvent être perdus. Le choix du site et du nombre de stocks est déterminé par la logistique supportant la méthode choisie. La taille de la zone de stockage dépend de la capacité de production de la carrière, du temps nécessaire pour extraire la quantité d'enrochement nécessaire pour la première expédition, de la capacité de transport et de la capacité de construction.

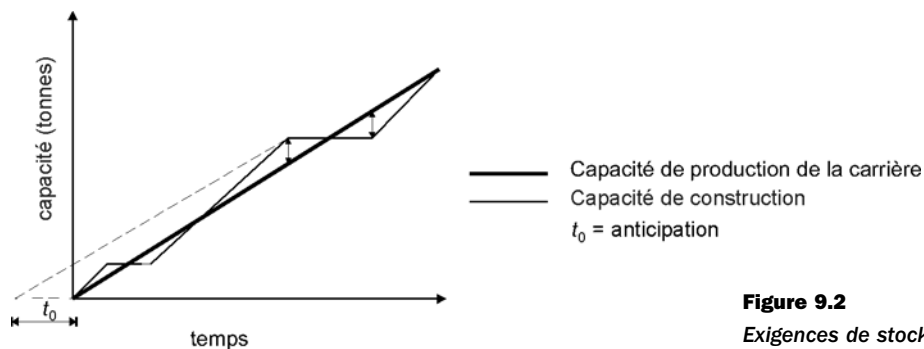
Les carrières ont en général une production hebdomadaire assez constante basée sur la fréquence de l'abattage à l'explosif, la capacité des installations et d'autres contraintes.

Les exigences du site peuvent changer de manière importante en fonction de l'avancement du chantier. Au début du chantier, le déversement en vrac par barge à clapet entraîne habituellement une consommation d'enrochement par semaine beaucoup plus élevée que pour les phases suivantes du chantier, lorsque les différents blocs d'enrochement doivent être placés avec précision.

La planification des travaux doit prendre en compte cette évolution des exigences et – dans la mesure du possible – les flux globaux doivent être contrôlés pour éviter les pics et les chutes d'activité. Comme il est rare d'obtenir un équilibre parfait entre la production de la carrière et les besoins du chantier, des stocks tampons sont habituellement nécessaires.

La Figure 9.2 montre comment gérer une aire de stockage en traçant simplement sur un même graphique les tonnages/heure produits par la carrière et utilisés par le chantier. Les périodes pendant lesquelles les besoins du chantier, représentés par la courbe de capacité de construction, dépassent la capacité de production de la carrière, nécessiteront la mise en place d'un stockage anticipé. Ceci peut nécessiter une anticipation,  $t_0$ , de l'activité de la carrière, avant le démarrage du chantier de construction. La production de cette période étant stockée, elle permet de faire face au pic de demande lors des travaux.

Un graphique semblable de la capacité d'approvisionnement en fonction des besoins du chantier permettra de décider si le stock d'enrochement doit être conservé à la carrière ou stocké sur le site de construction. Les mêmes considérations s'appliquent à tous les types de matériaux. Ceci est important lorsqu'une même carrière fournit tous les types de matériaux, sachant que la production d'enrochement dépend de la production de grandes quantités de petit enrochement et de tout-venant.



**Figure 9.2**  
Exigences de stockage

La taille des stocks augmente avec les quantités d'enrochement à y stocker et avec sa blocométrie. Lorsque l'espace est limité, les stocks peuvent atteindre des hauteurs considérables. Un des critères est la possibilité pour un tombereau de rouler sur un stock constitué de petit enroche-

ment et d'enrochement moyen. C'est en général le cas pour des blocométries inférieures à 5 à 40 kg, et dans ce cas la hauteur du stock est déterminée par :

- la pente de la rampe d'accès au stock – les pentes maximums étant approximativement de 15/1 ;
- la ségrégation – des stocks construits par couches de 4 à 5 m empêchent les plus gros enrochements de rouler vers le bas de la pente ;
- la poussière – la poussière soulevée par le vent dans les secteurs exposés peut être contrôlée par arrosage (pour les autres impacts environnementaux, voir la Section 2.5) ;
- sol-support – capacité portante et stabilité.

La hauteur des stocks d'enrochement de blocométrie supérieure à 10 – 60 kg est limitée par la portée des chargeuses sur pneus ou des pelles hydrauliques disponibles, en général 3 à 3.5 m de haut pour les chargeuses sur pneus et de 4.5 à 5.5 m pour les pelles.

Pour éviter les mélanges entre les différents matériaux (c.-à-d. blocométrie et origine), un espace suffisant et/ou des cloisons de séparation seront aménagés pour séparer les stocks. Si on place les gros matériaux à côté des matériaux moyens, les différences seront plus marquées et les mélanges seront visibles immédiatement.

Le Tableau 9.2 donne une estimation des quantités pouvant être stockées par hectare, en excluant tout espace de séparation et/ou voies de passage.

**Tableau 9.2** Estimation des quantités d'enrochement pouvant être stockées par hectare

Type de matériau		Déversement seul (t / ha)	Déversement et rangement (t / ha)
Gros enrochement	6 – 10 t	15 000	40 000
	3 – 6 t	20 000	45 000
	1 – 3 t	25 000	50 000
Petit enrochement	45/200 mm	100 000	-
Tout-venant de noyau	1 – 500 kg	110 000	-

L'emplacement de la zone de stockage (en carrière comme sur site) par rapport au point de chargement/déchargement est important. Dans le cas d'un transport par voie d'eau et si le stock est situé près de la zone de chargement/déchargement, des chargeuses sur pneus peuvent être utilisées pour transporter vers ou à partir des barges ou navires. Pour faciliter le chargement et le transport, les gros blocs devraient être entreposés au plus près du bord du quai. Les petits enrochements et les enrochements moyens peuvent être situés plus loin, car ils seront transportés généralement par tombereaux.

**NOTE:** la structure du quai devra être étudiée pour s'assurer qu'il peut résister aux poids des stocks (voir également la Section 9.2.2).

Dans certains cas, des travaux de réparation et d'entretien peuvent être faits sur le site pour l'accès des engins terrestres et des équipements de transport par voie d'eau. Le transport et la manutention des enrochements provoquent une usure et une détérioration importante des équipements et notamment des camions, dont les bennes nécessiteront aussi des réparations importantes. En général ce travail peut être fait dans un atelier local. Pour les équipements flottants, il est possible d'établir un atelier sur site pour les petites réparations, le gros entretien se faisant dans un port voisin ou dans un port provisoire sur le chantier de construction. Cet atelier doit également pouvoir réparer d'autres types de matériel utilisé sur le chantier de construction comme des grues, des bulldozers ou des chargeuses.

Quand des équipements terrestres sont utilisés en zone de marnage pendant la basse mer, il est essentiel d'avoir à disposition, les outils de réparation de secours et/ou un équipement de remorquage pour récupérer les machines en panne avant qu'elles ne soient submergées par la marée.

### 9.2.1.2 Conditions d'exploitation et de sécurité

Les exigences de chargement, de déchargement et de constitution des stocks varient en fonction du mode du transport et des équipements disponibles, mais il y a certaines constantes d'organisation, de contrôle qualité et d'hygiène et sécurité communes à tous les types de chantiers :

- dans la mesure du possible, la zone choisie doit se trouver sur un terrain plat, sans obstacles, sans installations en sous-sol et sans débris ou morceaux de blocs. C'est particulièrement important pour l'utilisation de grues ;
- l'accès doit être interdit à tout piéton non autorisé ;
- pour empêcher une contamination des blocométries des différents enrochements, la surface doit être nivelée avec du sable propre ;
- les différentes zones doivent être bien éclairées la nuit ;
- un espace suffisant doit être aménagé pour permettre le stockage des différentes catégories de matériaux, celles-ci doivent être indiquées clairement, sans chevauchement ;
- les équipements de chargement doivent être entretenus de manière suffisante pour pouvoir charger tous les types de matériaux demandés. Ils doivent être munis de l'équipement de sécurité obligatoire pour protéger les conducteurs et tous les autres opérateurs travaillant à proximité. Ils doivent avoir une capacité correspondant aux exigences du navire de transport, par exemple pouvoir charger à un rythme de 300 tonnes par heure. Les équipements de secours appropriés doivent être disponibles à proximité ;
- si possible, un système de rotation à sens unique doit être mis en place pour contrôler la circulation ;
- les engins doivent être munis d'un système d'avertissement sonore en marche arrière avec sirènes et caméras ;
- seul le personnel ayant suivi une formation adaptée peut participer aux opérations de chargement, afin de respecter les règles d'hygiène et de sécurité et d'assurer un contrôle qualité suffisant ;
- tout le personnel doit porter un équipement de sécurité réglementaire et personnel lui permettant d'être parfaitement vu et protégé ;
- un accès contrôlé aux ponts à bascule ou à tout autre équipement de contrôle du poids empêchera les surcharges et pourra être utilisé pour le paiement des livraisons ;
- chaque véhicule, navire ou train quittant la zone de chargement doit être muni d'un document clair sur le type de produit transporté, sa provenance, la quantité, la date, moyen de transport etc. ;
- le site de déchargement doit être choisi en fonction de la protection de l'habitat et des zones protégées pour l'environnement ;
- les quais sur terre-plein et sur pieux devront être vérifiés pour éviter tout dommage causé par les chargements ;
- une inspection des secteurs de chargement et de déchargement doit être faite pour identifier les réseaux, les servitudes et prévenir les risques de dommages.

### 9.2.2 Installations de chargement et de déchargement

Le chargement et le déchargement nécessitent une infrastructure et des équipements adaptés. Cette section se concentre sur les infrastructures plutôt que sur le matériel et les équipements. Des renvois à la Section 9.3 sont faits, dans laquelle les équipements et le matériel de maintenance des enrochements et des matériaux associés sont décrits en détail.

Le chargement des navires est souvent une opération qui se fait 24H/24, à moins que le marnage ne le permette pas à marée haute ou à marée basse. Habituellement plusieurs équipes sont nécessaires pour avoir des périodes de travail continues ou variables.

### 9.2.2.1 **Chargement des barges**

Des barges à pont plat (voir la Figure 9.11) peuvent être chargées par :

- des tombereaux (voir la Figure 9.12) et des chargeuses sur pneus, le cas échéant ;
- des chargeuses sur pneus (pour le chargement et le transport) (voir la Figure 9.13).

La taille des barges à employer dépend de la taille des engins de chargement. La taille des engins utilisés dépend de l'espace disponible à quai et sur le pont de la barge ainsi que de la solidité du pont. Les combinaisons suivantes des tailles de barges et d'engins sont habituellement (mais pas toujours) utilisées :

- barges à pont plat de 1800 t chargeuses sur pneus de 30 t et tombereaux articulés de 25 t ;
- barges à pont plat de 3000 t chargeuses sur pneus de 30 t et tombereaux articulés de 30 t ;
- barges à pont plat de 4500 t chargeuses sur pneus de 30 à 50 t et tombereaux rigides de 35 t ;
- barges à pont plat de 9000 t chargeuses sur pneus de 40 à 50 t et tombereaux rigides de 50 t ;
- barges à pont plat de 18000 t chargeuses sur pneus de 40 à 60 t et tombereaux rigides de 80 t.

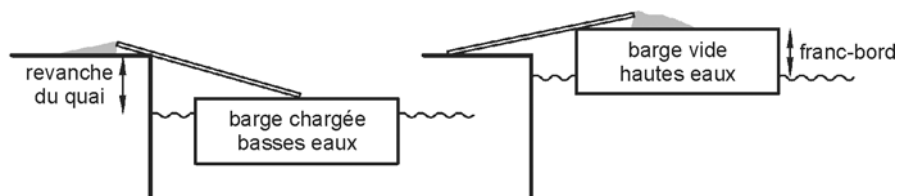
Les matériaux peuvent être chargés à bord directement par des chargeuses sur pneus ou par des tombereaux, en fonction de l'équipement disponible et de la distance entre les stocks et le bord du quai. Les blocs de plus de 1 t ne peuvent pas être déversés sur le pont d'une barge, mais doivent être portés à bord par une chargeuse sur pneus – le chargement par basculement des gros blocs d'enrochement endommagera le pont à moins qu'il n'ait été renforcé avec des plaques d'acier supplémentaires pour résister à de tels efforts. Cela peut accélérer le cycle de chargement mais en augmente aussi le coût. Réciproquement, si les stocks sont loin du bord du quai et qu'il n'y a pas de zone de gerbage à proximité, une pelle peut être utilisée pour décharger les plus gros blocs des tombereaux, même si ce processus est lent.

Du bois, du béton, du bitume et des plaques d'acier supplémentaires peuvent être utilisés pour protéger le pont d'une barge, mais l'installation et l'entretien d'une couche de protection sont coûteux. La protection du pont contribue à le protéger contre les dommages induits par les équipements comme la flexion des tôles entre les barrots du pont. En outre, le déchargement de gros blocs d'enrochements en les faisant basculer endommage la protection du pont. Une décision économique simple doit être prise : soit installer une protection du pont soit rembourser au propriétaire les dommages causés au pont en application des termes standard des contrats d'affrètement.

Une puissante chargeuse sur pneus chargeant ou transportant à partir d'un stock sur une distance d'environ 300 m fait de 14 à 16 cycles par heure.

L'accès à la barge se fait habituellement par une rampe ou une passerelle. Les personnes responsables du chargement doivent décider si les chargeuses sur pneus ou les tombereaux peuvent rouler jusqu'à la barge, après analyse des questions suivantes :

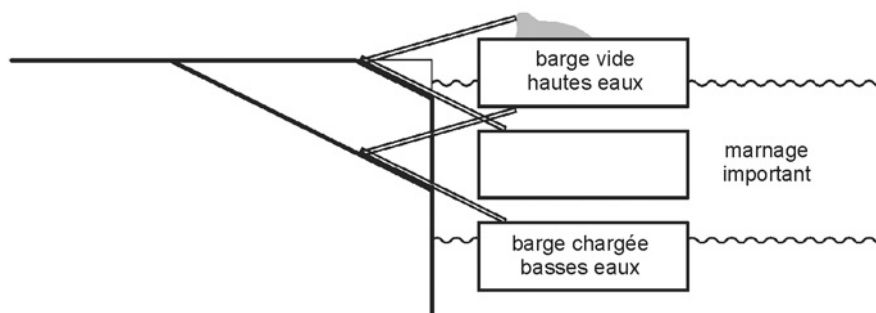
- le franc-bord de la barge à vide ou en charge ;
- la revanche du quai en basses et hautes eaux ;
- la hauteur de marnage ;
- la possibilité de ballaster la barge.



**Figure 9.3** Variation de l'inclinaison de l'accès à la barge en fonction de la marée et du chargement

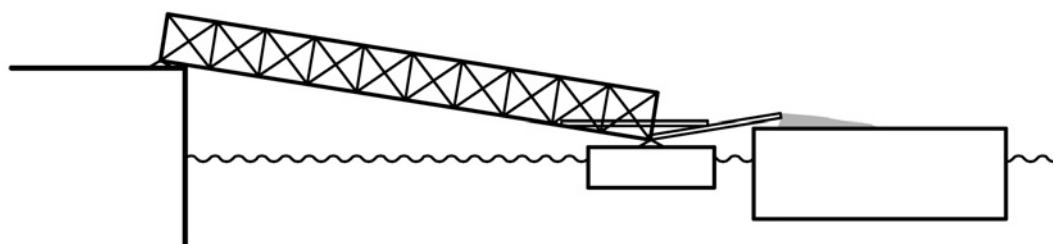
Quand la différence de hauteur le permet, la manière la plus simple d'établir un accès est d'utiliser une rampe en bois (composée de gros madriers en bois) ou en acier conçue pour cet usage. Avant de se lancer dans la construction de la rampe, il est important de considérer son poids, la largeur des engins de chargement mesurée d'un pneu à l'autre (la largeur de la rampe doit faire 1.5 fois l'écartement des roues) et la longueur nécessaire. La pente de la rampe ne doit pas dépasser 20 %. En pratique cela se traduit par une différence maximum de hauteur entre le quai et la barge de 1.5 à 2 m, vers le haut ou vers le bas (voir la Figure 9.3). Il est important que les deux extrémités de la rampe soient convenablement encastrées, dans le sol ou dans du sable par exemple, pour qu'elles ne puissent pas être déplacées par les pneus des engins ou pour éviter aux extrémités de la rampe de rebondir au passage des engins. De petits tas de matériaux sur le pont de la barge et en haut du quai suffisent généralement et permettent à la rampe de bouger librement, réduisant ainsi les risques de dommages (voir la Figure 9.3).

Un marnage important, des quais élevés et des navires de faible franc-bord nécessitent le recours à un niveau intermédiaire pour compenser la différence de hauteurs (voir la Figure 9.4).



**Figure 9.4** Compensation des différences de hauteurs en cas de fort marnage

Lorsqu'il n'est pas possible d'employer la méthode ci-dessus, ou lorsqu'il est nécessaire de rester en eau profonde à l'écart du quai, une passerelle amarrée à un petit ponton flottant librement doit être envisagée (voir la Figure 9.5).



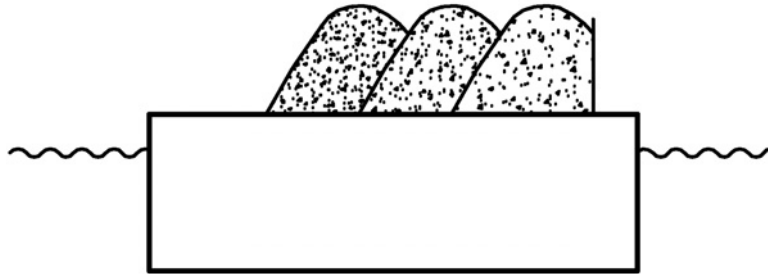
**Figure 9.5** Passerelle d'accès avec ponton flottant librement

La taille de la barge et de la passerelle ainsi que la taille et le poids total en charge des engins utilisés sont des critères de choix importants.

En utilisant un camion à la fois, la durée du cycle pour arriver jusqu'à la barge, tourner, benner et repartir détermine le taux de chargement réalisable. Par exemple, avec une durée de cycle de 150 secondes (soit 2.5 minutes) et un rendement de 80 %, il est possible d'atteindre environ 20 cycles à l'heure. Le taux de chargement est alors de :  $20 \times 25 \text{ t}$  (capacité du camion) soit 500 t/h.

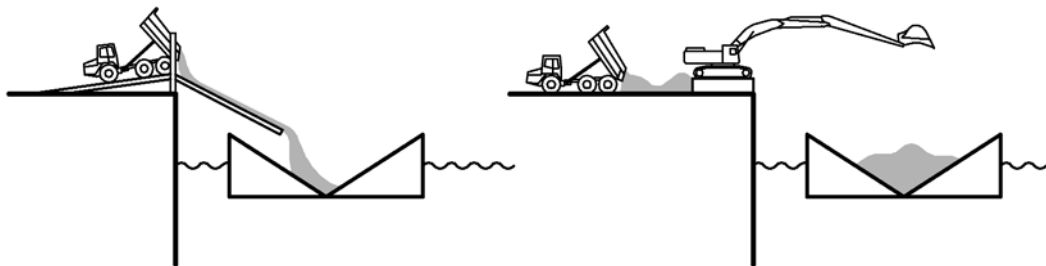


Pour obtenir un chargement complet de l'enrochement, que la charge soit importante ou faible, il est recommandé qu'une chargeuse sur pneus empile à intervalles réguliers les matériaux à la hauteur maximum (voir la Figure 9.6). Quand des chargeuses sur pneus sont utilisées pour le chargement et le transport, ou quand des tombereaux sont déchargés avec des pelles hydrauliques (voir la Figure 9.7 - droite), les matériaux doivent être empilés immédiatement. Le chargement doit être dirigé par le capitaine de la barge, qui est responsable de la quantité chargée et de la stabilité de la barge.



**Figure 9.6** Empilement des enrochements sur une barge après reprises par une chargeuse.

Pour les petits matériaux comme les enrochements pour filtre ou le tout-venant de carrière (jusqu'à 300 kg), il est possible de procéder à un déchargement direct à partir des camions par l'intermédiaire d'une goulotte (voir la Figure 9.7 - gauche). A contrario, lors du chargement d'enrochement plus gros ou s'il y a un risque d'endommager le pont du navire, les matériaux peuvent être chargés à l'aide d'une pelle hydraulique (voir la Figure 9.7 - droite). Ce système peut être aussi utilisé pour charger les barges à pont plat bien que dans ce cas, la pelle devra être assistée d'une chargeuse sur pneus sur la barge pour répartir et empiler les matériaux pour éviter d'avoir à repositionner la barge plusieurs fois.

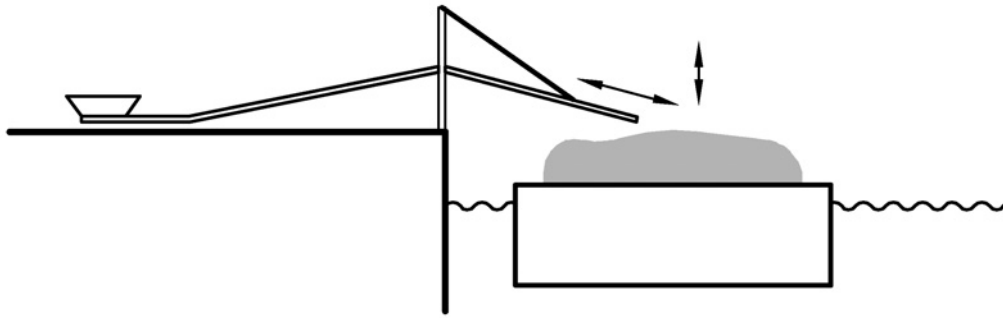


**Figure 9.7** Chargement des enrochements dans une barge ou un navire

Les matériaux de petite taille (de 200 millimètres à 10 kg environ) peuvent être chargés par une bande transporteuse (voir les Figure 9.8) à hauteur réglable pour compenser les différences de marée et de franc-bord, maintenir une hauteur de chute minimum constante et réduire toute fragmentation des enrochements.

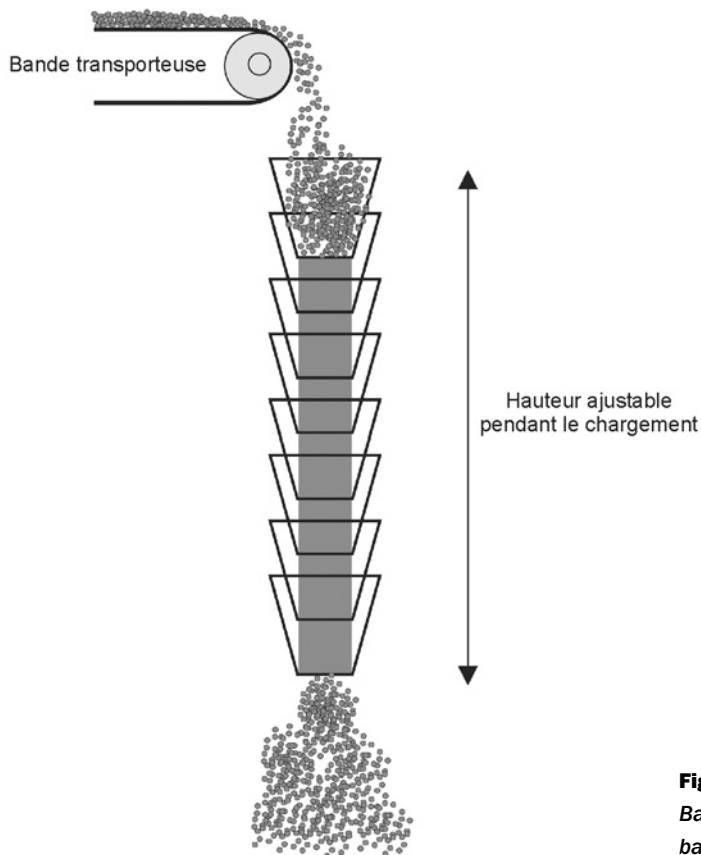
La bande transporteuse doit pouvoir pivoter pour répartir les matériaux sur toute la largeur de la barge ou du navire, la répartition en longueur se fait par déplacement de la barge ou du navire. Le navire doit se rééquilibrer en permanence (en utilisant ses ballasts) pendant le chargement afin de conserver une assiette nulle. Noter que les tas élevés peuvent provoquer une ségrégation des matériaux, les gros blocs roulant au fond et les fines restant au-dessus.

La solution la plus simple est d'utiliser une bande transporteuse chargée par une trémie avec un système d'alimentation par convoyeur à godets. La trémie peut être chargée soit par des tombereaux lorsqu'elle est de taille suffisante et si les trajets d'acheminement sont longs. Sinon, une chargeuse sur pneus peut alimenter la trémie quand elle est de petite taille et les trajets plus courts, c'est-à-dire lorsque le stock est situé près de la trémie. Les matériaux sont gèrbes dans la trémie, puis transférés par le convoyeur à godets sur la bande transporteuse pour finalement arriver dans le navire.



**Figure 9.8** *Chargement par trémie et bande transporteuse*

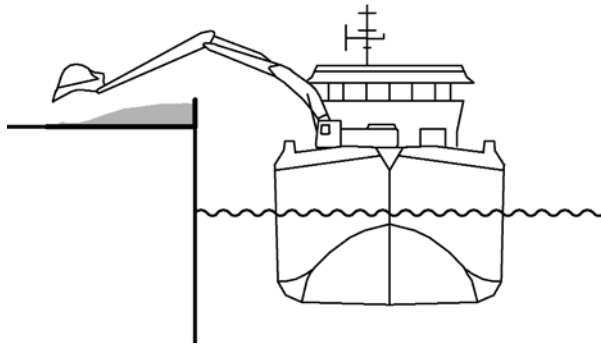
Le chargement par bande transporteuse, en particulier dans certaines conditions de chaleur et de sécheresse, produit beaucoup de poussière. Il peut être nécessaire de prendre des mesures préventives, en arrosant avec de l'eau pour réduire la volatilité de la poussière ou en utilisant des bacs en cascade (voir Figure 9.9) qui empêchent la poussière de s'échapper. Néanmoins, ce système nécessite du personnel supplémentaire, car le niveau des bacs en cascade doit être ajusté pendant le chargement du navire.



**Figure 9.9**  
*Bacs en cascade alimentés par une bande transporteuse*

### 9.2.2.2 **Chargement des caboteurs**

Des caboteurs peuvent être utilisés pour transporter des enrochements petits ou moyens. Du gros enrochement peut même y être transporté, à la condition que le fond de la cale soit recouvert d'une couche d'un matériau plus fin pour le protéger contre les chutes de blocs. Ce type de navire se charge généralement avec une pelle placée sur un pont roulant au-dessus de la cale (voir la Figure 9.10). Quand la pelle est équipée d'un grappin, les matériaux peuvent être déversés sur le quai près du navire, puis chargés directement avec le grappin. Cependant, lorsque la pelle est équipée d'un godet les matériaux doivent être déversés dans un bac où la pelle les prend (voir la Figure 9.10). Ce système de transport offre l'avantage d'une vitesse de navigation beaucoup plus élevée que les barges remorquées, avec un déchargement indépendant ce qui dispense de la présence d'équipement de déchargement supplémentaire au point d'arrivée.



**Figure 9.10** Chargement d'un caboteur

### 9.2.2.3 Chargement des camions et des trains

Le chargement des camions et des trains diffère du chargement des navires en ce sens qu'on ne peut charger que des petites quantités à la fois. La planification des opérations de chargement doit prendre en compte le type de véhicule (p. ex. camion plateau, wagon plat ou wagon tombe-reau) et les matériaux à charger. Pour s'assurer que le matériel requis est disponible et que ne soient facturées des exigences spéciales de chargement, il est recommandé de contacter le plus tôt possible le propriétaire des camions ou des wagons. Les principales difficultés sont :

- la zone de chargement – le terrain doit être ferme et plat pour permettre l'accès des véhicules sur le site ;
- l'accès aux zones de chargement – tous les camions ne sont pas des véhicules tout terrains, en particulier les semi-remorques ;
- la disponibilité de camions à châssis en acier – prévoir des frais de réparation en cas d'indisponibilité ;
- la disponibilité de l'équipement de chargement approprié, c'est-à-dire fourche ou grappin (voir la Section 9.3), et de bons opérateurs ;
- l'arrimage des blocs – lorsque des gros enrochements doivent être chargés sur des camions à plateau, il faut s'assurer de la capacité des conducteurs à arrimer la charge en toute sécurité avant de quitter le site et estimer le temps nécessaire ;
- la disponibilité de la main-d'œuvre et de l'équipement nécessaires à la carrière pour charger les enrochements – si ce n'est pas le cas, du matériel supplémentaire devra peut être loué ou acquis.

### 9.2.2.4 Considérations supplémentaires pour le déchargement

Le déchargement des matériaux sur le site risque d'être fait dans des zones aménagées temporairement, mais il est essentiel que les mêmes directives concernant les bonnes pratiques de chargement soient aussi suivies pour décharger. En outre, en raison de la nature et de la localisation du site de l'ouvrage en enrochement (en particulier les ouvrages de protection du littoral), plusieurs autres facteurs doivent être pris en compte, notamment :

- la protection de la main-d'œuvre, des installations et des matériaux contre les actions de la mer. Par exemple, les matériaux du noyau et les matériaux de filtre devraient être protégés pour éviter leur perte lors de tempêtes. On utilise souvent pour se faire des tas d'enrochements naturels placés entre la mer et les stocks de matériaux plus petits ;
- l'interdiction des zones de stockage au public, à l'aide de panneaux d'avertissement et, si possible à l'aide de clôtures pour empêcher le public, et en particulier les enfants, de grimper sur les stocks d'enrochements ;
- l'identification visible des stocks, même à marée haute, pour empêcher les jet-skis, les véliplan-chistes et les petits bateaux de s'échouer sur les stocks submergés à proximité de la plage ;
- les moyens de s'assurer que le personnel maintient une distance de sécurité avec les tombe-reaux, qui sont dangereux lorsqu'ils déchargent, en particulier sur des sols instables ;

- la préparation d'instructions claires pour tout le personnel du site concernant le déchargement des matériaux sur le site. Le personnel non essentiel doit rester à l'écart de la zone pendant le déchargement;
- l'application rigoureuse des réglementations locales concernant l'hygiène et la sécurité;
- les mesures pour empêcher la formation de zones molles sur le littoral ou au fond des rivières lorsque les stocks sont enlevés.

#### **Précautions particulières pour décharger les camions et les trains**

Le site doit offrir assez d'espace de stockage et assurer la sécurité de manœuvre aux camions, aux engins de manutention d'enrochement et permettre le rechargement simultané des véhicules de chantier. Le type d'engin de manutention d'enrochement nécessaire dépendra de l'état de la route, des wagons utilisés, de la taille des enrochements, de la place disponible pour les stocks et des équipements de rechargement. Les gros blocs en particulier nécessitent des opérations de manutention précises en raison des risques de dommages aux véhicules de chantier ou aux bacs de stockage temporaire (pour plus de détails voir les Sections 9.4.1 et 9.4.2).

#### **Précautions particulières pour décharger les navires**

La zone de déchargement doit être dégagée de tous débris avant la livraison suivante. L'armateur du navire a souvent des exigences particulières qui doivent être respectées.

Les quais provisoires doivent offrir des zones de stockage suffisantes pour accueillir un chargement complet (voir la Figure 9.11). L'équipement terrestre nécessaire sera conditionné par la méthode de livraison, l'espace disponible et la localisation de la livraison. Les conditions locales du sol sont souvent déterminantes dans le choix des engins à employer. Il faut s'assurer qu'ils peuvent fonctionner ou tourner sur la plage ou sur l'estran et qu'ils peuvent gérer les quantités d'enrochement dans les délais pour respecter le programme de livraison. Comme chaque site est sujet à différents paramètres, il est recommandé d'étudier ces points avec les fournisseurs potentiels d'engins et d'enrochement au moment de la préparation de la réponse à l'appel d'offres. Les éléments suivants sont importants:

- avant la livraison, il est essentiel que tous les permis, accords locaux avec les pêcheries, les notifications aux marins et les autorisations environnementales soient publiés. Des copies de ces derniers documents devraient être conservées à bord du navire de livraison. Ces autorisations devraient également être demandées pour les zones de transbordement et les routes pour le transfert à la côte;
- les autorités maritimes locales (comme les garde-côtes locaux) doivent être informées des livraisons prévues et des itinéraires suivis;
- les livraisons maritimes doivent être dirigées par un capitaine d'armement expérimenté ou un officier de port dont le rôle sera d'établir la liaison entre le personnel du chantier et le capitaine des navires de livraison. Il doit être le point de contact unique avec le navire et surveiller, pour le compte du capitaine du navire, la zone de déchargement pour déceler les obstacles pendant les périodes de basses eaux;
- des signaux visibles pour la position de déchargement doivent être installés, avec les amers associés;
- des prévisions météorologiques doivent être obtenues pour le secteur, avec une mise à jour toutes les 24 heures;
- des points de mouillage provisoires ou autres installations similaires doivent être prévus et testés dans la mesure du possible;
- lorsque les barges doivent être échouées, il faut considérer que les conditions d'échouage changeront entre les livraisons. Lorsqu'on ne peut pas voir le fond, il sera nécessaire d'adopter une méthode acceptable permettant de vérifier que le profil de la plage n'a pas changé. Pour toutes les opérations maritimes, c'est le capitaine qui est responsable des décisions.



Figure 9.11 Déchargement d'une barge de transport maritime (source : Royal Boskalis Westminster)

## 9.3 ÉQUIPEMENT

### 9.3.1 Généralités

Cette section analyse les types d'équipement utilisés pour placer les enrochements dans un ouvrage en enrochement et établit une distinction entre les opérations **terrestres** et les opérations **nautiques**. Les opérations terrestres incluent l'utilisation d'équipement terrestre pour placer les enrochements sous l'eau. Des capacités caractéristiques du matériel sont analysées ainsi que des aspects relatifs à la construction.

Pour le choix de l'équipement, il est important de faire la distinction entre un **déversement direct des matériaux en vrac**, par exemple pour le noyau d'une digue, et la pose contrôlée des enrochements, comme pour les travaux des carapaces ou de sous-couches des protections de talus et/ou de fond. En général, la pose contrôlée consiste à déverser une quantité limitée d'enrochement par cycle ou à placer les blocs individuellement.

#### Opérations terrestres

Pour les opérations terrestres, des tombereaux peuvent être utilisés pour **déverser directement** les matériaux en vrac, au besoin assistés par des bulldozers, des chargeuses sur pneus, des pelles hydrauliques et des grues à câbles. Les grues et les pelles hydrauliques peuvent être utilisées pour la **pose individuelle** d'enrochements naturels. Les grues à câble sont souvent utilisées pour les blocs artificiels.

Les fabricants de matériel de construction publient des catalogues avec les caractéristiques de tous leurs produits et beaucoup publient aussi ces informations sur l'Internet. Certains des fabricants d'équipements fréquemment utilisés, tels que des tombereaux, pelles, grues, chargeuses sur pneus et bulldozers, sont Caterpillar ([www.caterpillar.com](http://www.caterpillar.com)), Daewoo ([www.daewoo.com](http://www.daewoo.com)), Hitachi ([www.hitachi-c-m.com](http://www.hitachi-c-m.com)), Komatsu ([www.komatsu.com](http://www.komatsu.com)), Liebherr ([www.liebherr.com](http://www.liebherr.com)), Link-Belt ([www.linkbelt.com](http://www.linkbelt.com)), Manitowoc ([www.manitowoc.com](http://www.manitowoc.com)), Volvo ([www.volvo.com](http://www.volvo.com)).

Pour la plupart des projets, le maître d'ouvrage choisira des entreprises possédant des types particuliers de machines, certaines d'entre elles peuvent avoir été modifiées pour améliorer leur performance pour les tâches courantes. Des caractéristiques générales de ces types de matériel sont présentées au Tableau 9.3, et des informations particulières peuvent être fournies par les entreprises engagées sur le site.

### Opérations nautiques

Pour les opérations nautiques, les types de navires suivants sont utilisés pour le **déversement direct** des matériaux en vrac :

- barges à clapets et navires à déversement latéral ;
- barges équipées d'une grue munie d'un bac à enrochement ;
- barges à pont plat avec chargeuse sur pneus.

Pour une **pose contrôlée**, les navires suivants sont utilisés :

- navires à déversement latéral ;
- pontons avec pelle hydraulique ou grues à câble ;
- navires équipés d'un tube plongeur flexible ;
- dragues aspiratrices en marche, spécialement équipées d'un tube plongeur pour la mise en place des matériaux dragués.

### 9.3.2 Équipement terrestre – déversement des matériaux

Un remblai en enrochement est construit en déversant directement les matériaux (en vrac) avec des tombereaux ou des chargeuses ou des pelles hydrauliques ou des grues à câble. Le Tableau 9.3 donne une liste des équipements terrestres généralement utilisés. La puissance, la capacité, le poids à vide et la largeur sont simplement donnés à titre indicatif et couvrent quasiment toute la gamme allant des plus petits aux plus gros équipements. Le type d'équipement nécessaire dépend de la taille du chantier et des conditions de travail sur le site.

**Tableau 9.3** Vue d'ensemble des types d'équipement avec les gammes de puissance, de masse, de capacité et de largeur

Engins	Puissance du moteur (hp*)	Poids à vide (t)	Capacité	Largeur effective (m)
Bulldozer	140 – 410	17 – 79		3.26 – 4.31
Pelle	140 – 515	22 – 85	1.2 – 4.6 m <sup>3</sup>	2.80 – 3.50
Chargeuse sur pneus	235 – 475	23 – 50	3.6 – 6.6 m <sup>3</sup>	3.15 – 3.90
Tombereau articulé	280 – 415	23 – 35	23.6 – 38.1 t	2.90 – 3.45
Tombereau rigide	485 – 730	24 – 76	39.3 – 66.5 t	5.00 – 5.10
Semi-remorque	225 – 375	12 – 20	12.5 – 25.0 t	2.55
Grue câble équipée d'un grappin	150 – 375	50 – 160	65 – 325 tm	4.30 – 6.45
Grue à câble	350 – 750	150 – 350	500 – 1 500 tm	6.00 – 8.50

**Note :** \* 1 hp = 0.746 kW.

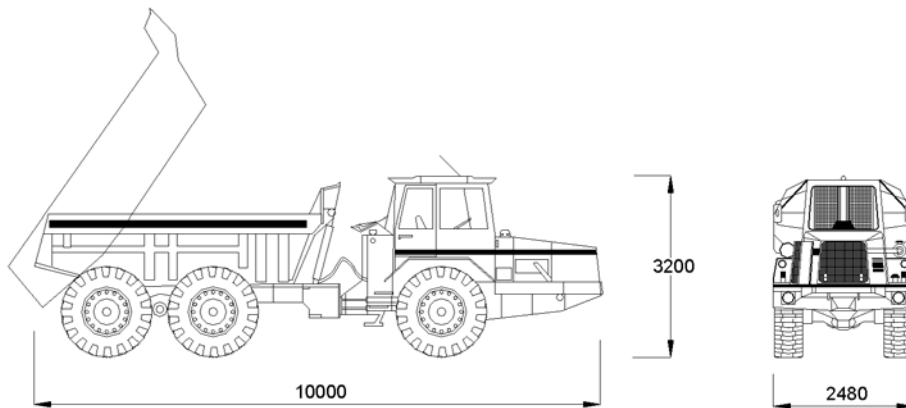
### Camions bennes

La méthode de construction la plus simple consiste à déverser les matériaux directement en vrac avec des semi-remorques ou des tombereaux, transportant généralement une charge de 20 à 50 t (plus si du matériel de la carrière est disponible). L'aide d'un bulldozer est souvent requise pour étendre les matériaux déversés. Ces camions nécessitent une route d'accès ou une piste de chantier d'au moins 4 m de large. La taille des camions dépend de la blocométrie de l'enrochement à transporter. S'il n'y a qu'une route d'accès à sens unique, des points de croisement d'au moins 7 m de large doivent être aménagés à intervalles réguliers.

Il existe deux types de camions bennes, pouvant être utilisés sur la route ou uniquement sur des pistes de chantier. Les tombereaux (ou dumpers) sont utilisés pour les charges lourdes, pour les gros enrochements et ils peuvent rouler sur des terrains accidentés, par exemple sur des enrochements allant jusqu'à 300 kg environ. Les bennes sont soumises à des efforts considérables lorsqu'elles sont chargées d'enrochements et doivent être renforcées ou protégées. Les tombereaux en charge ne sont pas autorisés sur les voies publiques en raison des dommages causés par leur charge par essieu élevé. Il existe maintenant des bennes partiellement en caoutchouc ou avec une protection en caoutchouc pour ces véhicules. Leur utilisation permet de réduire l'usure du matériel ainsi que les nuisances sonores. La Figure 9.12 montre un tombereau articulé de dimensions habituelles.

L'efficacité et la résistance aux avaries sont améliorées par l'utilisation de bonnes pistes pour le transport sur le site. C'est particulièrement important quand les véhicules routiers doivent apporter les matériaux directement sur le site.

Des tombereaux sont utilisés pour transporter les blocs d'enrochement de l'aire de stockage temporaire jusqu'au positionnement final. Au Royaume-Uni, les blocs sont souvent livrés sur la plage à marée haute par barge ou navire à déversement latéral. À marée basse, les blocs sont récupérés et chargés dans des tombereaux pour les transporter sur le lieu de pose.



**Figure 9.12** Tombereau articulé, dimensions habituelles (mm)

Les tombereaux ne sont pas conçus pour rouler sur de gros enrochements et une couche de matériaux plus fins devra être utilisée comme colmatage des enrochements. Il faudra peut-être renouveler ce colmatage à chaque marée puis l'enlever après utilisation, afin de préserver la porosité du noyau ou de la sous-couche.

