

2 Conception des ouvrages



1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

SOMMAIRE du Chapitre 2

2.1	Introduction	19
2.2	Définition des exigences	20
2.2.1	Le processus de conception	20
2.2.1.1	Les phases de la vie des ouvrages	20
2.2.1.2	Travailler à différentes échelles	21
2.2.1.3	Les degrés de spécifications	21
2.2.1.4	Les facteurs à considérer pour une conception intégrée	22
2.2.2	Les connaissances requises pour la conception	24
2.2.2.1	Les informations nécessaires	24
2.2.2.2	Les exigences fonctionnelles	25
2.2.2.3	Les conditions de site	26
2.2.2.4	Les considérations techniques	26
2.2.2.5	Les informations économiques	27
2.2.2.6	Les informations environnementales	28
2.3	Considérations techniques	29
2.3.1	Les structures en enrochement et leurs réponses	29
2.3.2	La conception de l'ouvrage	35
2.3.2.1	Les éléments des ouvrages	35
2.3.2.2	Les actions appliquées à l'ouvrage	36
2.3.2.3	L'analyse	37
2.3.3	Le dimensionnement de l'ouvrage	38
2.3.3.1	Le processus de dimensionnement	38
2.3.3.2	Critères techniques de dimensionnement	39
2.3.3.3	Les approches de dimensionnement	40
2.4	Considérations économiques	43
2.4.1	Coût sur le cycle de vie	43
2.4.2	Les éléments de coût	44
2.4.2.1	Les catégories des coûts	44
2.4.2.2	Les coûts fixes et variables	44
2.4.3	Estimation du coût	45
2.4.4	Recherche, production et transport d'enrochement	47
2.4.5	Construction	47
2.4.6	Maintenance et réparation	50
2.4.7	Démolition	51
2.5	Considérations environnementales	51
2.5.1	Utilisation durable de l'enrochement comme matériau de construction	51
2.5.2	Évaluation des impacts environnementaux	52
2.5.2.1	Au cours des études de conception	54
2.5.2.2	À la validation du projet	55

2.5.2.3	Au cours de la construction de l'ouvrage	55
2.5.2.4	Pour l'ouvrage en service	57
2.5.2.5	Au cours de la démolition de l'ouvrage	58
2.5.3	Les opportunités pour l'amélioration de l'environnement	59
2.5.4	Vue d'ensemble du processus de l'Étude d'Impact sur l'Environnement (EIE)	60
2.5.4.1	La législation autour de l'Étude d'Impact sur l'Environnement	60
2.5.4.2	Dossier d'étude d'impact	62
2.5.4.3	Le processus d'étude d'impact	62
2.6	Considérations sociales	64
2.6.1	L'hygiène et la sécurité	64
2.6.2	La construction	64
2.6.3	L'engagement des parties concernées	65
2.7	Références bibliographiques	65

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

2 Conception des ouvrages

Le Chapitre 2 donne une vue d'ensemble du processus de conception et des considérations à étudier lors de l'élaboration du projet. Des principes généraux sur les ouvrages en enrochement, applicables à tout le guide, sont donnés ici.

Données des autres chapitres:

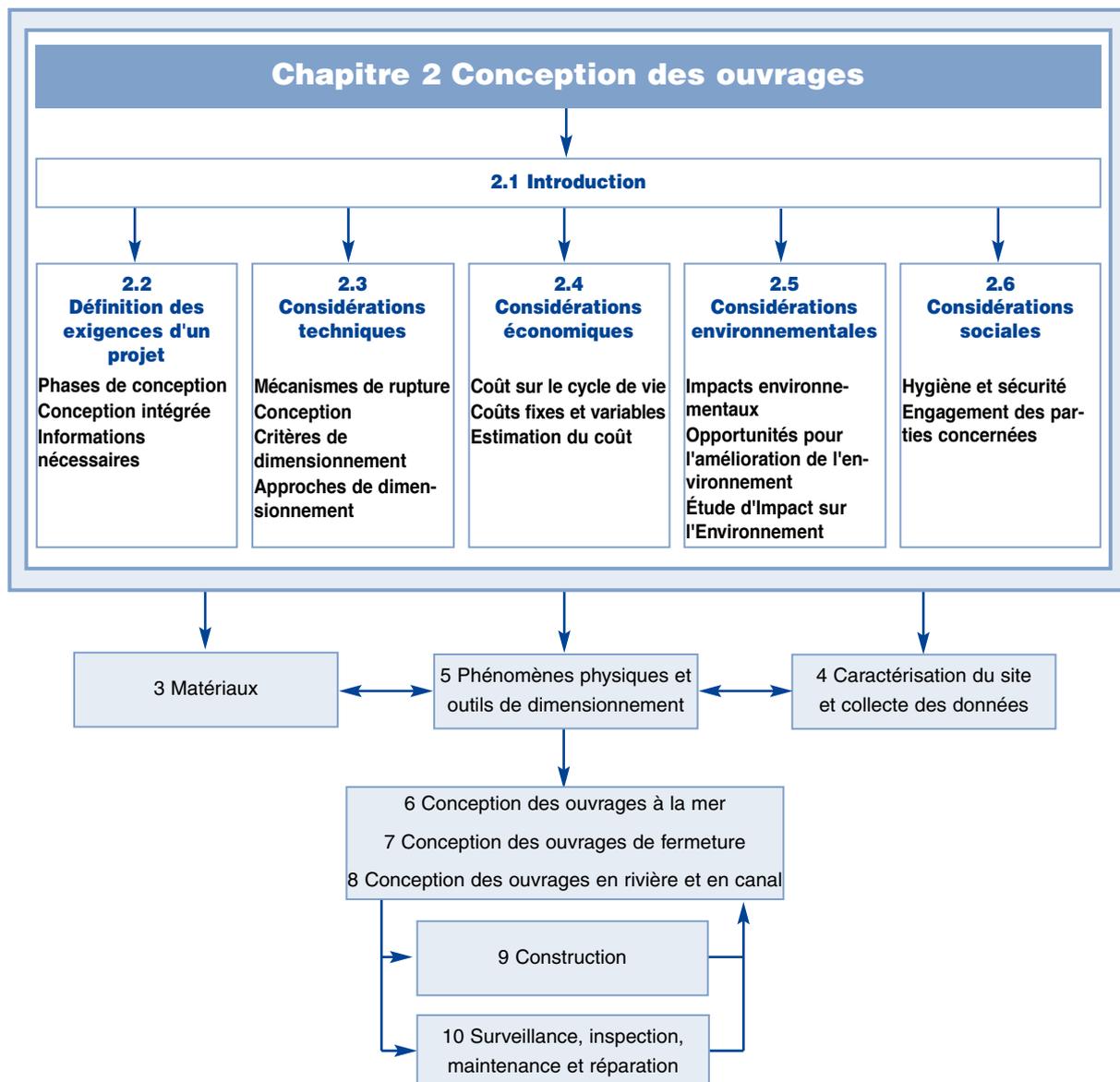
- **point de départ** d'un aménagement en enrochement.

Résultats pour les autres chapitres:

- **exigences de projet** - environnement, coût, problématiques techniques et exigences fonctionnelles.

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.



2.1 INTRODUCTION

Tous les utilisateurs de ce guide sont vivement invités à lire ce chapitre avant d'entamer les chapitres suivants. En effet, il fournit une vue d'ensemble des principales problématiques à considérer tout au long du cycle de vie d'un aménagement.

Le Chapitre 2 souligne la nécessité de considérer le cycle de vie complet de l'ouvrage, c'est-à-dire de sa conception à son déclassement (le cas échéant), lors de la planification et la conception des ouvrages en enrochement. Les aspects techniques doivent être intégrés au même titre que les facteurs sociaux, environnementaux, économiques et autres. Ce chapitre introduit les problématiques générales qui doivent être considérées pour les ouvrages en enrochement traités dans ce guide. L'information donnée dans ce chapitre est générique et renvoie aux autres sections du guide pour plus de détails.

Ce chapitre pose les questions générales auxquelles un concepteur se doit de répondre, par exemple :

- quelles fonctions doit remplir l'ouvrage ?
- qu'est ce que le concepteur a besoin de connaître ?
- quels sont les problèmes et/ou les contraintes potentiels ?
- comment le concepteur doit-il aborder le projet et développer des solutions ?