### Chargeuses sur pneus

Des chargeuses sur pneus (voir la Figure 9.13) peuvent être utilisées quand les enrochements peuvent être pris d'un stock situé juste à côté du chantier, comme dans le cas de la construction de petites digues ou de protections côtières. Les chargeuses sur pneus ont l'avantage sur les camions de pouvoir placer les enrochements plus loin de la crête et de manière plus contrôlée.



**Figure 9.13**  
Chargeuse sur pneus embarquée sur une barge échouée  
(source : Royal Boskalis Westminster)

L'utilisation des chargeuses sur pneus pour placer les enrochements en vrac est limitée à une blocométrie de 300 kg maximum, c'est-à-dire pour la pose de matériaux de noyau, et dans certains cas pour les sous-couches. Les chargeuses sur pneus équipées d'un godet tendent à enlever les matériaux de surface lorsqu'elles puisent dans les stocks, ce qui peut entraîner une contamination. Quand le godet est remplacé par une fourche, des blocs plus importants peuvent être manipulés sans les fines.

### Pelles

Toutes les pelles (voir la Figure 9.14) doivent avoir une caisse renforcée et résistante à l'eau, ce qui permet d'allonger leur durée de vie. De l'huile biodégradable doit être utilisée si possible dans les circuits hydrauliques des pelles fonctionnant dans des environnements sensibles à la pollution, pour que la rupture d'un flexible n'ait pas de conséquences sur l'environnement. Il est important que toutes les pelles soient équipées de système pour limiter les effets des fuites d'huile de moteur ou de carburant. Le plein en carburant des engins doit se faire dans une zone spéciale, éloignée de la plage ou des berges, équipée de réservoirs clos et avec des tuyaux à déclenchement rapide. Des équipements à grande portée (voir la Figure 9.22) sont souvent utilisés pour prolonger le temps de travail à la marée, mais cela réduit la capacité de la pelle et nécessite l'utilisation de machines plus grosses.



**Figure 9.14** Pelle (à caisse renforcée) travaillant depuis la crête (source : J D Simm)

Le Tableau 9.4 donne des indications sur la taille minimale des pelles nécessaires en fonction de la taille de l'enrochement.

**Tableau 9.4** Rapport entre la taille des pelles et celle de l'enrochement

Taille de l'enrochement	Matériau de noyau	1 – 3 t	3 – 6 t	6 – 10 t	10 – 15 t	15 – 20 t
Taille de la pelle	15 t	20 t	30 t	45 t	60 t	70 t

### Grues à câbles ou sur chenilles

Les enrochements livrés par tombereaux ou chargeuses sur pneus peuvent être également mis en œuvre à l'aide de grues à câbles (voir la Figure 9.15). Pour disposer les matériaux en vrac ces grues peuvent travailler avec des bennes ou des bacs d'enrochement remplis à la carrière ou à partir des stocks et transportés sur le site de construction par camions, ou bien des bacs chargés



directement sur le site. Dans ces situations les grues utilisées sont des grues lourdes qui prennent beaucoup de place. La capacité de production de ce type de grue est déterminée par le volume d'enrochement qu'elle peut lever, par sa portée et par sa vitesse de rotation et de levage. Les constructeurs fournissent des tables et des abaques avec les capacités de levage qui dépendent de la longueur et de l'angle de la flèche et de son rayon d'action. Si les enrochements sont placés dans des bacs, le rapport contenant/charge utile varie de 1/2 à 1/6.



**Figure 9.15**  
Grue sur chenilles travaillant sur la crête d'une digue (source : Brien Wegner, USACE)

### 9.3.3 Équipement terrestre – placement contrôlé

Le placement contrôlé est défini ici comme le placement d'enrochement en vrac par petite quantité ou comme le placement individuel de blocs plus lourds.

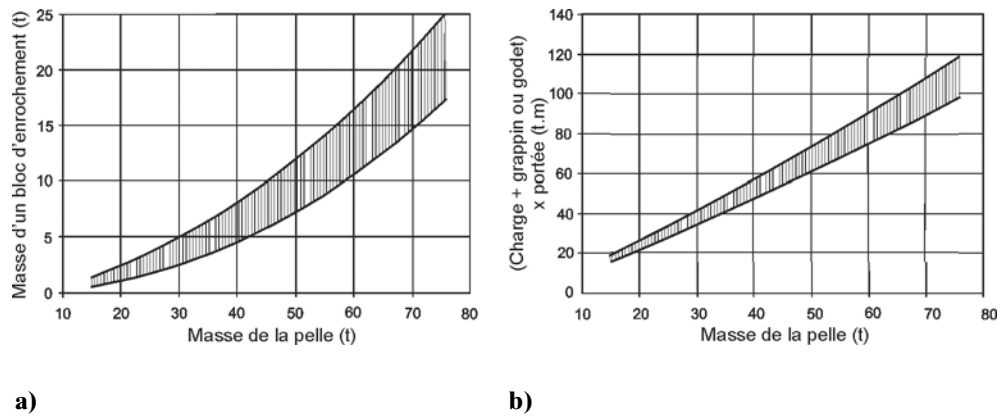
Pour le placement de ce type d'enrochement une pelle hydraulique ou une grue à câble (p. ex. voir la Figure 9.14) est utilisée. Pour le placement successif de petites quantités d'enrochement, les pelles hydrauliques sont plus adaptées en raison de la rapidité de leur cycle d'utilisation. De nombreuses pelles sont équipées de grappin ou de pince (voir Figure 9.17) qui permettent de puiser dans le stock de matériaux de noyau déversés par les camions; autrement, un godet ou des équipements de longue portée peuvent être utilisés. Les grues à câbles sont plus adaptées pour les gros enrochements ou s'ils doivent être posés loin de la crête.

Les options de levage de blocs individuels d'enrochement - parfois équipées d'aides au levage - dépendent de la taille du bloc et de la manutention nécessaire et incluent :

- les grappins, les chaînes;
- les élingues chaînes;
- les élingues en câble métallique;
- les anneaux ou crochets de levage scellés à l'époxy.

La méthode de manutention doit être choisie en fonction du niveau de sécurité qu'elle offre. L'évaluation de sa sécurité conduit habituellement à utiliser un grappin et des crochets scellés. Les blocs peuvent être transportés jusqu'au site sur des camions à plateau ou des barges. Les petites pelles ont besoin d'une aire de travail d'au moins 4 m de large, la taille exacte étant basée sur le rayon d'action du contrepoids. Les plus grandes grues nécessitent une plate-forme faisant jusqu'à 8.5 m de large. Ce sont les largeurs opérationnelles minimales et la place pour le passage, d'un camion par exemple, n'est pas incluse.

La Figure 9.16 donne une indication de la relation entre la taille de la pelle requise pour la pose d'un bloc d'enrochement de taille donnée et la portée maximum pour une pelle de charge et de taille donnée.



**Figure 9.16** Relations entre la taille du bloc d'enrochement, la taille de la pelle et la portée maximale

Avec un mécanisme rotatif hydraulique, un grappin (traditionnel ou fermé) (voir Figure 9.17a) donne une grande flexibilité à l'opérateur pour positionner le bloc d'enrochement à son emplacement et suivant l'orientation désirée. Il est aussi possible d'obtenir une densité de pose élevée. Un grappin non-orientable réduit le contrôle de l'opérateur sur l'orientation des blocs d'enrochement, mais permet une pose précise, y compris la possibilité de pousser et de sélectionner le bloc avec facilité dans le stock. Les pinces à trois ou cinq dents (voir Figure 9.17c) montées sur une pelle hydraulique sont également souvent utilisées. Bien qu'il soit souvent difficile d'opérer une rotation des enrochements pendant le placement, il est possible de procéder à une pose rapide et dense car le bloc d'enrochement peut être poussé à l'endroit désiré et ne tombe pas à la verticale, comme cela se produit avec les autres types de grappins. Avec une pince, une construction plus dense qu'avec un grappin peut être réalisée, car ce dernier a besoin de plus d'espace pour ouvrir ses dents. Noter que lorsque l'absorption d'énergie dans la carapace est à la base de la conception des ouvrages en enrochement libre. L'enrochement doit donc être placé pour être aussi perméable que possible. Dans ce cas, la pose requiert une précision particulière pour que la stabilité de l'ensemble soit assurée.

Un godet monté sur une pelle hydraulique peut être utilisé dans certains cas. L'inconvénient est qu'une fois les blocs positionnés, il est difficile de les déplacer, rendant plus difficile l'obtention d'une surface finale régulière ou avec une forte densité de pose. Un godet normal suffit pour niveler et aplanir les petits matériaux, jusqu'à environ 300 kg.

Dans tous les cas, la qualité de la carapace dépend du savoir-faire de l'opérateur.

Le rendement des pelles dépend du volume du grappin ainsi que des vitesses de rotation et de levage. Le volume d'enrochement par cycle et le poids maximum de chaque enrochement posé séparément dépendent de la taille et de la portée de la pelle. Noter que la vitesse moyenne d'une grue à câbles est inférieure à celle des pelles hydrauliques. Cependant, pour la pose des enrochements en pied d'ouvrage, il est souvent nécessaire d'utiliser ce type de grue pour atteindre la portée nécessaire.



(a) Grappin fermé



(b) Grappin



(c) Pince à cinq dents

**Figure 9.17** Exemples de grappins utilisés pour la pose de blocs d'encrochement

La masse, la portée et le moment de levage des pelles hydrauliques et des grues à câbles (sur chenilles) sont corrélés. Le Tableau 9.2 donne certains éléments importants de ces corrélations.

**Tableau 9.5** Relations entre les caractéristiques de différentes machines

Caractéristiques	Unité	Rapport
Poids d'un grappin hydraulique	kg	$3.25 \times \text{volume du grappin (litres)} - 1910$
Poids d'une pince	kg	$55 \times \text{masse de la pelle (tonnes)} + 200$
Masse d'un grappin fermé	kg	$3.5 \times \text{volume du grappin (litres)}$
Masse d'un grappin	kg	$2.5 \times \text{volume du grappin (litres)}$
Portée d'une pelle hydraulique	m	$0.06 \times \text{masse de la pelle (tonnes)} + 5.8$
Moment de levage par l'avant	tm	$1.6 \times \text{masse de la pelle (tonnes)} + 2.3$
Moment de levage par le côté	tm	$1.2 \times \text{masse de la pelle (tonnes)} - 7.6$
Portée des grues sur chenilles	m	$5.2 \times (\text{masse de la grue (tonnes)})^{0.4}$
Moment de levage des grues sur chenilles	tm	$0.4 \times (\text{masse de la grue (tonnes)})^{1.31}$
<b>Grappin (à câbles) pour grues à câble :</b>		
• Grappin fermé	t	$3.5 \times \text{volume du grappin (m}^3\text{)}$
• Grappin	t	$2.5 \times \text{volume du grappin (m}^3\text{)}$
<b>Grappin hydraulique pour pelles hydrauliques :</b>		
• Grappin fermé	t	$2.25 \times \text{volume du grappin (m}^3\text{)}$
• Grappin	t	$1.55 \times \text{volume du grappin (m}^3\text{)}$
• Pince	t	$0.06 \times \text{masse de la pelle (tonnes)}$

### 9.3.4 Équipement flottant – déversement de matériaux

Une opération de déversement réussie permet d'obtenir une couche d'épaisseur préconisée, indiquée par une valeur moyenne cible et une valeur minimum cible, et un taux optimal de déversement d'enrochement, c'est-à-dire un volume ou tonnage cible par mètre carré. Le processus de déversement et son résultat dépendent du type de matériel utilisé, de la profondeur d'eau, du courant et des caractéristiques de l'enrochement (densité, taille moyenne, gradation et forme). Plusieurs types de barges à déchargement autonome peuvent être utilisés comme :

- des barges à clapets;
- des barges à pont plat équipées d'une chargeuse sur pneus (voir la Figure 9.13, p. ex.);
- des grues sur barge équipées d'un bac ou d'une benne à enrochements;
- des navires ou des barges à déversement latéral d'enrochements (voir Figures 9.19 et 9.20).

Ces types de navires sont habituellement utilisés pour déverser de grandes quantités comme pour la construction du noyau des digues, des seuils ou des barrages par exemple et lorsque la précision nécessaire est moins grande au début des travaux. La Figure 9.18 montre l'utilisation de benne ou de bac à enrochement pour la construction d'un noyau de digue.



**Figure 9.18** Mise en place d'enrochement à partir d'une grue flottante utilisant une benne ou un bac à enrochement (source : CUR)

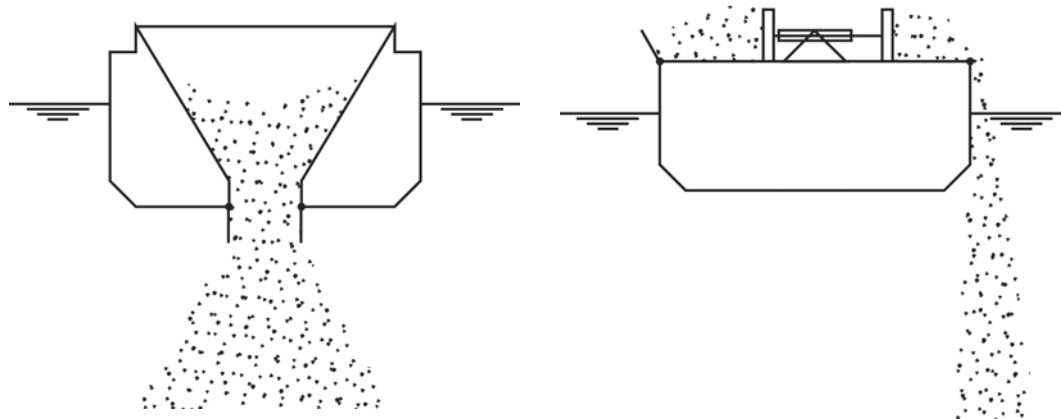
Les barges à clapets sont soit remorquées soit autopropulsées à l'aide d'hélices permettant le contrôle de la direction et de la propulsion. Elles se déchargent par le fond qui s'ouvre en deux parties de chaque côté de la quille. Au-delà d'une ouverture limite, l'enrochement est déversé en entier. Le déversement prend habituellement moins d'une minute. L'enrochement forme un nuage, dont la vitesse de chute excède la vitesse de chute à l'équilibre dans l'eau,  $V_e$ , de chaque enrochement pris individuellement (voir Section 9.3.6.2). Le nuage d'enrochement et d'eau atteint le fond avec une vitesse de deux à trois fois  $V_e$ . Les enrochements peuvent également subir un déplacement horizontal important après avoir heurté le fond. L'impact de ce genre de déversement est très fort et peut causer des dommages aux canalisations ou aux câbles situés dessous, en particulier s'ils sont en porte-à-faux (voir la Section 6.4.2.4). Lors du déversement de gravier, de petit enrochement ou d'enrochement moyen, un certain degré de contrôle du déversement peut être obtenu en bloquant le mécanisme d'ouverture pour réduire la largeur de l'ouverture.

**NOTE :** pour éviter les blocages et les irrégularités (de débit comme de placement), l'ouverture doit être suffisamment grande.

L'utilisation de ces navires est en général limitée à des enrochements de petites tailles pour empêcher le blocage et les dommages aux joints de fond de coque pendant le déversement. Ces navires ont en général une charge utile d'environ 900 t maximum et ont besoin d'une profondeur d'eau suffisante sous la quille pour pouvoir décharger toute la cargaison sans s'échouer.

Pour le déversement à partir de barges à pont plat et de navires à déversement latéral, la position et la distribution du cordon d'enrochement sur le fond peuvent être calculées avec précision (voir la Section 9.3.6.2), en fonction de la blocométrie, de la profondeur d'eau et de la vitesse du courant.

Les types de barges à déchargement autonome utilisées pour déverser directement des matériaux sont illustrés à la Figure 9.19.



**Figure 9.19** Types de barges à déchargement autonome pour déversement direct de matériaux en vrac ou de matériaux de noyau – gauche à clapet; droite à déversement latéral

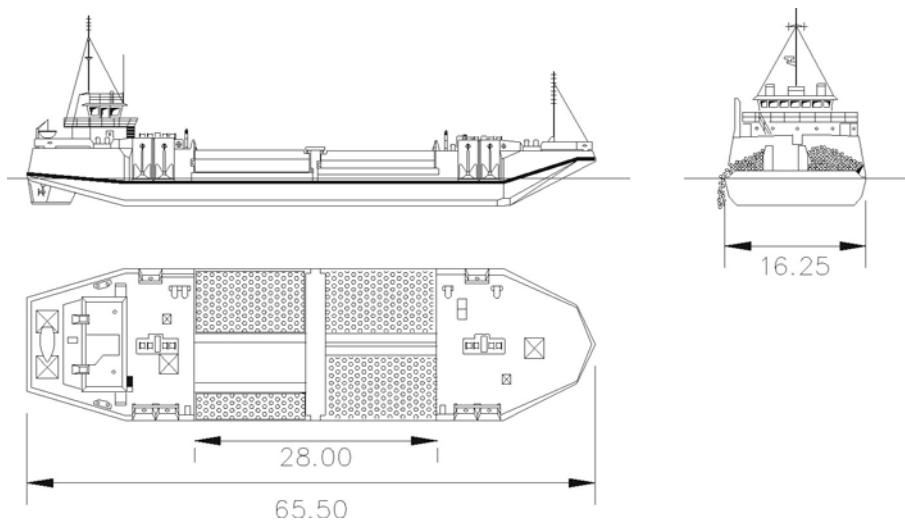
Le mécanisme de déchargement des barges à déversement latéral utilise des pelles coulissantes à mouvement latéral. La Figure 9.19 présente un exemple de navire à déversement latéral d'enrochement. Avec une barge à pont plat, le déchargement se fait à l'aide d'une chargeuse sur pneus (ou d'un bulldozer), qui pousse l'enrochement à l'eau. Le principe du déchargement est le même pour les deux types de barges.

### 9.3.5 Équipement flottant – placement contrôlé

#### Navire ou barge à déversement latéral

Une caractéristique importante de ce type d'équipement est qu'il permet de contrôler le déversement de quantités assez importantes d'enrochement. Les blocs d'enrochement sont soit progressivement poussés par-dessus bord par les pelles coulissantes (voir Figure 9.20) soit transportés et évacués du pont par des chaînes ou un système de plancher vibreur. La vitesse à laquelle l'enrochement est poussé par-dessus bord est un paramètre important du processus qui contrôle la qualité et plus particulièrement l'épaisseur du déversement.

En fonction des caractéristiques de l'ouvrage, l'enrochement peut être mis en œuvre en couches répondant à des exigences de tonnage par mètre carré, par exemple pour les ouvrages de protection de fond, ou en levées relativement étroites d'une épaisseur spécifiée, par exemple pour les protections de canalisations. Dans le premier cas, le navire sera déplacé latéralement à une petite vitesse déterminée, permettant la pose de couches de 0.3 à 0.5 m d'épaisseur, sur le fond de la mer ou sur le noyau de l'ouvrage. Dans le deuxième cas, le navire reste stationnaire ou se déplace lentement en avant ou latéralement, en fonction des dimensions de l'ouvrage prévu et de la profondeur d'eau à l'endroit considéré. Pour ce faire ces navires sont en général équipés de moyens de propulsion permettant de contrôler les déplacements latéraux et d'un système de positionnement dynamique synchronisé avec la vitesse de déplacement des lames de pelles. Pour contrôler le déversement il est essentiel que le débit de déversement, exprimé en kg/s ou en m<sup>3</sup>/s, soit faible pour que chaque enrochement puisse être considéré comme déversé individuellement (voir Section 9.3.6.2). Pour un navire à déversement latéral de 1000 t le temps de déversement total est approximativement de 15 minutes.



**Figure 9.20** Plan et section transversale du navire à déchargement latéral Frans d'une capacité de 1 000 t (dimensions en mètres) (source : Van Oord)

Le pont de ce type de navire est divisé en sections qui peuvent être déchargées séparément, ce qui permet de mettre différents types d'enrochement dans chaque section. Cela peut être nécessaire lorsqu'une couche inférieure faite de petit enrochement doit être recouverte d'enrochement plus gros en une seule opération de déversement pour assurer sa stabilité dans un courant fort.

Il existe une gamme étendue de navires appropriés dont la capacité varie de 500 t à 2000 t pour les plus grands navires.

De gros enrochements (au sens de la norme) peuvent être déversés par des navires à déversement latéral, même à très courte distance des ouvrages existants, tels que représenté à la Figure 9.21.



**Figure 9.21** Navire à déversement latéral Cetus déversant de l'enrochement 1 à 3 t près d'une jetée (source : Royal Boskalis Westminster)

### Barges à pont plat équipées d'une chargeuse sur pneus ou d'une pelle

Ces barges peuvent être utilisées pour poser des quantités relativement importantes d'enrochement avec un degré de précision assez élevé. Les barges sont positionnées à l'aide d'un système de lignes d'amarrage et de treuils à bord. Elles peuvent également être équipées de moyens de propulsion permettant les déplacements latéraux et d'un système de positionnement dynamique. L'avantage des barges à pont plat, par rapport aux types de barges décrits ci-dessus, est qu'elles ont besoin de moins d'équipement spécialisé (à l'exclusion, sans doute, du système de positionnement dynamique) et pour cette raison elles peuvent être utilisées dans des situations où les équipements spécialisés sont peu disponibles. Ce type d'équipement permet également de positionner des enrochements de différentes tailles en une seule opération de déversement. La charge limite de ces barges peut être beaucoup plus élevée et atteindre 5000 t. La Figure 9.22 montre la pose d'un enrochement naturel pour la construction d'une digue-récif avec une pelle de longue portée embarquée sur une barge à pont plat.

Il est possible d'utiliser des barges ou des navires à déversement latéral pour la construction d'une carapace faite d'enrochement assez petit, par exemple pour des digues ou des travaux de protection de talus. La taille limite mise en œuvre dépend notamment de l'état de la mer sur laquelle la barge doit opérer.



**Figure 9.22** Pose d'enrochement avec une pelle (source : Van Oord)

### Ponton ou navire équipé d'une grue à câble

Ce type d'équipement permet de poser des petites quantités d'enrochement par cycle et les enrochements plus gros sont posés individuellement. Par exemple, il peut être utilisé pour des travaux de protection de fond autour des culées de pont nécessitant des petites quantités de matériaux. L'utilisation des navires à déversement latéral est moins intéressante dans ce cas car :

- la place pour manœuvrer est limitée ;
- ou seules des petites quantités sont nécessaires ce qui rend l'utilisation de ce type de navires peu rentable.

Ce matériel peut être également utilisé pour niveler les talus des digues ou des remblais comme alternative à l'utilisation de l'équipement terrestre quand la portée nécessaire est trop élevée. Une grue embarquée sur une barge peut également être utilisée pour construire des barrages, des seuils ou des banquettes immergées en différentes couches horizontales.

Les grues sont également utilisées quand il est nécessaire de poser chaque bloc individuellement avec précision – par exemple, pour la construction de la carapace en doubles couches d'une digue

à talus. La grue sur barge, reste au mouillage sur le site, alors que les enrochements sont apportés par d'autres barges. L'approvisionnement en enrochements et la pose peuvent être effectués par le même navire, tel que montré à la Figure 9.23.



**Figure 9.23** Grue montée sur le navire Jan Steen, approvisionneur de blocs d'enrochement (source: Van Oord)

#### Navires équipés d'un tube plongeur

Ce type de système de déversement est utilisé pour obtenir une plus grande précision en eau plus profonde. Il est possible de contrôler la pose jusqu'à des profondeurs de 1000 m. Le système guide les enrochements vers le bas jusqu'à un niveau de quelques mètres au-dessus du fond. D'autres avantages de ce système sont l'absence d'influence des courants sur le placement des enrochements, l'absence de ségrégation de l'enrochement et la profondeur plus élevée à laquelle peuvent être menés les travaux, de 20 m et plus, sans perte de précision.

Les travaux pour lesquels ce type de navire est habituellement utilisé sont :

- les protections de canalisations ;
- les préparations du fond de la mer (ouvrages de fondation) ;
- les protections de pied et de talus.

Le système consiste en un tube flexible qui peut être descendu à quelques mètres au-dessus du fond de la mer. L'extrémité du tube peut être positionnée à l'aide d'un système de propulsion indépendant. Ce système de propulsion peut être équipé d'un appareil permettant de faire des levés avant et après déversement. Des levés peuvent être également faits séparément, par un véhicule mobile commandé à distance. Les matériaux à déverser sont introduits dans le tube plongeur à l'aide d'une trémie et d'une bande transporteuse. La construction d'une couche de protection d'une canalisation immergée en grande profondeur est un bon exemple. Le navire se déplace le long de la canalisation à une vitesse constante tandis que l'enrochement est déposé sur la canalisation. Il existe deux systèmes :

1. Tube plongeur flexible **semi-fermé**.
2. Tube plongeur **fermé**.

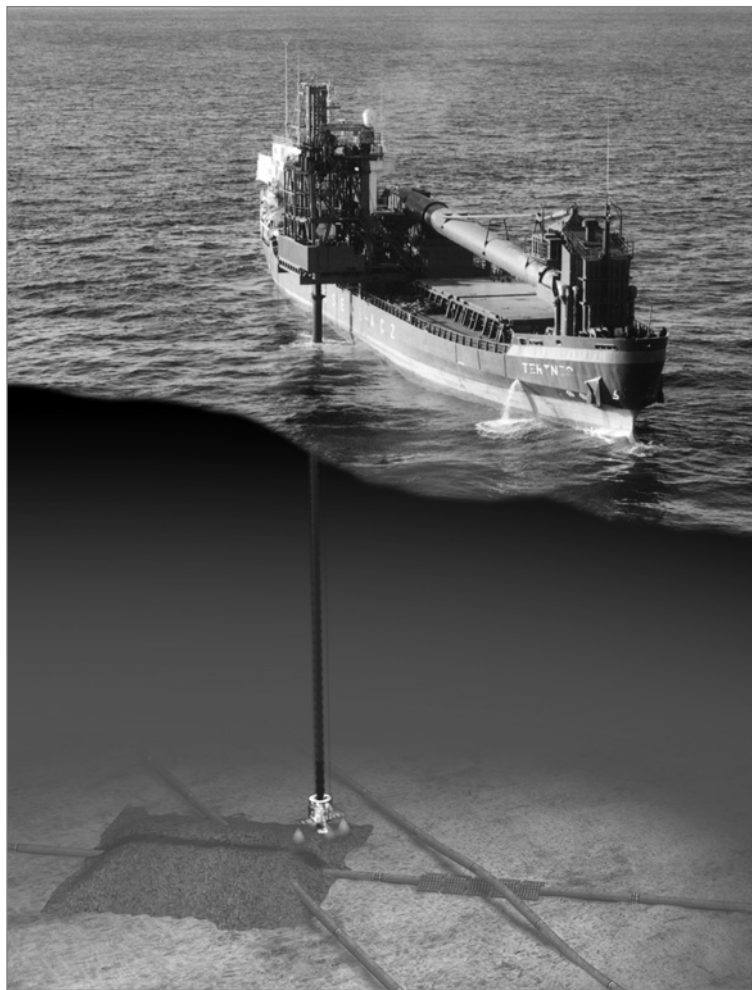
Le tube **semi-fermé** (voir la Figure 9.24), se compose d'une suite de seaux sans fond reliés entre eux et descendus à quelques mètres au-dessus du fond de la mer. Pendant le cheminement de la surface vers le fond, la poussière et les autres particules sont partiellement lessivées, cela permet une vision claire et une bonne performance de l'équipement de levé près du fond. Il devient alors



possible d'enregistrer le déversement sur vidéo. Un véhicule mobile commandé à distance monté sur l'extrémité inférieure du tube plongeur peut être équipé d'une caméra vidéo et de matériel de levé. Le véhicule téléguidé doit avoir la puissance propulsive nécessaire pour positionner l'extrémité inférieure du tube plongeur.

Un autre avantage de l'utilisation d'un système semi-fermé est que l'eau de mer environnante est aspirée sur toute la longueur du tube, réduisant la dépression dans le tube et la vitesse de chute des enrochements, d'avantage que dans un tube plongeur fermé. Cependant, la vitesse de chute sera toujours plus élevée que pour des enrochements déversés un par un.

La taille des matériaux utilisés est limitée par le diamètre du tube. En général la limite extrême supérieure de l'enrochement ne peut excéder le tiers du diamètre du tube en son point le plus étroit. Pour un diamètre de tube de 0.80 m, la dimension maximale de l'enrochement déversé est d'environ 250 mm.



**Figure 9.24** Navire positionné dynamiquement muni d'un tube plongeur flexible semi-fermé (source : Van Oord)

Le tube plongeur **fermé** est un tuyau continu et fermé. Dans sa configuration la plus simple le tube est descendu à partir d'un ponton auto-élévateur (voir la Figure 9.25). Après le déversement de la quantité requise d'enrochement, le ponton se déplace d'une distance déterminée et un nouveau tas d'enrochement est posé sur le fond marin. Le système est relativement économique et facile à installer. L'ordre des opérations est semblable à celui du déversement d'enrochement à l'aide d'une grue à benne preneuse sur un système de grille de positionnement, mais la précision est beaucoup plus grande. En fonction du contrôle du tube, du positionnement du ponton et de la position du tube au point de déversement - lui-même affecté par l'état de mer - et une bonne alimentation en matériaux, la précision verticale peut atteindre 0.1 m pour des petits enrochements et  $0.5 D_{n50}$  pour de l'enrochement moyen.

Les systèmes avancés ont des treuils à tension constante permettant de contrôler la position du ponton de manière dynamique, un système d'alimentation par bande transporteuse pour contrôler la quantité de matériau passant dans le tube et un treuil hydraulique actionnant le câble de levage pour contrôler la profondeur du tube. De plus, l'extrémité du tube est équipée d'une règle à araser permettant de niveler les matériaux déposés par le tube.

À partir du ponton auto-élévateur il est possible de contrôler en permanence le déplacement vertical du tube l'aide d'un laser en rotation et de compenser avec le treuil du câble de levage. Ce treuil permet aussi de compenser les effets de la houle, ce qui permet de continuer à travailler lorsque la mer est plus agitée, et de conserver la précision mentionnée jusqu'à 1.5 m de houle. On obtient la meilleure précision avec un système de descente complètement monté sur rails et se déplaçant sur le côté du ponton (voir Figure 9.25). Ce système peut être utilisé pour préparer le fond avant la pose de caissons ou d'éléments de tunnel qui requièrent une tolérance de quelques centimètres.

La taille des matériaux pouvant être posée à l'aide d'un tube plongeur fermé est déterminée par le diamètre du tube. La limite extrême supérieure de l'enrochement posé ne peut excéder un tiers du diamètre intérieur du tube. Par exemple, pour un enrochement de 10 à 60 kg avec un  $M_{50}$  de 33 kg et une valeur d'EUL de 120 kg ( $\approx 350$  mm, voir également la Section 3.4.3) le diamètre intérieur du tube doit être d'au moins 1 100 mm environ.



**Figure 9.25** Ponton auto-élévateur polyvalent avec tube plongeur fermé muni d'une règle à araser (source : Royal Boskalis Westminster)

### Drague aspiratrice en marche inversée

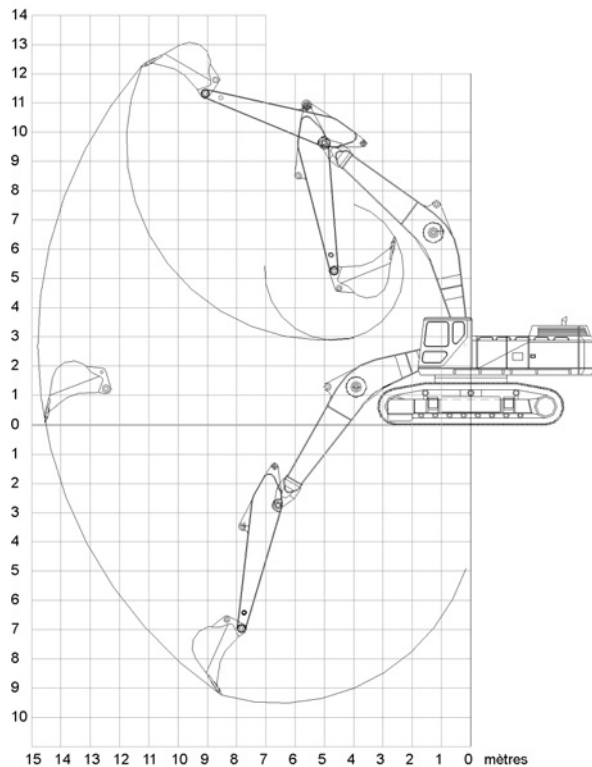
Des matériaux de type gravier peuvent être posés à l'aide d'une drague aspiratrice en marche. Ces dragues peuvent être équipées de systèmes permettant de pomper les matériaux de la cale pour les renvoyer par le tuyau d'aspiration vers le fond avec une tête d'élinde suspendue quelques mètres au-dessus du fond de la mer.

## 9.3.6 Conditions de travail

### 9.3.6.1 Conditions de travail pour les travaux terrestres

Le déversement direct peut être utilisé pour réaliser des talus à pentes naturelles d'environ 4/3, qui correspond approximativement à l'angle de repos. Ceci est important lorsque des tombe-

reaux, des chargeuses sur pneus ou des bennes sont utilisés. En conséquence, l'extérieur du talus aura une surface irrégulière. Sous l'action des vagues le talus peut prendre un profil dynamique, et le déversement direct est seulement utilisé pour la construction des noyaux de digues à talus ou des digues d'enclôture, qui peuvent être ultérieurement nivelés (réglés) ou recouverts par d'autres couches de matériaux. Le réglage peut être fait à l'aide d'une pelle hydraulique, si la pente n'est pas trop longue et le poids maximum des enrochements pas trop élevé (p. ex. pas plus de 2 t). Une dragline peut être utilisée pour le réglage des points les plus éloignés. La Figure 9.26 montre la portée d'une pelle hydraulique standard (80 t) utilisée pour le réglage. Quand il est effectué en même temps que la pose directe par camions, il faut prévoir assez d'espace pour permettre aux camions de contourner la pelle en opération. Pour un talus moins pentu, il peut être nécessaire d'avoir aussi recours à une pelle à grande portée.



**Figure 9.26**

*Portée standard pour le réglage de pente (pelle de 80 t, CAT 375L)*

Le déversement direct de gros enrochements peut causer des problèmes de ségrégation. Les gros blocs tendent à rouler vers le bas de la pente laissant les fractions plus petites sur le dessus, ce qui peut altérer la constitution du filtre sur le fond par exemple. Cette ségrégation pose moins de problèmes quand de grands volumes d'enrochement sont nécessaires, par exemple pour le noyau d'une digue, ou pour l'enrochement de fondation d'ouvrage de protection.

Une pose directe précise peut être obtenue en utilisant des grues à câbles ou des pelles équipées de bacs ou de bennes qui peuvent placer les enrochements directement à l'emplacement désiré et avec des engins équipés de grappins ou de pinces. Ce genre de pose est souvent contrôlé avec un système de grille de placement. Avec les systèmes modernes de pose assistée par ordinateur les coordonnées des blocs peuvent être calculées automatiquement pour l'opérateur, indiquant le profil à construire en un point donné.

### Conditions de travail sur le site

Pour les opérations comportant l'utilisation de tombereaux, le niveau de la zone de travail et de la piste d'accès est importante. Ce niveau doit être supérieur au niveau des plus hautes eaux pour prévenir les problèmes provoqués par les paquets de mer et l'écume des vagues. Si la piste est bien protégée sa hauteur au-dessus de l'eau peut être plus faible. Dans les régions à marée le niveau de la zone de travail pour les tombereaux et la grue doit être déterminé par les niveaux de pleine mer des marées de vive-eau, alors que pour la pose d'enrochement, les heures de travail coïncident habituellement avec les basses eaux afin de faciliter les opérations de construction du talus car l'opérateur peut ainsi voir ce qu'il fait.

### 9.3.6.2 Conditions de travail pour les opérations nautiques

Pour les opérations nautiques, les conditions du site influencent fortement la planification des travaux. Une distinction doit être faite entre les conditions affectant le déroulement des travaux et celles qui affectent directement le processus de pose des enrochements.

**ATTENTION :** lorsqu'il s'agit d'un navire, c'est de la responsabilité du capitaine de décider si les travaux peuvent être conduits dans les conditions de mer au moment considéré.

#### (a) Conditions du site

Pour les travaux nautiques les conditions de site suivantes sont applicables :

- états du courant, de la houle et du vent ;
- profondeur de l'eau et espace disponible pour manœuvrer ;
- facteurs saisonniers.
- **Courant, houle et force du vent**

Le déversement d'enrochement doit être effectué de préférence à l'étalement de la marée. Le positionnement est obtenu par un système de mouillage « tourne-autour », utilisant habituellement six ancres ou une combinaison de deux ancres et de deux propulseurs latéraux, ou un système de positionnement dynamique utilisant un système informatisé de propulseurs. Il est parfois nécessaire de déverser les matériaux dans des zones affectées par des courants. Dans ce cas, en plus d'un déplacement et d'une dépose étendue dans la direction du courant, il faut prévoir une ségrégation importante des matériaux.

Les forces exercées sur un navire ou une barge exposé à des courants de vitesse,  $U$  (m/s), peuvent être estimées en calculant la pression due aux courants,  $F$  (N), et les forces de frottement,  $T$  (N), le long d'une surface exposée,  $A$  (m<sup>2</sup>). Comme indiqué aux Équations 9.1 et 9.2, ces forces sont dépendantes de la pression - égale à  $1/2 \rho_w U^2$  (N/m<sup>2</sup>) - et de la surface exposée,  $A$  (m<sup>2</sup>). Ces forces déterminent le système de mouillage requis.

$$F = \frac{1}{2} \rho_w U^2 A C_p \quad (9.1)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho_w U^2 A C_f \quad (9.2)$$

où  $\rho_w$  = masse volumique de l'eau (de mer) (kg/m<sup>3</sup>);  $C_p$  = coefficient de pression (-);  $C_f$  = coefficient de frottement (-). Les valeurs habituelles sont  $C_p = 0.8$  à  $1.2$  et  $C_f = 0.04$  à  $0.06$ . Tous deux dépendent de la forme de la coque sous la ligne de flottaison.

Pour les équipements usuels, les courants de marée ne doivent pas dépasser la valeur maximum de 1.5 à 2.0 m/s sans prendre des précautions particulières. Le maximum acceptable dépend des dimensions du navire ou de la barge, des possibilités de mouillage, du fond marin pour la tenue des ancres et de la puissance du système de propulsion.

Les temps d'arrêt dus à la houle et au vent sont déterminés par l'influence de la houle et du vent sur la précision du positionnement du navire déversant les enrochements et sur la précision de la pose plutôt que sur les limites opérationnelles de l'équipement. L'effet de ces limites est décrit ci-dessous dans la sous-section « Effet sur la pose des enrochements ». En eau peu profonde, les travaux peuvent être affectés par le shoaling de la houle (voir Section 4.2.4).

- **Profondeur d'eau disponible**

Pour la construction d'ouvrages avec une revanche relativement peu élevée et pour tous les types de barges et de navires de déversement, la hauteur maximum pour le déversement des matériaux dépend de trois critères.

1. Le **tirant d'eau maximum** des navires ou des barges, plus un pied de pilote pour le pilonnement ou le déplacement vertical. En pratique le niveau le plus élevé pour ce critère est d'environ 3 m en dessous du niveau d'eau, bien que les barges à clapet nécessitent plus de profondeur à cause des portes qui s'ouvrent en dessous. Cette restriction de tirant d'eau s'applique aux travaux de protection du fond en faible profondeur, aux radiers pour les travaux de fermeture, aux remblais, etc.
2. La **perte de matériaux**. La perte de matériaux, particulièrement pendant les tempêtes d'hiver, doit rester à un niveau acceptable. Pour les matériaux du noyau, un remodelage des contours du noyau final peut être acceptable, malgré tout.
3. L'**espace de manœuvre**. L'espace disponible pour manœuvrer et la présence d'ouvrages peuvent limiter l'utilisation d'équipements flottants.

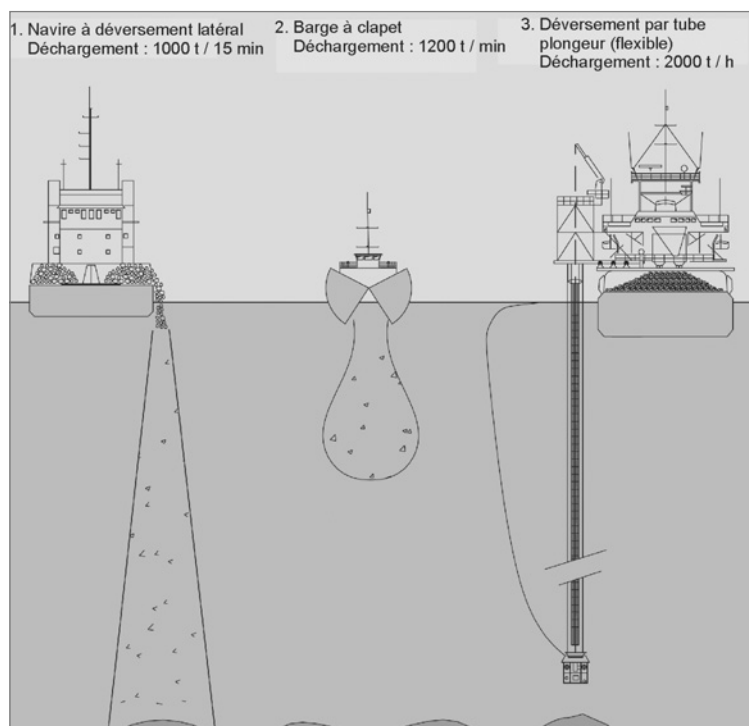
- **Facteurs saisonniers**

Les travaux de construction peuvent être interdits pendant la saison d'hiver, la période de la mousson, les périodes de crue pour les rivières ou un état de mer difficile, par exemple, quand la perte de matériaux n'est pas acceptable. Si les travaux de construction couvrent plusieurs saisons, il sera peut-être nécessaire de poser des couches de protection provisoires pour empêcher l'érosion pendant la saison où les travaux sont interrompus. La saison estivale et l'utilisation touristique de certains sites peuvent aussi entraîner des limitations.

**(b) Effet sur la pose des enrochements**

L'objectif du déversement est habituellement de placer une quantité spécifiée d'enrochement pour réaliser le profil requis en un point précis du fond. La quantité d'enrochement peut être donnée en masse déposée sur le fond ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) ou en épaisseur de couche (m). La précision du déversement se mesure par la différence entre la cible et les profils réels de déversement. En plus du type d'équipement utilisé (voir la Figure 9.27), la précision dépend aussi :

- de la houle et du vent;
- de la profondeur d'eau;
- de la vitesse des courants;
- de la blocométrie de l'enrochement mis en œuvre.



**Figure 9.27**

*Pose d'enrochement pour différents types d'équipement flottant*

- **La houle et le vent**

Les mers de vent de période courte ( $T = 2$  à  $6$  s) et de longueur d'onde courte associée ont moins d'impact sur les navires ou les barges et sur le processus de déversement des enrochements, qu'une mer sujette à une houle de période plus longue. Le déversement reste en général possible tant que les vagues levées par le vent ne dépassent pas une hauteur significative de  $H_s = 1$  à  $1.5$  m, correspondant approximativement à un vent de Force six sur l'échelle de Beaufort. Par contre, une houle océanique dépassant de  $H_s = 0,5$  m peut affecter le déversement des navires ou des barges. Le déversement avec un tube plongeur reste possible avec des hauteurs de houle significative allant jusqu'à  $1.5$  m.

Pour les travaux avec des grues montées sur barges, la hauteur maximale de la houle est limitée par la présence des mécanismes de levage et des mâts. Les grues ne sont pas habituellement conçues pour résister à des forces latérales telles que les oscillations provoquées par des mouvements de la barge et pour cette raison la gîte maximale ne doit pas dépasser  $5^\circ$  à  $10^\circ$ .

Le Tableau 9.6 résume les conditions aux limites de houle des différents types de navires. Une distinction a été faite entre le déversement en vrac des matériaux, par exemple pour le noyau, et le placement contrôlé. Pour les grands volumes et une précision moindre, le déversement en vrac est utilisé, alors que le placement contrôlé s'applique aux plus petits volumes d'enrochement ou même au placement individuel de blocs d'enrochement.

**Tableau 9.6** Synthèse des conditions aux limites de houle pour différents types de navires

Type de navire	Taille du navire	Taille de la grue	Limite $H_s$ pour le déversement	Limite $H_s$ pour le placement
Grande barge-grue	60 × 20 m	grue de 150 t	0.80 m	0.60 m
Petite barge-grue	40 × 15 m	grue de 75 t	0.65 m	0.50 m
Grande pelle sur barge	35 × 12 m	pelle de 70 t	0.65 m	0.50 m
Navire à déversement latéral	650 t	–	1.25 m	1.00 m
Navire à déversement latéral	1 400 t	–	1.50 m	1.25 m
Barge à clapet	800 t	–	1.50 m	n.d.
Barge à clapet	2 000 t	–	2.00 m	n.d.
Barge à pont plat et chargeuse sur pneus	2 000 t	–	0.80 m	n.d.
Barge à tube plongeur	50 × 17.5 m	–	n.d.	0.65 m
Barge à tube plongeur	10 000 t	–	n.d.	3.50 m

**Notes :** les valeurs indiquées ci-dessus sont indicatives et peuvent varier en fonction des facteurs suivants :

- la période de la houle – c'est un facteur important ; avec de la houle de période courte la hauteur significative  $H_s$  peut être plus grande que pour de la houle de période longue ;
- la position du navire – quand la proue ou la poupe font face aux vagues la hauteur significative de la houle  $H_s$  peut être plus grande que lorsque le côté du navire est exposé aux vagues ;
- la hauteur significative de la houle – ce facteur peut être plus élevé dans le cas du déversement ou de la pose de petits matériaux ; la probabilité des dommages augmente avec la taille de l'enrochement, en particulier les plus gros ;
- le maintien d'une barge chargée d'enrochement à côté d'une barge-grue dans les conditions ci-dessus peut nécessiter des treuils à tension constante.

- **La profondeur d'eau**

La profondeur d'eau est un facteur important qui affecte l'étalement,  $y$  (m), de la masse d'enrochement sur le fond marin (voir Figure 9.28). Le comportement de l'enrochement en chute pendant le processus de déversement en vrac diffère de celui obtenu par placement contrôlé de blocs individuels.

Pour le **déversement contrôlé**, la vitesse de chute des différents blocs d'enrochement,  $V_e$ , est un paramètre important du processus, alors que dans un **déversement direct** l'ensemble des enroche-

ments se comporte comme un mélange d'enrochement et d'eau à haute densité ( $\Delta_{sw} = 1.0 - 1.2$ ). Avec sa vitesse de chute élevée, qui peut excéder  $V_e$ , ce mélange atteint le fond de la mer en générant un fort impact. Après avoir touché le fond, le matériau se met à glisser assez loin sur les côtés. Il n'en reste qu'une faible quantité à l'endroit désiré (voir la Figure 9.28b). Il n'est pas conseillé d'employer ce processus de déversement pour les travaux nécessitant de la précision de placement, telle que la protection des canalisations ou des câbles en grandes profondeurs. L'utilisation de barges à clapet et d'autres méthodes de déversement direct est limitée au déversement de grandes quantités d'enrochement en eau peu profonde, où la précision de placement n'est pas une priorité.

Une pose plus précise peut être réalisée par **déversement contrôlé** à partir de navires à déversement latéral, avec des grues ou des systèmes à tube plongeur. Le contrôle de l'épaisseur ou de la hauteur de la couche déversée peut alors être amélioré en déversant plusieurs couches minces d'enrochement, de l'ordre de 0.3 à 0.5 m, en fonction de la hauteur totale de l'ouvrage à construire et de la taille des enrochements. L'enrochement est dispersé suivant des directions parallèles et perpendiculaires à la barge en raison des interactions entre l'enrochement et l'eau environnante. Après impact, les blocs d'enrochement se dispersent plus loin sur le fond. L'ampleur de cette dispersion dépend de la méthode de déversement, de la pente du fond et des caractéristiques de l'enrochement et du fond. Une mesure de l'étendue couverte par le déversement,  $y$  (m), de l'enrochement déchargé à partir d'un navire à déversement latéral en fonction de la profondeur de l'eau,  $h$  (m), a été obtenue à partir d'essais sur modèles réalisés pour la protection de fond du barrage anti-tempête Eastern Scheldt aux Pays-Bas (Delft Hydraulics, 1989). L'Équation 9.3 donne le rapport approximatif pour ce type de déversement contrôlé.

$$y = a \sqrt{h} \quad (9.3)$$

où  $a$  vaut environ 1.9 pour les enrochements anguleux et  $a$  vaut environ 2.1 pour les enrochements arrondis.

**NOTE:** la valeur de  $y$  pour un déversement direct est beaucoup plus élevée que pour un déversement contrôlé.

- **Le courant**

Pour le déplacement,  $x$  (m), du centre du tas d'enrochement par rapport à l'aplomb de la position de déchargement,  $x_0$  (m), la vitesse de chute de chaque enrochement est le facteur le plus important. Ceci peut être représenté en trois étapes: (i) chute dans l'air, (ii) chute dans l'eau et (iii) impact sur le fond. D'abord (i) lorsque le bloc d'enrochement est lâché d'une hauteur,  $z$  (m), au-dessus de l'eau, il passe d'une vitesse nulle à la vitesse de chute dans l'air,  $V_{air}$  (m/s), selon l'Équation 9.4:

$$V_{air} = \sqrt{2 g z} \quad (9.4)$$

Deuxièmement (ii), lorsque le bloc frappe la surface de l'eau sa vitesse passe de  $V_{air}$  à la vitesse d'équilibre de chute dans l'eau  $V_e$  (m/s) (voir Section 6.4.2.4).

Enfin (iii), le bloc de diamètre nominal,  $D_n$  (m), densité relative déjaugée,  $\Delta$  (-), heurte le fond ou les blocs précédemment déversés à la vitesse d'équilibre dans l'eau,  $V_e$  (m/s), calculée par l'Équation 9.5:

$$V_e = \sqrt{\frac{4}{3 C_D}} \sqrt{g \Delta D_n} \quad (9.5)$$

où  $C_D$  est le coefficient de traînée (-); valeurs généralement entre 0.5 et 1.5, en fonction du nombre de Reynolds ( $Re = V_e D_n / \nu$ ) et de la forme du bloc.

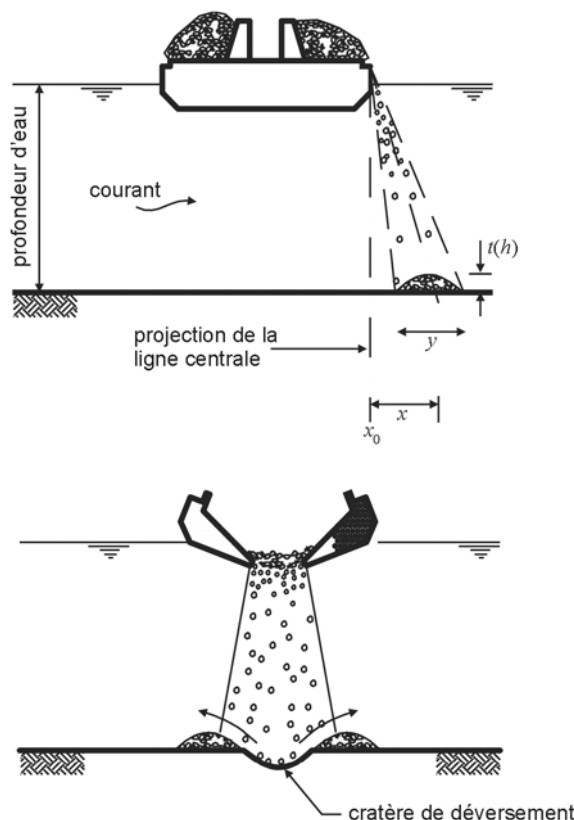
En comparant les Équations 9.4 et 9.5 et en supposant que  $4\Delta/(3C_D) \approx 2$ , il apparaît que l'impact dans l'eau d'un enrochement d'un diamètre  $D_n$  peut être comparé à l'impact du même enrochement tombant dans l'air d'une hauteur à peu près égale à son propre diamètre ( $z = D_n$ ). Lorsque l'impact lié à la vitesse de chute,  $V_e$ , risque de causer des dommages inacceptables, par exemple à l'enrochement lui-même ou à tout élément reposant sur le fond, il est possible de déposer une couche protectrice de petit enrochement. Alternativement, les plus gros enrochements près du fond peuvent être posés à l'aide d'une pince ou d'un grappin, ce qui n'est possible que lorsque seules de petites quantités d'enrochements sont nécessaires.

Un paramètre important du processus lié à  $V_e$  est le déplacement,  $x$ , des blocs d'enrochement par le courant et le déplacement du tas de matériaux déversés qui en résulte (voir Figure 9.28). Dans un courant de vitesse,  $U$  (m/s) et une profondeur d'eau,  $h$  (m), pour des enrochements de diamètre,  $D_n$  (m), et de densité relative déjaugée,  $\Delta$  (m), le déplacement engendré,  $x$  (m), sur le fond peut être estimé à partir du temps de chute,  $h/V_e$  à l'aide de l'Équation 9.6:

$$x = C \frac{hU}{\sqrt{g \Delta D_n}} \quad (9.6)$$

où  $C$  est un coefficient, dont la valeur dépend de la position du navire.

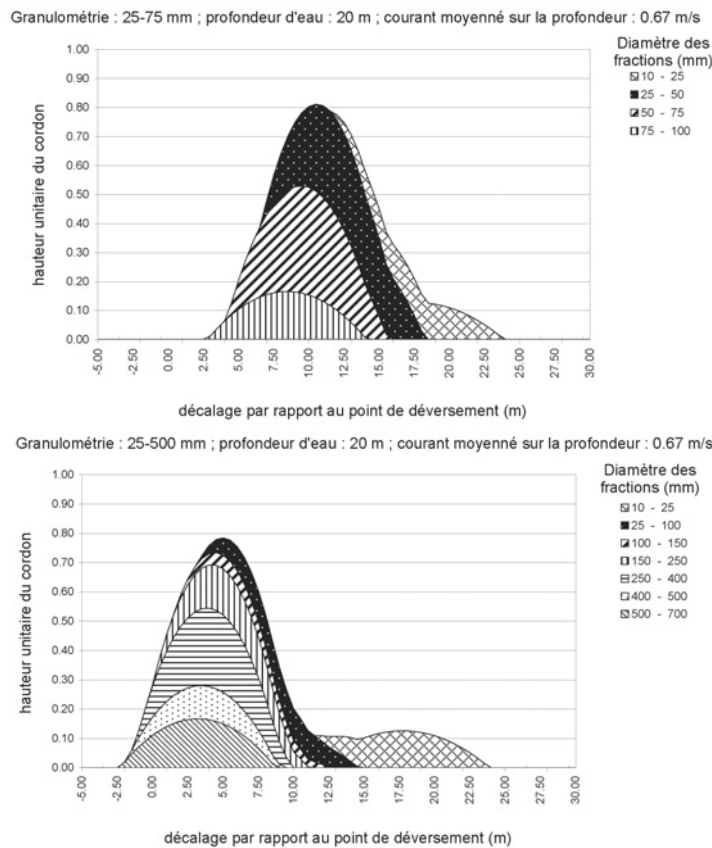
Dans le cas d'un déversement avec des courants transversaux  $C = C_{uc} = 0.86/\sqrt{\Delta}$  (-); les valeurs courantes de  $C_{uc}$  sont de 0.9 à 0.6 ( $\Delta = 1$  et  $\Delta = 2$  respectivement). Dans le cas d'un déversement avec un courant frontal, une valeur plus faible est utilisée:  $C = C_{ul} = 1/3 C_{uc}$ . Il est à noter que le coefficient  $C$  est équivalent au terme  $1/2\sqrt{3}C_D$  de l'Équation 9.5.



**Figure 9.28** Contrôle du processus de déversement

La position finale et la distribution des enrochements déversés à une profondeur d'eau donnée en présence d'un courant d'une vitesse donnée peuvent être aussi calculées en tenant compte des interactions physiques entre les enrochements pendant leur chute et les conditions environnantes, y compris le courant, la profondeur et la densité. La précision du déversement en termes de hauteur, de largeur et de positionnement dépend de la profondeur d'eau, de la réaction du navire à la houle, du profil vertical de la vitesse du courant, et de la taille et de la densité spécifique de l'enrochement. Le déversement d'enrochement de petite taille à une profondeur d'eau de 20 m et dans un courant de 0.7 m/s donne la distribution représentée à la Figure 9.29a. La plupart des enrochements sont déposés à environ 10 m en aval du point de déversement. La Figure 9.29b montre le résultat d'un déversement d'enrochement plus gros et de blocométrie plus étalée dans les mêmes conditions. La majeure partie des matériaux est déposée à environ 5 m du point de déversement et une ségrégation de la fraction fine est observée.





**Figure 9.29** Distributions calculées des enrochements déversés: (a) blocométrie étroite, (b) blocométrie étalée

**Notes :** pour un décalage donné, par rapport au point de déversement, repéré en abscisse, la hauteur totale du cordon et sa blocométrie se lisent comme suit :

- la hauteur totale du cordon se lit sur l'axe des ordonnées ; par exemple, à 5 m du point de déversement le cordon a une hauteur de 800 mm ;
- la hauteur équivalente de chaque taille est lue sur l'axe des ordonnées ; par exemple, sur une hauteur totale de 800 mm, la fraction 500-700 mm représente 150 mm soit environ 19 %, la fraction 400-500 mm représente 120 mm soit 15 % ;
- à 20 m du point de déversement, le cordon a une épaisseur d'environ 150 mm. Il est composé à 100 % de matériau fin de la fraction 10-25 mm.

### 9.3.7 Tolérances

Le terme « tolérance » correspond au degré de déviation acceptable ou toléré par rapport à un résultat de référence dont différentes définitions peuvent être proposées :

- Ce qui est possible** Pratiquement tout est possible, mais parfois ceci peut être coûteux, long et conduire à l'utilisation de méthodes très sophistiquées.
- Ce qui est demandé** Seulement certaines techniques de construction permettent des tolérances très serrées, la rédaction du cahier des charges qui accentue certains aspects des travaux peut requérir l'utilisation de ces seules méthodes.
- Ce qui est nécessaire** Les tolérances indiquées dans un marché doivent refléter ce qui est nécessaire pour que l'ouvrage corresponde à la fonction prévue.
- Ce qui est accessible** L'effet des tolérances sur les aspects économiques peut être important. En formulant le niveau de finition sous forme d'exigences fonctionnelles plutôt que sous formes de spécifications sur les produits mis en œuvre, des économies qui permettent de rendre le projet moins coûteux peuvent être faites.

Le choix des tolérances et l'échelle des déviations par rapport au profil prévu nécessitent un équilibre délicat entre les facteurs ci-dessus.

### Tolérances pour les travaux terrestres

Les tolérances acceptables pour la pose d'enrochement sont principalement déterminées par des exigences fonctionnelles concernant l'ouvrage et la rigueur avec laquelle elles sont formulées peut varier. Ces exigences concernent :

- la stabilité de l'ouvrage, par exemple exposé aux courants et à la houle ;
- le réglage de la couche filtre, par exemple pour les fondations des ouvrages de type caisson ;
- la profondeur de navigation garantie dans le cas des travaux de protection de fond ;
- les aspects visuels.

La méthode de construction doit être choisie en conséquence.

- **exemple 1 :** des exigences plutôt strictes concernant la pose de la couche externe d'un ouvrage en bord de mer peuvent être imposées pour des raisons architecturales, tandis que la précision demandée pour la carapace d'une digue exposée à la houle du large sera dictée principalement par des exigences fonctionnelles ;
- **exemple 2 :** la pose d'une couche de gravier sous un caisson demande une grande précision de nivellement, tandis que pour une sous-couche ou une carapace l'épaisseur moyenne est plus importante que la précision par rapport au profil requis.

La tolérance acceptable dépend principalement du type d'équipement et de la méthode de pose utilisés, ainsi que de la taille et de la forme des enrochements (voir Tableau 9.7). Lors de l'utilisation d'équipement standard, les tolérances approximatives suivantes sont appliquées en pratique, utilisant le diamètre nominal  $D_{n50}$  comme référence.

**Tableau 9.7** Tolérances verticales pratiques réalisables pour le placement avec l'équipement terrestre

Profondeur de pose par rapport au niveau des basses eaux	Enrochements posés en vrac		Carapaces et enrochements posés individuellement avec $M_{em} > 300$ kg	
	$M_{em} \leq 300$ kg	$M_{em} > 300$ kg (pas pour la carapace)	Mesures individuelles	Profil prévu par rapport au profil réel moyen
Au-dessus des basses eaux = à sec	+0.2 m à -0.2 m	+0.4 m à -0.2 m	+/- 0.3 $D_{n50}$	+0.35 à -0.25 $D_{n50}$
0 à -5 m	+0.5 m à -0.3 m	+0.8 m à -0.3 m	+/- 0.5 $D_{n50}$	+0.60 à -0.40 $D_{n50}$
-5 à -15 m	–	+1.2 m à -0.4 m	–	–
En dessous de -15 m	–	+1.5 m à -0.5 m	–	–

#### Notes :

1.  $M_{em}$  = masse moyenne effective (voir la Section 3.4.3) ;
2. Les tolérances s'appliquent même si les blocs posés ne sont pas des blocs standard ;
3. Toutes les tolérances se rapportent au profil prévu au marché et au profil réel moyen sauf indication contraire ;
4. Les tolérances sur deux profils réels moyens consécutifs doivent être positives ;
5. Quels que soient les hors-profil des sous-couches, l'épaisseur de la couche suivante ne doit pas être inférieure à 80 % de l'épaisseur nominale calculée en utilisant les profils réels moyens. Lorsqu'il se produit une accumulation de hors-profil positifs et qu'elle est acceptable pour le maître d'œuvre, les profils de dimensionnement devront être réajustés.

Dans les travaux de protection de talus, la tolérance du profil en travers est définie comme la différence mesurée perpendiculairement au talus entre le profil prévu et celui réalisé pour les différentes couches.

Des tolérances plus strictes, de 0.10 à 0.15 m, que celles indiquées au Tableau 9.7 peuvent être obtenues seulement avec des enrochements soigneusement choisis, une pose spéciale des blocs

(voir Section 9.8.1) ou un appareillage et, pour les opérations terrestres, en général avec assistance manuelle. Ceci est utilisé quand :

- un degré élevé de précision est nécessaire pour des raisons esthétiques ;
- ou les pertes de frottement doivent être réduites au minimum.

Pour la protection des talus et la construction de digues, l'épaisseur moyenne de la carapace (qui est en général en double couche) est calculée comme  $2k_t D_{n50}$ , au-dessous et au-dessus du niveau de l'eau. Les valeurs habituelles du coefficient d'épaisseur de couche,  $k_t$ , sont données à la Section 3.5.1 pour différentes formes d'encrochements et techniques de construction. Quelques informations pratiques sont également fournies à la Section 9.8.1. Une épaisseur de couche inférieure ( $1.6 D_{n50}$ ) a été obtenue en appareillant les blocs d'encrochement.

**NOTE :** une épaisseur de deux blocs d'encrochement serait également acceptable comme spécification. Dans ce cas la valeur utilisée pour l'épaisseur est généralement  $2D_{n50}$ , sans tenir compte du coefficient  $k_t$ . Une épaisseur légèrement supérieure au cahier des charges présente quelques inconvénients, tels qu'une stabilité accrue aux dépens d'un accroissement du run-up, du franchissement et de l'affouillement en pied. Les formules utilisées pour calculer ces propriétés hydrauliques sont en grande partie basées sur des essais en bassin avec deux couches d'encrochement naturel, qui atteignent rarement - voire jamais -  $2D_{n50}$ .

#### Tolérances pour les travaux nautiques

Tel que mentionné précédemment, la tolérance de pose doit être liée aux exigences fonctionnelles de l'ouvrage et la méthode de construction devrait être choisie en conséquence. Plus les conditions sont strictes, plus la méthode de construction doit être sophistiquée.

Les techniques de mesure jouent un rôle en définissant des tolérances réalisables et acceptables en particulier sous l'eau (voir Section 9.9.8.2).

Bien que les aspects visuels ou esthétiques soient sans importance dans le cas des ouvrages submergés, la douceur des courbes peut être importante pour les parties visibles. Par exemple, une exigence de navigation peut imposer, que pour le profil fini d'une protection de fond qui est stabilisée par un poids d'encrochement spécifié ( $\text{kg/m}^2$ ), aucun bloc ne doit dépasser le niveau prévu. Les tolérances liées à l'épaisseur des couches sont importantes pour assurer un tirant d'eau suffisant pour les navires. Pour les spécifications de filtre, une couche d'une épaisseur minimum doit être garantie (voir la Section 5.4).

Lorsque l'on utilise l'équipement flottant adéquat, il doit être possible d'atteindre les tolérances verticales données au Tableau 9.7 pour les travaux terrestres. Des tolérances verticales applicables aux profils et épaisseurs de couches pour le noyau, les sous-couches, et la carapace à l'aide d'équipement flottant sont données au Tableau 9.8.

**Tableau 9.8** Tolérances verticales de pose pouvant être obtenues en pratique avec des équipements flottants de type barge à déversement latéral et barge-grue (CROW, 1999)

Taille de l'encrochement	Petit encrochement	Moyen encrochement	Gros encrochement 300 à 1 000 kg	Gros encrochement > 1 000 kg
Individuel	n.d.	n.d.	+/- 0.8 $D_{n50}$	+/- 0.8 $D_{n50}$
En vrac	+/- 0.20 m	+/- 1 $D_{n50}$	+/- 1 $D_{n50}$	n.d.

#### Notes :

1. Les valeurs ci-dessus sont indiquées en +/- et dépendent de la qualité du matériel, du savoir-faire de l'opérateur et des circonstances, y compris de la houle, des courants et de la pente du talus ;
2. Les valeurs représentent la somme des tolérances de construction et de mesure.

La précision horizontale de la pose dépend :

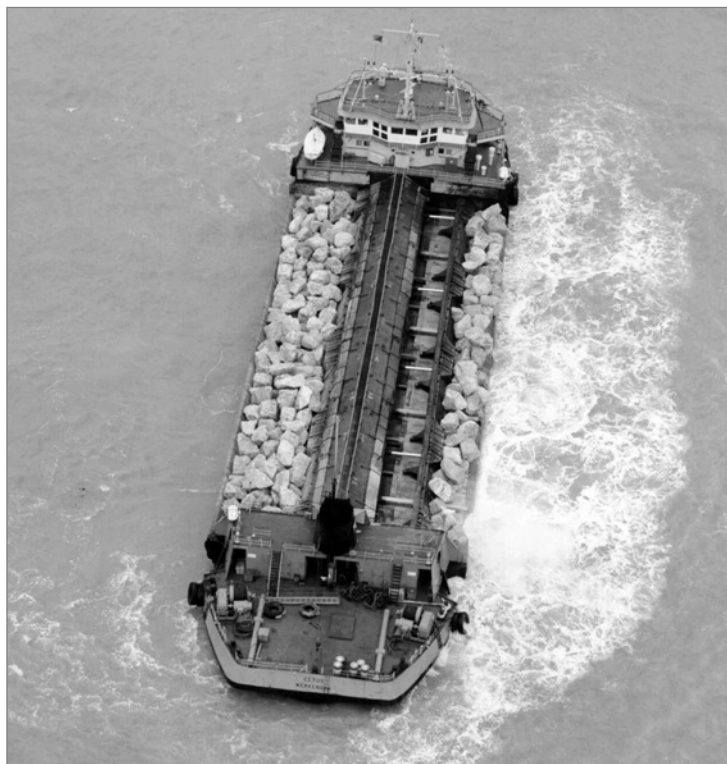
- du type de matériel utilisé, de sa facilité de manœuvre, de la présence d'un système de positionnement dynamique etc. (voir la Figure 9.30);
- de la précision du système de positionnement;
- de conditions de travail telles que la houle, les courants et la profondeur d'eau (voir la Figure 9.28).

Dans les zones abritées, c'est-à-dire sans courant ni vague, une précision horizontale d'environ 1 m peut être atteinte par déversement. Dans les zones exposées la précision sera inférieure et diminuera avec l'augmentation de la profondeur d'eau (voir la Section 9.3.6.2 et la Figure 9.28).

Pour limiter la probabilité de laisser des zones non couvertes ou avec une couverture d'enrochement insuffisante, le flux des matériaux s'écoulant du navire doit être aussi continu que possible. Le déversement dans les sections adjacentes doit se faire en superposition ou, si possible en couches avec un *système en panneresse*. Le déversement ou la pose assisté par ordinateur garantissent la mise en place de la quantité prévue.

D'autres tolérances à prendre en compte lors du dimensionnement sont liées aux interfaces, c'est-à-dire lorsque les dragues donnent une pente aux fonds sableux ou bien là où les dragues vident la première couche de gravier. Les tolérances réalisables sont :

- dragage par drague à cutter +/- 0 à +/- 0.5 m verticale et horizontale
- déversement de gravier par drague en marche +/-0.5 m verticale; +/- 3.0 m horizontale
- réglage avec la tête d'élinde d'une drague en marche +/- 0.2 m verticale



**Figure 9.30**

*Positionnement dynamique du navire Cetus à déversement latéral muni de propulseurs d'étrave et de poupe (source: Royal Boskalis Westminster)*

## 9.4 TRANSPORT

Les matériaux utilisés pour les travaux côtiers et les travaux fluviaux sont transportés par route, chemin de fer ou par voie d'eau. De plus, chaque méthode de transport peut être subdivisée en :

- un simple acheminement des matériaux à un site particulier
- un moyen de transport utilisé également comme moyen de construction.

Des exemples incluent : les matériaux acheminés jusqu'au site par chemin de fer, déchargés sur le site et rechargés dans des tombereaux pour le transport jusqu'au point de pose ; les livraisons par voie maritime, où des matériaux sont acheminés à proximité du site par un navire de transport de grande capacité et puis transbordés dans des navires plus petits qui peuvent s'approcher plus près du rivage et même participer à la pose des matériaux.

Le choix du système de transport est fondamental dans la planification de la construction, et la décision ne doit pas être basée seulement sur le prix, mais aussi sur d'autres facteurs comme :

- la distance du chantier à la carrière ;
- les infrastructures existantes sur le site ;
- la localisation et la géographie du site ;
- les cadences de livraison visées ;
- les contraintes naturelles ;
- les quantités d'enrochement et la blocométrie ;
- la disponibilité des moyens de transport nécessaires ;
- la programmation et la saison (été ou hiver) des travaux.

Chaque facteur doit être considéré avec soin lors de la planification du projet pour optimiser les aspects environnementaux, économiques, l'hygiène et la sécurité.

Pour toutes les méthodes de livraison, il est essentiel que toutes les parties soient conscientes des exigences associées à la livraison d'enrochement. Leur nature abrasive, qui peut causer une destruction rapide d'équipements non adaptés, peut surprendre une entreprise peu avertie, c'est pourquoi le processus de sélection doit soigneusement vérifier l'expérience professionnelle des potentielles sociétés de transport et leurs plans d'urgence en cas de panne et de casse.

### 9.4.1 Transport routier

Les types de véhicule suivants sont généralement utilisés pour le transport de l'enrochement en carrière et vers le chantier.

#### Camions à plateau

Les camions à plateau transportent seulement quelques blocs d'enrochement. Ils sont fréquemment utilisés pour transporter des blocs de plus de 3 t (voir les Figures 9.31 et 9.33). Le poids maximum autorisé par camion varie suivant le pays.



**Figure 9.31**  
Camion à plateau utilisé pour transporter des gros blocs d'enrochement pour la réparation de la digue de Cherbourg (source : Service des Infrastructures de la Défense)

Le déchargement doit être organisé au point de livraison et est effectué à l'aide d'une pelle hydraulique à grappin, ou par une chargeuse sur pneus à fourche (voir la Figure 9.32). Les camions à plateau sont habituellement constitués de remorques articulées et tractées. Ils peuvent avoir du mal à accéder au site. Des élingues et des chaînes peuvent être utilisées, mais ce n'est pas la meilleure option pour des raisons d'hygiène et de sécurité (piégeage et dommages imprévus possibles à l'équipement), et après une évaluation des risques ces méthodes sont généralement abandonnées au profit des autres mentionnées ci-dessus (p. ex. une chargeuse sur pneus).



**Figure 9.32**

*Camion à plateau utilisé pour transporter les blocs artificiels pour la construction de la digue de Barcelone (source : CETE de Lyon)*

Il faut aussi envisager les dommages possibles aux plateaux ; ils doivent être soigneusement vérifiés pour s'assurer que chaque bloc d'encrochement est solidement arrimé pour empêcher sa perte en transit et les risques potentiels pour le public.



**Figure 9.33**

*Mise en place de chaînes pour arrimer de gros encrochements avant que le camion plateau ne quitte la carrière (source : Carrières du Boulonnais)*

### **Bennes en acier et tombereaux de chantier**

Ils peuvent être utilisés pour tous les matériaux, mais les difficultés augmentent avec la taille des blocs transportés. Il faut trouver un équilibre entre la solidité de la benne et son poids puisque la charge utile peut être restreinte à cause du poids propre de l'engin. Le déchargement se fait en basculant la benne au-dessus du stock ou d'un navire (voir la Figure 9.34), ou directement sur le chantier (voir la Figure 9.35). Des véhicules rigides avec des châssis spécifiques peuvent être utilisés pour transporter des bacs remplis d'encrochement. Il faut faire très attention à ce que le véhicule ne se retourne pas lors du basculement.



**Figure 9.34** Vue d'ensemble de la zone de stockage du chantier de Barcelone où les camions livrent des enrochements ou chargent les barges pour déversement sur le chantier (source : CETE de Lyon)



**Figure 9.35** Exemple d'un camion de livraison qui déverse les enrochements directement en position sur le chantier (source : TPPL)

Malgré toutes les précautions, les dommages aux bennes en acier sont inévitables et un entretien régulier est essentiel. Le coût des dommages n'est pas habituellement inclus dans le prix du transport ou n'est pas spécifiquement couvert dans les conditions de location, et l'entreprise peut devoir rembourser tous les dommages.

#### **Bennes classiques d'alliage d'aluminium**

La majorité des bennes utilisées en Europe ont maintenant des corps en alliage pour optimiser le poids net pour le transport des cargaisons non-abrasives en vrac telles que le sable ou les granulats. Il est peu probable que les matériaux de plus de 60 kg puissent être transportés sans dommages pour la benne de ces véhicules.

Le risque de dommages aux bennes d'acier et d'aluminium peut être réduit au minimum par l'utilisation d'une pelle (en rétro) pour charger les matériaux. Une chargeuse sur pneus donne des chocs plus élevés. Pour prévenir les dommages à l'équipement il est essentiel d'employer un opérateur expérimenté pour le chargement des enrochements.

#### **Véhicules de chantier**

Ceux-ci peuvent être de toute taille et tout type, en fonction des besoins. L'évolution moderne va vers les tombereaux articulés à quatre roues motrices, avec une capacité habituelle de 25 à 40 t. Ils permettent un transport rapide des matériaux sur terrain difficile et sont très manœuvrables

dans l'espace restreint du chantier. Ils sont aussi facilement disponibles et leurs bennes basculantes sont souvent doublées avec des plaques d'acier trempé. Les véhicules tout-terrain toutes roues motrices devraient être choisis pour leur capacité à rouler dans des sites avec une adhérence et une traction limitées (voir la Figure 9.36).



**Figure 9.36** Exemple d'un tombereau transportant des enrochements de la zone de stockage temporaire à la section de digue en construction (source : Port Autonome du Havre)

#### 9.4.2 Transport ferroviaire

Seuls les plus grands projets justifient l'installation d'une nouvelle voie de desserte pour la livraison par trains. Cette forme de transport peut être attrayante quand la carrière appropriée a sa propre installation ferroviaire, et quand il est possible d'utiliser une installation ferroviaire proche du chantier pour décharger les wagons.

La taille de l'installation de déchargement détermine souvent la longueur du train qui peut être utilisé et par-là même la quantité totale de matériaux pouvant être acheminée en une seule fois. Le poids net autorisé par wagon dépend de l'opérateur ferroviaire local et de l'autorité responsable de l'infrastructure. Des restrictions possibles à l'utilisation des réseaux ferrés en raison de conflit de synchronisation avec des trains de voyageurs et de tout autre trafic de marchandises devraient être étudiées dès le début du processus de planification. Au Royaume-Uni, par exemple, les trains de marchandises ne peuvent transiter le plus souvent que la nuit, alors qu'il n'est peut-être pas possible de décharger dans la zone ferroviaire ou de travailler sur le site à ce moment-là.

L'entreprise doit prêter une attention particulière aux conditions de déchargement des wagons de chemin de fer. Celles-ci dépendront de la disposition de la voie de desserte, du type de wagons utilisés, de la taille des enrochements à transporter et de l'équipement de déchargement disponible. Pour réduire au minimum les risques de dommages aux wagons et s'assurer de la disponibilité du matériel adéquat, la société exploitant les wagons doit être contactée au plus tôt. Les plus gros blocs d'enrochement peuvent nécessiter l'utilisation de wagons plats ou de wagons avec côtés démontables.

##### Wagons plats

Des wagons plats ont été souvent utilisés pour le transport de blocs d'enrochements. L'utilisation de wagons à côtés abaissés ou de wagons spécialement conçus pour le transport des enrochements dispense d'assurer les blocs avec des sangles ou des chaînes. Les wagons plats sont habituellement chargés et déchargés au grappin (voir la Figure 9.37).





**Figure 9.37**  
Chargement d'un train au grappin au terminal ferroviaire de la carrière (source: Carrières du Boulonnais)

### Wagons tombereaux à bords élevés

L'utilisation de wagons ordinaires ouverts à bords élevés (également connus sous le nom de wagons tombereaux) est habituellement limitée à des enrochements inférieurs à 100 millimètres de diamètre en raison des difficultés de déchargement. Des wagons à déchargement latéral ou par le fond sont disponibles, mais, pour éviter les ruptures de charge lors du déchargement, l'entreprise doit s'assurer qu'il a l'équipement et les véhicules nécessaires pour la réception.

### Trains à déchargement autonome

Ces trains ont un système intégré de bandes transporteuses, capables de décharger rapidement. Ils sont conçus pour manipuler des granulats, conviennent ainsi pour les petits enrochements.

## 9.4.3 Transport par voie d'eau

Le transport par voie d'eau est souvent utilisé pour acheminer les matériaux de carrière sur le site des grands chantiers. Cette méthode offre l'avantage de pouvoir transporter de grandes quantités sur le site assez rapidement et avec peu d'impact sur l'environnement. Cette section présente les moyens de transport disponibles et souligne l'importance vitale des opérations de transbordement des matériaux des zones en eau profonde vers des points où ils peuvent être manipulés avec du matériel de chantier.

Les voies navigables, telles que les rivières et les canaux, peuvent fournir un lien commode pour le transport des matériaux sur le site à partir de carrières situées dans l'arrière-pays ou bien outre-mer. Les enrochements destinés à la protection des voies navigables elles-mêmes sont les premiers matériaux à être transportés par voie d'eau. Les enrochements sont souvent transportés dans des navires de transport de vrac et des barges poussées. Les barges à pont plat sont rarement utilisées.

La nature abrasive de l'enrochement naturel implique que tous les navires soient spécialement préparés pour cet usage. Ce genre de matériel spécialisé est habituellement utilisé pour divers projets tout au long de l'année, il est donc important de s'assurer dès le début de la planification qu'il sera disponible le moment venu.

Bien que la transformation et même la construction de nouveaux navires restent une option pour les plus grands projets, l'entreprise doit étudier soigneusement les coûts de mobilisation, de préparation, d'assurance et de réparation pour tout navire acheté ou affrété directement, et analyser ces coûts subjectivement. Il est recommandé à l'entreprise de contacter une société spécialisée dans le transport maritime possédant son propre équipement et savoir-faire et prête à inclure dans le devis de transport tous les risques jusqu'à la livraison des enrochements. L'affrètement de navires et de services auprès d'une société de transport est une alternative généralement moins coûteuse, mais elle peut laisser tous les risques – y compris les risques météorologiques et les dommages possibles au navire – à la charge de l'entreprise.

### 9.4.3.1 Transport maritime

De la carrière d'approvisionnement à un point en mer près du site, les enrochements sont transportés par mer sur un navire ou des barges à pont plat. Toutes ces méthodes de transport ont en commun la nécessité d'assurer une protection adéquate des flancs et du pont des navires. Les blocs d'enrochement empilés sur le pont, sur une hauteur de plusieurs mètres, peuvent se détacher pendant le transport, tomber sur le pont, avec des risques de dommages graves, ou induire un déplacement de cargaison qui peut faire chavirer le navire.

#### Barges à pont plat

Les barges entre 5000 et 20000 TPL peuvent transporter de grandes quantités d'enrochement jusqu'à un point au large. Leur tirant d'eau peut atteindre 6.5 m à pleine charge – voir l'exemple sur la Figure 9.38.

L'équipement de déchargement peut être situé sur la barge et rester à bord pour les opérations de chargement et de déchargement, mais il est recommandé de transférer cet équipement du bord vers le lieu de transbordement. L'équipement de déchargement doit consister en une pelle pouvant être équipée d'un godet ou d'un grappin et de taille suffisante pour la manipulation des matériaux transportés. Une panne de matériel au point de déchargement peut avoir des conséquences graves. Les systèmes électriques de la machine sont en général son point faible et doivent être complètement scellés hors d'atteinte de l'air marin.



**Figure 9.38** Barge à pont plat de 20 000 t pour enrochements (source : Stema Shipping Ltd)

Quand la barge est arrivée au mouillage dans la zone de transbordement le remorqueur de mer peut partir, si les conditions le permettent, réduisant au minimum le risque de paiement d'indemnités d'immobilisation. Cependant, à la suite de plusieurs incidents avec des barges qui ont chassé sur leur mouillage, les réglementations nationales de nombreux pays, par exemple les exigences britanniques actuelles Defra, imposent la présence d'un remorqueur adéquat à poste ou à disposition localement tant que la barge est au mouillage.

#### Caboteurs à chargement et déchargement autonome

Ils sont équipés d'un engin de déchargement embarqué comme une pelle hydraulique de capacité suffisante pour charger et décharger des blocs d'enrochement (voir la Figure 9.39). Ces pelles sont souvent équipées d'une gamme d'outils de manutention pour matériaux de toutes tailles et sont souvent montées à bord du navire de manière à pouvoir se déplacer sur toute la longueur de la cale. La présence de ce type d'équipement à bord permet une plus grande autonomie dans les ports de chargement et de déchargement, ce qui réduit la dépendance à l'égard des grues basées à terre et permet de n'utiliser pour les opérations de chargement que les membres qualifiés de l'équipage qui connaissent bien le navire.



**Figure 9.39**  
Navire MV Mari à chargement et déchargement autonome  
(source : Sillanpää)

Il existe des navires entre 1000 et 5500 TPL, mais comme pour les pontons à pont plat, ils doivent répondre au but prévu et avoir une protection adéquate du pont et des flancs. Bien que ces navires soient plus petits que les pontons à pont plat, ils ont une vitesse de navigation plus élevée, permettant des rotations plus rapides. Le tirant d'eau en charge peut atteindre 7 m suivant de la taille du navire.

#### **9.4.3.2 Transbordement vers le rivage**

Pour protéger l'habitat et la faune locale, les bateaux et les filets de pêche, le choix du site de transbordement est un processus minutieux auquel participent les équipes de construction et de transport ainsi que les défenseurs locaux de l'environnement et les pêcheurs.