Un « projet » commence généralement bien avant que la conception de l'ouvrage soit entreprise. Les besoins particuliers sont généralement définis à partir d'études de faisabilité qui ont dû intégrer différents facteurs tels que la justification économique et les impacts physiques, sociaux et environnementaux de l'aménagement. Ces études – qui peuvent être substantielles – sont souvent indispensables pour déterminer la viabilité et l'acceptabilité de l'aménagement. Les apports ultérieurs dans la conception de l'ouvrage peuvent quelquefois être moindres par comparaison. Les études de faisabilité ou la planification stratégique à plus large échelle avant un aménagement particulier dépassent le champ du guide.

Ce chapitre, comme le reste du guide, suppose que la nécessité d'ouvrages composés d'enrochement a déjà été démontrée et que les alternatives se sont montrées moins appropriées ou moins préférées. Le guide peut être utile dès que cette décision a été prise lors des évaluations de pré-conception ou planification. Par conséquent, les références au « projet » tout au long du guide désignent les activités associées aux ouvrages en enrochement.

NOTE : les principes décrits ici s'appliquent aux processus de planification et de conception dans leur ensemble et donc à tous les stades du cycle de vie. La planification et la conception ne sont pas restreintes aux ouvrages neufs, avant travaux. Il y a, en effet, un besoin croissant d'entretenir, de réparer, de modifier ou d'améliorer les ouvrages existants, activités qui nécessitent également une planification et une conception. La gestion du cycle de vie est illustrée Figure 2.1.

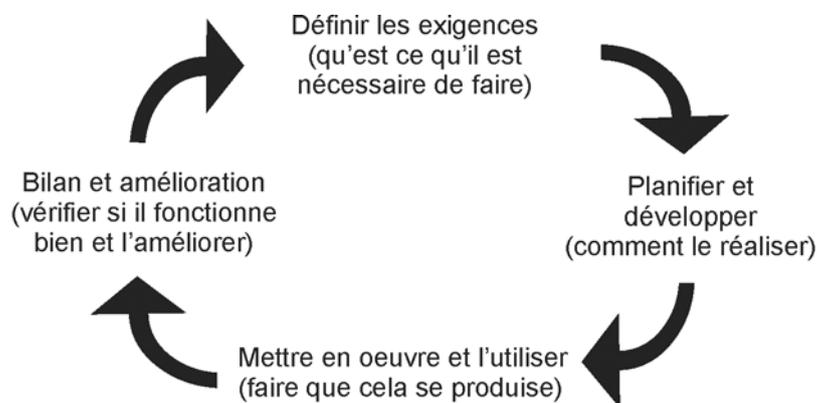


Figure 2.1 La gestion du cycle de vie de l'ouvrage

2.2 DÉFINITION DES EXIGENCES

2.2.1 Le processus de conception

2.2.1.1 Les phases de la vie des ouvrages

Pendant la vie de tout ouvrage, plusieurs phases caractéristiques existent, à savoir :

- le programme de l'aménagement ;
- les études de définition ou d'esquisse ;
- les études d'avant-projet (avant-projet sommaire puis définitif) ;
- les études de projet ;
- les études d'exécution, incluant les plans d'exécution et la préparation du chantier ;
- l'exploitation, incluant la surveillance, la maintenance, la réparation et la réhabilitation, si nécessaire ;
- le déclassement, incluant l'enlèvement le cas échéant.

Tout projet commence avec un besoin : un désir, une nécessité ou un manquant – un défaut d'abri dans un port, par exemple. La phase de **définition du programme de l'aménagement** définit le besoin en posant les objectifs de l'aménagement, particulièrement suivant les aspirations du maître d'ouvrage. Ces objectifs vont présenter des exigences (c.-à-d. ce qui est stipulé) et des limitations (c.-à-d. ce qui n'est pas voulu ou possible). Des objectifs clairs permettront l'établissement de la solution technique appropriée qui répond au besoin identifié. Ceci est le point de départ pour le travail du concepteur.

Au stade des **études de définition**, des solutions sont généralement esquissées, telles que les principaux types d'ouvrages et leur localisation, souvent pour évaluer la faisabilité de l'aménagement. La principale activité à ce niveau consiste à identifier les fonctions, les contraintes et les informations requises pour poursuivre le processus de conception. Les facteurs à considérer peuvent comprendre les autorisations et les données sur les conditions de site qui sont requises pour que l'étape suivante du projet puisse commencer.