Les discussions couvrent entre autre :

- les tirants d'eau requis ;
- les zones de pêche locales ;
- la qualité du fond marin pour la tenue des mouillages ;
- les chenaux de navigation ;
- les considérations environnementales pour le fond marin ;
- la protection contre les conditions météo et l'état de la mer ;
- les activités de loisirs.

Des conditions rigoureuses concernant les levés du fond marin, les méthodes de transbordement des matériaux d'un navire à un autre pour éviter les déversements, des créneaux horaires et d'autres contraintes sont fréquemment imposées. Ces conditions sont précisées dans les autorisations que l'entreprise ou le client doit obtenir avant le début des travaux. Comme ce processus peut prendre du temps il doit être lancé le plus tôt possible pour permettre la publication et la distribution des avis nécessaires (avis aux navigateurs) et pour informer toutes les parties intéressées.

Une fois que le navire de transport maritime est à un mouillage stable au large à l'endroit convenu, les matériaux sont transbordés sur un navire plus petit, de faible tirant d'eau pour être débarqués à terre (voir Figure 9.40).



**Figure 9.40** *Transbordement en mer (source : Stema Shipping Ltd)*

Une large gamme d'équipements spécialisés est disponible mais cette section couvre les équipements et les méthodes les plus répandus. Le choix du matériel peut jouer un rôle important dans la planification globale du chantier, car souvent le navire de transport peut participer au processus de construction lui-même.

Il convient de noter que dans les zones à faible marnage ou dans les zones où la pente des fonds marins est trop raide pour recevoir les matériaux, il peut être nécessaire de construire des mouillages provisoires et des jetées. Alternativement les matériaux peuvent être déchargés dans un port voisin et transportés sur le site par la route.

#### **Barges à clapet et navires à déversement par le fond**

Une description de ces navires est donnée à la Section 9.3.4.

#### **Navires à déversement latéral et navires géostationnaires**

Une description de ces navires est donnée à la Section 9.3.5.

#### **Navires à déversement latéral par basculement**

Ces navires sont propulsés par des propulseurs jumelés spéciaux et sont équipés de larges bennes de camions sur toute la longueur du pont (voir la Figure 9.41). Le navire apporte les enrochements près de la côte au point de déchargement prévu et des vérins hydrauliques soulèvent les différentes bennes jusqu'au gerbage des enrochements. Ces navires permettent un déchargement rapide et peuvent avoir un tirant d'eau en charge d'environ 2.20 m, mais ont une charge limitée à environ 500 t. Ils ne peuvent pas décharger avec la même précision que les navires géostationnaires, mais ils peuvent transporter des enrochements de plus grandes tailles, jusqu'à 12 t. Ils sont tout à fait adaptés aux livraisons d'enrochements pour les digues et les ouvrages de défense contre la mer. Pendant le déchargement ces navires sont sujets à un déplacement latéral et le savoir-faire et l'expérience de l'équipage sont essentiels pour en garantir la précision.



**Figure 9.41** Navire à déchargement latéral par basculement MV Ville (source: Sillanpää)

### Barges à pont plat

Ces barges n'ont pas de moyen de propulsion et sont tirées vers la côte par un remorqueur d'assistance. La barge peut avoir besoin de câbles ou d'ancres pour l'approche finale de la plage et pour stabiliser sa position. Avec l'utilisation de câbles amarrés au rivage, les barges peuvent décharger à l'endroit prévu avec un degré de précision élevé. Le tirant d'eau et l'assiette dépendent de la taille de la barge, de la charge transportée et du navire d'assistance. Les matériaux sont déchargés par la poupe ou par le côté. L'enrochement est déchargé à l'aide de la pelle de chargement à bord et il n'y a pas de limite à la taille des enrochements. Les barges sont tout à fait adaptées aux livraisons pour les brise-lames et les ouvrages de défense contre la mer. Les limites de tirant d'eau dépendent souvent du remorqueur utilisé plus que de la barge elle-même. Alternativement, si le littoral s'y prête, des barges à pont plat peuvent être échouées sur le rivage. Cette méthode exige une inspection et une préparation soignée de la plage. Des rampes d'accès au pont de la barge et le ballastage de la barge peuvent être nécessaires pour abaisser la flottaison en même temps que les blocs sont déchargés.

## 9.5 RISQUES LIÉS À LA CONSTRUCTION ET SÉCURITÉ

### 9.5.1 Introduction

La construction en milieu côtier, maritime et dans les estuaires est particulièrement dangereuse en raison de la nature hostile et parfois imprévisible de l'environnement. Les documents cadres de Simm et Cruickshank (1998) et de Cruickshank et Cork (2005) examinent ces problèmes du point de vue de l'environnement côtier. Les travaux de Morris et Simm (2000) couvrent ceux des environnements fluviaux et des estuaires. La gestion des risques fait l'objet d'une attention accrue de tous les professionnels car elle peut aider à :

- identifier et remettre en cause les hypothèses affectant le succès du projet ;
- concentrer l'effort de contrôle du risque en affectant des priorités aux risques ;
- équilibrer les coûts et les avantages des mesures de contrôle du risque ;
- protéger la santé et la sécurité des travailleurs et du public.

Depuis 2000, des recommandations ont été préparées à l'incitation d'entreprises de travaux maritimes expérimentées qui s'inquiétaient de la réputation de cette industrie et voulaient favoriser l'adoption de bonnes pratiques. Certains de ces sujets sont traités dans le *Coastal Engineering Manual* (USACE, 2003) et couvrent :

- l'incertitude sur les conditions naturelles et l'influence que celle-ci peut avoir sur les risques liés aux aménagements côtiers et fluviaux ;
- comment l'évaluation et la gestion des risques à travers le projet peuvent aider à atténuer leurs occurrences et leurs conséquences ;
- l'influence des modes de paiement et d'assurance, ainsi que de la sécurité, du temps, des coûts et des objectifs environnementaux, sur les procédures ou protocoles qui devraient être adoptés.

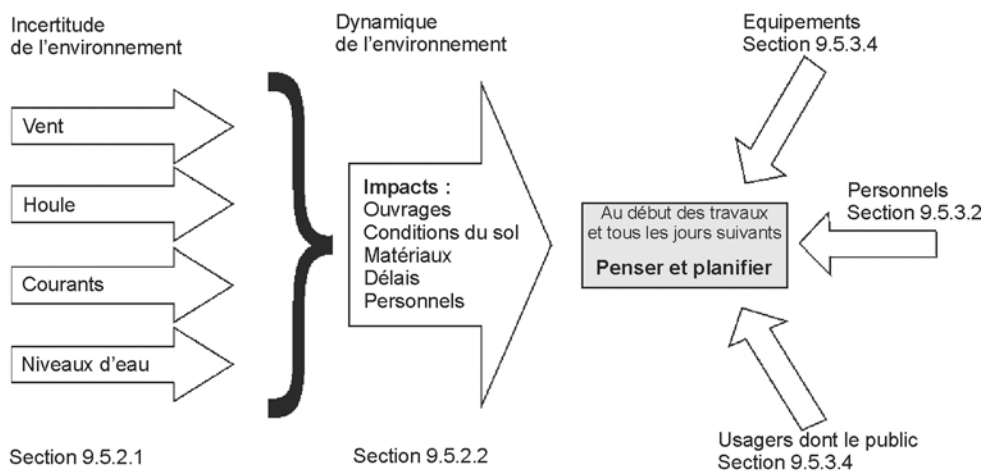
Les sections suivantes récapitulent les principaux risques et problèmes de sécurité et les mesures possibles de contrôle de ces risques. Il est à noter que la probabilité d'accidents mortels augmente quand les principales situations dangereuses décrites ci-dessous sont rencontrées.

## 9.5.2 Sources principales de risques et leurs occurrences

Les sources principales des risques sont décrites à la Figure 9.42. Elles proviennent :

- d'un environnement incertain – vent, houle, courant, niveau d'eau ;
- de la nature de cet environnement physique et de sa dynamique, c'est-à-dire son impact, y compris celui de mauvaises conditions de sol ;
- des usagers de l'environnement côtier ou fluvial, c'est-à-dire d'un manque de confinement du site.

Les éléments ci-dessus influencent les travaux, le choix du matériel, l'organisation du chantier et la disposition des ateliers, ainsi que les activités du public.



**Figure 9.42** Sources principales de risque en ingénierie côtière

### 9.5.2.1 Un environnement instable

Les environnements côtiers et marins peuvent être instables et parfois imprévisibles, ce qui représente un défi majeur pour ceux qui participent à des travaux de construction. Cette section décrit les paramètres de base pouvant influencer la planification et l'exécution des travaux de construction dans de tels environnements, à savoir :

- le régime des vents ;
- le régime des houles ;
- les courants ;
- les niveaux d'eau ;
- la combinaison des probabilités ci-dessus.

Ces paramètres sont présentés brièvement ci-dessous. Plus de détails sont donnés à la Section 4.2, ainsi que dans Godfrey (1996), USACE (2003) et Simm et Cruickshank (1998).

Les entreprises doivent être pleinement informées des conditions météorologiques sur le site de construction et sur le trajet emprunté par les livraisons. Toute information concernant la conception doit être transmise à l'entreprise à l'étape de l'appel d'offres.

### Régime des vents

Indépendamment de l'influence des vents sur la houle, les vents peuvent également avoir un effet important sur les embarcations et sur le fonctionnement des matériels de l'entreprise. L'effet de vents forts avec des variations importantes et rapides de vitesse, en même temps que la pression locale, peut entraîner des mouvements importants des embarcations, avec des conséquences pour la sécurité du matériel et des personnels. En outre, le vent peut affecter de manière importante les opérations de levage sur le rivage, sur les barges grues et des grues sur les plates-formes auto-élévatrices.

### Climat de houle

La houle peut constituer le paramètre hydraulique le plus important dans l'organisation de travaux de construction en milieu côtier et maritime. Les paramètres définissant les conditions de houle sont décrits à la Section 4.2.4.

Son impact sur les activités de construction est varié et peut :

- affecter la livraison des matériaux sur le site, par exemple en empêchant les barges de quitter le port, en les forçant à chercher un port ou un autre abri, en les retardant en cours de voyage, en les empêchant de décharger ;
- suspendre l'avancement des travaux jusqu'à ce que l'état de la mer redevienne compatible avec la reprise des travaux ;
- endommager le matériel à l'occasion des échouages, des chavirages ou d'impact sur les travaux ;
- endommager les ouvrages temporaires ;
- entraîner des blessures corporelles aux travailleurs sous l'impact des vagues ;
- compromettre les procédures de sauvetage ;
- endommager les parties terminées des travaux alors que la protection permanente n'est pas encore entièrement en place ;
- faire baisser le niveau des plages, ce qui peut affecter les travaux et les livraisons ;
- empêcher l'accès aux équipements flottants ou aux installations en mer ou de les quitter.

L'impact de la houle dépend de certains facteurs comme sa hauteur et sa périodicité : les houles de période longue tendent à poser plus de problèmes pour les mouvements des navires et provoquent un plus grand run-up et plus de franchissements. Les autres facteurs importants sont la direction de la houle, la durée des tempêtes, leur persistance et leur succession. Les vagues d'étrave des navires qui passent à proximité du chantier doivent aussi être considérées.

### Courants

Les éléments ci-dessous sont généralement valables pour les courants de marée mais doivent aussi être considérés pour les travaux en rivière.

À l'exclusion de certaines circonstances telles que la mise en place de caissons ou le fonçage ou le battage de pieux dans des courants forts, l'impact des courants sur le risque lié à la construction est limité en particulier si les courants sont prévisibles, par exemple autour des côtes européennes. Dans certains cas, cependant, comme dans le Golfe de Khambat en Inde par exemple,

les courants peuvent être forts et/ou imprévisibles en raison de l'influence des montées subites des eaux. Il est important d'en tenir compte si des travaux de construction subaquatiques avec des véhicules commandés à distance ou avec des plongeurs sont prévus. Les courants peuvent :

- affecter la capacité d'un navire à tenir sa position ;
- affecter la capacité d'un navire à s'approcher du site sans risque et en particulier lorsque la profondeur d'eau est faible ;
- affecter les opérations de sauvetage et réduire la capacité de l'embarcation de sauvetage à fonctionner ;
- affecter la pose des matériaux en respectant les tolérances ;
- affecter l'inclinaison des pieux et nécessiter un contreventement des pieux immédiatement après leur battage ;
- affecter les conditions de houle incidente ;
- éroder des ouvrages partiellement terminés ;
- exercer des sollicitations importantes sur des ouvrages provisoires.

### **Niveaux d'eau**

Les niveaux d'eau peuvent :

- déterminer le type de travaux pouvant être menés à bien à sec et le temps pour accéder à ces parties d'ouvrages ;
- empêcher les livraisons d'atteindre le site ;
- inonder les chantiers lorsque des excavations ou des batardeaux sont utilisés ;
- affecter le régime de la houle et des courants sur le site ;
- affecter les niveaux d'eaux souterraines et les pressions d'eau interstitielles derrière les quais et les ouvrages de retenue.

Les Sections 4.2.2 et 4.3.1 décrivent les paramètres de niveaux d'eau à prendre en considération. Souvent le facteur principal déterminant le niveau d'eau est la marée astronomique, qui peut être prévue à l'avance avec précision. Les effets météorologiques peuvent être prévus jusqu'à un certain degré seulement ; les prévisions sont valables seulement quelques jours à l'avance mais elles ne sont pas complètement fiables. Les effets sismiques demeurent en général imprévisibles bien que des tsunamis puissent être prévus dans une certaine mesure à condition que la technologie nécessaire soit disponible et que la source soit située très loin du site. Tous ces aspects devraient être pris en considération, car ils peuvent présenter un risque pour les travaux de construction.

### **9.5.2.2 Dynamique de l'environnement**

La section précédente montre comment les variations de l'environnement hydraulique - et donc l'incertitude sur son état à un instant donné - peuvent affecter les travaux de construction. En outre, il peut y avoir une interaction entre l'environnement hydraulique et d'autres facteurs physiques qui peut avoir un impact sur la constructibilité des ouvrages. Cette interaction peut entraîner :

- des changements du fond ;
- des changements des conditions de sol ;
- des changements dans les quantités de matériaux ;
- des problèmes d'accès et de surface de travail ;
- des problèmes de fiabilité des approvisionnements en matériaux.



Tout cela affectera la stabilité des ouvrages en cours d'exécution, des ouvrages provisoires ou permanents. Simm et Cruickshank (1998) donnent plus de détails sur la question.

### 9.5.3 Principes et bonnes pratiques pour la gestion des risques

#### 9.5.3.1 Protection des ouvrages

Les principaux moyens de protection des ouvrages sont récapitulés dans cette section, basée sur des recommandations de Simm et Cruickshank (1998).

##### a) Stabilité des ouvrages en cours de construction et des ouvrages provisoires

Les conditions quotidiennes de vent, de houle, de marée et de niveau d'eau qui influencent le processus de construction, diffèrent des conditions prises en compte dans la conception, qui se base le plus souvent sur des événements extrêmes. Pour la conception des ouvrages provisoires et l'évaluation des risques de dommages aux ouvrages partiellement terminés, les conditions météorologiques quotidiennes sont plus importantes que les événements extrêmes. À certaines étapes critiques de la construction les ouvrages peuvent être vulnérables à des conditions de vent, de houle, de niveau d'eau et d'écoulement de rivière tout à fait modérées. La durée de ces conditions peut jouer un rôle critique. Par exemple, une digue à talus dont seul le noyau en enrochement a été posé ne sera pas sérieusement endommagé par une tempête de deux heures avec un  $H_s = 2$  m par exemple, mais si cette tempête devait durer deux jours les dommages pourraient être sérieux. S'ils connaissent ces conditions, les entreprises peuvent prévoir la durée et la périodicité des périodes de calme et planifier leur travail en conséquence. Par exemple, ils peuvent travailler avec une houle moins forte ou un débit de rivière réduit mais ne pas pouvoir avancer pendant les périodes de mauvais temps, pendant lesquels ils devront aussi protéger les ouvrages permanents en partie terminés. Les maîtres d'œuvre doivent recueillir les informations météorologiques de base et les rendre disponibles, car il est très difficile pour les entreprises d'obtenir ces informations pendant la période d'appel d'offres qui est courte. Pour réduire la vulnérabilité des ouvrages en partie terminés, le maître d'œuvre doit, dans la mesure du possible, choisir la méthode de construction lorsqu'il recueille les données météorologiques appropriées et lorsqu'il conçoit les ouvrages

##### b) Méthodes d'évaluation des conditions du site pour répondre aux appels d'offres, pour des prévisions en temps réel et le contrôle du site pendant la construction

Il est fait référence aux Sections 4.2 et 4.3 pour les informations détaillées sur les méthodes d'évaluation des conditions sur le site pour les zones côtières et intérieures respectivement.

##### c) Limites opérationnelles de l'équipement

Les limites de fonctionnement de l'équipement lui sont propres et dépendent des conditions locales et des qualifications des opérateurs. Par exemple, les conditions limites d'accès d'une barge à un mouillage provisoire pour décharger dépendent autant de la période de la houle, de la direction du vent, des courants, de l'état de la marée et des qualifications du chef de chantier que de la hauteur réelle de la houle.

##### d) Ouvrages provisoires et ouvrages permanents en cours de construction

Ces ouvrages sont souvent conçus, ou évalués, pour un événement de période de retour arbitrairement choisie, souvent de 10 ans, sans se soucier de la probabilité de son occurrence pendant la période de construction. La période de retour utilisée dans la conception des travaux provisoires ou d'une évaluation de la vulnérabilité de l'ouvrage ne doit pas être confondue avec la période de construction. Par exemple, si la périodicité d'un événement extrême est de cinq ans et la période de construction est également de cinq ans il y a alors une probabilité de 67 % que cet événement se produise pendant la construction (voir Tableau 2.4 dans la Section 2.3.3.2).

**e) Modifications du fond marin et du lit d'une rivière**

À la différence de la plupart des ouvrages de génie civil, pour les ouvrages hydrauliques les couches superficielles, c'est-à-dire le fond de la mer, le lit d'une rivière ou le profil d'une plage, peuvent être très mobiles, changeant d'un jour à l'autre et d'une saison à l'autre. Ces modifications peuvent être dues à des causes naturelles, à la présence d'ouvrages existants et d'installations et d'ouvrages provisoires, y compris des ouvrages permanents en partie terminés, et de stocks de matériaux. Ces changements peuvent affecter le déroulement de la construction par leur impact sur :

- l'intensité de la houle ou de l'écoulement près de l'ouvrage, ce qui peut affecter la stabilité des ouvrages provisoires ;
- le tirant d'eau disponible pour les installations flottantes sur le chantier et pour l'accès nautique ;
- le temps pendant lequel les ouvrages sont découverts permettant un accès à sec ;
- l'accessibilité des engins terrestres aux surfaces découvrantes à marée basse.

**f) Planification des travaux**

Dans leurs offres, les entreprises doivent donner une durée précise pour le contrat, bien qu'une date exacte de début soit rarement donnée. L'obligation de faire une offre valide pendant trois mois reflète une incertitude pesant sur la date de début des travaux. Pour cette raison, les statistiques météorologiques couvrant la durée du contrat peuvent indiquer une période avec plus ou moins de tempêtes, surtout si la durée du contrat n'est que de six à neuf mois.

Lorsque le maître d'œuvre n'est pas sûr de la date de démarrage pour des raisons de disponibilités et d'arrangements financiers, ou pour toute autre raison, il est recommandé de proposer une durée de douze mois minimum pour le contrat. Souvent, les contrats peuvent être imbriqués ou prolongés pour couvrir une période de trois à cinq ans. Ceci permet à l'entreprise de choisir la période pendant laquelle elle va faire les travaux et réduire ainsi le risque global : les mauvaises conditions météorologiques d'une année peuvent être compensées par de meilleures conditions d'une autre.

Parfois les travaux prévus par le contrat doivent être faits en hiver pour ne pas gêner des activités commerciales ou touristiques pendant les mois d'été ou pour profiter de la disponibilité de main-d'œuvre et d'équipement. L'établissement de ce genre d'échéance augmente automatiquement les risques de construction et les temps d'arrêt qui sont inévitables. Les coûts induits doivent être justifiés lors de l'évaluation du projet (voir la Section 2.4) par des avantages correspondants appropriés.

**g) Incertitude sur les eaux souterraines**

La surveillance du niveau des eaux souterraines exige une bonne compréhension de la pression d'eau mesurée, des strates concernées et de leur effet sur la résistance du sol et les sollicitations imposées. Le niveau des eaux souterraines peut varier à proximité des rivières et des estuaires. Il est étroitement lié aux niveaux de la mer ou de la rivière, même si les ouvrages ne sont pas inondés par les marées ou les crues des rivières. Les problèmes suivants peuvent surgir lorsque l'on tente d'assécher des chantiers de construction :

- impossibilité d'assèchement si le sol est trop perméable, par exemple les sables mouvants en rivière et en zone côtière ;
- assèchement d'un ruisseau et/ou inondation en aval lors du pompage à côté du ruisseau.

**h) Variations géologiques dans la carrière**

Un approvisionnement incertain en enrochement peut créer des risques importants d'augmentation des délais et des coûts de construction. La question clé est la production de la carrière (p. ex. le pourcentage d'enrochement de plus de 1 t). Pour la préparation de l'offre et la planification des travaux des hypothèses sur le rendement de la carrière (voir le Chapitre 3) doivent être prises. Le

maître d'œuvre peut fournir une estimation de ce rendement si le temps pour soumettre l'offre est limité et s'assurer ainsi que les soumissionnaires concurrents utilisent la même base d'évaluation.

Comme les matériaux provenant de la carrière constituent la majeure partie du coût du projet, tout changement dans le rendement estimé aura un effet important sur le coût et la date d'achèvement. Pour réduire ce risque et même (dans le cas d'une amélioration du rendement de carrière) en faire profiter le maître d'ouvrage et l'entreprise, un mécanisme de partage des risques peut être utilisé pour partager à la fois les hausses de coûts et les économies.

#### **i) Autres risques liés à la construction**

- incertitude sur les conditions de sol;
- respect des tolérances de construction – en particulier pour les travaux subaquatiques;
- incertitude sur l'état des ouvrages existants;
- fiabilité de l'approvisionnement en matériaux (voir également le paragraphe ci-dessus);
- changements des fonds résultant du transport sédimentaire, du tassement et du système de mise en place des enrochements;
- existence d'accès appropriés au chantier;
- remplissage des excavations et dispersion des tas de débris sous l'action de l'eau;
- maintien de la navigation commerciale ou de plaisance;
- choc de navires;
- ouvrage induisant un impact défavorable sur l'environnement local;
- actions des groupes de pression cherchant à obtenir des compensations, ou à faire arrêter les travaux;
- risques accrus concernant la sécurité lors des travaux effectués dans ou au-dessus de l'eau (risques contrôlables par l'application de mesures simples de précaution);
- risques de sécurité particuliers, y compris le travail dans des batardeaux ou dans un environnement pressurisé tel que des caissons, l'utilisation d'installations différentes et flottantes, le travail avec des plongeurs et l'utilisation ou la découverte d'explosifs;
- risques environnementaux, tels que l'écoulement des eaux de ruissellement et l'installation de ré-approvisionnement en carburants.

#### **j) Gestion des risques pour contrôler les coûts et les échéances**

Des initiatives récentes, y compris celles décrites aux Sections 2.3, 2.4 et 2.5, ont essayé de formaliser le processus de gestion des risques pour faciliter le travail des ingénieurs. Les différentes étapes commencent avec des procédures d'évaluation des risques semblables à celles requises par la loi dans le domaine de la sécurité.

Un excellent point de départ est de mettre sur pied un groupe de travail sur le risque. Une méthode est proposée par Simm et Cruickshank (1998) qui donnent aussi des exemples de réalisations de ce groupe de travail. Les séances de réflexion et d'établissement de priorités permettent une détection systématique des sujets à risque et une première identification des mesures de réduction du risque.

La réduction des risques et/ou les mesures de contrôle tombent dans une ou plusieurs des catégories suivantes de gestion des risques:

- faire disparaître;
- réduire;

- transférer;
- partager;
- assurer;
- accepter.

Chacune de ces options est présentée dans Simm et Cruickshank (1998), avec la meilleure stratégie de contrôle en fonction du risque, de la capacité à gérer ce risque et les organismes concernés.

Lorsque les clients établissent les budgets de travaux et lorsque les entreprises cherchent à contenir les coûts, ils devraient faire des évaluations de tous les coûts et/ou délais supplémentaires attribuables à des facteurs de risque qu'ils peuvent encourir sur des projets côtiers, en rivière et en estuaire. Il existe beaucoup de méthodes pour estimer les budgets des projets. La plus simple consiste à préparer des registres de risques dans lesquels chaque risque est représenté par une probabilité et le coût de ses conséquences. Des méthodes plus complexes peuvent étendre ce système à une description systématique de tous les risques basés sur des conséquences identifiables séparément : minimum, intermédiaire, maximum. Quand les chiffres et/ou les interactions entre les éléments de risque sont tels qu'un calcul à la main serait difficile ou long, on peut recourir à la technique d'analyse Monte Carlo pour calculer une distribution de risque à partir d'un ensemble donné d'éléments de risque. Voir Vrijling (2001) et Schiereck (2001) pour plus d'information.

### 9.5.3.2 **Protection des travailleurs**

#### **Mesures d'hygiène et de sécurité**

En complément des problèmes d'hygiène et de sécurité présentés à la Section 2.6, quelques éléments caractéristiques sont présentés ici. Les chantiers de construction côtiers et fluviaux sont souvent situés dans des régions retirées où il existe peu d'installations d'aide sociale ou médicale. Dans ces régions, il est difficile d'avoir des informations sur le temps perdu en arrêts-maladie et pour une mauvaise santé en général des ouvriers et sur l'absentéisme provoqué par le travail en horaires décalés et dans des conditions difficiles. Il est donc essentiel de décider comment :

- fournir les équipements sanitaires de base aux travailleurs;
- protéger le personnel contre les risques de maladie et de contamination, comme ceux des matériaux de dragage contaminés, la maladie de Weil;
- le rythme des marées ou le travail en dehors des heures normales peuvent affecter la santé des travailleurs;
- contrôler l'hygiène et la sécurité globales du site;
- assurer la sécurité de toutes les opérations assurées par des ouvriers isolés dans des zones éloignées;
- éviter la fatigue et le stress et gérer les mesures de réduction.

#### **Dispositions particulières d'hygiène et de sécurité (Cruickshank et Cork, 2005)**

- plates-formes et passerelles;
- échelles;
- propreté du site;
- éclairage;
- conditions météorologiques;
- équipement de premiers soins;
- vêtements de protection et équipements comprenant l'équipement personnel de flottabilité;

- visibilité des autres employés par les opérateurs de gros engins ;
- moyens d'accès, notamment transport par voie d'eau ;
- accès à des ouvrages partiellement réalisés ;
- équipements de sauvetage ;
- bouées de sauvetage ;
- lignes de vie ;
- transbordement entre navires et du navire au rivage ;
- opérations de plongée.

#### **Prise en compte de l'hygiène et la sécurité à l'étape de planification du projet**

L'hygiène et la sécurité doivent être considérées assez tôt, car souvent les décisions prises avant le début du processus formel de conception ont des conséquences sur l'hygiène et la sécurité. Depuis 2005, certains consultants maritimes intègrent désormais dans leurs analyses une section courte sur les implications des options techniques sur l'hygiène et la sécurité ; ces choix concernent le début de projet jusqu'à la conception détaillée en passant par les étapes d'études préliminaires. De simples tables d'évaluation des risques sont ajoutées lorsque nécessaire. Cela permet de traiter des problèmes d'hygiène et de sécurité à considérer dès le début du projet et également de garder des traces systématiques des décisions prises.

Des évaluations des risques, complètes et détaillées, devront être faites lors des étapes postérieures du projet (Simm et Cruickshank, 1998).

#### **9.5.3.3 Protection du public pendant les travaux de construction**

Dans un environnement côtier et fluvial il peut être difficile d'isoler le chantier de construction du public et des autres usagers comme les pêcheurs. Le coût élevé des installations de protection dans cet environnement ne se justifie que lorsque des éléments importants du patrimoine sont menacés, et que ces éléments tendent à être utilisés par un grand nombre de personnes.

Les principales causes d'aggravation du niveau de risque pour un projet à proximité du public incluent :

- la difficulté d'interdire l'accès à de grands secteurs de la côte ou des berges d'une rivière pendant les travaux de construction ; ceci s'applique en particulier aux plages en zone intertidale ;
- le public qui est souvent attiré par les zones côtières et fluviales elles-mêmes et également par les travaux de construction, et il peut ne pas réaliser que le chantier de construction est en cours ;
- les gens qui promènent leur chien et qui utilisent souvent la plage ou les berges d'une rivière tôt le matin avant que le personnel de sécurité ou le personnel de gardiennage ne commencent la surveillance du site ;
- une large variété d'usagers qui peut aller de ceux qui roulent en quads à ceux qui font voler des cerfs-volants sur des plages ;
- les plaisanciers qui peuvent être attirés par le chantier sans avoir vu l'avis à la navigation ;
- les jet-skis et les surfeurs en particulier qui peuvent essayer de s'approcher des installations flottantes ;
- les pêcheurs et pêcheurs à la ligne qui vont souvent pêcher la nuit alors que le site n'est pas complètement contrôlé et qui ne sont pas nécessairement au courant des restrictions ou des avis à la navigation.

L'expérience montre que le public est moins susceptible de poser un risque pour sa sécurité s'il est bien informé. Ainsi, ce risque peut être contrôlé à l'aide de services d'assistance téléphonique, de bulletins d'information, d'articles dans la presse locale et d'annonces, de panneaux d'affichage et en installant des points d'observation sûrs. D'autres mesures incluent des visites d'écoles, des réunions d'information et la création de sites web sur le projet.

Dans beaucoup de projets la protection des abords du site peut être difficile en raison de la dynamique de l'environnement côtier et fluvial. Il faut néanmoins étudier la mise en place de clôtures de sécurité lorsque c'est possible, pour protéger les zones de travail du chantier et les zones de stationnement ou d'entretien du matériel, tout en s'assurant aussi que les secteurs sans activités sont sûrs pour l'usage public. Employer des gardes de sécurité est une autre option.

#### **9.5.3.4 Choix et utilisation de l'équipement et du matériel**

Les équipements utilisés pour les travaux côtiers et fluviaux entrent dans trois catégories :

- les équipements terrestres, y compris les équipements de terrassement ;
- les équipements flottants ;
- les autres équipements spécialisés.

Il faut reconnaître qu'une grande partie de l'équipement utilisé n'est pas particulièrement conçue pour fonctionner dans un environnement côtier ou en estuaire. Certains équipements doivent être modifiés pour supporter ces conditions particulières, mais leur utilisation dans les estuaires et le long des côtes peut néanmoins présenter des risques plus grands qu'une utilisation dans l'environnement pour lequel ils ont été conçus.

Les risques peuvent être réduits si ces équipements sont choisis et utilisés avec soin. Le contrôle et la coordination des équipements flottants dans cet environnement dangereux sont essentiels. Alors que l'utilisation de certains équipements – comme des plates-formes auto-élévatrices et sur pieux – peut permettre de réduire certains risques, elle peut aussi en introduire de nouveaux, tels que la rupture des pieux ou l'impact des vagues sous la plate-forme.

#### **9.5.3.5 Résumé des bonnes pratiques**

Les nouveaux guides disponibles aident à identifier et contrôler les risques liés à la construction dans les environnements côtiers, fluviaux et en estuaire. Ces conseils sont basés sur les bonnes pratiques en usage et incluent les recommandations suivantes :

- s'assurer que les clients comprennent les risques de construction en les faisant participer à des groupes de travail sur les risques et en préparant des registres de risques, de coût et de délai et des évaluations statutaires de sécurité ;
- choisir les meilleurs itinéraires d'approvisionnement et les stratégies optimales de gestion des risques ;
- s'assurer que le risque est contrôlé par ceux qui sont les plus à même de les contrôler. Les accords contractuels doivent clairement définir et assigner les risques à ceux qui sont les plus qualifiés pour les contrôler ;
- choisir et nommer les consultants et les entreprises avec l'expérience nécessaire pour prévoir, minimiser et contrôler les risques liés au projet, y compris les variantes du projet ou les solutions alternatives prévisibles ;
- permettre un retour financier sur les travaux qui laisse du temps pour la gestion des risques ;
- garantir des méthodes de travail sûres qui minimisent le risque et récompense l'entreprise de son acceptation ;
- baser le choix de l'offre la plus avantageuse économiquement sur les coûts probables de production obtenus en utilisant le propre modèle de coût du risque du client ;

- accorder plus de flexibilité dans les délais d'exécution pour atténuer l'impact des risques météorologiques;
- donner plus d'importance aux variantes et à la valeur ajoutée de l'ingénierie;
- inclure dans le contrat des conditions liées aux risques météorologiques et aux risques de condition de sol. Les clients doivent fournir toutes les informations disponibles au moment de l'appel d'offres, y compris des informations détaillées sur la durée et le nombre de tempêtes/crués et de périodes calmes/sèches. En particulier:
  - *les événements de coups de vent, de fortes houles, de surcotes et de crués* doivent être clairement définis, en termes d'amplitude maximum – par exemple une période de retour de 10 ans pour un mois particulier de l'année – pour permettre à l'entreprise de faire une évaluation plus précise des travaux. Des définitions vagues telles que "l'action normale de la mer" et "un débit normal de la rivière" doivent être évitées et remplacées par des formulations plus précises comme celles adoptées pour les événements donnant droit à compensation dans le cadre du contrat d'ingénierie et de construction,
  - *les risques liés aux conditions de sol* peuvent être transférés à l'entreprise. Il est cependant recommandé de ramener le risque à un niveau acceptable par une étude du site sérieuse au début du projet. Si cette étude est bien menée, au bon moment et si elle concerne plusieurs ouvrages, elle permet de réaliser des économies d'échelles;
- suivre les bonnes pratiques en matière de gestion des risques lorsque l'on utilise l'assurance comme mécanisme de transfert de risque. Étudier le projet avec les assureurs dès le début pour gagner leur confiance. Une meilleure gestion des risques améliorera les résultats d'assurance et permettra de faire baisser les primes. Pour l'entreprise cela réduira le nombre d'incidents, arrêtera les escalades de coût et diminuera les pénalités potentielles lorsqu'il y a des retards. Les entreprises gagneront la confiance des assureurs par leur professionnalisme et pourront bénéficier de primes plus basses;
- prendre en compte les problèmes d'hygiène et de sécurité dès que possible et neutraliser les risques à la source si possible.

## 9.6 PROBLÈMES GÉOTECHNIQUES

### 9.6.1 Conditions de sol

Pour tous les types de travaux, il est nécessaire de s'assurer de la stabilité de l'ouvrage et du sous-sol. Ces informations résultent de reconnaissances géotechniques préliminaires (voir la Section 4.4). Les sols mous peuvent causer un tassement de l'ouvrage ou peuvent provoquer un grand glissement. Là où cela risque de se produire, il pourra être nécessaire de renforcer le sol, soit par purge et remplacement du sol, soit par drainage vertical. Les sables peu compacts ou pouvant se liquéfier doivent être compactés ou enlevés. L'éventualité de ces mesures doit être prévue dès la phase de conception. Les méthodes d'analyse géotechnique sont présentées à la Section 5.4.

Même lorsque des travaux d'amélioration de sol ne sont pas nécessaires ou après leur réalisation, la stabilité du sol doit être suivie pendant toute la construction (voir Section 4.4). La programmation du chantier doit permettre aux tassements du sous-sol de se stabiliser pendant la construction des différentes couches de l'ouvrage. Cela peut prendre jusqu'à une année en fonction de l'épaisseur du sol mou. Dans ce cas une protection provisoire contre l'érosion doit être installée. Alternativement, des tassements peuvent être admis en surchargeant le sol de fondation ou ajoutant des épaisseurs pour compenser. Pour empêcher les instabilités locales – par exemple glissements par liquéfaction des couches instables dans un remblai – il faut construire par couches successives de sable.

Il y a deux types de tassements: primaire (ou à court terme) et secondaire (ou à long terme). Les tassements à court terme peuvent être corrigés en rajoutant des matériaux, en attendant plusieurs mois que les tassements se stabilisent et en terminant l'ouvrage pour l'amener aux niveaux de

construction prévus. Une façon de gérer les tassements à long terme sur une période de plusieurs années est de construire tout l'ouvrage avec davantage de matériaux, de sorte que le niveau final prévu soit obtenu après stabilisation du tassement. Les deux solutions doivent être approuvées par écrit par le maître d'œuvre et l'entreprise pour pouvoir facturer le volume réel des matériaux utilisés. Lorsque le tassement à court terme est plus important que prévu, des matériaux supplémentaires seront nécessaires.

## 9.6.2 Érosion et sédimentation

Les matériaux du noyau et/ou les sous-couches sujets à l'érosion doivent être couverts assez rapidement pour réduire à un minimum les pertes causées par le courant et la houle. Ce risque de pertes doit être évalué sur la base des conditions prévues pendant la construction. De plus, d'un point de vue morphologique, les travaux de construction doivent être faits de préférence vers l'aval pour réduire la sédimentation dans la zone des travaux avant le déversement des enrochements.

Une érosion du sol peut se produire pendant la construction en raison de la contraction de l'écoulement autour des ouvrages en construction comme les digues, les épis, les barrages de fermeture et les culées de pont. Le maître d'œuvre et l'entreprise doivent évaluer les conséquences de cette érosion sur les quantités de matériaux. Pour cette raison il est recommandé d'installer une protection de fond – à l'aide d'équipements flottants si nécessaire – avant de commencer la construction avec l'équipement terrestre.

## 9.7 TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE

Cette section couvre les aspects de la construction d'une sélection d'ouvrages en site aquatique comportant des enrochements. Les techniques de mise en œuvre et les questions relatives à la construction pour les travaux de protection de fond et des berges sont d'abord analysées, car la construction de la plupart des ouvrages commence par cela. Les équipements utilisés pour les ouvrages hydrauliques en enrochement, les conditions de travail et les tolérances pour ces équipements sont décrites aux Sections 9.3.1 à 9.3.7.

Cette section se concentre sur les travaux côtiers, principalement en raison de l'instabilité et parfois de l'hostilité de l'environnement, qui peuvent être affectés par des tempêtes et des conditions extrêmes de marée. La construction des ouvrages en enrochement dans des secteurs plus abrités tels que les ports et les voies navigables, les rivières et les canaux, utilise des techniques semblables. Dans les secteurs encore plus protégés, un matériel moins important est utilisé. La Section 9.7.5 couvre les travaux en rivière qui requièrent des techniques particulières.

### 9.7.1 Travaux de protection de fond et des berges

#### 9.7.1.1 Types et fonctions

Les travaux de protection de fond et des berges sont destinés à protéger le fond, les rives ou les berges contre l'érosion par la houle et/ou les courants. Ils peuvent avoir plusieurs fonctions :

- servir de couche de fondation pour un ouvrage ;
- empêcher l'affouillement près d'un ouvrage ;
- empêcher l'érosion du lit d'une rivière ;
- stabiliser une passe de fermeture.

Les travaux de protection de fond et des berges procèdent en général par couches successives : une couche supérieure d'enrochement relativement gros pour résister à l'action érosive des vagues et des courants, déposée sur une ou plusieurs sous-couches filtres. La blocométrie de ces couches doit empêcher la migration des matériaux fins entre les couches – et éventuellement hors de l'ouvrage. Les exigences liées à la fonction de filtration sont présentées à la Section 5.4. Ces travaux de protection peuvent comprendre :



- une couche supérieure d'enrochement et plusieurs sous-couches filtres en enrochement ;
- une couche supérieure d'enrochement et un géotextile (possibilité de quelques sous-couches filtres en enrochement, si la couche supérieure est trop grossière pour la placer directement sur le géotextile). Le géotextile sert de filtre à la place des sous-couches filtres les plus fines sur le fond et réduit le nombre de sous-couches filtres nécessaires ;
- un matelas filtre préfabriqué lesté par une couche supérieure en enrochement libre ;
- un matelas filtre préfabriqué lesté par un lest solidaire composé par exemple de blocs de béton ;
- un matelas de gabion.

La construction de ces différents types de protection est décrite dans les sections suivantes. La construction peut impliquer le positionnement et la mise en œuvre d'un matelas filtre ou un matelas géotextile sur le fond et le déversement d'enrochement sur celui-ci.

Pour la plupart des travaux de protection de fond et les grands travaux de protection de berges (c.-à-d. ceux avec une grande distance entre le haut et le pied du talus) du matériel embarqué est utilisé. Cependant, si l'équipement terrestre a une portée suffisante, il sera plus économique de l'utiliser.

Pour les conditions de travail et les tolérances il faut se référer aux Sections 9.3.6 et 9.3.7. Le respect des exigences fonctionnelles est généralement déterminé ainsi :

- filtration épaisseur de couche suffisante, migration minimum des enrochements dans les couches suivantes ;
- stabilité poids suffisant de toute la couche d'enrochement ;
- navigation profondeur de navigation à garantir.

L'utilisation de géotextiles en environnement marin doit être soigneusement étudiée pendant la phase de conception car il peut être difficile de le poser et de le fixer avec la précision requise. Le géotextile est léger (il flotte), grand et très difficile à contrôler dans de l'eau en mouvement. Néanmoins, des techniques de pose ont été développées et le maître d'œuvre doit étudier des méthodes de pose avec des entreprises spécialisées et des fabricants de géotextiles.

### 9.7.1.2 Travaux de protection de fond

#### Protection de fond intégralement en enrochement

Les couches sont souvent mises en œuvre par placement contrôlé, par exemple en utilisant un navire à déversement latéral (voir la Section 9.3.5). Pour les travaux en rivière ou les travaux portuaires, la pose peut aussi être réalisée à l'aide d'engins terrestres. Pendant la construction, il faut empêcher la ségrégation des enrochements et les variations d'épaisseur de couche. Ceci peut être réalisé en :

- déplaçant le navire au-dessus de la zone à couvrir tout en déversant les enrochements de manière uniforme ;
- construisant chaque couche avec de multiples couches minces pour corriger les discontinuités du déchargement précédent ;
- déversant des deux côtés du navire tout en le déplaçant latéralement ;
- créant un recouvrement entre les sections à couvrir.