Au moment des **études d'avant-projet**, beaucoup des activités de reconnaissances et d'études doivent être menées, incluant l'étude du climat de houle ou des régimes des courants, l'évaluation de l'environnement et l'analyse financière. Il est important de porter un intérêt particulier à la faisabilité technique. La conception peut être développée jusqu'à la quantification des principales dimensions de l'ouvrage, telles que des coupes et des vues en plan ainsi que l'identification des principaux matériaux. À ce stade des études, un certain nombre de variantes peuvent être développées afin de les évaluer. L'évaluation doit considérer des facteurs tels que :

- la faisabilité de l'option (incluant la construction) ;
- l'atteinte de critères politiques, sociaux et législatifs ;
- les impacts environnementaux et la (ré-) utilisation optimale des ressources ;
- le coût global de l'aménagement au cours de son cycle de vie ;
- l'identification des risques (techniques, économiques et environnementaux) ;
- la complexité de gestion et de maintenance de l'ouvrage.

Ce processus doit être itératif, impliquer beaucoup de parties, pour augmenter le consentement sur l'aménagement et sélectionner la solution préférée.

Une fois que les différents critères ont été satisfaits, **les études de projet** doivent conduire à la conception de tous les éléments structurels, en utilisant des reconnaissances *in situ* et des données

physiques et techniques supplémentaires, pour produire les plans, les cahiers des charges et les détails estimatifs. Il peut être nécessaire de travailler sur le projet avec d'autres parties telles que les autorités environnementales et d'aménagement, avant que les autorisations de construction soient obtenues.

Pendant **les études d'exécution**, des plans d'exécution sont produits et des modifications supplémentaires au projet peuvent être nécessaires, résultat de difficultés sur le site tel que des conditions de sol non prévues ou de changements dans les approches de construction. Quand ceci se produit, le maître d'œuvre doit s'assurer que les principes de conception sont totalement compris et que les changements dans la conception ne compromettent aucun autre aspect de la performance de l'ouvrage.

Lors de **l'exploitation**, la performance continue de l'ouvrage est vérifiée par la mise en œuvre d'un programme de surveillance et de maintenance. Celui-ci peut conduire à identifier des besoins en travaux de réparation. Un changement d'utilisation de l'aménagement peut conduire à des travaux de modification ou d'amélioration, nécessaires pour assurer que l'ouvrage fournit les performances attendues. Ces changements doivent être effectués avec une bonne compréhension des choix initiaux de conception et leurs conséquences doivent être complètement déterminées.

Si l'ouvrage doit être **enlevé**, il est important d'en comprendre la conception initiale ainsi que les modifications postérieures pour permettre son **déclassement** avec le minimum de risques d'hygiène et de sécurité, et aussi pour comprendre les impacts environnementaux associés.

2.2.1.2 Travailler à différentes échelles

La satisfaction des besoins et des souhaits, la résolution des problèmes et le développement de solutions se passe souvent à trois niveaux :

- échelle macroscopique : le système (dans ce cas, généralement l'ouvrage ou les ouvrages, dans le cas où un certain nombre d'ouvrages sont nécessaires pour fonctionner en même temps, tels qu'un système d'épis) ;
- échelle mésoscopique : les composants du système (incluant les composants de l'ouvrage, tels que la carapace ou la butée de pied, et de sa zone d'influence telle que le sol affecté par l'ouvrage) ;
- échelle microscopique : les éléments individuels (tels que les blocs d'enrochement naturel ou artificiel, les palplanches, les poutres de recouvrement).

En général, le concepteur est impliqué aux trois niveaux.