Pour assurer la stabilité du filtre l'épaisseur des différentes couches doit être supérieure à  $2 k_f D_{n50}$ . Pour une mise en œuvre réussie, l'épaisseur minimum d'une couche est en général de 0.5 m. Les matériaux de type gravier peuvent être posés par une drague aspiratrice en marche équipée

d'un système permettant de pomper un mélange de gravier et d'eau et de le renvoyer dans le tube d'aspiration. Après déversement, les couches peuvent être nivelées avec la tête d'élinde, aussi connue sous le nom de *niveleur de fond*.

Des courants forts peuvent entraîner la ségrégation des enrochements pendant leur chute, en fonction de leur blocométrie et de la profondeur d'eau. Quand la vitesse des courants dépasse 0.5 m/s, la pose d'une couche doit être faite avec beaucoup plus de soin. Alternativement le processus de déversement peut être repoussé jusqu'à ce que les conditions deviennent plus calmes. La vitesse de courant n'affecte pas la précision du positionnement du navire, mais elle affecte la qualité du déversement. La houle, pour sa part, nivelle les irrégularités pendant le déversement des enrochements et peut contribuer à la formation d'une couche d'enrochement de bonne qualité. Comme la houle affecte la précision du positionnement du navire, la manœuvrabilité du navire est le critère limitant en présence de houle.

Comme les premières couches déposées sur le fond sont généralement du petit enrochement, ceux-ci doivent être mis en œuvre seulement quand il y a peu de courant et peu de houle. Pour éviter l'érosion des sous-couches fines pendant la construction, les premières couches fines devraient être rapidement couvertes par les couches d'enrochement plus gros. Lorsque des moyens nautiques sont utilisés, cela peut être effectué à l'aide d'un navire à déchargement latéral, muni de compartiments qui peuvent être chargés avec différentes blocométries pour les différentes couches.

### **Protection du fond par un géotextile recouvert par de l'enrochement**

Les géotextiles sont livrés en rouleaux. Ils peuvent être cousus ensemble en des formes appropriées qui peuvent ensuite être posées directement sur le fond. Un recouvrement suffisant est nécessaire pour obtenir une couverture continue, en tenant compte du tassement et de la déformation possible du sol. Un espace plat de travail, de taille suffisante, doit être aménagé, en général à terre à proximité du site, pour pouvoir dérouler les géotextiles et les coudre ensemble.

Le géotextile peut être posé au fond en tirant directement le rouleau au-dessus du fond ou en tirant un cadre immergé (ou un axe lesté) sur lequel le rouleau est fixé. Le géotextile peut temporairement être stabilisé avec des enrochements ou des sacs de sable placés par des plongeurs en attendant que les couches définitives d'enrochement soient mises en œuvre par-dessus. Cette méthode peut être utilisée quand la houle et les courants sont limités et pour les petits projets. Pour les plus grands projets, le géotextile peut être pré-lesté sur toute sa surface suivant un motif régulier, puis ré-enroulé sur des tubes métalliques équipés de filins permettant les manipulations comme le déroulage au fond.

Pendant le déversement de la première couche d'enrochement sur le géotextile, il faut prendre soin de ne pas l'endommager. La performance de capacité de filtration du géotextile peut être compromise s'il est endommagé pendant son installation. Le géotextile peut être déchiré ou perforé par les blocs anguleux d'une tranchée drainante ou simplement lors déversement.

Plusieurs laboratoires ont lancé des programmes expérimentaux sur des sites réels pour évaluer les dommages causés aux géotextiles par le déversement d'enrochement (Caquel *et al.*, 1999; Chew *et al.*, 1999). Les résultats de ces essais sont récapitulés comme suit :

- l'énergie de chute du bloc est un paramètre important ;
- la rigidité du sol joue un rôle majeur en absorbant l'énergie de chute du bloc par déformation ; elle doit donc être considérée lors de la phase de conception ;
- l'allongement du géotextile sous une force maximum est très important pour les sols mous car le géotextile doit pénétrer dans le sol et accompagner l'enrochement sans se déchirer. Dans la phase d'étude, les propriétés du géotextile doivent être basées sur les conditions de sol prévues.

L'enrochement le plus souvent déversé directement sur le géotextile a une blocométrie standard 10 à 60 kg. De l'enrochement de blocométrie non standard avec des limites nominales à 1 à 10 kg est également utilisé comme première couche protectrice. Ce matériau de carrière ne sera autrement pas utilisé pour le projet dans certains cas.

Les blocométries 10 à 60 kg sont données à titre indicatif. La blocométrie maximale de l'enrochement pouvant être déversé directement sur le géotextile dépend :

- des caractéristiques du géotextile ;
- de la profondeur d'eau ;
- de l'équipement utilisé ;
- du sol de fondation – rigidité et granulométrie du sol ;
- de la forme des blocs ;
- de la structure du revêtement – en une ou plusieurs sous-couches.

En tenant compte de ces paramètres, des blocs jusqu'à quelques centaines de kilogrammes peuvent être déversés directement sur du géotextile. À l'inverse, si la blocométrie est fixée, les propriétés mécaniques du géotextile (résistance à la perforation, allongement, résistance à la traction) devraient alors être choisies en conséquence. Le maître d'œuvre peut également choisir de prescrire un essai convenance par déversement d'enrochement sur site dans le cadre du processus de sélection du géotextile en début de chantier (voir également l'Annexe 1, Modèle de spécifications pour la construction).

Dans tous les cas, le revêtement au-dessus du filtre géotextile doit être assez épais pour empêcher que le géotextile ne soit directement exposé aux rayons UV.

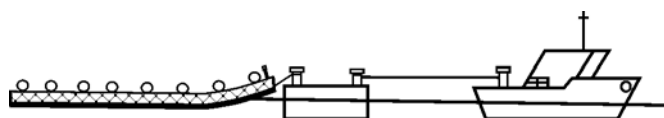
Avant de poser le géotextile, le fond doit être dégagé de tout ce qui pourrait l'endommager, comme des pierres, des racines d'arbre, etc. La première couche d'enrochement posé sur le géotextile doit être assez épaisse pour maintenir l'ensemble sur le fond et empêcher les dommages lors du déversement des plus gros enrochements suivants. La pose des couches suivantes peut être effectuée telle que décrit dans la section précédente.

#### Protection du fond par un matelas filtre recouvert d'enrochement

Un *matelas filtre* se compose d'un géotextile solidaire d'une grille de renforts. Ces grilles de renfort peuvent être des fascines (c.-à-d. des branches de saule tressées – pratique hollandaise classique), composées de matériaux synthétiques ou de bambou. Elles facilitent le transport du matelas en augmentant sa flottabilité et en l'empêchant de se plier. Ils servent également à stabiliser les enrochements pendant le ballastage, empêchant les enrochements de rouler du matelas vers le fond.

Les assemblages de géotextile et de grille de renfort, aussi appelé *matelas*, sont fabriqués sur le chantier, de préférence près de la construction et à sec. La zone de travail doit être dégagée de tout obstacle et sa pente ne doit pas dépasser 3/1. Quand le géotextile a été déroulé et cousu pour obtenir la taille désirée de matelas, les renforts y sont attachés. Le matelas est soigneusement enlevé de la zone de préparation en prenant l'ensemble par le géotextile et en distribuant les forces de traction uniformément à l'aide d'une poutre ou d'un cadre de levage.

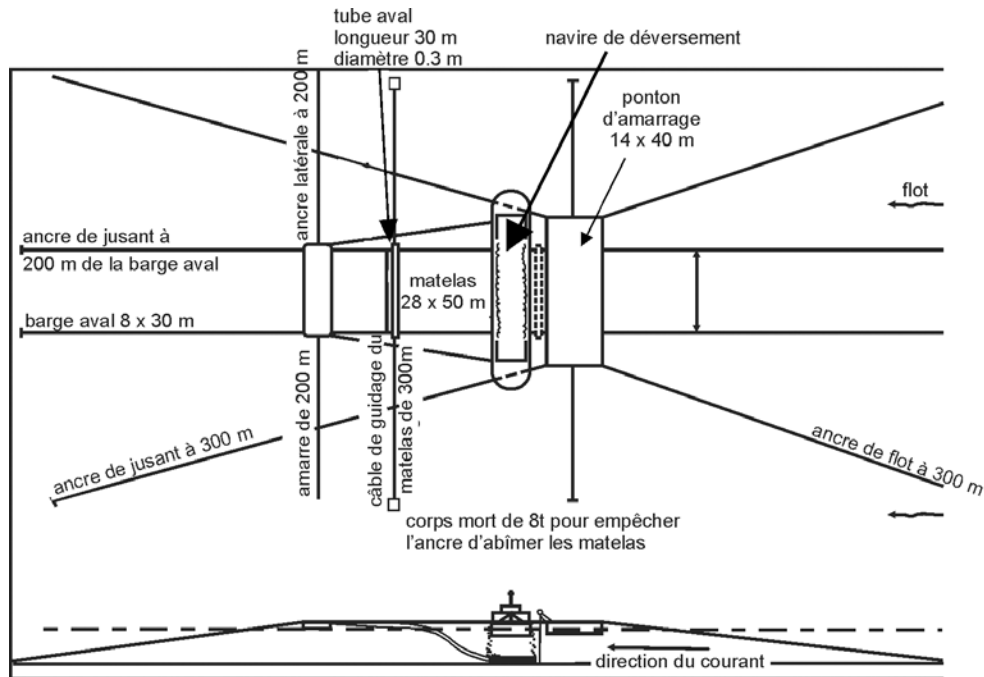
Le matelas est transporté au moyen d'une poutre d'immersion et d'une grue ou d'un ponton puis attaché aux bollards du ponton avec des haussières par l'intermédiaire d'une poutre en I (voir la Figure 9.43). Les forces exercées sur le géotextile par le courant peuvent être d'environ 30 % plus fortes que celles des vagues seules (avec des hauteurs de vagues généralement de 0.5 à 0.8 m). Lorsque du matériel terrestre est utilisé, les matelas sont placés par la grue à l'aide d'un cadre de levage (voir la Figure 9.51).



**Figure 9.43** Utilisation d'une poutre d'immersion pour le transport

Après positionnement, le matelas est submergé en y déversant de l'enrochement petit ou moyen (généralement 1 à 10 kg ou 5 à 40 kg). Il faut éviter d'endommager le géotextile en suivant les instructions ci-dessus. En outre, des nattes protectrices peuvent être cousues sur le géotextile. Ensuite on peut déverser sur les premiers enrochements de ballastage, des enrochements plus gros de 60 à 300 kg environ, en fonction des exigences de stabilité et de filtres.

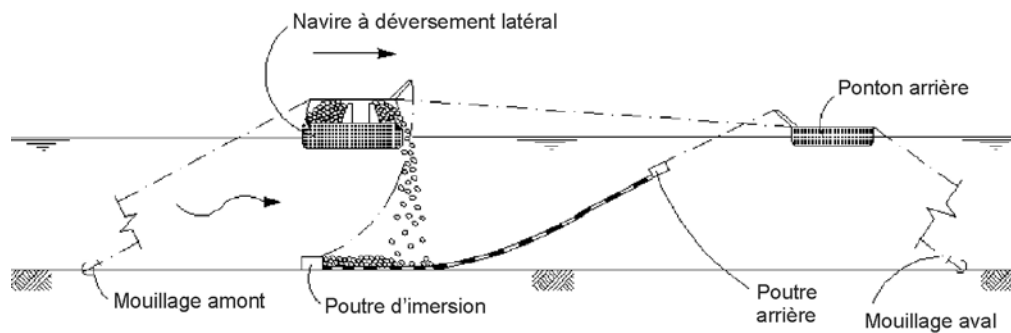
Pour obtenir un déversement uniforme des enrochements sur un matelas de protection du fond il est nécessaire d'employer un système de repérage fiable ou un cadre flottant pendant l'immersion, et une grue pour déverser de l'enrochement supplémentaire. La Figure 9.44 montre l'utilisation de deux pontons pour stabiliser un matelas pendant l'immersion.



**Figure 9.44** Immersion d'un matelas avec deux pontons, en eau à marée

Quand un matelas de protection de fond est coulé, les bords libres du géotextile sont attachés à la poutre d'immersion à une extrémité et à la poutre arrière à l'autre. Pour installer le matelas à l'emplacement requis, il est positionné entre les pontons avant et arrière, qui doivent avoir été préalablement positionnés avec précision. Après l'abaissement de la poutre d'immersion, il y a suffisamment d'espace pour qu'un navire de déversement d'enrochement vienne se placer dans cet espace. La partie avant du matelas est maintenue en position sur le fond par le ballastage ; la partie restante du matelas est ensuite descendue. Par un mouvement contrôlé du navire de déversement entre les deux pontons, une couche uniforme d'enrochement peut être placée sur le matelas. Le matelas est maintenu en position. Grâce à la tension exercée par les lignes de mouillage du ponton arrière (la barge aval de la Figure 9.44), l'inclinaison du matelas est contrôlée pour empêcher la perte des blocs déversés sur le matelas.

Une autre méthode d'immersion peut être utilisée en combinant les fonctions du navire de déversement des enrochements et du ponton avant. Le navire de déversement est équipé de treuils qui peuvent être utilisés pour abaisser la poutre d'immersion du matelas. Lorsque la poutre a atteint le fond, le navire de déversement se déplace au-dessus du matelas. Pendant ce processus les élingues fixées à la poutre d'immersion peuvent être ajustées. Le ponton arrière maintient le matelas sous tension (voir Figure 9.45).



**Figure 9.45** Immersion d'un matelas avec un ponton (source : CUR/NGO)

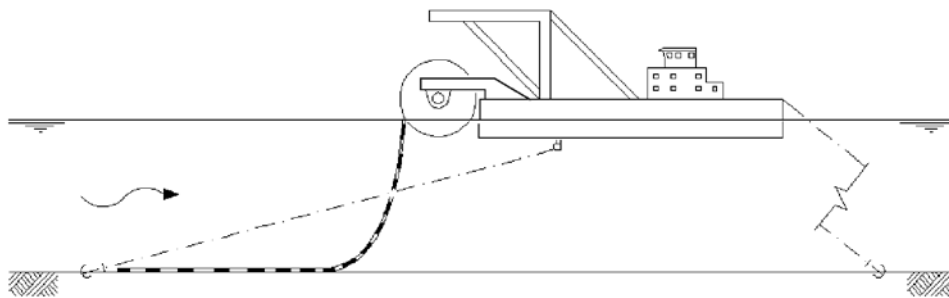
Après la pose du matelas, un complément d'enrochement peut être déversé par des navires de déversement ou des grues flottantes.

Au lieu de renforts en bois, on peut parfois utiliser une grille faite de barres métalliques ou de tubes d'échafaudage, passés dans des boucles cousues sur le géotextile en usine. La grille fournit la rigidité nécessaire pour manipuler et poser le matelas. Comme cet assemblage avec le matelas ne flotte pas, il doit être posé par une grue embarquée. Cette méthode est semblable à la méthode utilisée pour les travaux de plus petite envergure décrits dans la section suivante. Comme la corrosion de l'acier peut endommager le géotextile, les renforts ne conviennent pas pour une utilisation dans un ouvrage permanent. Néanmoins, ils peuvent être rapidement récupérés par des plongeurs.

#### Protection du fond par l'utilisation de matelas préfabriqués avec lest fixe

Des matelas filtres préfabriqués avec lest fixe sont utilisés comme protection de fond et de berge et pour couvrir des canalisations. Les matelas se composent de géotextile auquel sont attachés des blocs de béton. Pendant la fabrication, il faut s'assurer que le lien entre les blocs et le géotextile est de bonne qualité. Il est également possible d'utiliser un matelas géotextile lesté avec du sable.

Pour les grands projets, le matelas peut être déroulé sur le fond à partir d'un ponton, tel que représenté à la Figure 9.46. Le ponton est tiré tandis que le cylindre est déroulé. Cette méthode, qui requiert un équipement spécial, est utilisée quand des exigences strictes sont imposées pour les filtres.



**Figure 9.46** Déroulement d'un matelas à partir d'un ponton (source : CUR/NGO)

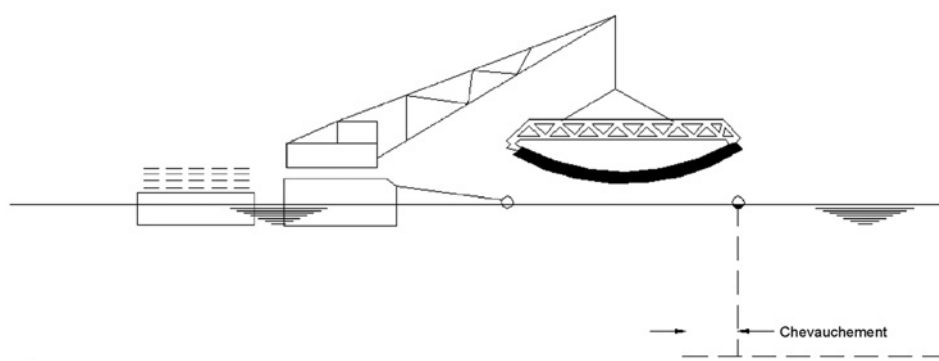
Une alternative consiste à dérouler les rouleaux sur le rivage et à les lester à l'aide de petites barres d'armature disposées de manière régulière. Le géotextile est alors ré-enroulé sur un tube métallique pour être manipulé. Le rouleau est ensuite immergé jusqu'au fond. Le déroulage est réalisé en tirant sur des élingues elles-mêmes roulées dans le géotextile dont les extrémités sont attachées à la barge qui conduit la mise en œuvre depuis la surface. Pour cette opération l'équipement standard représenté à la Figure 9.45 suffit.

Si un lest fixe est utilisé, un ballastage supplémentaire après la pose sur le fond peut s'avérer inutile si les matelas restent stables dans des conditions de courants forts. Lorsqu'il n'y a aucune couche d'enrochement posée sur les matelas, le raccordement ou le recouvrement entre différents matelas est important, ce qui requiert une attention particulière au positionnement du ponton

pendant les travaux. Habituellement une bande libre de lest de 1 m de large est laissée sur un matelas recouvert par une autre nappe. Ce géotextile est stabilisé à plat sur le fond avant que le prochain matelas n'y soit posé dessus, créant ainsi une transition continue entre les deux matelas.

Pour les petits projets, les matelas peuvent être posés par une grue embarquée équipée de cadres spéciaux (voir Figure 9.47). Dans ce cas la taille maximum des matelas est déterminée par la capacité de la grue et les déformations acceptables des matelas.

Lorsque des matelas de gabion sont utilisés, ils peuvent être remplis sur le site. Une alternative consiste à les poser comme indiqué précédemment. Par contre, les différents matelas peuvent être joints par des systèmes spéciaux d'attaches ne nécessitant pas de recouvrement. Cette méthode requiert la présence permanente d'un plongeur pour assurer un calpinage serré entre les éléments et installer les attaches. Un géotextile peut être intégré au matelas de gabion pendant le processus de remplissage. Ce système a pour avantage de permettre l'empilement des éléments terminés. Ainsi les opérations de remplissage peuvent être effectuées dans une zone beaucoup plus petite, qui peut même être éloignée du site de pose.



**Figure 9.47** Pose d'un matelas avec une grue embarquée

### 9.7.1.3 Travaux de protection des berges

Les travaux de protection des berges visent les parties immergées des talus et peuvent s'étendre jusqu'au niveau de l'eau ou au-dessus (voir les Sections 8.2.3 à 8.2.7). Les travaux nautiques près de l'ouvrage sont limités par le tirant d'eau des équipements flottants. Dans les zones à marée les travaux peuvent être coordonnés avec le régime des marées, notamment les travaux en haut de talus. Les travaux peuvent être faits depuis l'eau, la terre ou une combinaison des deux.

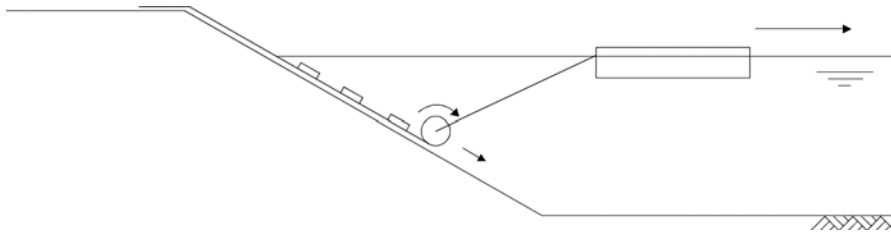
#### Protection de berges intégralement en enrochement

Bien que les géotextiles soient souvent utilisés pour la protection des berges parce qu'il est facile de les poser à partir du rivage, des filtres complètement granulaires sont également utilisés. Comme la première sous-couche filtre est généralement fine, sa construction nécessite des conditions calmes, en particulier au niveau de l'eau, comme pour les géotextiles. Lors de la construction d'une protection de berges complètement granulaire, il faudra aussi s'assurer que le sol support soit suffisamment grossier pour n'être retenu que par un filtre granulaire.

Les diverses couches d'enrochement peuvent être mises en œuvre à l'aide de matériels terrestres si leur portée le permet. Lorsque cela ne suffit pas, une grue flottante peut être utilisée. Les bonnes pratiques suggèrent de commencer par poser l'enrochement de pied du talus puis de travailler en remontant la berge pour s'assurer de sa bonne tenue. Une progression vers le bas du talus n'est possible que sur des talus très peu profonds et avec une pose très compacte.

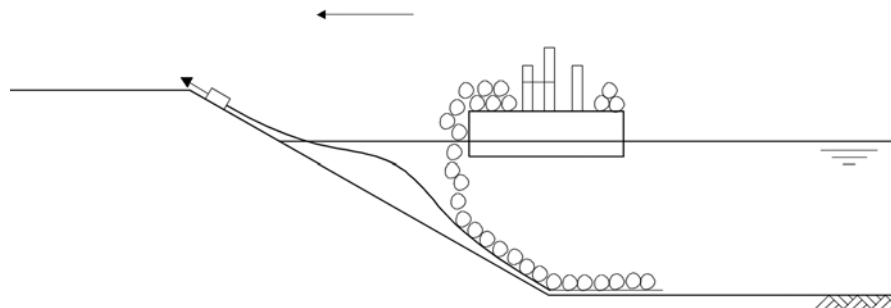
### Protection de berges avec un géotextile recouvert d'enrochement

Un géotextile posé à partir de la terre est déroulé à partir du haut du talus vers le bas, après aplatissement et réglage du talus. Une fois déroulé, le géotextile est fixé au bas du talus par des sacs de sable, de l'enrochement ou des piquets posés par des plongeurs. Par voie navique, le géotextile peut être déroulé vers le bas à partir d'un ponton (voir la Figure 9.48).



**Figure 9.48** Pose d'un géotextile en le déroulant vers le pied du talus

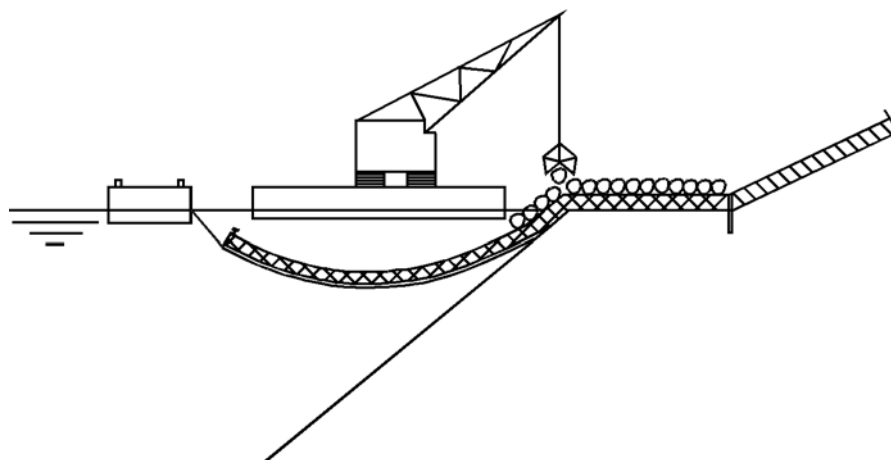
Après la pose du géotextile, des couches d'enrochement peuvent être ajoutées comme lest avec les engins terrestres de portée suffisante. Sinon, une grue flottante ou un navire à déversement latéral peuvent être utilisés. La pose doit être effectuée du pied vers le haut du talus (voir Figure 9.49).



**Figure 9.49** Couverture du géotextile vers le haut avec des enrochements

### Protection de berges utilisant un matelas filtre recouvert par de l'enrochement

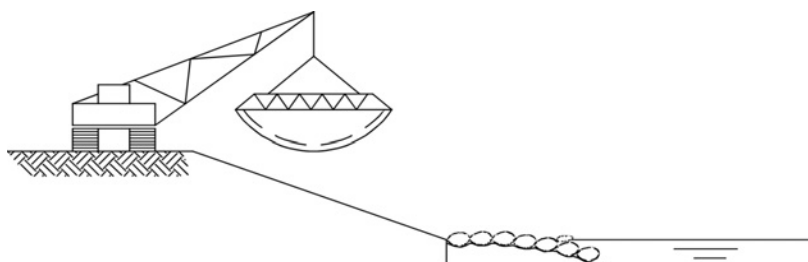
Des filtres matelassés avec des renforts tels que des fascines sont positionnés sur l'eau au-dessus de l'emplacement prévu, en profitant d'une hauteur d'eau suffisante (p. ex. à la pleine mer). Le matelas est alors ancré au rivage ou à la berge en haut du talus (voir la Figure 9.50). Lorsque le courant est gênant, l'extrémité inférieure du matelas est maintenue en position par une poutre ou un ponton d'immersion. Les matelas qui ne flottent pas peuvent être posés par une grue munie d'un cadre (voir Section suivante). Quand le matelas est mouillé en position, il est lesté avec des enrochements, toujours en procédant vers le haut.



**Figure 9.50** Immobilisation de la partie supérieure du matelas

### Protection de berges à l'aide de matelas préfabriqués avec des lests fixes y compris les matelas de gabion

Des matelas préfabriqués peuvent être posés par une grue flottante ou par une grue terrestre avec un cadre (voir la Figure 9.51). Si le lest fixe est suffisant pour résister à l'action du courant et des vagues, le déversement de l'enrochement sur le matelas peut être inutile.



**Figure 9.51** Pose du matelas filtre préfabriqué à l'aide d'une grue équipée d'un cadre spéciale

## 9.7.2 Construction des digues à talus

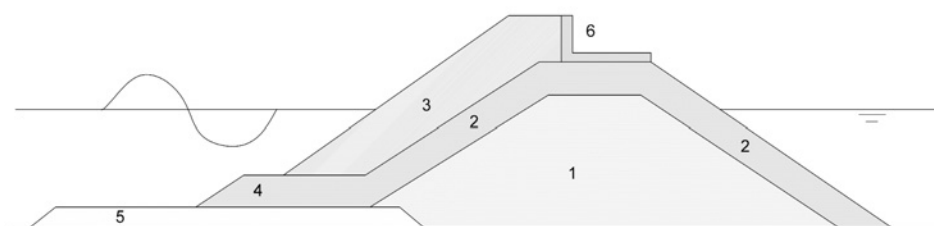
### 9.7.2.1 Généralités

Les caractéristiques constructives des digues à talus sont les suivantes :

- elles sont habituellement entièrement construites avec des enrochements naturels, mais peuvent incorporer une carapace en blocs artificiels ;
- elles doivent être construites en site exposé aux actions météorologiques et de la mer.

La méthode de construction doit assurer que les dommages causés par les vagues pendant la construction restent minimales et que les sous-couches exposées sont couvertes dès que possible par des couches protectrices. La distance habituelle, définie comme la distance entre les limites d'avancement des différentes couches, varie de 25 à 50 m, en fonction de la méthode de construction et de sa vitesse, ainsi que du degré d'exposition du site.

La construction d'une digue à talus requiert de grandes quantités d'enrochement (voir les Figures 9.52, 2.4 et 6.31), qui proviennent souvent de carrières éloignées. La disponibilité des enrochements appropriés près du site peut influencer de façon significative la conception de l'ouvrage et des travaux, sur les méthodes de transport des matériaux et sur la construction de la digue.



**Figure 9.52** Coupe transversale classique d'une digue à talus

Les composants habituels d'une digue à talus sont les suivants (voir la Figure 9.52) :

1. Le noyau.
2. La sous-couche.
3. La carapace.
4. La butée de pied, ou éventuellement une berme.
5. La protection anti-affouillement.
6. Le mur de couronnement.



Les sections suivantes couvrent la construction de ces parties de la digue et comparent les travaux terrestres aux travaux nautiques. Une autre section est consacrée à la pose des blocs d'enrochement artificiel, qui sont souvent utilisés pour la carapace.

### **Brise-lames et épis**

Les brise-lames et les épis sont deux autres types d'ouvrages présentant des problématiques de construction semblables à celles des digues à talus. Pour la construction de brise-lames, on peut utiliser du matériel embarqué ou du matériel terrestre. Les exigences fonctionnelles des épis et des brise-lames autorisent une crête relativement étroite. Dans de nombreux cas, l'utilisation de matériel terrestre pour leur construction nécessite une crête plus large pour l'accès des engins. Des épis peuvent néanmoins être construits à l'aide de moyens terrestres à partir de plages sablonneuses et depuis la zone intertidale. Pour les moyens nautiques, les conditions de construction sont limitées par la profondeur d'eau et les conditions d'exposition. Si l'état de mer le permet, on peut utiliser des équipements flottants pour construire la partie en mer des épis et brise-lames. L'équipement terrestre est alors utilisé pour construire la partie terrestre et, à basse mer, c'est-à-dire la partie allant vers le large. L'accès se fait par une piste provisoire ou une installation de débarquement.

### **Mur de couronnement**

Les digues à talus peuvent être équipées d'un mur de couronnement (voir les Figures 9.52 et 6.27). Celui-ci peut être constitué d'éléments de béton préfabriqués placés sur un ouvrage en enrochement, ou d'éléments coulés sur place. Une grue stationnaire de grande capacité est utilisée pour poser les éléments préfabriqués. La même grue, de portée suffisante, peut être utilisée pour poser les blocs d'enrochement de la carapace.

#### **9.7.2.2 Construction des digues par voie terrestre**

Pour les travaux par la terre, le matériel de construction doit pouvoir accéder à la partie supérieure du noyau, ce qui peut influencer sa hauteur et sa largeur. La largeur doit être suffisante pour la réalisation des travaux. La crête provisoire doit dépasser le niveau haut de la mer ou, dans un site à marée, rester accessible pendant une partie importante du cycle de marée. Si les matériaux du noyau sont posés autour et au-dessus du niveau de l'eau, ils restent vulnérables à la houle pendant la construction et il peut être nécessaire de poser la couche de protection peu de temps après la construction du noyau.

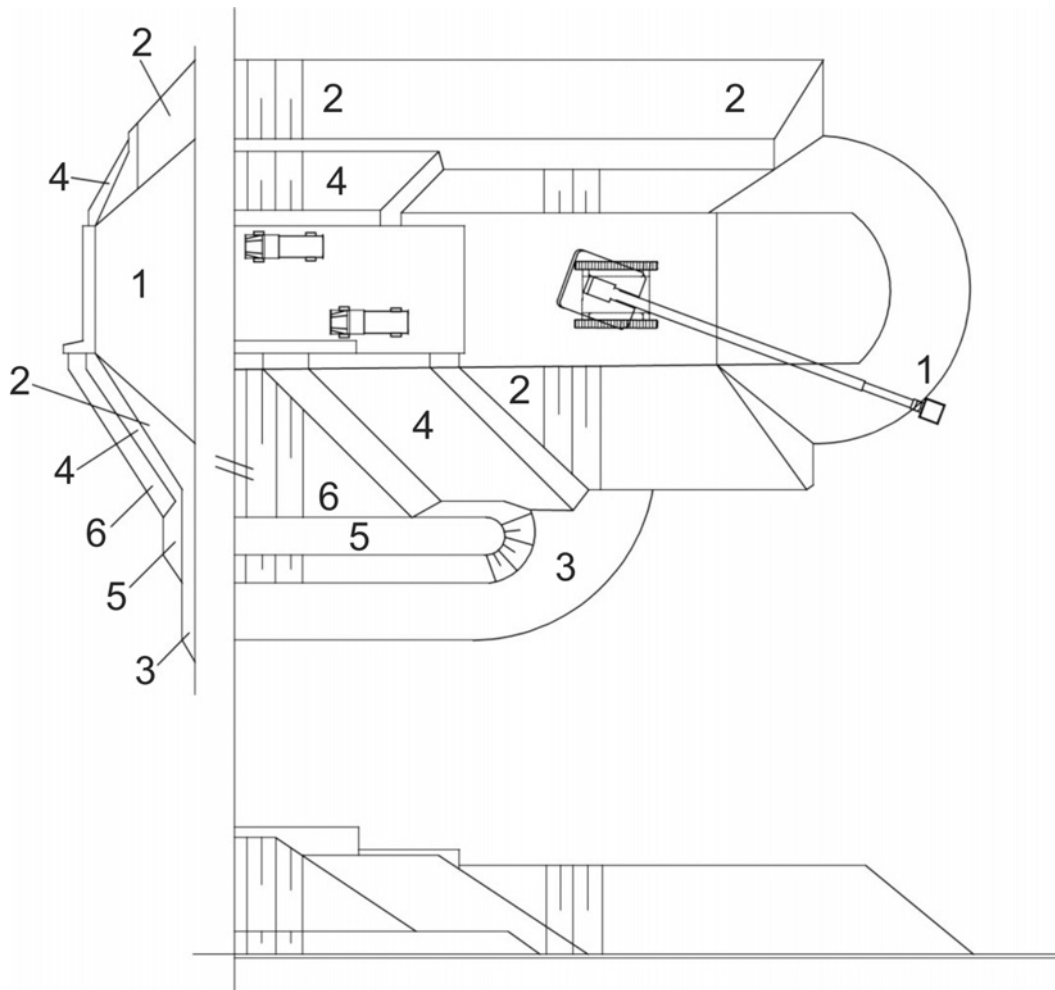
Il ne sera peut-être pas possible de faire rouler des véhicules à pneus sur l'enrochement. Cependant, en épandant des matériaux fins sur la surface avec un bulldozer, il doit être possible de maintenir un passage sur des enrochements jusqu'à 1 t. Si la conception de l'ouvrage ne permet pas de conserver une couche aussi imperméable sur le dessus de l'ouvrage, il sera sans doute nécessaire de l'enlever avec un jet d'eau sous pression. Cette opération est coûteuse et elle ne doit être mise en œuvre que lorsque cela est absolument nécessaire pour des raisons de stabilité. Alternativement, des engins à chenilles peuvent généralement circuler sur les enrochements ou un accès peut être aménagé en créant une piste provisoire à côté de la digue.

En dépit de ces limitations, la construction par voie terrestre est normalement plus économique que par voie nautique, en particulier si les matériaux de constructions sont transportés de la carrière au chantier de construction par voie terrestre.

Une vue standard de travaux par voie terrestre est présentée à la Figure 9.53. Elle est, décomposée en six phases différentes.

1. Pose du noyau en tout venant d'abattage par tombereaux.
2. Pose du reste du noyau par grue et/ou pelle sur chenilles.
3. Pose de la protection contre les affouillements avec une grue sur chenilles.

4. Pose d'une sous-couche par une grue ou une pelle sur chenilles.
5. Pose de la butée de pied côté mer par grue ou pelle.
6. Pose de la carapace côté mer par grue ou pelle.

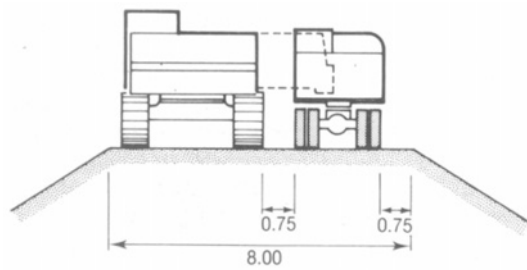


**Figure 9.53** Vue en plan et de côté et coupe transversale de la construction d'une digue par moyen terrestre.

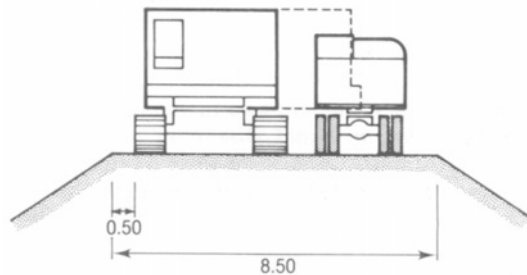
#### Construction du noyau par voie terrestre

Les enrochements peuvent être mis en œuvre par déversement direct à l'aide de tombereaux ou de chargeuses, ou en utilisant une grue. Le déversement direct d'enrochement à blocométrie étendue peut induire de la ségrégation, car les plus gros blocs roulent vers le bas du talus et les plus petits restent sur le dessus. Le filtre sur le fond de la mer sera alors de mauvaise qualité et cela produira aussi un talus raide de pente d'environ  $4/3$ , en fonction de l'angularité de l'enrochement. Il faudra utiliser une grue pour placer les matériaux du noyau nécessaires à l'extérieur de la ligne de pente. Le déversement direct est la méthode la plus économique.

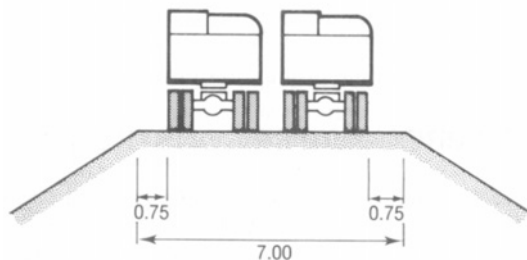
Dans le cas de la construction à partir de la terre, la largeur de la crête du noyau est habituellement dictée par l'espace requis pour une utilisation sûre et fluide des engins sur la crête. Les tombereaux doivent pouvoir croiser les grues et autres camions, déverser leur contenu et tourner. Des informations sur les dimensions minimales de crête en fonction du matériel sont données à la Figure 9.54. C'est souvent le type de grue utilisé pour la construction de la butée de pied et de la carapace qui détermine la largeur de la crête (voir Figure 9.56 à l'Encadré 9.1). La Figure 9.55 montre un exemple de construction d'une digue avec des élargissements le long du noyau permettant aux véhicules de chantier de se croiser et de tourner.



Tombereau croisant une pelle hydraulique



Tombereau croisant une grue à câble sur chenilles



Tombereaux se dépassant

**Figure 9.54** Largeur nécessaire sur la crête d'une digue

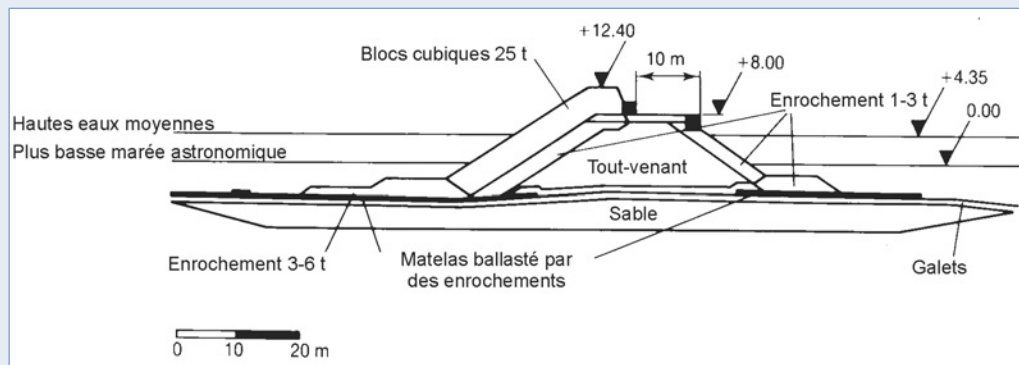
Les matériaux du noyau posés par des grues sont habituellement apportés par tombereaux et la capacité de la grue déterminera le rythme de progression des travaux. Les grues peuvent être équipées d'un grappin ou d'une benne preneuse (pour 'taper' dans le tas de matériaux de noyau déversés par des camions) ou travailler avec des bennes ou des bacs d'enrochement remplis avec chargeuse/pelleteuse ou directement par des tombereaux. Dans le premier cas, il faut prévoir un espace suffisant pour une pelle ou une chargeuse et un camion. Dans le dernier cas, des grues de grande capacité sont nécessaires, et requièrent une place considérable sur la digue.

**Figure 9.55** Pose d'une carapace, montrant les élargissements permettant aux engins de tourner et de se croiser sur la crête du noyau (source : Van Oord)

Il peut être possible d'employer du sable comme matériau de noyau. Dans ce cas pour éviter des profils larges, des banquettes en enrochement sont placées pour contenir le remplissage en sable. Par contre si le budget et le régime de houle le permettent, une large sous-structure en sable peut être construite avec des pentes douces. Pendant la progression de la construction, le talus côté mer est souvent recouvert d'une protection anti-affouillement.

**Encadré 9.1** *Élargissement de la crête en réduisant le niveau de la crête pendant la construction*

Dans le cas de la digue de Zeebrugge (voir Figure 9.56), la crête de 10 m de large n'était pas assez large pour permettre aux tombereaux de tourner et de croiser la grue pendant la phase de pose des blocs d'enrochement de carapace. Il aurait fallu prévoir la construction d'une structure plus large ou bien une piste de construction plus large à un niveau plus bas. Cependant, une piste à niveau plus bas aurait entraîné plus de temps d'arrêt en raison de l'exposition à la houle. Un compromis a été trouvé au niveau +6.8 m, où la largeur totale du noyau plus les sous-couches filtres adjacentes était de 13.7 m, permettant à une grue American Hoist-11.310 de fonctionner et aux tombereaux de passer. Ce niveau plus bas a également permis de réduire la portée de la grue nécessaire pour placer les blocs artificiels en pied de talus.