2.2.1.3 Les degrés de spécifications

Le processus de conception comprend plusieurs cycles de conception, qui augmentent en niveau de détails :

1. Le premier cycle identifie clairement les **objectifs** de l'aménagement – le besoin ou le souhait qui doit être rempli – par exemple, l'apport d'un port abrité ou la protection de berges contre l'érosion.
2. Le second cycle conduit aux **fonctions** quantitatives et mesurables ou aux exigences de performance, qui décrivent sans ambiguïtés ce qui doit être réalisé pour atteindre un but donné – par exemple une protection contre une houle de 3 m de hauteur ou un écoulement de rivière dont la vitesse est de 4 m/s.
3. Le troisième cycle produit les principales **formes** et caractéristiques des ouvrages – telles qu'une digue à talus trapézoïdale ou reprofilable ou un dispositif composé d'épis dans une rivière.
4. Le quatrième cycle conduit aux **spécifications** et répond à la question comment l'ouvrage doit-il être construit ? – par exemple avec quels matériaux, suivant quelles dimensions et à l'intérieur de quelles tolérances.

2.2.1.4 Les facteurs à considérer pour une conception intégrée

Tous les ouvrages sont conçus pour remplir un ou plusieurs objectifs spécifiques - **les exigences fonctionnelles**, exprimées parfois sous forme d'**exigences de performance**. En plus de celles-ci, il faut aborder d'autres considérations, qui peuvent imposer des contraintes de conception supplémentaires. Celles-ci peuvent être classées comme suit :

- des considérations techniques : les conditions de site, la technique, la construction, la maintenance (Section 2.3);
- des considérations économiques : le coût de l'investissement et de la maintenance, les bénéfices, le coût global sur la durée de vie (Section 2.4);
- des considérations environnementales : les impacts sur l'environnement naturel (Section 2.5);
- des considérations sociales : les impacts sur l'environnement socio-économique comprenant la main-d'œuvre, les parties concernées, le grand public, etc. (Section 2.6).

Ces considérations et les principaux facteurs associés sont présentés au Tableau 2.1. Ils sont traités en détail dans les sections indiquées. Il est à noter que la liste n'est pas exhaustive et que chaque aménagement peut générer des problématiques spécifiques à considérer. Le Tableau 2.1 renvoie aussi vers les sections du guide où des recommandations détaillées sont données.

Tous les facteurs listés au Tableau 2.1 peuvent influencer la conception, bien qu'ils ne seront pas tous connus au début du projet. En conséquence, le processus de conception est nécessairement itératif.

Tableau 2.1 Considérations pour la programmation et la conception de l'aménagement

Aspect	Considérations	Section	
Considérations techniques	Exigences fonctionnelles (performance)	<ul style="list-style-type: none"> Exigences fonctionnelles à atteindre (p. ex. limitation du franchissement, réduction de l'agitation dans le port, protection contre l'érosion d'une berge) Stabilité de la structure acceptable et risque de rupture résiduel faible (facteurs de sécurité et choix des situations de dimensionnement) Variations de la probabilité de rupture acceptable dans le temps Adaptation (p. ex. modifications de l'utilisation de l'ouvrage dans le temps) Exigences d'hygiène et de sécurité en phase de service 	Section 2.3
	Conditions physiques	<ul style="list-style-type: none"> Conditions de sol (géotechnique) Topographie et bathymétrie Forces hydrauliques – houle, courants, niveaux d'eau, écoulements, glace Changements morphologiques Mouvement et transport sédimentaire Incertitudes sur les conditions de site (intervalles de confiance) 	Chapitre 4
	Données techniques	<ul style="list-style-type: none"> Propriétés des matériaux (p. ex. blocométrie de l'enrochement), qualité, durabilité et disponibilité Précision des informations de dimensionnement, des paramètres et domaine de validité des méthodes analytiques Méthodes spécifiques au dimensionnement de certains types d'ouvrages Nature de la rupture (progressive ou instantanée, complète ou partielle) 	Chapitre 3 Chapitre 5 Chapitres 6, 7, 8
	Construction	<ul style="list-style-type: none"> Constructibilité Expériences de l'entreprise et moyens disponibles Problématiques d'hygiène et de sécurité Conditions pendant la construction (p. ex. fréquence et importance des crues ou des tempêtes) Accessibilité au chantier pour les engins ou équipements Propriétés et qualité des matériaux de construction Disponibilité de matériaux alternatifs (gisements) Zones dédiées au stockage des matériaux ou aux travaux 	Chapitre 9
	Maintenance	<ul style="list-style-type: none"> Établissement de variantes Ratio bénéfice/coût (équilibre entre la réalisation complète ou partielle des exigences fonctionnelles pour un coût supérieur ou inférieur) Risque acceptable pour l'ouvrage en service Contraintes sur les coûts d'investissement Coût de maintenance envisageable 	Section 2.4
	Économie	<ul style="list-style-type: none"> Établissement de variantes Ratio bénéfice/coût (équilibre entre la réalisation complète ou partielle des exigences fonctionnelles pour un coût supérieur ou inférieur) Risque acceptable pour l'ouvrage en service Contraintes sur les coûts d'investissement Coût de maintenance envisageable 	Section 2.4
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> Intégration des exigences environnementales Préservation des ressources (eau, roche, etc.) Impacts environnementaux potentiels lors de la construction Risque de vandalisme Bénéfices environnementaux potentiels de l'aménagement Impacts morphologiques et sédimentologiques Acceptabilité de l'apparence de l'aménagement 	Section 2.5	
Considérations sociales	<ul style="list-style-type: none"> Hygiène et sécurité En construction et en service Participation des parties concernées 	Section 2.6	

Le résultat d'une conception intégrée doit être un ouvrage (p. ex. un revêtement, une protection de berges, une fermeture ou une digue) qui satisfasse les performances requises et qui soit robuste, facile à construire et à entretenir, accepté du point de vue social et esthétique, économique et qui minimise les impacts négatifs sur son environnement.

En pratique, tout projet devra atteindre un équilibre approprié entre ces différentes exigences. L'économie d'un projet a généralement pour but de contrebalancer la **valeur** d'un aménagement, principalement dictée par les performances fonctionnelles et les impacts sur l'environnement, et le **coût**, dicté par les aspects techniques et la construction. Le niveau d'attention accordé à ces aspects varie au cours de la conception. Par exemple, l'attention aux performances (et donc à la valeur) diminue aux dernières phases, tandis que l'attention aux détails constructifs (et donc au coût) augmente.

La conception d'un ouvrage doit tenir compte de toutes les phases futures de sa vie, incluant sa construction, son exploitation et le cas échéant son déclassement. Les modifications des conditions de site ou des exigences fonctionnelles pendant la vie projetée de l'ouvrage doivent aussi être considérées. Lorsque cela est approprié, l'ouvrage et son programme de maintenance doivent être conçus de manière à permettre des adaptations, afin de faire face aux changements de l'environnement ou des exigences fonctionnelles pendant la vie de l'ouvrage. Ceux-ci peuvent comprendre la modification de l'usage de l'ouvrage, la modification du climat de houle, une augmentation des niveaux d'eau, des variations de l'affouillement ou du taux de sédimentation, une augmentation du trafic, et des modifications de disponibilité de matériaux et de main-d'œuvre locaux pour la maintenance, etc.

2.2.2 Les connaissances requises pour la conception

2.2.2.1 Les informations nécessaires

Les informations liées à la compréhension du problème et/ou des contraintes de l'aménagement sont en général fournies par le maître d'ouvrage et les autorités compétentes en matière d'aménagement ou de réglementation. Les informations sont souvent très spécifiques au type d'aménagement et à son lieu d'implantation. En ce qui concerne la fonction et l'utilisation envisagée de l'ouvrage, les informations peuvent être initialement définies dans les grandes lignes. Les détails des attentes sur la performance et les contraintes, qui peuvent ne pas être déterminées au début des études, peuvent être définis plus en détail par le concepteur et proposés pour acceptation au maître d'ouvrage.

Le Tableau 2.1 identifie les aspects principaux de la conception à considérer. Des informations sur tous ces aspects sont nécessaires pour développer une solution adaptée, en particulier :

- les exigences fonctionnelles;
- les conditions de site;
- les données techniques (incluant les exigences liées à la construction et à la maintenance);
- les considérations économiques (incluant les risques acceptables en service);
- les conditions et les exigences environnementales.

Les contraintes dictent aussi certains aspects de la conception, telles qu'illustrées ci-dessous par des exemples caractéristiques :

- le niveau d'exposition aux actions hydrauliques sur un site peut exclure ou imposer l'utilisation de certains matériaux ou de certaines techniques de constructions;
- les conditions de sol, telles que la présence d'argiles molles qui doivent être retirées lors de la construction;
- le manque de certains matériaux ou équipements, qui peut influencer la forme de l'ouvrage et l'organisation des travaux;

- la sauvegarde de la nature ou d'autres intérêts environnementaux qui peuvent influencer le mode de construction ou de maintenance possible, ou l'emprise de l'ouvrage ;
- l'intégration paysagère, pouvant exclure la construction de certains types d'ouvrages ou les limitant à une hauteur maximale ;
- l'équilibre financier entre le budget disponible pour la construction et celui pour la maintenance.