**Figure 9.56** *Coupe transversale de la digue de Zeebrugge*

**Pose de la sous-couche par voie terrestre**

La sous-couche peut également être posée par tombereaux, mais elle devra être nivelée ensuite pour donner aux matériaux le profil requis. Les pelles, qui nécessitent une aire de travail de 5 m de large au moins, peuvent être utilisées pour cela. Les longs talus et les gros enrochements, pesant plus de 2 t, sont des facteurs limitants. La sous-couche peut également être posée avec des bacs.

**Construction de la butée de pied, de la protection anti-affouillement et de la carapace par voie terrestre**

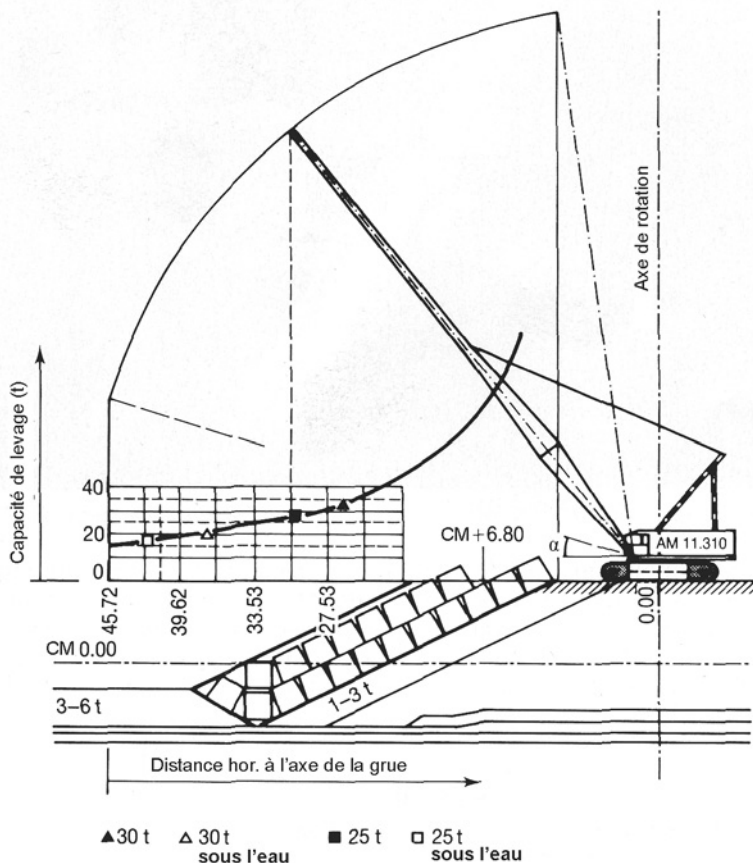
Si la construction est complètement menée par voie terrestre, la protection anti-affouillement sera mise en place après la construction du noyau. Cependant, un affouillement considérable peut se produire pendant la construction du noyau en raison de l'accélération du courant autour des musoirs provisoires de l'ouvrage. Cet affouillement peut rendre nécessaire l'utilisation de plus grandes quantités de matériaux de noyau mais il peut être empêché en construisant une protection avec un navire de déversement d'enrochement avant la construction du noyau.

Pour les travaux par la terre, la protection anti-affouillement, la butée de pied et la carapace nécessitent des grues avec une portée suffisante. Les pelles ne pouvant pas être utilisées, il faut des grues à câble sur chenilles. Les enrochements plus petits de la butée de pied et de la protection anti-affouillement sont posés à l'aide d'une benne ou d'un bac.

La capacité de la grue à utiliser est déterminée par le poids maximum du contenant rempli d'enrochement au maximum de portée, c'est-à-dire la limite extrême supérieure de la blocométrie. En définitive, les enrochements en pied et de la butée déterminent le type et la taille de la grue requise. Pour les grandes digues en eau profonde on peut utiliser deux grues différentes. D'abord une grande grue pour construire la butée de pied et la partie basse de la sous-couche et de la carapace, ensuite une plus petite grue pour poser la partie supérieure de la sous-couche et de la carapace.

Il est important de noter que le poids du grappin utilisé par ces grues pour le noyau et la carapace représente 30 % de la charge utile maximum. Pour réduire cette perte de capacité de levage lors de la manipulation des gros blocs d'enrochement, des anneaux de levage peuvent être utilisés. Il faut cependant être très prudent et s'assurer que les anneaux sont conçus et approuvés pour cette tâche. Si les matériaux de noyau pour la protection du fond sont placés à l'aide de bacs, le poids du bac représente environ 15 % de la charge utile. Le rapport entre le poids, la portée et le moment de levage de la grue est présenté à la Section 9.3.3.

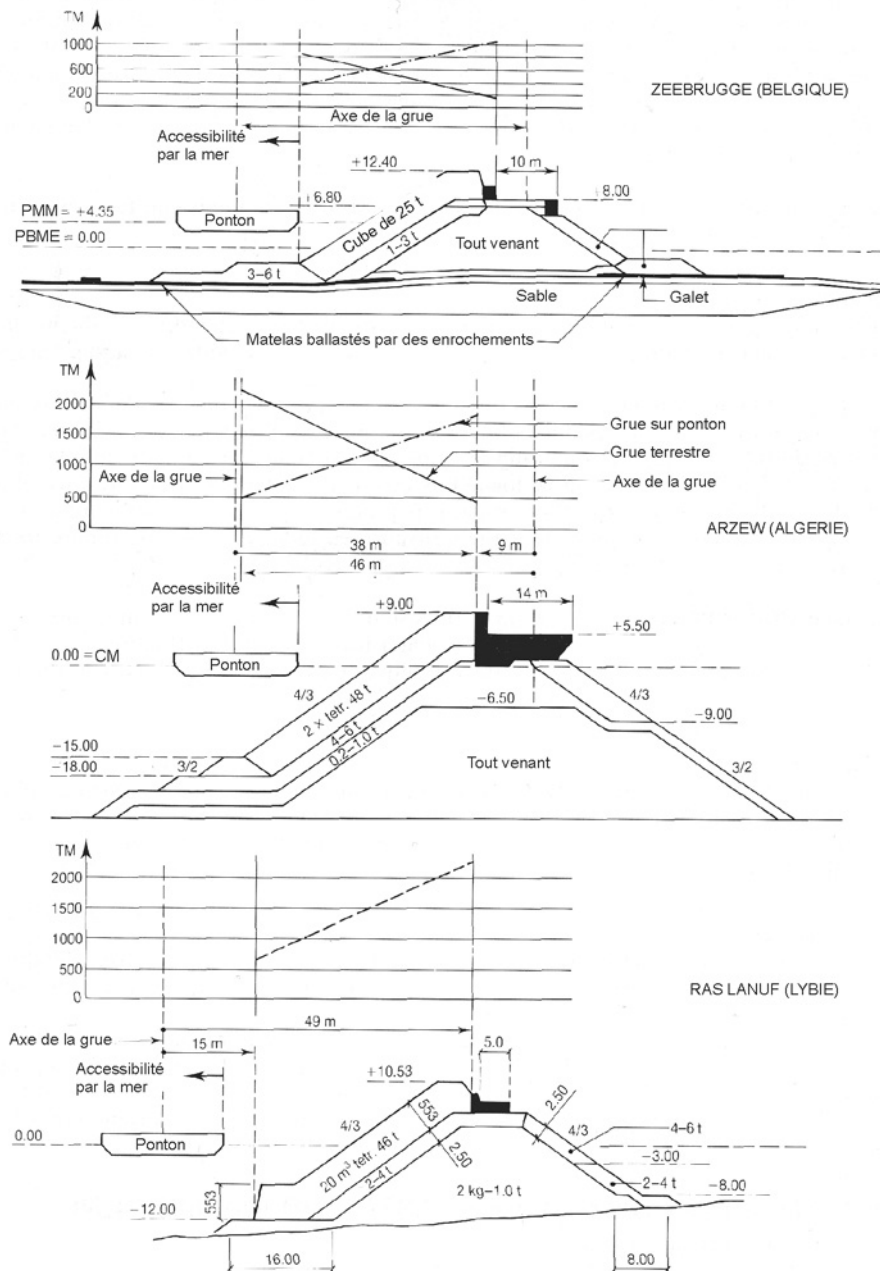
Le déjaugage des enrochements lorsqu'ils sont mis dans l'eau peut être utilisé pour allonger la portée (voir Figure 9.57). Ce dessin illustre la capacité de levage en fonction de la distance horizontale jusqu'à l'axe de la grue. En maintenant l'élément sous l'eau pendant l'opération de pose, la portée dans cet exemple peut être prolongée de 12 m environ.



**Figure 9.57** Extension de la portée de la grue en utilisant la flottabilité des blocs

La capacité, la vitesse de levage, le mouvement vertical de la flèche et la vitesse de rotation sont des caractéristiques importantes pour identifier la grue appropriée pour la pose des enrochements. Habituellement, les grues de levage ont un tambour principal pour le câble de levage, généralement démultiplié, et un plus petit tambour pour le câble de la flèche, ainsi la charge est soulevée relativement lentement. Ce type de grues peut être utilisé pour poser de lourds éléments de béton. Les grues à grappin ont un double tambour principal, un pour le câble de levage du grappin et un pour le câble de fermeture, le tout devant pouvoir soulever le poids du grappin avec son contenu. Elles utilisent un câble unique permettant une vitesse de levage beaucoup plus élevée. La descente est souvent possible en mode « chute libre », ce qui n'est pas adapté à la pose d'éléments en béton. Les systèmes à câble unique ont une capacité de levage très inférieure. Des câbles guides sont utiles pour limiter les balancements de la charge et permettre un positionnement rapide du grappin. Les grues les plus appropriées pour ce genre de travaux sont les grues derrick, qui ont la même capacité de levage sur toute la longueur de la flèche. Ceci permet un déplacement vertical rapide de la flèche, avec pour résultat un positionnement plus facile et plus rapide de la charge.

La capacité d'une grue permettant de placer les gros enrochements, qu'elle soit à terre ou sur un ponton, est illustrée à la Figure 9.58, représentant les digues de Zeebrugge, Arzew et Ras Lanuf. Ces courbes montrent la capacité de la grue en tonne-mètres (t-m) en fonction de la portée lorsque la grue est située sur la crête de la digue ou sur un ponton.



**Figure 9.58** Exemples de conditions opérationnelles pour la pose de blocs avec une grue pour les digues à talus de Zeebrugge, Arzew et Ras Lanuf

### 9.7.2.3 Construction de digues avec du matériel embarqué

Les principales raisons d'adopter le transport et la pose par voie nautique sont :

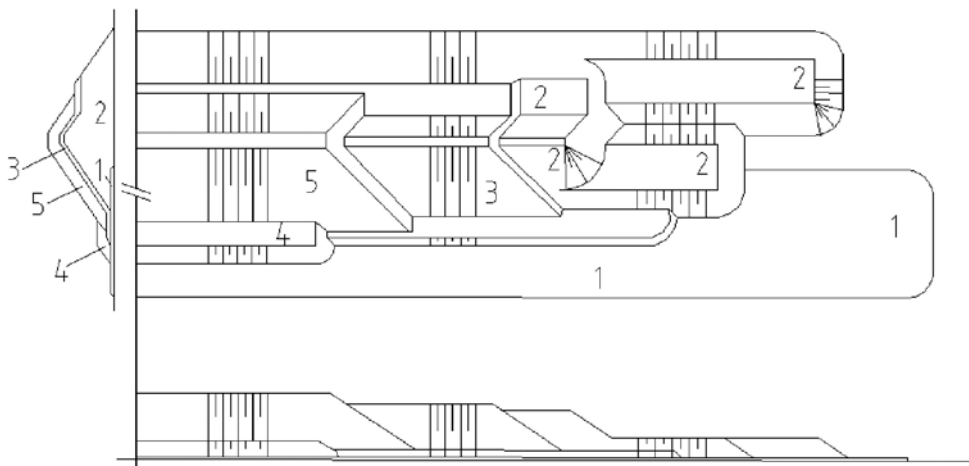
- la largeur disponible et/ou hauteur insuffisante de la crête de la digue ;
- les problèmes d'encombrement sur la digue lorsqu'on utilise du matériel terrestre si de grands volumes d'enrochement doivent être posés sous l'eau ;
- les raisons économiques – en fonction de l'emplacement de la carrière (intérieur ou côtier) et de la distance de transport, une logistique maritime peut être plus économique qu'une logistique terrestre ;

- la portée de la grue – pour les digues en eau profonde avec de longues pentes ou des crêtes étroites ou pour installer la butée de pied, la portée de grue requise peut être un obstacle à l'utilisation de matériel terrestre à partir de la crête de la digue. Dans ces situations, le déversement direct avec des barges est souvent possible. Des grues flottantes peuvent être utilisées pour surmonter les problèmes de portée, à l'aide de bacs à enrochement si nécessaire.

Pour le matériel embarqué, la profondeur d'eau et l'exposition à la houle océanique et/ou à la mer de vent et aux courants sont des facteurs importants qui allongent les périodes d'indisponibilité pendant la construction.

Une vue en plan d'un chantier classique utilisant du matériel embarqué est montrée à la Figure 9.59, qui comporte cinq phases :

1. Pose de la protection anti-affouillement par des navires à déversement latéral par exemple.
2. Pose du tout-venant du noyau avec une barge à clapet (jusqu'à 3 m au-dessous du niveau d'eau), puis déversement avec une chargeuse sur pneus à partir d'une barge à pont plat ou avec une grue flottante.
3. Réglage des pentes et pose de la sous-couche avec une pelle hydraulique flottante et/ou une grue flottante.
4. Pose de la butée de pied côté mer par navire à déversement latéral ou grue flottante.
5. Pose de la carapace par grue flottante.



**Figure 9.59** *Vue en plan, de côté et coupe transversale d'un chantier de construction par voie nautique d'une digue ; le matériel n'est pas montré.*

### Protection anti-affouillement et construction de la couche filtre

Avant la pose du noyau, une protection du fond peut être nécessaire pour empêcher l'affouillement causé par l'accélération du courant autour du noyau. La construction de ces éléments structuraux est décrite à la Section 9.7.1.

### Construction du noyau par voie nautique

Pour la construction du noyau par voie nautique, on utilise des navires à déchargement autonome comme des barges à clapet ou des navires à déversement latéral. Pour l'enrochement, l'approvisionnement peut être assuré par des barges tandis que des grues flottantes peuvent être utilisées pour la mise en œuvre. Cependant, si elles ne sont pas abritées par l'ouvrage, la maniabilité et la précision des grues flottantes sont limitées.

Selon le tirant d'eau, l'utilisation de barges à déchargement autonome ou à clapet pour le déversement du noyau peut se poursuivre jusqu'à environ 3 m sous le niveau des basses mers. Si le mar-

nage est important, le déversement peut continuer à marée haute ce qui permet de construire un noyau plus élevé. Avec cette méthode, le noyau sera plus vulnérable à la houle pendant la basse mer. Le déversement du noyau par une barge à clapet n'est pas contrôlé et il peut être nécessaire d'utiliser des grues flottantes ou des navires à déversement latéral pour le réglage ou l'ajout de matériaux supplémentaires. Les navires à déversement latéral sont plus appropriés pour la construction du noyau parce que leur précision est plus grande avec un meilleur rendement.

#### **Construction de la butée de pied avec du matériel embarqué**

La construction de la butée de pied par voie nautique requiert une précision élevée parce que la qualité de la pose de la butée de pied affecte la pose de la carapace. Un navire à déversement latéral ou une barge-grue peuvent permettre d'atteindre cette précision. Les matériaux de type gravier peuvent être posés à l'aide d'une drague aspiratrice en marche (voir la Section 9.3.5).

#### **Construction de la sous-couche avec du matériel embarqué**

Si la sous-couche est en général constituée de la plus petite des *blocométries de gros enrochement*, 300 à 1 000 kg, un navire à déversement latéral peut être utilisé. Il peut être nécessaire de niveler la sous-couche pour assurer une pose précise de la carapace. Si de gros enrochements sont nécessaires, une grue flottante doit être utilisée.

#### **Construction de la carapace avec du matériel embarqué**

Un navire à déversement latéral peut être utilisé pour la construction d'une carapace faite de gros enrochement de relativement petite taille, 1 000 à 3 000 kg. Aucune limite précise de taille maximale d'enrochement ne peut être donnée, car son utilisation dépend également de l'état de mer dans lesquelles le navire peut évoluer. Le cahier des charges n'autorise généralement pas l'utilisation de cette méthode, car les enrochements de la carapace doivent être placés individuellement afin de construire une structure appropriée en deux couches. Le déversement peut être une bonne option pour la section sous-marine, jusqu'à  $1.5 - 2 H_s$ , en dessous du niveau de la basse mer, car la pose est moins critique pour cette zone.

Quand le déversement est impossible en raison de la précision nécessaire, les grues ponton sont habituellement utilisées pour les carapaces lourdes ( $> 1$  t). Pour une pose précise des blocs de gros enrochements de la carapace, les grues sont placées sur des plates-formes auto-élévatrices (à vérins) ce qui les rend indépendantes de l'état de la mer. Toutefois il peut être difficile de continuer à livrer les enrochements avec des barges amarrées à couple. Les conditions de fonctionnement de ce système peuvent être plus restrictives que celle d'une grue sur une barge.

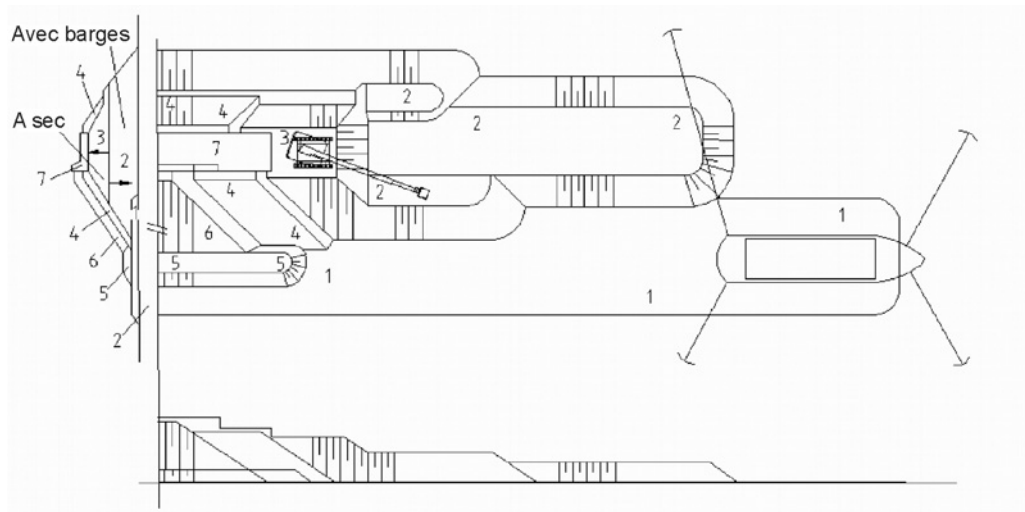
#### **9.7.2.4 Combinaison de construction par voie terrestre et par voie nautique**

Les travaux par voie terrestre et maritime sont souvent effectués en parallèle lorsque la planification du projet impose de travailler simultanément en deux points différents ou plus d'une digue. Une autre raison de le faire peut être la nécessité de réduire l'érosion au point le plus avancé en plaçant les couches de fondation et les sections inférieures de la digue à partir d'un navire, avant de construire la superstructure avec du matériel terrestre.



Pour illustrer les étapes de la construction d'une digue en fonction du type de matériel utilisé, un exemple de planification de la construction des différentes couches est donné à Figure 9.60. Il comporte sept phases.

1. Pose de la protection anti-affouillement avec un navire à déversement latéral.
2. Pose du tout-venant du noyau avec un navire à déversement latéral ou une barge à clapet jusqu'à 3 m au-dessous du niveau de la basse mer.
3. Pose du tout-venant du noyau à partir de 3 m au-dessous du niveau de l'eau vers le haut par tombereaux.
4. Réglage des talus et pose de la sous-couche avec une grue à chenilles ou une pelle hydraulique.
5. Pose de la butée de pied du talus côté mer avec une grue à chenilles.
6. Pose de la carapace sur le talus côté mer par grue à chenilles et/ou pelle hydraulique.
7. Pose du mur de couronnement à l'aide d'une lourde grue à chenilles ou coulage sur place.



**Figure 9.60** Vue en plan, de côté et coupe transversale d'un chantier de digue avec construction simultanée par moyen terrestre et nautique.

### 9.7.2.5 Résumé des conditions d'utilisation du matériel terrestre comparé au matériel embarqué

La liste qui suit récapitule les avantages et certains inconvénients du matériel terrestre et du matériel embarqué tel que présenté ci-dessus à la Section 9.7.2.

Moyen terrestre	Moyen nautique
<p><b>Coupe transversale</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La hauteur et la largeur de la crête sont déterminées par la taille des grues et des camions. Leur utilisation est acceptable en cas de franchissement et d'embruns.</li> <li>Les talus peu inclinés et les bermes larges peuvent dépasser la portée maximum des grues.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le niveau de la crête est déterminé par la stabilité hydraulique et le franchissement par la houle.</li> <li>Le niveau du noyau est de préférence 3 m en dessous de la basse mer pour permettre un déversement autonome des matériaux à partir des barges.</li> </ul>
<p><b>Coupe longitudinale</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Le chantier est peu allongé par nécessité. Les diverses phases de la construction se suivent de près puisque des travaux sont concentrés autour de la position de la (des) grue(s).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le chantier couvre un grand secteur pour donner des espaces de manœuvre et de mouillage suffisants.</li> </ul>
<p><b>Logistique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tous les approvisionnements sont faits par la digue ; l'accès étroit limite l'approvisionnement quotidien.</li> <li>Les digues courtes se prêtent mieux à des travaux à partir de la terre.</li> <li>Les infrastructures existantes peuvent être normalement utilisées pour le transport entre la carrière et le site.</li> <li>Le travail est généralement limité à un seul front.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Un terminal de chargement doit être installé pour les barges avant que la construction ne puisse commencer.</li> <li>La longueur de la digue n'est pas un obstacle logistique.</li> <li>Les travaux peuvent être commencés et peuvent avancer sur différents fronts.</li> </ul>
<p><b>Affouillements</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Les concentrations de courants peuvent créer des fosses d'affouillement au musoir temporaire, car il est difficile de construire une protection anti-affouillement complète.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Une protection anti-affouillement peut être installée à l'avance pour éviter le développement de fosses d'affouillement.</li> </ul>
<p><b>Facteurs limitant</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La portée et la capacité des grues limitent réellement la coupe transversale et l'avancement des travaux.</li> <li>Les digues à talus en eau profonde peuvent être sources de problèmes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Une profondeur d'eau d'au moins 2 à 4 m est nécessaire. Parfois le travail n'est possible qu'à certaines heures de la marée.</li> <li>Les barges et tout autre équipement nautique sont plus difficiles à trouver que le matériel terrestre et leur utilisation nécessite du personnel spécialisé.</li> </ul>
<p><b>Contraintes naturelles</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Le temps de construction est déterminé par la revanche entre la plate-forme de travail et le niveau d'eau.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le temps de construction est déterminé par les mouvements possibles des barges et de l'équipement flottant. Le temps d'arrêt est plus long que pour des travaux à partir de la terre.</li> <li>Les pontons grue sont particulièrement sensibles. Les chocs entre les pontons et les barges à couple, les forces sur la grue et les risques de choc avec la digue excluent l'utilisation de grues en houle de <math>H_s &gt; 0.5</math> à 0.75 m.</li> </ul>
<p><b>Domages pendant les travaux</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Les risques de dommages sont élevés parce que le noyau et les sous-couches de petite taille se prolongent au-dessus du niveau d'eau.</li> <li>La longueur d'ouvrage non protégée est limitée.</li> <li>Dans le cas d'une période de construction prolongée le risque de dommage augmente proportionnellement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le risque de dommage au noyau et à la sous-couche peut être limité en maintenant la partie supérieure de ces matériaux à un niveau peu élevé.</li> <li>Si des dommages se produisent, ils couvrent généralement une longueur considérable.</li> </ul>
<p><b>Planification</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Le temps de construction est déterminé par la préparation en carrière.</li> <li>Le temps de mobilisation de l'équipement terrestre peut être court.</li> <li>L'avancement de la construction dépend d'une ou deux grues qui jouent un rôle critique pendant plusieurs phases de la construction.</li> <li>L'équipement est facile à trouver.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le temps de construction peut être long si des terminaux spéciaux doivent être construits.</li> <li>Le temps de mobilisation de l'équipement maritime est plus long.</li> <li>Aux phases critiques la production peut être augmentée en recourant à plus de matériel et en travaillant en parallèle.</li> <li>De grands stocks ou des taux de production élevés sont nécessaires au fonctionnement efficace du matériel maritime.</li> <li>La disponibilité du matériel est limitée en raison de la nature spécialisée de l'équipement.</li> </ul>
<p><b>Spécificités pour l'entretien et la réparation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Si la digue est conçue avec une crête suffisamment large, l'entretien de la superstructure peut être fait avec des équipements terrestres standards. Ce n'est souvent pas le cas et de l'équipement flottant est nécessaire.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>L'entretien et les réparations peuvent être faits seulement avec de l'équipement flottant.</li> </ul>

### 9.7.2.6 Pose des blocs d'enrochement artificiel

La pose de blocs artificiels peut constituer une partie importante de la construction d'une digue en raison du grand nombre de blocs qui doivent être placés et des contraintes associées au placement de blocs élancés et/ou fortement imbriqués. Les vitesses de pose sont en général de 3 à 15 unités par heure et peuvent changer de manière importante en fonction des conditions locales (houle, courants, visibilité, etc.). Un matériel approprié et fiable devra être choisi pour obtenir des temps de pose raisonnables.

Le talus de la digue doit être correctement profilé et, pour faciliter la pose, la masse médiane de l'enrochement de la sous-couche ne doit pas dépasser 15 % de la masse caractéristique des blocs artificiels (voir le Tableau 5.36 pour plus de détails et la Section 5.4 pour plus d'informations sur la taille des filtres et la taille des sous-couches). Les écarts dans le profil de la sous-couche par rapport au niveau et à la pente prévus ne doivent pas dépasser une fois le diamètre nominal  $D_{n50}$  de l'enrochement de la sous-couche. Les tolérances sont présentées plus en détail à la Section 9.3.7 (Tableau 9.7).

Les blocs sont posés à l'aide d'une élingue équipée d'un crochet à ouverture rapide actionné par un câble de retenue (voir la Figure 9.61). Un câble guide est utilisé pour placer le bloc dans la bonne orientation. On utilise plutôt une pince pour placer les cubes.



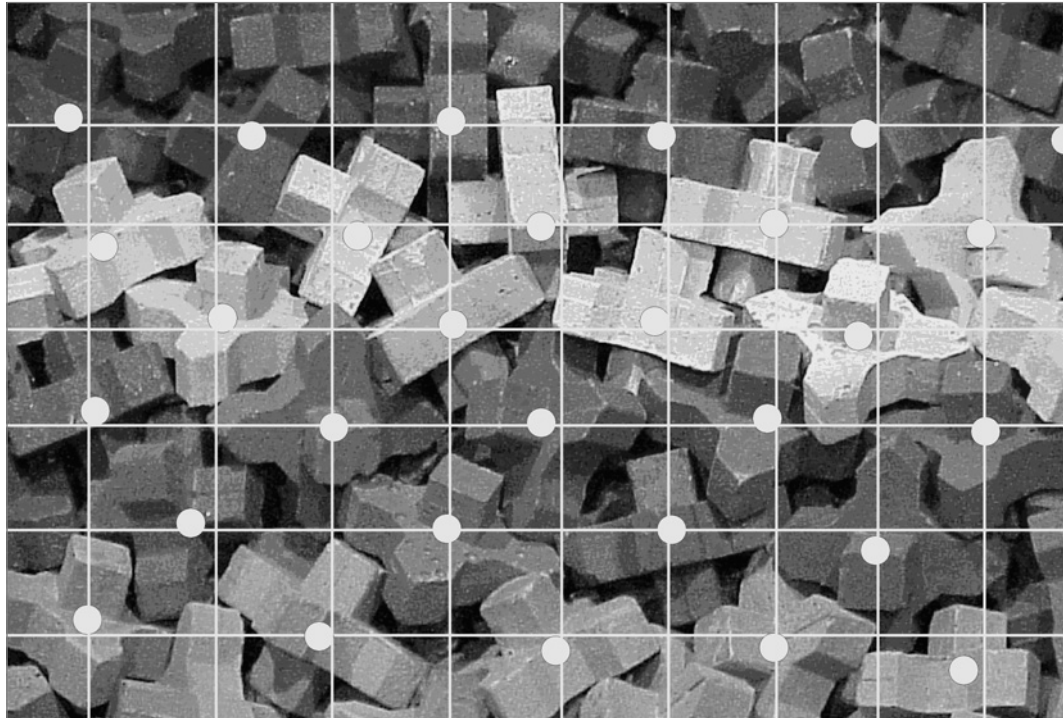
**Figure 9.61** Utilisation d'un crochet à ouverture rapide (source : Interbeton)

La plupart des blocs artificiels sont posés avec une orientation aléatoire, mais sont positionnés sur une grille prédéfinie. Pour poser les blocs avec précision sur cette grille, la grue doit être équipée d'une antenne GPS sur la flèche. Les blocs artificiels en simple couche comme les blocs ACCROPODE, CORE-LOC et Xbloc sont placés sur une grille en quinconce (voir Figure 9.62).

La pose des blocs artificiels en simple couche commence par la pose d'une section triangulaire de la section courante de la digue dans un secteur relativement abrité. Ensuite un bloc est ajouté à la première rangée (au pied de la digue) puis à la deuxième rangée reposant sur les deux blocs de la première rangée (le bloc vient d'être posé et son voisin), ensuite à la troisième rangée et ainsi de suite. La pose des blocs artificiels avance au fur et à mesure de la construction du noyau et de la (ou des) sous-couche(s) de la digue et peut devenir un facteur limitant pour l'avancement des

travaux. Le positionnement précis des blocs artificiels sur la première rangée en pied est essentiel, particulièrement en ce qui concerne l'espacement horizontal entre les blocs. Ensuite le positionnement des blocs vers le haut, c'est-à-dire la deuxième rangée, la troisième, etc. seront soutenus par les blocs des rangées du dessous. Il est essentiel d'obtenir une bonne stabilité de la butée de pied pour empêcher le revêtement de s'ouvrir et de devenir instable. Dans le cas d'une carapace à double couche la deuxième couche est mise en place juste après la première couche.

Lorsque les longueurs de talus ne sont pas trop grandes, les blocs artificiels peuvent être placés avec une pelle hydraulique équipée d'un grappin rotatif fait sur mesure équipé d'un GPRS pour obtenir l'orientation et la position requises.



**Figure 9.62** Pose des éléments de carapace Xbloc sur une grille en quinconce

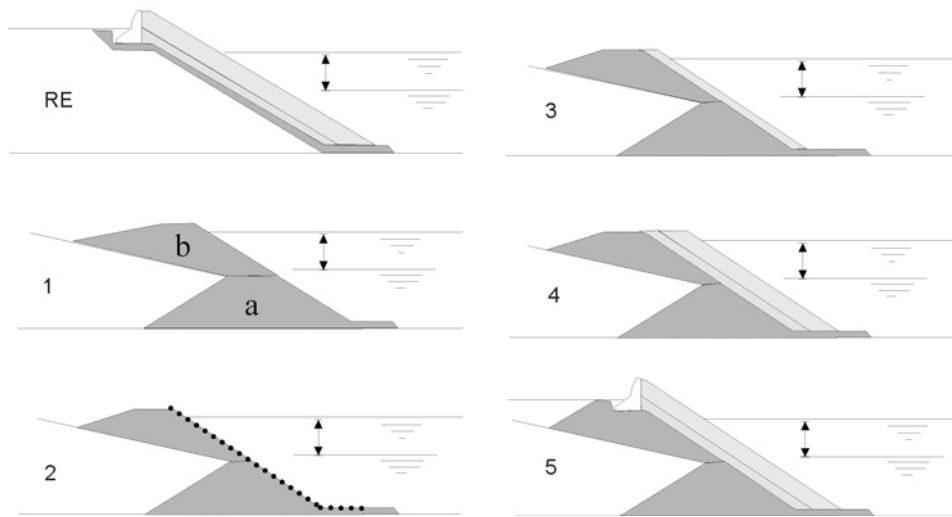
Une visibilité limitée complique le placement sous l'eau des blocs imbriqués. Des plongeurs peuvent être nécessaires pour assurer la pose et l'imbrication des blocs. Pour des raisons de sécurité les plongeurs ne doivent pas participer activement à la pose des blocs artificiels, mais ils peuvent contrôler le positionnement des blocs et, s'il y a lieu, aider à récupérer l'élingue.

### 9.7.3 Construction des perrés

Les perrés sont utilisés pour protéger le littoral et les îles artificielles (voir Section 6.3). Dans les deux cas, les perrés sont mis en place et la surface arrière remblayée avec du sable. Si la construction est haute, plusieurs banquettes consécutives et couches de remblais peuvent être construites pour réduire les volumes exigés pour le perré (voir la Figure 9.63). Dans le cas d'îles artificielles entourées par des perrés, le rapport entre les matériaux du perré et le remblai est faible, alors que pour les rives existantes on a besoin de relativement moins de sable que pour le remblai. Quand un nouveau perré est construit contre un rivage existant aucun remblai de sable n'est nécessaire (voir Figure 9.63).

Les banquettes peuvent être faites d'enrochement déversé. Il existe d'autres méthodes de construction notamment en utilisant des géotubes et des géobags mais ce guide ne couvre que les banquettes en matériaux rocheux.

Pour les perrés le long de rivages existants, du matériel terrestre ou une combinaison de matériel terrestre et embarqué peut être utilisé, alors que seul du matériel embarqué est utilisé pour construire des îles artificielles.



**Figure 9.63** Programme normal de construction d'un perré le long d'un rivage existant (RE) et le long d'un polder (étapes 1 à 5)

Un programme normal de construction pour un perré protégeant une île artificielle ou un polder est présenté à la Figure 9.63, qui montre les cinq étapes successives.

1. Pose des enrochements des banquettes et du remblai en sable (en blanc). La banquette (a) est réalisée par déversement à partir d'une barge et la banquette (b) est réalisée à l'aide de tom-bereaux;
2. Réglage du talus extérieur et placement d'un géotextile. Dans cet exemple, une partie des enrochements des banquettes est enlevée avec une pelle pour être réutilisée ailleurs dans le perré;
3. Pose d'une sous-couche avec une pelle hydraulique;
4. Pose d'une carapace avec une pelle ou une grue sur chenilles;
5. Finalisation de la section supérieure comprenant le mur de couronnement, soit préfabriqué ou coulé en place, et la surface de chaussée.

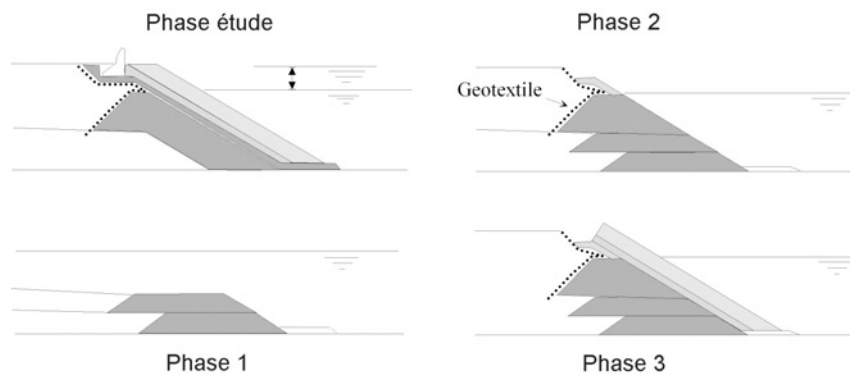
#### Récupération des matériaux des banquettes

La construction des banquettes peut nécessiter des volumes supplémentaires d'enrochement qui ne sont pas nécessaires à la performance de l'ouvrage. Une partie de cet enrochement peut être récupérée par des pelles et utilisée ailleurs sur le perré. Cependant, ceci n'est faisable que pour la construction en eau peu profonde et de préférence lorsque l'utilisation du matériel terrestre est possible. À plus grande profondeur, la récupération des matériaux excédentaires n'est pas possible. Le volume excédentaire de matériau des banquettes peut être réduit en construisant plusieurs petites banquettes. Cependant ce n'est pas toujours possible, car cela complique la construction des banquettes et nécessite une plus grande précision dans le déversement de l'enrochement.

#### Degré d'exposition à la houle

Le placement du géotextile pendant la construction du perré est un processus compliqué. La méthode la plus facile est de placer le géotextile du côté mer des banquettes, tel que représenté à la Figure 9.63-étape 2. Cependant, ceci doit être fait dans des conditions calmes. S'il est probable que les périodes calmes soient peu nombreuses, la conception et le programme de construction doivent être revus.

Dans ce cas, le géotextile doit être placé côté terre de la banquette supérieure. L'extrémité du géotextile et la hauteur de la banquette supérieure ne doivent être prolongées que jusqu'au niveau auquel le sable peut être emporté par les vagues et les courants. En dessous du niveau du géotextile, l'entraînement du sable peut être évité en construisant des banquettes suffisamment larges. Les turbulences produites par la houle et les courants, qui emportent le sable, seront affaiblies par la distance à l'intérieur des banquettes. Cette méthode de construction est illustrée à la Figure 9.64.



**Figure 9.64** Construction d'un perré dans des conditions exposées

Le schéma montre les trois premières des quatre phases de construction.

1. Pose de banquettes suffisamment larges avec du matériel embarqué, combinée au remblai de sable.
2. Pose d'un barrage en tout-venant jusqu'au niveau de la mi-marée avec du matériel terrestre, pose du géotextile côté terre de ce barrage, mise en œuvre du sable de remblai et pose d'enrochement sur l'extrémité supérieure du talus pour la sous-couche.
3. Pose de la sous-couche et de la carapace avec une grue à terre ou embarquée.
4. Réalisation de la section supérieure de l'ouvrage (non montrée).

#### 9.7.4 Ouvrages de fondation et offshore

Les ouvrages de protection de fond construits en mer nécessitent des méthodes spéciales de travail, nécessairement nautique (voir la Section 6.4). Ils consistent en la pose d'enrochement en eau profonde. Ce travail est soumis à l'action considérable de la houle et la résolution de problèmes logistiques pour l'approvisionnement et le chargement des matériaux est spécifique. En conséquence, le déversement à partir de barges classiques peut être non rentable pour les raisons suivantes :

- mouvements des barges causés par la houle océanique ou la mer de vent ;
- enrochements perdus ou dispersés à cause de la houle et/ou du courant ;
- ségrégation de l'enrochement.

Dans ces situations, des navires équipés de tube plongeur flexible (décrits à la Section 9.3.5) peuvent être utilisés. D'autres aspects de la construction en mer d'ouvrages de protection de fond et des canalisations sont présentés aux Sections 9.7.4.1 et 9.7.4.2.

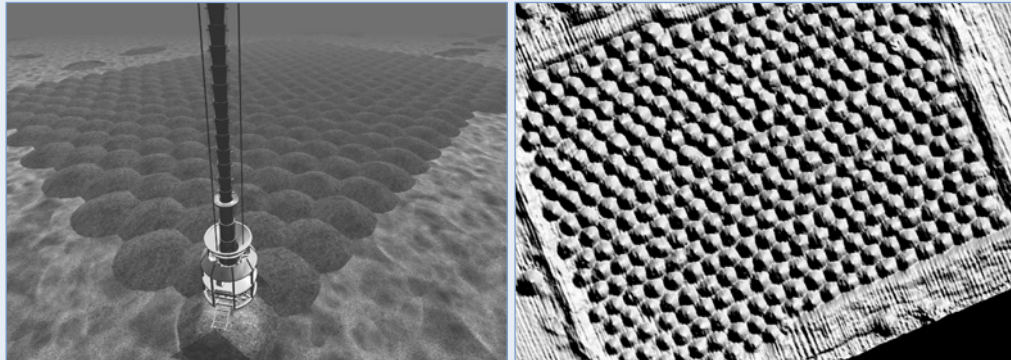
##### 9.7.4.1 Construction des ouvrages de fondation

Pour les ouvrages maritimes, tels que les ouvrages poids en béton, il est parfois nécessaire de préparer une fondation en matériaux granulaires pour s'assurer que l'assise est exempte d'obstructions, de points durs etc., qui pourraient provoquer des concentrations de charges sur l'ouvrage poids après son placement. Ceci dépendra surtout de la rigidité de l'ouvrage poids. De plus, le fond marin doit être d'assez bonne qualité pour éviter un tassement différentiel de l'ouvrage poids. Suivant la nature du projet, différentes méthodes de préparation du fond peuvent être uti-

lisées. Finalement le choix de la méthode dépendra de la sensibilité de l'ouvrage aux séismes et de sa rigidité. Un exemple de méthode pour des fondations à l'aide d'un tube plongeur est présenté à l'Encadré 9.2.

**Encadré 9.2** Réalisation d'une fondation d'ouvrage à l'aide d'un tube plongeur flexible

En 2001, un ouvrage poids en béton de 112 m x 86 m x 52 m de haut pesant 90 000 t a été construit et installé à une profondeur d'environ 45 m pour alimenter des centrales en gaz naturel. Pour s'assurer que les forces exercées sur la dalle inférieure de l'ouvrage poids étaient inférieures aux limites prévues et qu'aucune concentration locale de charge ne pourrait se produire, un matelas d'enrochement de fondation composé de plus de 350 différents tas d'enrochement a été posé à l'aide d'un navire équipé d'un tube plongeur flexible (voir la Figure 9.65). Sur le site, 10 émetteurs sous-marins ont été déployés pour garantir un positionnement précis des monticules à l'endroit prévu avec un espace maximum de 0.5 m entre les bases de chaque monticule. L'équipement de positionnement cinématique à longue portée ainsi que deux récepteurs DGPS ont été utilisés pour vérifier la position du navire et de l'extrémité inférieure du tube plongeur.



**Figure 9.65** Exemple de fondation en mer construite par un navire équipé d'un tube plongeur flexible (source : Van Oord)

Les monticules sont composés de 24 000 t de gravier fin. Ce matériau provient d'une carrière située à 200 kilomètres du site. Le transport a été assuré par une barge à pont plat qui a également servi pour le stockage. Les conditions de houle sur le site étaient relativement bonnes : pendant 60 % du temps la hauteur des vagues était inférieure à 1 m. Les courants n'étaient pas trop forts : de l'ordre de 0.5 m/s ou moins. Ces conditions favorables ont facilité le transbordement de l'enrochement de la barge au navire de déversement, limitant les temps d'arrêt imputables aux conditions naturelles.

Les protections, de fond et anti-affouillement, sont souvent utilisées autour des montants des plates-formes offshore et autour des monopieux des éoliennes offshore. La construction de ces ouvrages en enrochement est décrite à la Section 6.4. Ils sont habituellement construits en eau profonde, ainsi un navire équipé d'un tube plongeur peut être utilisé pour poser les graviers de petite taille (moins de 200 millimètres environ). Quand l'enrochement plus gros est nécessaire, il peut être mis en place en utilisant toutes les méthodes décrites à la Section 9.3.5. Quand une fondation est posée à l'aide de navires à déversement latéral, la précision de la pose dépendra de la profondeur d'eau, de la taille de l'enrochement et des conditions naturelles. Les couches sont placées en déplaçant le navire au-dessus de la surface à couvrir pendant le déversement. Un déversement de l'enrochement sur plusieurs couches permet d'améliorer l'uniformité de celles-ci et cela réduit les possibilités de laisser des zones mal couvertes.

#### 9.7.4.2 Construction d'ouvrages de protection de canalisations et de câbles

Des enrochements sont utilisés pour recouvrir des canalisations, des lignes de télécommunications, des câbles électriques et des connexions situés au large en eau profonde. L'ouvrage de protection se compose d'une seule couche d'enrochement ou différentes couches formant des banquettes sur le fond de la mer. Ces banquettes se prolongent de part et d'autre de la canalisation ou du câble et fournissent ainsi une couverture suffisante (voir Section 6.4) pour les protéger, les stabiliser ou leur fournir une isolation supplémentaire. Ces couches de couverture sont construites :

- sur le fond de la mer existant dans le cas d'une canalisation ou d'un câble non enterré ;
- en dessous du niveau du fond de la mer existant dans le cas d'une canalisation ou d'un câble enterré avant ou après.

La taille de l'enrochement à utiliser est déterminée lors de la conception de la protection (voir Section 6.4). Ces matériaux déterminent la stabilité du cordon dans des conditions naturelles de projet ou pour d'autres charges (exemple ancres). Si la pose de l'enrochement directement sur la canalisation produit un impact trop élevé sur la canalisation ou le câble, une couche tampon en petit enrochement peut être placée autour de la canalisation ou du câble. L'utilisation d'enrochement filtre plus petit peut être nécessaire pour empêcher l'érosion des matériaux du sous-sol à travers l'enrochement plus gros, l'érosion pouvant provoquer un tassement non désiré du cordon. Quand il est nécessaire d'augmenter l'isolation d'une canalisation d'exportation de pétrole à haute température, des mélanges spéciaux de sable et de gravier sont posés autour de la canalisation pour réduire au minimum la perte de chaleur. En conséquence, la pose en mer exige un système de positionnement précis et des techniques de pose maîtrisées. Des navires à déversement latéral peuvent être utilisés en eau peu profonde tandis que des navires équipés de tube plongeur flexible sont généralement utilisés en eau profonde (voir la Section 9.3.5).

### 9.7.5 Ouvrages courants de rivière

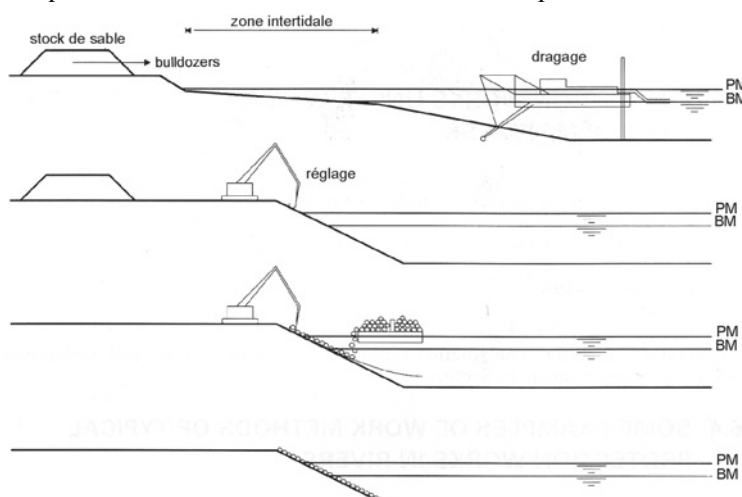
La plupart des travaux de protection en rivière concernent la protection du lit et des berges (voir Sections 9.7.1.2 et 9.7.1.3). Dans cette section, les questions de méthode et les problèmes de construction de deux types de chantier représentatifs sont étudiés (voir aussi Section 8.2).

#### 9.7.5.1 Protection en enrochement d'une berge sur un remblai de sable

La méthode de travail particulière applicable à une protection de talus le long de la digue d'un canal ou d'une rivière est illustrée à la Figure 9.66. L'ouvrage est très semblable à un perré, mais, dans les voies navigables intérieures et dans les zones à marée, la construction se fait en zones abritées. Ceci permet de niveler le remblai en sable sous-jacent pour lui donner la pente nécessaire sur toute la hauteur et de poser la protection en enrochement en plusieurs couches sur le remblai de sable, au lieu d'alterner la pose de banquette en enrochement et de remblais de sable (voir la Section 9.9.3).

Le sable est souvent placé hydrauliquement et des pentes assez faibles, de 6/1 à 10/1, peuvent être obtenues en dessous des basses eaux en fonction de la taille du sable et de la méthode utilisée. Dans la zone de marnage, la pente peut varier de 30/1 pour les sables les plus grossiers jusqu'à 100/1 pour les sables plus fins.

Avant que la protection en enrochement ne soit posée, le remblai de sable est nivelé pour obtenir la pente nécessaire, environ 3/1 à 4/1. Quand la partie inférieure du talus ne peut être nivelée à partir de la terre, cette opération est effectuée à l'aide d'une drague ou d'une pelleteuse sur un ponton. Comme représenté à la Figure 9.66, le sable dragué peut être stocké provisoirement pour l'utiliser dans la partie supérieure du talus ou comme matériau de remplissage. Pour réduire l'exposition de la surface de sable non protégée à l'action de la marée et du courant, la progression du réglage de la pente doit être ajustée à la progression de la pose des enrochements. Les enrochements peuvent être posés à l'aide de matériel terrestre ou embarqué en fonction de la longueur du talus.



**Figure 9.66**  
Construction d'une protection de berge en enrochement sur le remblai de sable



### 9.7.5.2 Épi et ouvrage d'alignement de rivière

Ces ouvrages sont en eau peu profonde et nécessitent l'utilisation de petit équipement approprié à leur taille généralement modeste. Les épis se composent généralement d'un remblai en sable recouvert d'enrochement. La vitesse des courants et la profondeur d'eau varient en fonction du débit de la rivière au moment de la construction. Pendant ces périodes d'étiage, il peut être possible de construire un épi à sec. Pour faciliter la construction les travaux devraient être menés pendant la saison sèche quand le niveau de la rivière est bas.

Si la construction ne peut être entreprise à sec, on peut procéder ainsi. Jusqu'à 2 m en dessous du niveau de l'eau, le sable peut être déversé sur le fond avec des petites barges à clapet (capacité : 200 m<sup>3</sup>). Au-dessus de ce niveau, le sable est mis en œuvre par une grue montée sur une petite drague. Une fois que le remblai de sable dépasse le niveau d'eau, les pentes peuvent être nivelées à l'aide d'une pelle hydraulique à terre et le remblai de sable peut alors être monté jusqu'au niveau nécessaire. Au musoir de l'épi, des palplanches peuvent être installées pour contrer une érosion possible du sol autour du musoir de l'épi. Une pelle est utilisée pour enfoncer les palplanches dans le sable.

La protection du talus peut alors être installée. À la racine de l'épi, on utilise du matériel terrestre pour placer le géotextile et les enrochements. Plus loin dans la rivière et lorsque la profondeur de l'eau augmente, les matelas sont posés avec du matériel embarqué. Sur les côtés de l'épi, les matelas sont positionnés et tirés vers le haut du talus jusqu'à approximativement 1 m au-dessous du niveau de la crête à la main ou à l'aide d'une grue. Il faut s'assurer que les différentes sections du tissu géotextile se chevauchent d'au moins 1 m. Après avoir été mis en place, le matelas est lesté avec des enrochements.

Quand des palplanches sont utilisées au musoir de l'épi, le matelas doit monter jusqu'au sommet de l'épi et le géotextile sous-jacent doit être fixé au-dessus des palplanches pour empêcher que le sable soit emporté.

Finalement, si un matelas est placé au musoir de l'épi, il doit le recouvrir complètement (voir la Figure 9.67).



**Figure 9.67** Matelas de fascines en position, début du lestage (source : Van Oord)

La couverture finale est soit posée avec une grue, dans le cas d'une protection en enrochement (voir la Figure 9.68), ou à la main quand de petits blocs préfabriqués de revêtement doivent être employés.



**Figure 9.68** Pose et réglage d'une couverture d'épi (source : Van Oord)

Pour contrôler l'érosion sur le chantier, les travaux d'alignement commencent à l'amont et sont effectués vers l'aval. Dans ce cas, la construction a lieu dans un environnement plus abrité, ce qui limite l'érosion. Par contre, lorsque l'envasement risque de devenir le problème principal, le sens des travaux est inversé.

### 9.7.6 Exécution de réparations urgentes

Des réparations d'urgence sont nécessaires quand un ouvrage est endommagé. Si les dommages ne sont pas réparés immédiatement, l'ouvrage peut être gravement détérioré ou même rompre. Quand la carapace est endommagée, il faut s'attendre à sa disparition graduelle puis, à ce que les sous-couches et le noyau soient emportés.

Les réparations d'urgence ne sont pas programmées et ne font pas partie du programme de maintenance régulière décrit au Chapitre 10. Une maintenance régulière doit être programmée à l'avance et l'ouvrage doit répondre à tous les critères de conception après les opérations de maintenance.

Les réparations d'urgence sont généralement faites sans préparation particulière, il y a donc peu de règles générales applicables. Comme les réparations doivent être exécutées très rapidement, les mesures qui peuvent être prises dépendent surtout de la disponibilité de l'équipement et des matériaux et de l'accessibilité à l'ouvrage endommagée. Les mesures prises en cas de réparations d'urgence ne peuvent pas toujours satisfaire tous les critères de la conception, mais elles devraient servir à réduire au minimum la possibilité que d'autres dommages ne surviennent jusqu'à ce qu'un programme cohérent de réparations puisse être exécuté lors de la saison calme suivante.

Seul l'équipement terrestre ou embarqué disponible peut être utilisé pour la réparation (voir la Section 9.3). Souvent l'équipement terrestre ne peut pas accéder à l'ouvrage pour le travail de réparation, même s'il a été utilisé pour le construire. La seule option peut être d'utiliser du matériel embarqué. Il est souvent nécessaire de réagir tout de suite et seul le matériel embarqué immédiatement disponible peut être utilisé ce qui n'est pas toujours l'idéal pour le but recherché. Ceci peut avoir les conséquences suivantes :

- l'accès à la zone à réparer est souvent restreint et la libre circulation de l'équipement est gênée;
- en conséquence, les travaux de réparation doivent être simples;
- les dommages se produisent souvent dans la partie la plus exposée de l'ouvrage, et même pendant la période de calme suivante, les conditions de travail peuvent encore être affectées par la houle et le courant;
- la pose des enrochements peut être moins précise que pendant la phase de construction.

Si elles n'ont pas été conçues et construites avec précision, les transitions dans les revêtements sont vulnérables et les dommages peuvent commencer à ces endroits. Les transitions sont des zones de contact entre différents types de matériaux dans la couche supérieure aussi bien que dans les sous-couches. La conception doit éviter le positionnement des transitions dans la zone proche du niveau de l'eau, où les forces hydrodynamiques sont souvent les plus fortes. Dans beaucoup de cas, il n'est pas possible de reconstituer des transitions endommagées à leur état original lors des réparations d'urgence. Remplir les vides et les trous avec des matériaux de filtre et les recouvrir d'enrochements plus gros peut être une mesure de secours adéquate. Un recouvrement suffisant doit être créé avec la zone de revêtement intacte autour de la surface de transition endommagée.

Les conditions principales qui doivent être remplies par les travaux de réparation sont :

- rétablir une stabilité pour résister à de prochaines tempêtes;
- rétablir une qualité de filtre adéquate pour arrêter la perte de matériaux de la sous-couche et du noyau.

Des matériaux de filtre en abondance garantiront un bon fonctionnement du filtre dans ces circonstances.

Si un ouvrage de protection de fond est endommagé, il en résulte souvent une fosse d'affouillement. Des dommages importants aux protections de fond faites de matelas de fascines peuvent être réparés en descendant de nouveaux matelas de fascines. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de relier étroitement les nouveaux matelas aux matelas en place. Un espace entre les nouveaux matelas et les matelas existants est acceptable. Le matelas peut se déformer facilement en réponse aux fosses d'affouillement initiales relativement petites. Ceci réduit l'exposition des matériaux de fond aux forces hydrodynamiques et le processus d'érosion ralentira graduellement et éventuellement s'arrêtera.

Il n'est pas toujours possible de descendre des matelas de fascines dans les cavités d'une protection de fond endommagée. La réparation est accomplie en remplissant les fosses d'affouillement de matériaux de filtre. Ensuite, ce remblai en enrochement est recouvert par une couche supérieure d'enrochement de plus grandes tailles, ou en descendant des matelas de fascines. Les matelas nouvellement posés doivent avoir un recouvrement suffisant avec les matelas en place.

## 9.8 CONTRÔLE QUALITÉ

### 9.8.1 Méthodes de pose et d'agencement

#### 9.8.1.1 *Enrochement naturel*

Les matériaux de noyau, comme les petits enrochements et les enrochements moyens standard et non standard, sont dits être **placés en vrac** lorsqu'ils sont positionnés sur l'ouvrage par déversement à partir d'équipements variés (voir Sections 9.3.2 et 9.3.4). La porosité de couche,  $n_v$ , basée sur un remplissage en vrac sans compactage peut être estimée à l'aide des méthodes données à la Section 3.5.1. Dans ce cas la gradation de l'enrochement, c'est-à-dire  $D_{85}/D_{15}$ , est le facteur le plus important.

Le gros enrochement pour les sous-couches ou la carapace est dit être **placé individuellement** lorsque des engins sont utilisés pour poser les blocs un par un. La forme du bloc et la méthode de pose affectent la densité de pose, l'épaisseur de la couche et la stabilité finale. Des recommandations explicites sont données à la Section 3.5.1. En général, les blocs de gros enrochement sont posés individuellement avec des pelles hydrauliques équipées d'un grappin, d'une pince à trois ou cinq dents ou d'un godet. Les grappins montés sur des grues peuvent également améliorer le contrôle de l'orientation et de la pose grâce à des câbles guide, mais il faut des opérateurs très qualifiés et les vitesses de pose sont alors plus faibles (Wegner, 2003). La pose contrôlée est présentée plus loin aux Sections 9.3.3 et 9.3.5. Les recommandations de la Section 3.5.1 se rapportent à la forme des blocs et font référence à quatre types de pose individuelle.

1. Pose aléatoire.
2. Pose standard.
3. Pose dense.
4. Pose particulière.

Pour une **pose aléatoire**, il n'y a pas de contrôle d'orientation et il ne faut pas supposer que les blocs sont plus serrés que s'ils étaient placés sous l'eau sans visibilité avec une grue à câble utilisant une grille de positionnement spatial. Les valeurs de la porosité et du coefficient d'épaisseur des couches applicables à une pose standard peuvent être utilisées, tout en reconnaissant que la porosité peut être de 0 à 2 % plus élevée.

Pour une **pose standard**, il y a un minimum de contrôle d'orientation, l'orientation du bloc est similaire à son orientation dans le stock avant levage. Cependant, il faut garantir au moins trois points de contact dans la couche que l'on pose, c'est-à-dire en excluant les blocs se trouvant dessous, de sorte que dans certains cas le bloc puisse être tourné pour réaliser un contact en trois points. Cette rotation peut être réalisée avec le degré de liberté supplémentaire fourni par un grappin et une pince. Cela est difficile à faire avec un godet ou un grappin actionné par une grue à câble.

La **pose dense** comporte une rotation des enrochements jusqu'à ce que l'orientation obtenue donne le nombre maximum de points de contacts (parfois spécifié à 5) et le minimum de vides. Les blocs d'enrochement peuvent être enlevés et remplacés au besoin. Ceci nécessite l'utilisation d'un grappin ou d'une pince à 3 ou 5 dents, idéalement à rotation contrôlée (voir la Figure 9.17).

La **pose spécifique** est utilisée quand il est indiqué de manière spécifique que les méthodes de pose liées aux contraintes de la forme des enrochements ne peuvent être ni aléatoires, ni standard ou denses. Un exemple en est la pose de blocs parallélépipèdes avec l'axe le plus long perpendiculaire à la couche, tel qu'utilisés dans des jetées du Nord Ouest des États-Unis (Wegner, 2003).

L'Encadré 9.3 montre des densités de pose de plusieurs ouvrages obtenues par des levés topographiques. Les chiffres montrent la variété dans les densités de pose.

**Encadré 9.3** Exemples des paramètres de sites et des statistiques résumées (Latham et al., 2002)

Site	Masse volumique apparente de la roche $\rho_{app}$ (t/m <sup>3</sup> )	Masse volumique de couche $\rho_b$ (t/m <sup>3</sup> )	Coefficient d'épaisseur de couche $k_t$ (-)	Porosité de la couche $n_v$ (%)	Termes de paiement du contrat	Si 'O' $n_v$ était basé sur la planche d'essai
Côte Est 1	2.73	1.85	–	32.2	V	N
Côte Est 2	2.73	1.72	–	37.0	V	N
Sud 1	2.65	1.71	–	35.5	M	N
Sud 2	2.60	1.82	–	30.0	M	N
Sud 3	2.65	1.72	–	35.1	V	N
Sud 4	2.64	1.82	–	31.1	V	N
Sud 5	2.69	1.78	–	33.8	M	N
Sud 6	2.67	1.90	–	28.8	V	O
Sud 7	2.75	1.90	–	30.9	M	N
Sud 8	2.65	1.65	–	37.7	V	N
Sud 9	2.65	1.70	–	35.8	V	N
Sud 10	3.10	2.00	–	35.5	V	N
Sud 11	2.65	1.70	–	35.8	V	N
Beesands	2.76	1.90	–	31.3	V	O
Wales Nord 1	2.66	1.81	–	32.0	V	O
Nord Ouest 1	2.72	1.77	–	35.0	M	N
Nord Ouest 2	2.70	1.82	–	32.6	V	O
Nord Ouest 3	2.70	1.70	–	37.0	M	O
Immingham – s	–	1.63	1.03	40.1		O
Immingham – ds	–	1.65	0.92	39.2		
Reculver – ds	–	1.77	0.94	34.4		O
Shoreham – s	–	1.90	0.71	30.0		O
Shoreham – ds	–	1.89	0.77	30.1		
Shoreham – dd	–	1.96	0.76	27.6		
Bardon Hill – s	–	1.84	0.80	34.4		
Bardon Hill – ds	–	1.89	0.88	32.8		O
Bardon Hill – dd	–	1.93	0.86	31.0		
Torr Works – s	–	1.79	0.82	34.8		O
Torr Works – ds	–	1.85	0.91	32.9		
Torr Works – dd	–	1.86	0.92	32.5		
<b>Moyenne</b>				33.95		
<b>Écart type</b>				2.83		

**Note :**

- données non disponibles
- s simple couche
- ds double couche standard
- dd double couche dense
- M masse
- V volume
- O oui
- N non

### 9.8.1.2 Enrochement artificiel

Les blocs d'enrochement artificiel nécessitent une méthode de placement particulière (voir la Section 3.12). Le contrôle qualité doit être adapté à chaque type de bloc et suivre les directives suivantes :

1. Blocs placés aléatoirement en double ou simple couche : un contrôle visuel suffit avec un suivi journalier.
2. Blocs placés suivant un schéma de positionnement spécifique tel que rectangulaire, en losange ou tout autre motif : un contrôle visuel et un système d'enregistrement de la position suffisent, ainsi que l'enregistrement de l'emplacement de chaque bloc numéroté. Un récolement avec la position de chaque bloc permet la récupération postérieure des détails de fabrication en cas de rupture.
3. Blocs placés avec contrôle de l'orientation : soit tous les blocs suivent la même orientation par rapport à une référence comme la ligne de crête, soit les blocs sont mis délibérément dans des attitudes différentes des blocs voisins. Un contrôle visuel suffit ; des documents photographiques sont préférables.
4. Chaque bloc doit être en contact avec la sous-couche ou avec la première couche. Un contrôle visuel suffit.
5. Une pose dense est requise. Le nombre de blocs dans chaque zone et la surface de cette même zone doivent être notés.

Des plongeurs doivent vérifier que les blocs ont été correctement placés sous l'eau, en particulier leur imbrication.

### 9.8.2 Vérification de la densité de pose à l'aide d'une planche d'essai et par comptage des blocs

Le principe de la méthode de comptage des blocs (Latham *et al.*, 2002) est simple. Une surface est délimitée à l'aide de bandes et cette surface est inspectée ou mesurée avec précision. Une méthode systématique de comptage de tous les blocs censés se trouver dans la couche supérieure du secteur est adoptée. Le nombre de blocs par mètre carré ou la densité de pose en surface doit être relativement constant si la taille des matériaux et les méthodes de pose n'ont pas changé.

$$1 - n_v = Q' \frac{M_{em}}{M_{50}} \frac{1}{n k_t} \quad (9.7)$$

où  $n_v$  = porosité de couche (-),  $k_t$  = coefficient d'épaisseur de couche,  $n$  = nombre de couches,  $Q'$  = densité de pose adimensionnelle (définie à l'Équation 9.8), équivalente au coefficient de densité de pose  $\phi$ , utilisé pour mesurer la densité de pose d'enrochement artificiel. Pour plus de détails sur le rapport entre la masse effective moyenne,  $M_{em}$ , et la masse médiane,  $M_{50}$ , voir la Section 3.4.3.8.

$$Q' = N D_{n50}^{-2} \quad (9.8)$$

où  $N$  = nombre de blocs par unité de surface ( $1/m^2$ ).

L'Équation 9.7 montre que si le coefficient d'épaisseur de couche,  $k_t$  (-), et la blocométrie (en particulier son uniformité) restent constants d'un secteur à l'autre, les variations de  $Q'$  indiqueront des variations de porosité.

Avec les données sur les valeurs de  $k_t$  et des masses moyennes effectives,  $M_{em}$ , on peut prévoir la porosité de la carapace de chaque planche d'essai (voir Latham *et al.*, 2002). Dans la pratique, les valeurs de  $k_t$ ,  $M_{50}$  et  $M_{em}/M_{50}$  sont rarement mesurées sur une planche d'essai, mais comme première approximation, les valeurs contractuelles peuvent être substituées pour vérifier la porosité de couche. En résumé, la méthode de mesure par comptage des blocs est une méthode simple et rapide pour vérifier la qualité du travail et il n'y a aucune raison pour laquelle elle ne pourrait

pas être utilisée en combinaison avec des photographies de bonne qualité, par exemple comme contrôle qualité lors de l'exécution des travaux.

### 9.8.3 Contrôle qualité pendant la construction

Cette section concerne le contrôle qualité des matériaux sur le chantier de construction, incluant les stocks temporaires, les moyens de transport et même les travaux finis. Ces contrôles font partie du processus complet d'assurance qualité. Certaines considérations générales sur l'assurance qualité sont couvertes à la Section 9.8.3.1. La Section 9.8.3.2 traite des contrôles sur chantier et des avantages et inconvénients de ces contrôles.

**NOTE:** les recommandations ci-dessous se réfèrent en général seulement à des situations où la Directive de l'UE sur les produits de construction (DPC 89/106/EEC), telle que transcrite dans la norme EN 13383 sur l'enrochement, n'est pas légalement obligatoire. Lorsque la Directive s'applique, les producteurs d'enrochement doivent se conformer à ses exigences légales et fournir des étiquettes CE indiquant la conformité des matériaux fournis à l'acheteur (voir aussi les Sections 3.7 et 3.10).

#### 9.8.3.1 Considérations générales sur l'assurance qualité

Des définitions liées à l'assurance qualité sont données dans les normes BS 5750-1, ISO 9000 à 9004 et ISO 8402), d'où certaines des définitions suivantes ont été extraites.

<b>Qualité</b>	Degré de conformité du produit, processus ou service aux exigences fonctionnelles.
<b>Système qualité</b>	Ensemble documenté d'activités, de ressources et de procédures dans l'organisation de la société, servant à s'assurer que le produit, le processus ou le service répond à l'exigence de qualité du client.
<b>Assurance qualité (AQ)</b>	Processus d'exécution, d'entretien, d'analyse et, en cas de besoin, d'amélioration du système qualité, y compris des activités montrant que le système qualité répond aux normes exigées.
<b>Manuel d'assurance qualité</b>	Document contenant la description des éléments de base du système qualité de la société.
<b>Contrôle qualité</b>	Ensemble de toutes les pratiques, recours et activités opérationnels servant à maintenir la qualité requise d'un produit, d'un processus ou d'un service.
<b>Plan qualité</b>	Document décrivant le processus de contrôle qualité pour un contrat ou un projet particulier dans le cadre de la société, du système de qualité (c'est-à-dire procédures générales et spéciales) et des exigences.

Un produit de qualité acceptable est un produit qui répond complètement aux exigences du client. La réalisation et la livraison des produits de qualité sont le résultat d'un contrôle précis de toutes les activités et concernent toutes les parties intéressées, à savoir les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, les bureaux d'études et les entreprises, comme le montrent les étapes de projet énumérées ci-dessous :

- analyses du marché et définition des besoins existants ;
- définition et spécifications des exigences fonctionnelles ;
- processus de conception ;
- préparation des travaux ;

- construction ;
- livraison et essai ;
- entretien ;
- évaluation après réalisation.

L'**assurance qualité** n'est pas limitée à la phase de construction, mais concerne toutes les étapes du projet. En conséquence, la conception doit non seulement tenir compte des exigences fonctionnelles mais doit être aussi contrôlée en vérifiant les exigences pratiques de construction telles que les tolérances et la facilité de construction avec de l'équipement standard.

Le **plan qualité** doit comprendre une description des méthodes et des procédures à suivre dans les travaux. Ceci doit être accompli pendant la préparation des travaux, et la construction doit être conforme aux descriptions. Les paramètres de qualité des activités de construction telles que l'extraction de l'enrochement en carrière, le transport, le stockage et la pose sur les ouvrages doivent également être définis. Ensuite, il est nécessaire de décider comment et dans quelle mesure ces paramètres peuvent être contrôlés – ce qui contraint les méthodes de travail – ou vérifiés – ce qui contraint les levés et les essais de contrôle sur matériaux.

Dans le meilleur des cas, l'entreprise doit donner au maître d'œuvre l'occasion de passer en revue le plan qualité du projet et, au besoin, il doit être modifié pour refléter les processus approuvés par les deux parties avant que la construction ne commence. En outre, la réalisation des ouvrages bénéficiera en général d'un accord entre l'entreprise et le maître d'œuvre sur des procédures de contrôle par le maître d'œuvre sur place pour vérifier que les travaux suivent les termes du **plan qualité**.

Des essais de **contrôle de la qualité** des matériaux dans la carrière sont présentés à la Section 3.10, avec les procédures normalisées utilisées pour évaluer la qualité des enrochements formés. Quelques aspects supplémentaires liés à l'exécution d'un projet sont également présentés.

### Choix de l'entreprise

En choisissant l'entreprise, le maître d'œuvre doit vérifier que non seulement les critères de prix mais aussi les critères de qualité demandée sont atteints. Le **plan qualité** des sous-traitants constitue un élément important qui doit clairement indiquer l'organisation, les responsabilités, les méthodes de travail, la planification et le système de reporting. Il doit également montrer comment la qualité des produits est contrôlée dans l'organisation de l'entreprise et (ce qui est encore plus important pour le maître d'œuvre), l'entreprise doit pouvoir prouver que le travail répond bien au cahier des charges.

### Organisation

La pratique et certaines recherches ont montré que les difficultés de se conformer aux standards de qualité viennent souvent de problèmes d'organisation, plutôt que de problèmes techniques. La gestion de l'organisation est d'une grande importance pendant toutes les étapes du projet, et pas simplement pendant la construction. Les tâches particulières, les responsabilités et les positions hiérarchiques doivent être précisées par écrit pour tous ceux qui ont une influence sur la qualité pendant les différentes étapes du projet, comme le chef de projet et le directeur qualité.

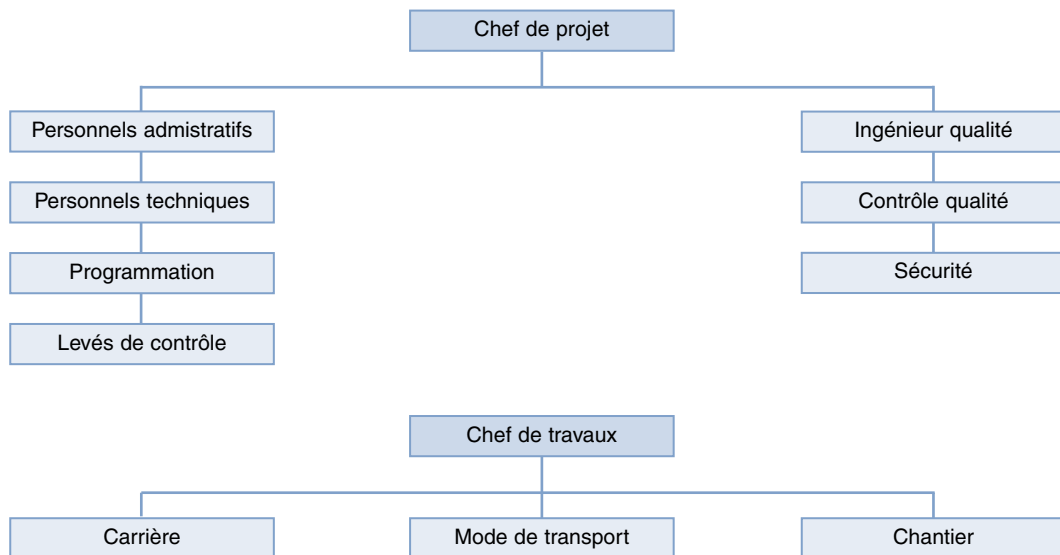
Pendant la phase de construction, la direction de l'entreprise doit s'assurer que la politique et les objectifs de l'**assurance qualité** seront atteints. Un ingénieur qualité doit être nommé au sein de l'équipe de chantier. En plus de ses autres fonctions, il doit pouvoir organiser librement :

- la mise en œuvre de l'**assurance qualité** telle que présentée dans le **plan qualité** ;
- l'identification et l'enregistrement des problèmes de qualité ;
- la mise en œuvre, la recommandation ou la fourniture de solutions par les canaux indiqués ;
- la vérification de la mise en œuvre des solutions.



L'ingénieur qualité est chargé de rapporter à la direction tout manquement à l'application de l'assurance qualité et doit tenir la direction informée sur le statut, l'exécution et de l'adéquation du **système d'assurance qualité**.

La direction doit imposer la pleine exécution de l'**assurance qualité**. La position de l'ingénieur qualité par rapport à la direction du projet est illustrée dans l'organigramme présenté à la Figure 9.69.



**Figure 9.69** Exemple d'organisation d'un site

### Construction

Pendant la construction, toutes les procédures et méthodes de travail décrites dans le **plan qualité** doivent être respectées. Elles doivent être aussi normalisées que possible. La Section 9.1.1 donne une vue d'ensemble des éléments impliqués dans la construction.

### Tolérances

Un aspect important de la qualité est la définition des tolérances acceptables. Un type de tolérance est lié à la taille, par exemple pour les matériaux et les éléments structurels. Les tolérances concernant les équipements sont présentées à la Section 9.3.7.

Un autre type de tolérance concerne les activités diverses prévues au planning du projet. Il faut identifier les temps morts ou les éventuels chevauchements de tâches. La situation idéale se produit lorsque la phase d'étude et la phase de construction se succèdent sans difficulté, avec pour résultat un processus d'échange d'expérience continu, dans lequel des ajustements mineurs produisent un ouvrage final optimisé. La meilleure définition des tolérances résulte d'une consultation continue entre le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre et l'entreprise.

Du point de vue de la construction, la faisabilité d'une conception dépend des facilités à réaliser l'ouvrage projeté, de préférence en utilisant des équipements courants. Les conditions du site, c'est-à-dire la houle et les courants, doivent aussi être prises en considération.

Pour garantir la qualité, la pose des enrochements doit être conforme aux procédures standard. À cet égard, il est recommandé que le système de grille soit présenté sur un tableau de positionnement électronique, monté dans la cabine du conducteur de grue ou sur le pont d'un navire à déversement latéral, montrant les positions en trois dimensions. Des planches d'essais doivent également vérifier la méthode de construction proposée. Des méthodes standard de contrôle sont présentées aux Sections 9.9 et 10.3. La fréquence des levés est étroitement liée à la méthode de travail et doit être incluse dans le **plan qualité**.

Les maîtres d'œuvre doivent noter qu'il est souvent avantageux de ne pas être trop spécifique sur l'emploi d'une technologie simplement parce qu'elle existe, mais devrait garder à l'esprit les méthodes courantes. Le cahier des charges doit être pratique, raisonnable, réalisable et accessible et il doit satisfaire aux exigences des travaux. Il est important de déterminer si la complexité du travail projeté justifie d'exclure certaines entreprises s'ils n'ont pas l'équipement le plus moderne. Dans certains cas, il peut coûter plus cher de contrôler finement et d'imposer des tolérances très strictes, que d'ajouter des matériaux supplémentaires, sans tenir compte des considérations environnementales.

### 9.8.3.2 **Contrôle qualité des matériaux sur le chantier de construction**

Si des contrôles qualité ont été faits à la carrière et s'ils ont donné de bons résultats, il n'est pas toujours nécessaire d'effectuer des vérifications supplémentaires sur le chantier de construction. Malheureusement, les matériaux qui arrivent au chantier de construction peuvent être différents des matériaux commandés et ils peuvent aussi être différents des matériaux inspectés à la carrière. Les raisons possibles peuvent être :

- mauvaise sélection des blocs par les opérateurs de la carrière ;
- évaluation imprécise des masses pendant le chargement, c'est-à-dire sur un chargement trié à la main ;
- introduction de sol de carrière lors du chargement avec une pelle mécanique ou une chargeuse ;
- ajout de petits blocs pour faire un chargement complet de camion ou de wagon ;
- mauvaise destination des camions ou de tout autre moyen de transport ;
- fragmentation des enrochements pendant le chargement, le transport et le déchargement ;
- fragmentation des enrochements pendant leur pose.

Bien qu'il soit possible de prévenir les quatre premières situations par une surveillance stricte à la carrière, c'est-à-dire jusqu'au moment où les matériaux sont chargés, les trois dernières situations sont très difficiles à contrôler avant la livraison.

Il peut être nécessaire d'inspecter les matériaux livrés au chantier de construction pour compenser les lacunes des contrôles dans la carrière et pour tenir compte des fragmentations des enrochements pendant le transport, le chargement et le déchargement. Théoriquement, la qualité de la production et des matériaux doit être vérifiée à la carrière, car il est plus facile d'effectuer les corrections nécessaires à ce stade.

Les types de vérification suivants peuvent être faits sur le chantier de construction et dans la carrière (voir les Sections 3.7 et 3.8 pour une description précise de chaque méthode de vérification) :

- taille et/ou distribution de masse ;
- forme et angularité ;
- origine des matériaux ;
- intégrité ;
- microfissures par la mesure de vitesse acoustique.

Les inspections peuvent être faites sur les stocks provisoires, pendant le transport par barges, navires, camions ou trains ou plus tard sur l'ouvrage fini.

Si le maître d'œuvre souhaite effectuer des contrôles qualité sur le chantier de construction, ceci doit être clairement stipulé dans le contrat de travaux. Les points suivants doivent être couverts dans le contrat :

- quelle partie paiera les essais de vérification ;
- la fréquence des essais de vérification ;

- l'emplacement des points de vérification ;
- les méthodes de prélèvement, par exemple une des méthodes décrites dans la norme EN 13383-2 ;
- le type d'essais ;
- le responsable de la fourniture des installations, de l'équipement et/ou de la main d'œuvre nécessaire pour les vérifications.

Le non-respect des normes imposées entraînera des travaux supplémentaires pour s'assurer que la qualité désirée est respectée dans les travaux subséquents. La responsabilité pour les retards associés aux travaux de reprise doit être clairement définie dans le contrat. On peut faire référence à la norme EN 13383-2 pour clarifier ce genre de situation.

Des vérifications doivent être effectuées à l'improviste.

Pour les essais particuliers et/ou pour régler un différend, le producteur, l'entreprise ou le maître d'œuvre, peuvent recourir à un laboratoire extérieur indépendant. Cette procédure doit être clairement stipulée dans les contrats.

#### **Avantages de la mise en œuvre des contrôles qualité sur le chantier de construction**

- Des contrôles près du chantier de construction permettent de s'assurer que les matériaux sont conformes au cahier des charges et que le résultat final sera de bonne qualité ;
- Quand deux contrats séparés sont signés, un pour les matériaux d'approvisionnement et un pour la pose des matériaux, un contrôle qualité sur le chantier de construction permet d'éviter les différences entre les deux contrats : des contrôles à la carrière doivent être prévus dans le contrat entre le producteur et l'entreprise tandis que des contrôles sur chantier doivent être prévus dans le contrat entre l'entreprise et le maître d'œuvre ;

**NOTE :** c'est un avantage seulement si les contrôles sur chantier concernent les mêmes éléments que les contrôles à la carrière. Le producteur est responsable de la qualité de l'enrochement et l'entreprise de sa mise en place. Dans ce type d'organisation, c'est l'entreprise qui a la responsabilité globale de la qualité des travaux.

#### **Problèmes liés aux contrôles qualité sur le chantier de construction**

Les contrôles qualité sur le chantier de construction peuvent avoir un impact sur le coût des matériaux. Les coûts peuvent augmenter pour les raisons suivantes :

- le coût des équipements d'essais augmentera les coûts initiaux ;
- des essais bien planifiés sur un chantier ne doivent pas retarder les travaux si les résultats sont bons. De mauvais résultats peuvent entraîner des retards plus ou moins importants en fonction du niveau de non-conformité. L'entreprise et/ou le producteur doivent être très attentifs à tout risque de retard, car cela aura des conséquences sur les coûts ;
- si certains matériaux doivent être renvoyés pour non-conformité, le producteur doit payer le coût du voyage retour. Ce risque doit être intégré dans les prix des matériaux.

Vu les facteurs ci-dessus, les procédures de contrôle qualité sur place affectent de manière importante les coûts et le calendrier des travaux. Par exemple, si les enrochements proviennent du Nord de l'Europe pour un projet sur le littoral français, les conséquences d'un rejet sur le site sont considérables. Le système de contrôle qualité dans toute la chaîne d'approvisionnement doit être considéré par toutes les parties prenantes et un système doit être mis en place pour que la probabilité de rejet sur le site se rapproche de zéro au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'incorporation du produit dans l'ouvrage.

### 9.8.4 Calculs sur une planche d'essai et problèmes de paiement

La planche d'essai est mentionnée en Annexe 1 – Méthode de spécifications pour la construction. Il s'agit habituellement d'une nouvelle section d'ouvrage en enrochement d'une longueur de 10 m où la qualité de pose de chaque couche – comprenant le noyau, le tapis anti-affouillement, les sous-couches, et la carapace en enrochement naturel ou artificiel – est inspectée par le représentant de la maîtrise d'œuvre pour approbation. Une fois approuvée, la planche d'essai sert de témoin pour les méthodes de construction approuvées. Cette section offre des réponses aux difficultés potentielles concernant les quantités de matériaux de carapace. Pour que l'exercice de la planche d'essai soit vraiment utile, on recommande que les mesures principales soient prises sur la carapace. Ces informations peuvent servir de base au calcul du prix des matériaux une fois que les résultats de la planche d'essai ont été validés puisqu'ils représentent alors une partie de l'ouvrage qui est limitée, certes, mais qui a été évaluée avec précision.

La procédure de la planche d'essai constitue un moyen efficace d'éviter les retards et les désaccords sur la qualité de construction de la carapace. En outre, elle peut être incorporée au contrat pour prévenir des contestations pour le paiement des matériaux.

Il a été noté que les recherches récentes sur l'épaisseur des couches et la densité de pose, particulièrement pour les couches d'enrochements placés individuellement (voir Section 3.5.1) devraient être intégrées dans la phase de finalisation de la conception des profils. La masse d'enrochement acheté par l'entreprise et placé dans la carapace sera alors plus proche de l'évaluation faite par le maître d'œuvre, et calculée à partir du volume prévu. L'ouvrage a alors besoin d'une mise en œuvre soignée, mettant en œuvre la quantité requise d'enrochement et sans avoir à payer pour des enrochements excessivement serrés alors que moins d'enrochement était nécessaire. L'entreprise veut des travaux rapides et un remboursement rapide des coûts de matériaux. Il faut être conscient de cet équilibre entre les intérêts légitimes des deux parties. Pour ce faire il est nécessaire que les hypothèses du maître d'œuvre sur la porosité de la carapace,  $n_v$ , applicable à la méthode de levé par sonde sphérique, soient connues, et que la validité de ces hypothèses soit vérifiée pendant l'approbation de la planche d'essai.