En définitive, l'acquisition de tous les détails possibles sur ces problématiques est de la responsabilité du maître d'œuvre. Ces informations peuvent être utilisées pour développer des solutions qui répondent aux besoins, aux contraintes et aux préférences qui existent tout au long de la vie de l'ouvrage. Les informations disponibles et les connaissances varieront au cours du développement de l'aménagement et la conception doit être revue en conséquence quand cela se produit.

2.2.2.2 **Les exigences fonctionnelles**

Pour tout projet, il est important d'avoir une compréhension complète des fonctions que doit remplir l'ouvrage, des problèmes particuliers qu'il est nécessaire de résoudre et des exigences de la solution. Les attentes vis-à-vis de la performance doivent être clairement définies dès le début en collaboration avec le maître d'ouvrage et l'exploitant, car des problèmes peuvent apparaître lors de la conception si chaque partie a des attentes différentes. Avant de s'attaquer au dimensionnement, à la maintenance ou à la réhabilitation d'un ouvrage, les questions suivantes doivent être posées :

- quel est le but de la conception ou de la maintenance de l'ouvrage ?
- quelles sont les exigences concernant la performance pour la conception ?

Bien que ces questions paraissent évidentes, elles ne sont pas toujours résolues. Il est généralement recommandé de produire une série d'exigences fonctionnelles pour l'ouvrage qui peuvent être acceptées et utilisées comme critères de dimensionnement.

Par exemple, pour une digue portuaire, les considérations-clé suivantes ont toutes une influence sur le dimensionnement de l'ouvrage :

- le but de l'ouvrage ;
- l'utilisation des équipements et l'étendue de la protection nécessaire – par exemple, différents niveaux de protection sont conseillés pour les ports de commerce, les ports de pêche et les marinas ;
- l'implantation des équipements – par exemple, si la zone directement derrière la digue sera utilisée pour l'accostage ou du stockage, ou si l'accès le long de la digue est nécessaire ;
- la durée d'immobilisation acceptable – par exemple, la fréquence tolérable de dépassement des conditions d'exploitation, les temps d'arrêt pour les interventions, le déchargement de navires, etc. ;
- la durée de vie de projet des équipements – pas nécessairement identique à la période de retour des paramètres de dimensionnement ;
- les risques acceptables pendant la vie de l'ouvrage, qui peuvent influencer le choix des paramètres de dimensionnement ;
- le niveau de maintenance et la facilité des interventions ou la disponibilité des matériaux ou des équipements – si des désordres ne sont pas traitables facilement, ils doivent être minimisés lors du dimensionnement.

2.2.2.3 **Les conditions de site**

Les conditions physiques du site sont généralement les facteurs déterminants dans la conception ou la construction d'un ouvrage en enrochement. Celles-ci comprennent les paramètres des actions hydrauliques qui influencent la forme de l'ouvrage en termes de tracé, hauteur, section, largeur, matériaux de construction et techniques constructives. Les incertitudes sur le coût du projet peuvent être limitées en améliorant la compréhension des conditions physiques du site. Ceci peut être réalisé en investissant dans les collectes de données sur, par exemple, la houle ou la fondation de l'ouvrage. Cet effort supplémentaire nécessaire pour recueillir cette connaissance est souvent une petite fraction des économies qui peuvent être faites.

Les principales conditions physiques du site comprennent la bathymétrie, la topographie et la morphologie, les conditions géotechniques (caractéristique du sol de fondation et les pressions interstitielles), les conditions hydrauliques (niveau d'eau, vent, houle, courant) et les autres actions potentielles comme la glace ou les chocs de navires. Le Chapitre 4 donne des détails sur les informations nécessaires et les méthodes pour obtenir les caractéristiques des actions de l'environnement, par exemple les modélisations numériques de la houle et des niveaux d'eau. Il traite également de la détermination des combinaisons des actions de l'environnement du site à utiliser dans le dimensionnement, pour les conditions normales de service et les conditions extrêmes. L'accessibilité au site pour la construction et pour la maintenance doit aussi être prise en compte.