Il est recommandé au maître d'œuvre de préciser dans le contrat :

- le coût de la masse d'enrochement posée pour chaque catégorie d'enrochement ;
- la porosité supposée de la carapace,  $n_v$ , pour chaque catégorie d'enrochement ;
- le coefficient d'épaisseur de couche,  $k_r$ , utilisé dans la conception des couches de la carapace.

La planche d'essai doit faire partie d'une grande zone terminée, tout en restant dans des limites réalistes. Les blocs se trouvant sur les limites de la planche d'essai sont traités de manière à ne pas fausser les résultats. Un soin particulier doit être pris pour s'assurer que les enrochements de la planche d'essai sont représentatifs des blocométries prescrites. Au besoin, des ajustements de la planche d'essai peuvent être faits jusqu'à ce que :

- la blocométrie réponde aux spécifications ;
- les hauteurs finales mesurées soient dans les limites de tolérance des plans de conception. Lorsque des difficultés sérieuses apparaissent cela signifie que les caractéristiques géométriques de l'enrochement n'ont pas été prises en compte et/ou que les hypothèses du facteur  $k_r$  utilisé dans la conception sont erronées. Ces problèmes peuvent être résolus par une reconstruction, en changeant les plans de conception ou les tolérances ;
- l'aspect visuel reflète généralement l'intention du maître d'œuvre telle que traduite par les méthodes de pose prévues au contrat et classées comme aléatoires, standard, denses ou spécifiques.

La planche d'essai est alors considérée comme visuellement acceptable et soumise à d'autres analyses.

Étant donné la méthode de pose décrite dans le contrat d'une part, et l'ensemble des facteurs en jeu sur le site (caractéristiques des matériaux, matériel de pose, formation et expérience des opérateurs, conditions de travail, contraintes de temps) d'autre part, une planche d'essai peut amener à choisir une hypothèse plus appropriée sur la porosité de couche. Cela peut notamment être considéré si la porosité est utilisée pour le calcul des paiements et si les paiements sont basés sur des tonnages d'enrochement calculés à partir des volumes mesurés et de la porosité de couche cible.

Les données obtenues à partir de l'inspection visuelle de la planche d'essai sont :

- l'estimation de la masse de chaque bloc de la planche d'essai. Ceci permet d'augmenter le contrôle sur place des blocométries les plus grosses (un pesage de chaque bloc est préférable à une évaluation de la masse à partir de la densité et du volume estimé par les dimensions du bloc et des facteurs de forme). La masse totale de la carapace contenue dans la planche d'essai est divisée par la densité apparente de la roche,  $\rho_{app}$  (kg/m<sup>3</sup>), pour obtenir le volume d'enrochement dans la planche d'essai,  $V_r$  (m<sup>3</sup>);
- le volume de carapace levé,  $V_{bs}$ , corrigé par la méthode de sonde sphérique de  $0.5 D_{n50}$ . La longueur de chaînage est multipliée par la surface moyenne comprise entre les surfaces inspectées supérieures et inférieures de la carapace (voir l'Équation 3.24, Section 3.5.1,  $V_{bs} = A_{cs}L$ ). Normalement il est suffisant d'avoir 4 lignes de profil de contrôle espacées de 2.5 m, en s'assurant que les points finaux de la ligne de contrôle sont inclus;
- le nombre de blocs contenus dans la carapace par unité de surface de talus couvert. Ceci doit être présenté pour la couche supérieure visible de blocs et pour tout le nombre total de blocs.

L'Équation 9.9 donne la relation entre la porosité de la carapace (exprimée comme fraction) de la planche d'essai après acceptation visuelle et les volumes de carapace appropriés.

$$n_{vp} = 1 - V_r / V_{bs} \quad (9.9)$$

Si la différence de valeur entre  $n_{vp}$  et  $n_v$  prévue dans le projet (qui doit aussi être indiquée dans le contrat) est inférieure à 2 %, la planche d'essai est à tout point de vue acceptable et peut servir de référence pour la construction à suivre.

Si la différence est supérieure à 2 %, une autre tentative pourrait être faite pour se rapprocher de la porosité de carapace prescrite à l'issue de la conception, sans que cela ajoute des frais déraisonnables, en considérant la méthode de pose par catégorie choisie au départ.

Si après cette opération de reconstruction les nouvelles surfaces levées respectent les tolérances et sont visuellement acceptables, mais que la planche d'essai montre toujours une différence supérieure à 2 %, l'entreprise et le maître d'œuvre peuvent convenir que cette planche d'essai devient la référence acceptable pour la suite de la construction.

Pour les contrats où le paiement est basé sur le tonnage posé calculé à partir des mesures de volume, c'est également l'occasion de valider et au besoin de mettre à jour les hypothèses de porosité de la carapace. Si le contrat établit un taux de rémunération pour le tonnage d'enrochement posé sur l'ouvrage, tonnage calculé à partir du volume en vrac mesuré, des hypothèses de porosité de la carapace et de la densité apparente de la roche, on obtient une base appropriée pour le prix de la planche d'essai (voir l'Équation 3.26:  $V_r = V_b (1 - n_v)$ ) avec l'Équation 9.10, qui donne la masse totale de la carapace,  $M_t$ .

$$M_t = \rho_{app} V_{bs} (1 - n_{vp}) \quad (9.10)$$

La qualité de la pose de zones test distribuées le long de l'ouvrage peut être comparée à la planche d'essai par critères visuels et aussi en comparant le nombre de blocs par unité de surface. Des variations importantes dans les résultats de comptage des blocs doivent être expliquées et corrigées par des reprises au besoin. Comme les profils terminés de l'ensemble de l'ouvrage sont habituellement examinés pour contrôler les tolérances, les volumes de l'ensemble de la carapace placés en vrac sur l'ouvrage terminé peuvent être calculés de la même manière et les tonnages placés peuvent être facturés en conséquence. Des clauses formulées avec précision permettent habi-

tuellement de dégager la responsabilité du maître d'œuvre pour le paiement de l'enrochement dont le contrôle a établi qu'il dépassait en une ligne supérieure de tolérance.

Il existe d'autres systèmes simples pour calculer les montants basés directement sur les tonnages placés. Par exemple, les paiements prévus par contrat pour la fourniture et la pose d'enrochement peuvent être basés sur un prix par tonne apportée sur le site en supposant que les bons de livraison sont des preuves satisfaisantes.

## 9.9 TECHNIQUES DE LEVÉS ET DE MESURES

En raison du rapport direct entre les techniques de levés et les paiements, toutes les parties prenantes d'un contrat de travaux doivent s'assurer qu'on adopte une méthode précise, juste et pragmatique de levé qui débouchera sur des modalités de paiement correctes pour le travail effectué. Pour satisfaire aux exigences du chantier, les niveaux de tolérance doivent être pratiques, raisonnables, réalisables et ne pas entraîner de surcoûts. Différentes définitions du terme « tolérance » sont présentées à la Section 9.3.7.

Cette section couvre les différentes techniques de levés et fournit également des tables d'information sur les tolérances verticales réalisables pour le matériel terrestre et embarqué, pour les enrochements placés en vrac et individuellement.

### 9.9.1 Contrôle des levés

La construction est continuellement liée à des informations, des points de contrôle ou de référence coordonnés avec un système géodésique local ou national. Le maître d'œuvre doit fournir un point de contrôle situé dans un emplacement sûr, sur un terrain stable près du chantier. Il doit être vérifié régulièrement, en particulier dans le cadre de projet à long terme. Les points de contrôle doivent être protégés des engins et des repères de secours ou secondaires supplémentaires doivent être installés au début du projet pour avoir un système de levé de secours et pour permettre d'établir des points d'étalonnage des instruments. Il faut s'assurer qu'il n'y a aucune confusion entre le niveau de référence local et les cotes marines.

Quand un GPS est utilisé pour les levés et l'implantation, une station de base unique permet habituellement de couvrir l'ensemble du site. Dans le meilleur des cas, elle doit être à 3-4 km du chantier et permettre à l'ensemble du projet d'être couvert par ses communications radio. Les systèmes optiques tels que les stations totales nécessitent plus de points de contrôle assez proches les uns des autres, en général de 500 à 600 m, avec une ligne de mire. Le choix du site de la station de base est très important. Quand la construction a lieu dans une baie, la station de base doit être placée sur un cap adjacent, fournissant une ligne de mire au-dessus de l'eau. Ceci à l'avantage de permettre à un géomètre travaillant sur la section inférieure d'une carapace à pente raide de conserver une meilleure liaison radio que si la station de base était située à terre, avec la face avant de la carapace hors de portée radio.

Une série de points de contrôle intermédiaires doit être établie près du chantier et ils doivent être régulièrement inspectés pour identifier les dommages au cours des travaux. Les bonnes pratiques en matière de levés prévoient qu'un contrôle d'initialisation et le bouclage d'un réseau de points connus doit être fait lors de chaque levé. Ces points de contrôle intermédiaires doivent être commodément placés par rapport à l'ouvrage et doivent être en sécurité et protégés de tout dommage.

La méthode habituelle pour lever les points de contrôle utilise des mesures au GPS statique d'un réseau de plusieurs points de contrôle. Habituellement pour obtenir des relevés d'une précision élevée, ces observations doivent durer plusieurs heures. Une analyse statistique avec le logiciel de levé indique la précision obtenue. Des points de contrôle intermédiaires peuvent être rapidement établis en employant des techniques statiques ou cinématiques rapides. Il est essentiel que l'entreprise et le maître d'œuvre utilisent le même système de contrôle.

### 9.9.2 Levés avant construction

Sans relevés précis il est difficile de planifier un nouvel ouvrage. Le maître d'œuvre doit fournir un plan détaillé des relevés du site avant construction qui identifie les irrégularités topographiques et tous les ouvrages existants qui doivent être enlevés. Les plans d'exécution doivent identifier toutes les coordonnées nécessaires. Dans les secteurs dynamiques, comme les plages, il peut être nécessaire de répéter ce processus juste avant que la construction ne commence. Une représentation numérique XYZ est très utile car elle peut être utilisée pour produire un modèle de terrain qui peut être intégré à la géométrie de la construction proposée.

Si l'entreprise doit implanter des lignes séparées de 10 m (espacement typique de nombreux cahiers des charges), toutes les informations de coordonnées nécessaires doivent être fournies à ce stade. Pour l'entreprise, le problème habituel d'implantation est la détermination de la ligne d'excavation pour le pied de l'ouvrage dans des conditions où la topographie du fond est très variable. Cela peut être réalisé en superposant le plan d'exécution sur relevé topographique. Le logiciel de modélisation du terrain peut rapidement fournir les positions permettant un contact du pied de l'ouvrage avec la topographie existante; ces positions peuvent alors être marquées avec le système de levé.

### 9.9.3 Alignement de l'ouvrage

Le GPS cinématique est le meilleur moyen d'établir des points d'alignement sur un ouvrage. La précision fournie est tout à fait conforme à celle qui est nécessaire pour la construction des ouvrages en enrochement naturel. Le GPS cinématique donne une précision verticale approximativement de  $\pm$  de 30 mm + 0.2 % de la longueur de la ligne de base. La précision de positionnement en plan est souvent deux fois supérieure au besoin. Les systèmes modernes fournissent un mode de marquage grâce auquel le géomètre peut naviguer rapidement vers les positions des principaux points singuliers à marquer sur le sol. C'est un processus simple à condition que les données du levé et un plan d'exécution avec les coordonnées, identifiant tous les points singuliers, soient disponibles sous forme numérique.

### 9.9.4 Implantation des profils

Après avoir établi la position des profils sur le plan, à l'aide d'un système de levé des coordonnées, les profils de l'ouvrage peuvent être implantés. Une gamme d'outils techniques permet de le faire.

Des niveaux ou des équipements de levé des coordonnées peuvent être utilisés pour placer des rails inclinés pour identifier la pente de construction. C'est un processus compliqué car il est souvent difficile de fixer des rails sur un talus (en particulier s'il y a déjà de l'enrochement), et le système des rails inclinés est encombrant et difficile à manier. Les coups de vent les endommagent souvent.

Les lasers rotatifs améliorent le degré de contrôle disponible pendant la construction, de même que les systèmes de type Pole et l'appareillage portable de type RTK (cinématique en temps réel) (voir également la Section 9.9.8.2). Les lasers émettent un rayon infrarouge qui, dans certains cas, peut endommager les yeux – des panneaux d'avertissement illustrant les dommages potentiels aux yeux doivent être installés.

En théorie les lasers devraient être installés sur des points de référence de hauteur connue, X m; le point de référence par rapport au niveau du faisceau peut par exemple être mesuré à 1.5 m de sorte que le laser soit installé à X + 1.5 m. Si le niveau supérieur des enrochements est prévu à X - 1 m alors l'alarme peut être réglée à 2.5 m sur la perche. La perche est montée ou descendue jusqu'à ce que l'alarme retentisse, indiquant le bon niveau et si l'enrochement en question est dans la limite de tolérance. Cette méthode peut également être utilisée pour les talus en s'assurant que la pente prévue est identique à celle marquée pour le laser; l'alarme est réglée sur la perche à la hauteur nécessaire.

La plupart des lasers pour talus raides peuvent être utilisés sur des pentes jusqu'à 1/1 dans les deux directions et faisant au moins 50 m de longueur et de largeur. Les lasers infrarouges avec cadran de mesure ont un certain nombre d'autres avantages :

- ils peuvent être utilisés la nuit (mais pas avec des vents forts ou du brouillard, de la pluie ou de la neige) ;
- ils ont une tolérance de  $\pm 2$  mm pour des distances courtes ;
- ils peuvent être positionnés loin des engins en mouvement, mais peuvent perdre de la précision à grande distance ;
- ils sont faciles à trouver chez tous les loueurs de matériel ;
- ils sont exempts d'entretien et sont déjà calibrés même si le calibrage doit toujours être vérifié.

### 9.9.5 Pose de blocs d'enrochement suivant un plan de pose

Les blocs d'enrochement sont normalement disposés suivant un plan de pose respectant une certaine densité de pose prédéfinie et à cette fin une grille relative à la ligne de base peut être réalignée. Les coordonnées de pose des blocs sont fournies par un système informatisé connecté au matériel de pose, en général une grue.

Parmi les techniques moins sophistiquées, on trouve un schéma d'alignement peint sur la surface de la sous-couche et la pose contrôlée par un opérateur au-dessus de l'eau. Des techniques plus efficaces au-dessus et en dessous du niveau de l'eau incluent des dispositifs de positionnement électroniques ou mécaniques montés sur la grue, la grue étant elle-même sur un emplacement prédéfini à terre. Pour positionner les blocs suivant le plan de pose, les données concernant la position de la grue, l'angle de flèche et la distance de la grue au câble doivent être disponibles.

Une autre technique utilisée pour les équipements terrestres et sur les grues barges consiste à viser le câble de suspension avec du matériel de levé topographique adapté. Cependant, la technique la plus efficace est celle du DGPS ou DGPS-RTK, système de positionnement relatif utilisant un point de repère à terre et une autre antenne à l'extrémité de la flèche, pour viser de manière précise et rapide le positionnement du bloc. Cette technique est limitée par le fait que l'antenne GPS est placée au-dessus de l'eau et très souvent au bout de la flèche loin de la position réelle du bloc. Des corrections et des procédures de contrôle qualité adaptées doivent alors être mises en œuvre pour tenir compte du mouvement de la barge et des blocs d'enrochement.

### 9.9.6 Implantation d'un musoir

Les principes pour implanter un musoir sont identiques à ceux utilisés pour la section courante de l'ouvrage. La principale différence est que les profils sont implantés sur un cercle et à des intervalles différents de ceux applicables à la section courante. La règle de base est que le musoir doit être implanté de manière à fournir une couverture spatiale suffisante au pied de l'ouvrage pour obtenir la forme prévue du musoir. La géométrie et les coordonnées des marques doivent être extraites des plans d'exécution contenant les informations nécessaires. Une attention particulière doit être prêtée à l'implantation du pied du musoir. Le pied du musoir est généralement plus complexe que celui de la section courante parce que le musoir coupe les lignes bathymétriques à différents angles et sera donc irrégulier. La plupart des plans d'exécution montrent des musoirs idéalisés dont le pied peut rarement être construit comme prévu en raison des variations irrégulières topographiques du fond. Le pied du musoir est souvent situé sous le niveau de basse mer et il est nécessaire de faire une étude bathymétrique détaillée pour obtenir les informations géométriques permettant d'assurer une bonne implantation du pied par rapport à la pente désirée et la géométrie de la crête. Les détails des coordonnées de pentes de transition à l'approche du musoir devraient également être fournis par le maître d'œuvre, car il est difficile de construire avec des changements abrupts de pente.



### 9.9.7 Construction sous-marine

La construction et l'implantation sous-marine d'un ouvrage sont moins précises que pour la partie émergée, bien que les mêmes principes s'appliquent. Des levés bathymétriques, utilisés avec des plans d'exécution détaillés, sont utilisés pour déterminer la position prévue du pied de l'ouvrage. Quand la carapace est posée à partir de la terre, pour s'assurer qu'elle est correctement positionnée, il faut employer un système de coordonnées de pose et de localisation du bloc, comme une antenne de GPS sur la flèche de la grue reliée à un enregistreur ou une grille de coordonnées de pose dans la grue. Des vérifications de construction peuvent être faites en suspendant une tige de sondage à une grue équipée d'une antenne GPS ou d'une cible rétro-réfléchissante (voir la Figure 9.70). Alternativement, des levés bathymétriques réguliers peuvent être faits au fur et à mesure de l'avancement des travaux, bien que cela puisse être dangereux en eau peu profonde.



Figure 9.70 Vérifications des profils sous-marins avec une barre de sondage (source : David Bowie)

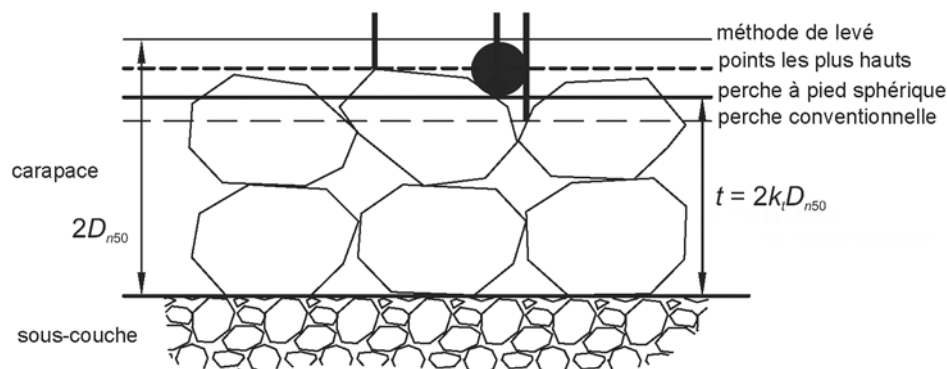
## 9.9.8 Techniques de levé

### 9.9.8.1 Au-dessus de l'eau

Les petits enrochements et les enrochements moyens peuvent être mesurés avec une sonde à extrémité sphérique de  $0.5D_{n50}$  de diamètre. Pour le levé topographique, elle est reliée à une perche, une antenne GPS ou une cible rétro-réfléchissante. Les mesures doivent être faites à des intervalles de 1 à 2 m à travers le profil mesuré.

Pour les gros enrochements, les mesures doivent être effectuées à l'aide d'une perche reliée à une antenne de GPS ou une cible rétro-réfléchissante. Pour les systèmes de carapace en double couche posés individuellement, trois méthodes différentes de levé peuvent être utilisées (voir la Figure 9.71):

- les points les plus hauts;
- perche à pied sphérique;
- perche conventionnelle.



**Figure 9.71** Impact des méthodes de levé sur l'épaisseur des couches avec une carapace en double couche

Chaque méthode donne une mesure différente de l'épaisseur de la couche (voir également la Section 3.5). Des recherches ont déterminé que le coefficient d'épaisseur de couche,  $k_t$  (-), et la porosité de couche,  $n_v$  (-), dépendent de la forme de l'encrochement et de la méthode de pose. La Section 3.5 donne des recommandations indicatives applicables pour l'utilisation de la méthode de levé de surface de référence, c'est-à-dire une sonde à extrémité sphérique de  $0.5 D_{n50}$  de diamètre. Quelques informations pratiques, provenant des mesures sur un prototype, sont fournies à l'Encadré 9.3 (Section 9.8.1). En pratique, les contraintes d'hygiène et de sécurité impliquent que les levés de surface pour les planches d'essai, pour les contrôles et les devis de paiement, ne soient parfois pas exécutés avec un pied sphérique à l'échelle des blocs et pour les gros blocs d'encrochement. Mesurer avec une perche conventionnelle placée à intervalle régulier recommandé produit une surface plus basse, ce qui signifie que les valeurs de  $k_t$  et  $n_v$  devront être réduites par un facteur de correction donné au Tableau 9.9. En revanche, mesurer en plaçant la perche sur le point le plus haut de chaque bloc contenu par le profil produit un profil plus élevé et nécessite également l'utilisation d'un facteur de correction (également donné au Tableau 9.9).

**Tableau 9.9** Facteurs de correction de la méthode de levé des carapaces en double couche tels que mesurés sur des prototypes (Latham et al., 2002)

Site	Correction pour les points les plus hauts		Correction pour la perche conventionnelle	
	$k_{thp} / k_t$	$n_{vhp} / n_v$	$k_{tcs} / k_t$	$n_{vcs} / n_v$
Beesands $D_{n50} = 1.30\text{m}$	1.082	1.176	0.929	0.838
Reculver $D_{n50} = 0.90\text{m}$	1.045	1.110	0.904	0.785
Facteurs recommandés	1.06	1.14	0.91	0.81

**Notes :**

- $k_{thp}$  = coefficient d'épaisseur de couche obtenu à la sonde et relevé du point le plus élevé (-);
- $n_{vhp}$  = porosité obtenue à la sonde, et relevé du point le plus élevé (-);
- $k_t$  = coefficient d'épaisseur de couche obtenu à la sonde sphérique (-);
- $n_v$  = porosité obtenue à la sonde sphérique (-);
- $k_{tcs}$  = coefficient d'épaisseur de couche obtenu à la sonde à intervalles réguliers (-);
- $n_{vcs}$  = porosité obtenue à la sonde à intervalles réguliers (-).

Le Tableau 9.9 donne des facteurs de correction déduits des données obtenues sur deux sites où trois méthodes de levé de surface ont été comparées (Latham et al., 2002). Le coefficient standard d'épaisseur de couche,  $k_t$ , et la porosité de couche,  $n_v$ , basés sur des levés de surface utilisant un pied sphérique de  $0.5 D_{n50}$  de diamètre peuvent être convertis en coefficients équivalents pour les levés du point le plus haut ou les levés à la perche conventionnelle (ou sonde). Dans la pratique, des niveaux de formation et les profils finaux sont établis avec les techniques de levés que l'entreprise, en accord avec le maître d'œuvre, considère comme les plus appropriées parmi toutes celles qui sont disponibles. Les méthodes autres que la perche avec un prisme réfléchissant sont équivalentes à la méthode du point le plus haut.

Les mesures de profils doivent être faites à intervalles réguliers sur toute la longueur de l'ouvrage tel qu'approuvé par le maître d'œuvre. Ces intervalles seront généralement de 10 m, mais ils peuvent se resserrer si le profil change rapidement. Aucune couche ne doit être couverte par la couche suivante avant que le maître d'œuvre n'ait approuvé le profil de l'ancienne couche.

### 9.9.8.2 Sous l'eau

#### Systèmes disponibles

Les éléments structurels qui sont sous le niveau de l'eau peuvent être levés à l'aide d'une boule lestée à l'extrémité d'une chaîne de sondage. Si la profondeur est trop grande, les levés ne peuvent être faits qu'avec un échosondeur ou un sonar latéral.

Les échosondeurs permettent de mesurer la profondeur d'eau en calculant la différence de temps entre le moment où le signal sonore est envoyé et celui où il est reçu après réflexion sur le fond de la mer. Avec une valeur préétablie pour la vitesse acoustique sous l'eau,  $v_s$  (m/s), et l'intervalle de temps mesuré,  $dt$  (s), la profondeur d'eau,  $h$  (m), peut être calculée comme suit :

$$h = 0.5 v_s dt \quad (9.11)$$

Il y a deux principaux systèmes d'échosondeurs :

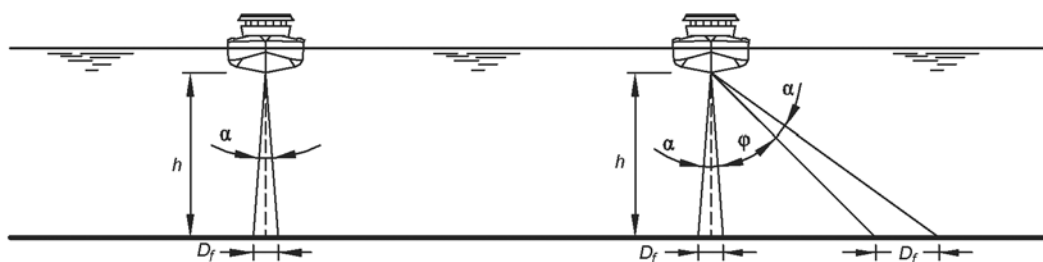
- les sondeurs monofaisceaux ;
- les sondeurs multifaisceaux.

Les systèmes **monofaisceaux** utilisent un faisceau sonore et seul le fond de la mer directement sous le navire hydrographique est sondé. La section circulaire du fond de la mer mesurée s'appelle l'empreinte (voir la Figure 9.72). Le diamètre de l'empreinte dépend de l'angle du faisceau et de la profondeur de l'eau (voir l'Équation 9.12) :

$$D_f = 2 h \tan(0.5 \alpha) \quad (9.12)$$

où  $D_f$  = diamètre de l'empreinte (m),  $\alpha$  = angle du faisceau ( $^\circ$ ),  $h$  = profondeur d'eau (m).

L'angle de faisceau,  $\alpha$ , varie en fonction du système (en particulier sa fréquence) mais reste dans entre 2.5 et 3.0 $^\circ$ .



**Figure 9.72** Empreinte d'échosondeurs monofaisceaux et multifaisceaux (Rotterdam, PWED et al., 2001)

Les systèmes **multifaisceaux** utilisent une rangée de faisceaux sonores permettant de mesurer une ligne de points en une séquence de mesure. Cette ligne de mesures se trouve en dessous et de chaque côté du navire mais peut être dirigée vers un seul côté si nécessaire (voir la Figure 9.72). Les valeurs des mesures du son/temps sont calculées en fonction des profondeurs par le logiciel du système. Ce logiciel est principalement conçu pour les surfaces régulières. Quand les surfaces accidentées ou dures (c'est-à-dire des fonds contenant des rochers) sont mesurées, des perturbations acoustiques se produiront, perturbant le traitement des faisceaux sonores. Ceci peut être source d'erreurs.

Les faisceaux sonores des sondeurs multifaisceaux ont une empreinte qui est en général plus petite que celle des systèmes monofaisceaux. Les angles de faisceau,  $\alpha$ , varient de 0.5 à 1.5°. Sur les côtés, l'empreinte augmente avec la distance au navire (voir la Figure 9.72). Le diamètre,  $D_f$ , de l'empreinte ovale est donné par l'Équation 9.13:

$$D_f = 2 h [\tan(\varphi + 0.5 \alpha) - \tan \varphi] \quad (9.13)$$

où  $\varphi$  = la direction du faisceau par rapport à la verticale (°),  $h$  = la distance entre l'empreinte et le fond du bateau (m).

Dans de nombreux systèmes, la direction du faisceau peut varier de -75° à +75° avec des incréments de  $\alpha = 0.5^\circ$  à  $1.5^\circ$ . La taille de l'empreinte la plus éloignée du navire hydrographique peut faire cinq fois la taille de l'empreinte sous le navire.

### Précision du sondage (Rotterdam PWED *et al.*, 2001)

En raison du lien entre les mesures et le paiement, il est clair que des mesures imprécises auront un effet important. Obtenir des informations sur l'origine des imprécisions dans les systèmes de mesures par échosondeurs monofaisceaux et multifaisceaux est essentiel. Les mesures peuvent être affectées par deux types d'erreurs:

- erreurs systématiques;
- erreurs aléatoires.

Une erreur systématique aura comme conséquence des mesures polarisées d'un côté, c'est-à-dire trop basses ou trop hautes. Les erreurs aléatoires changent la valeur des mesures dans une certaine largeur de bande, la valeur moyenne étant égale à la vraie valeur. Un exemple d'erreur systématique faite en contrôlant des ouvrages en enrochement est l'erreur provenant de la pénétration du système de mesure dans des couches composées de gros enrochements. Les niveaux moyens d'empreinte seront inférieurs à ceux de la partie supérieure des enrochements. Ce problème ne se produira pas avec des granulométries faibles, il existe donc bien un rapport entre la précision, la blocométrie de l'enrochement et la largeur de faisceau.

Le nombre de mesures par unité de surface est également important. Une perche de levé et une sphère ne fourniront que des mesures dispersées et isolées. Un échosondeur monofaisceau fournira des profils continus qui sont toujours séparés par la distance entre les lignes de levés. Les mesures faites avec un échosondeur multifaisceaux fournissent une couverture complète du secteur inspecté.

La précision des mesures peut également être influencée par:

- des erreurs de positionnement du navire hydrographique;
- des erreurs dans la mesure de la profondeur (mauvaise vitesse du son dans le réglage de l'échosondeur);
- un mauvais calibrage ou un calibrage incomplet du système;
- une mauvaise compensation des mouvements du navire hydrographique;
- des imprécisions provenant du système lui-même par rapport à la surface mesurée (lisse ou accidentée, horizontale ou inclinée);
- l'expérience du personnel.

Ces erreurs sont principalement des erreurs aléatoires et ne devraient pas affecter les valeurs moyennes.

Le Tableau 9.10 présente les niveaux de précision verticale de plusieurs systèmes de levé en fonction du type d'ouvrage à mesurer.

**Tableau 9.10** Précision des mesures (+/-) pour divers systèmes d'échosondeur (source Rotterdam PWED et al., 2001)

Fond	Station totale	Échosondeur monofaisceau	Échosondeur multifaisceaux	
			Faisceau central	Faisceau externe
Sable	< 10 cm	< 10 cm	< 10 cm	< 10 cm
Sous-couche filtre	< 10 cm	< 20 cm	< 30 cm	< 20 cm
Couche supérieure	< 30 cm	< 40 cm	< 40 cm	< 40 cm

**Notes :**

1. Les valeurs pour la sous-couche filtre et la couche supérieure sont seulement indicatives et dépendent principalement du rapport entre l'empreinte et le diamètre des enrochements de la couche.
2. Une meilleure précision obtenue avec le faisceau externe provient d'une empreinte plus grande puisque l'empreinte plus petite du faisceau central pénétrera plus dans la couche des enrochements.

Au moment de la rédaction de ce guide, plusieurs systèmes de navigation satellites sont utilisés pour des mesures de positionnement horizontal, ce sont les suivants :

- système de positionnement global (GPS),
- système de positionnement global différentiel (DGPS),
- cinématique en temps réel (RTK).

La précision comparée de ces systèmes de positionnement est résumée au Tableau 9.11.

**Tableau 9.11** Précision des mesures (+/-) pour différents systèmes de positionnement horizontaux (Rotterdam PWED et al, 2001)

Système	Signal de correction	Précision	
		valeur 1 $\sigma$	valeur 2 $\sigma$
GPS	–	< 5.00 m	< 10.00 m
DGPS	Disponible dans le commerce	< 1.50 m	< 2.50 m
DGPS	Localement disponible	< 1.00 m	< 2.00 m
RTK	Localement disponible	< 0.05 m	< 0.10 m
Station totale	–	< 0.01 m	< 0.02 m

**Notes :**

1. « localement disponible » signifie qu'une balise supplémentaire spéciale est installée.
2. « valeur 1  $\sigma$  » et « valeur 2  $\sigma$  » signifient : écart type pour l'intervalle de confiance à 65 % et 95 % respectivement.

La précision totale des systèmes verticaux et horizontaux peut être récapitulée comme suit :

- Type 1** DGPS + système de mesure dans l'eau - aucun protocole pour des procédures d'essai  
 $x$  et  $y$  < 3.0 m ;  $z$  < 0.40 m
- Type 2** DGPS + système de mesure de l'eau - utilisant des protocoles pour procédures d'essai et des essais de référence pour  $x$ ,  $y$  et  $z$   
 $x$  et  $y$  < 1.0/2.0 m ;  $z$  < 0.10/0.20 m
- Type 3** Système RTK - utilisant des protocoles pour procédures d'essai et des essais de référence pour  $x$ ,  $y$  et  $z$   
 $x$  et  $y$  < 0.50 m ;  $z$  < 0.10 m

On ne connaît pas bien la pénétration de l'empreinte des systèmes mono- et multifaisceaux dans des couches d'encrochement contenant des encrochements de différentes tailles. Les informations sur cet aspect sont importantes parce qu'elles influencent la détermination de l'épaisseur de la couche. Pour faire une analyse plus précise, des essais sur des déversements de deux blocométries d'encrochement différentes ont été effectués dans la cale sèche de Verolme du port de Rotterdam (Rotterdam PWED *et al.*, 2001). Les essais et les résultats sont présentés à l'Encadré 9.4.

### Les risques contractuels des levés

De grandes différences de mesures peuvent se produire quand un système d'échosondeur est utilisé pour contrôler des ouvrages en encrochement. Il est dans l'intérêt du maître d'œuvre et de l'entreprise de comprendre ces problèmes.

Les erreurs de mesures systématiques peuvent produire de grandes différences entre les niveaux prévus ou l'épaisseur de la couche nécessaire et la valeur réelle sur l'ouvrage. Ces différences pourraient conduire à la non-acceptation de la partie des travaux concernée. Des erreurs aléatoires importantes dans les levés peuvent également se produire, par exemple quand des tolérances de pose inadaptées sont stipulées. Ceci peut également entraîner la non-acceptation.

La pénétration du signal de l'échosondeur dans la couche d'encrochement aura comme conséquence la sous-estimation de l'épaisseur réelle de la couche. L'épaisseur mesurée de la couche peut varier de 0.25 à 0.75  $D_{n50}$ .

L'auteur des documents de l'appel d'offres doit être conscient des implications des éléments suivants :

- le système de mesure à employer pour vérifier les travaux ;
- la manière dont les mesures sont effectuées ;
- les exigences demandées sur les résultats des mesures ;
- les conséquences pour le maître d'œuvre et/ou l'entreprise quand les demandes ne sont pas satisfaites ;
- la définition des tolérances de pose et de mesure utilisées dans les documents du marché.

En pratique, la mesure en tonnes de la quantité d'encrochements posés est le seul véritable indice de la qualité des travaux. Pour protéger l'entreprise contre des erreurs systématiques importantes, il est préférable d'employer une combinaison de quantité posée par secteur avec des mesures à l'échosondeur.

Il est important que le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre et l'entreprise utilisent les mêmes définitions, en particulier en ce qui concerne la définition précise de ce qui est mesuré. Par exemple, lesquelles des phrases suivantes peut-on utiliser :

- des mesures isolées ou des mesures d'un secteur ?
- la précision d'une valeur ou la moyenne d'un certain nombre de valeurs avec un écart type correspondant ?
- l'écart type de plusieurs mesures dans un secteur ou l'écart type de plusieurs moyennes de plusieurs secteurs de mesure ?
- le niveau du haut des encrochements ou le niveau défini par une ligne théorique de conception telle que mesurée par un système prédéterminé de mesure ?

Il est impératif que toutes les parties au contrat se réfèrent aux mêmes définitions.

**Encadré 9.4** *Expérience pratique de mesure avec des échosondeurs mono- et multifaisceaux (VBKO/IADC, 2001)*

Comme décrit précédemment, l'empreinte d'un système mono ou multifaisceaux est essentielle pour la pénétration dans la couche d'enrochement. Quand les enrochements sont assez petits pour être contenus dans l'empreinte, on mesure à la surface des enrochements. Quand les enrochements sont plus grands que l'empreinte, celle-ci peut pénétrer dans la couche d'enrochement, avec pour résultat des valeurs plus basses. La situation est plus compliquée pour un système multifaisceaux parce qu'on ne sait pas comment la réflexion supplémentaire de la couche de gros enrochement influence le comportement des faisceaux.

Une série d'essais a été effectuée dans une cale sèche. Deux couches d'enrochement ont été posées, avec une blocométrie de 10 à 60 kg et de 40 à 200 kg respectivement. Les deux couches avaient une épaisseur de  $2.5 D_{r50}$  et un côté de chaque section était composé d'un talus.

Les mesures suivantes ont été faites :

- mesure avec une perche et un instrument de levé, c'est-à-dire en cale sèche ;
- mesure avec une perche munie d'une extrémité semi-sphérique égale à  $0.5 D_{r50}$  et un instrument de levé, c'est-à-dire en cale sèche ;
- échosondeurs monofaisceaux, cale remplie avec 10 m d'eau, angles de faisceau de  $2.5^\circ$  et de  $2.7^\circ$ , donnant une empreinte de 1.25 à  $1.9 D_{r50}$  ;
- quatre systèmes d'échosondeurs multifaisceaux, cale remplie avec 10 m d'eau, angle de faisceau de  $1.5^\circ$ , donnant une empreinte de 0.7 à  $1.1 D_{r50}$ .

Les conclusions sont les suivantes :

- la demi-sphère a donné les niveaux les plus élevés : légèrement en dessous du sommet des enrochements ;
- le système monofaisceau a fait peu de différence avec les mesures de la sonde semi-sphérique : 1 % pour l'épaisseur moyenne de couche d'enrochement de 10 à 60 kg et 5 % pour l'enrochement de 40 à 200 kg – le diamètre d'empreinte doit être au minimum de 3 à  $5 D_{r50}$  afin de mesurer le sommet des enrochements ;
- les mesures avec le système multifaisceaux ont montré les plus petites épaisseurs de couche.

Les différences de résultat d'épaisseur de couche pour les différents systèmes comparées avec le système de sonde semi-sphérique sont données au Tableau 9.12.

**Tableau 9.12** *Épaisseurs des couches mesurées avec une perche, des systèmes monofaisceaux et multifaisceaux*

Blocométrie	Système de mesure		
	Monofaisceau	Perche de levé	Multifaisceaux
10 – 60 kg	- 3 %	- 14 %	- 21 % ( $\approx 0.61 D_{r50}$ )
40 – 200 kg	- 5 %	- 8 %	- 11 % ( $\approx 0.32 D_{r50}$ )

**Note :**

L'écart type des faisceaux pour l'échosondeur multifaisceaux change avec l'emplacement du faisceau. Il est plus élevé sous le navire (7 cm) et plus petit de chaque côté (3.5 cm). En raison de la différence de pénétration dans la couche d'enrochement l'inspection doit être effectuée avec un recouvrement de 50 à 100 %, de sorte que les mesures soient un mélange de valeurs de faisceaux au centre et à l'extérieur.

## 9.10 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Caquel, F, Claire, J, Fauvre, Y H et Olivier, F (1999). “Comportement des géotextiles de filtration soumis à des chutes de blocs”. Dans : H Girard et J P Courc (eds), *Actes des 4e rencontres géosynthétique, Bordeaux, Octobre 1999*, vol 2, pp 279 – 286

CERC (1984). *Shore protection manual*. Coastal Engineering Research Center (CERC), US Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS

Chew, S H, Karunaratne, G P, Tan, S A et Wong, W K (1999). “Essai d’impact standard (EIS) pour évaluer la résistance au poinçonnement des géotextiles en protection des berges cotières”. Dans : H Girard et J P Courc (eds), *Actes des 4e rencontres géosynthétique, Bordeaux, Octobre 1999*, vol 2, pp 303 – 310

CROW (1999). *Construction and measurement tolerances in marine construction*. CROW workgroup

Cruickshank, I et Cork, S (2005). *Construction health and safety in coastal and maritime engineering*. Thomas Telford, Londres

Delft Hydraulics (1989). *Investigation on the dumping result of a side stone dumping vessel, model tests, Part I and II* (en hollandais). Report Q 673, Delft Hydraulics, Delft

Godfrey, P S (1996). *Control of risk. A guide to the systematic management of risk from construction*. SP125, CIRIA, Londres

Humphreys, B, Coates, T, Watkiss, M et Harrison, D (1996). *Beach recharge materials – demand and resources*. Report 154, CIRIA, Londres

Latham, J P, Newberry, S, Mannion, M, Simm, J D et Stewart, T (2002). “The void porosity of rock armour in coastal structures”. *ICE water and maritime engineering*, vol 154, no 3, pp189 – 198

Morris, M W et Simm, J D (2000). *Construction risk in river and estuary engineering: a guidance manual*. HR Wallingford, Wallingford

Rotterdam Public Works Engineering Department, Port of Rotterdam, VBKO and IADC (2001). *Construction and survey accuracies for the execution of dredging and stone dumping works* (en hollandais). Rotterdam

Schiereck, G J (2001). *Introduction to bed, bank and shore protection – engineering the interface of soil and water*. Delft University Press (ISBN 90-407-1683-8)

Simm, J D and Cruickshank, I (1998). *Construction risk in coastal engineering*. Thomas Telford, Londres

USACE (2003). *Coastal engineering manual*. Coastal Engineering Research Center (CERC), US Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS

Vrijling, J K (2001). “Probabilistic design of water defence systems”. *The Netherlands reliability engineering and system safety*, vol 74, no 3, Décembre 2001, pp 337 – 344

Wegner, B C (2004). “Large jetty construction challenges: Yaquina North Jetty, Oregon”. Dans : Proc 4th int conf coastal structures 2003, Portland, Oregon