Du point de vue de la gestion du cycle de vie de l'ouvrage et des besoins de modification dans le futur, la surveillance de l'ouvrage doit être menée avec attention (voir Section 10.3). Les mesures doivent permettre d'évaluer les changements de l'ouvrage, la réalisation des critères de performances et/ou les impacts aux alentours.

2.2.2.4 **Les considérations techniques**

Les considérations techniques se rapportent à la fois à la conception et à la construction. Pour la conception, elles incluent la sélection d'une approche de dimensionnement appropriée et des outils associés. Il est important de comprendre comment l'ouvrage se comporte et la fonction des différents éléments qui le composent. Ceci est traité à la Section 2.3, qui contient une revue des aspects techniques nécessaires au développement d'une solution, en s'intéressant essentiellement aux principes techniques. Plus de détails sur les outils de dimensionnement sont donnés au Chapitre 5. Les recommandations de conception propres aux différents types d'ouvrages sont couvertes aux Chapitres 6, 7 et 8.

Les considérations concernant la construction et la maintenance servent généralement de conditions limites à la solution plutôt qu'au problème et sont intégrées lors du processus itératif de conception. Les informations sur la qualité des matériaux disponibles ou sur les méthodes de travail locales particulières, lorsqu'elles sont disponibles, peuvent être importantes lors de la définition de la solution (voir Encadré 2.1).

Encadré 2.1 Les considérations liées à la construction importantes pour les ouvrages en enrochement

Les considérations liées à la construction essentielles pour planifier et développer une solution en enrochement sont les suivantes :

- disponibilité des matériaux. En particulier, ceci peut influencer le choix de la carapace (p. ex. enrochement naturel, blocs artificiels ou autre) et la forme de l'ouvrage (telle que l'adoption d'une pente plus douce ou d'une berme dans le profil de la digue) ;
- ressources locales pour la construction. Si la qualité de la construction est limitée, la prendre en considération lors du choix des coefficients de sécurité et des tolérances ;
- utilisation optimale des matériaux. Les dimensions d'une digue doivent idéalement être choisies pour maximiser l'utilisation de la production de la carrière, par exemple des blocométries appropriées permettent d'utiliser toute la production. Il faut envisager un dimensionnement sur-mesure pour s'adapter aux disponibilités locales de matériaux ;
- type d'équipements de travaux. Il est important de considérer la portée maximale des équipements requis, particulièrement pour placer des gros blocs de carapace. Par exemple, la construction d'une digue à partir d'une barge peut prendre deux fois plus de temps que la construction à partir de la crête, mais cette dernière nécessite une vaste zone de travail sur la crête ;
- mobilité des engins de travaux. Par exemple, il est nécessaire d'étudier si la largeur de crête est suffisante au niveau de construction, au-dessus du niveau d'eau, pour permettre le déplacement des engins, l'approvisionnement des matériaux, la manœuvre de grues et l'ajout de zone de dépassement dans la construction finale ;
- détails simples. Il faut s'efforcer à simplifier la construction en termes de couches d'enrochement, etc. ; garder le nombre d'activités de construction différentes au minimum.

Les problématiques liées à la construction ne doivent pas compromettre ou dicter la solution, mais jouer un rôle important dans la conception. La méthode de construction qui sera probablement utilisée doit être prise en compte, en considérant invariablement que plus simple est la méthode, plus rapidement l'ouvrage sera construit et moins il coûtera cher, même si plus de matériaux pourront être nécessaires. Ceci est d'autant plus important quand l'ouvrage est seulement l'un des éléments d'un plus grand aménagement, par exemple une digue de protection requise pour permettre les autres activités de construction de commencer en sécurité. Cependant, il peut être difficile de convaincre le maître d'ouvrage ou l'exploitant que le plus petit volume de matériaux peut ne pas être synonyme de coût minimum. Dans certains cas il peut être préférable de dimensionner et soumettre à l'appel d'offres deux variantes, l'une reflétant le volume minimum de matériaux et l'autre la solution constructive la plus simple.

Les exigences liées à la maintenance future forment un élément important de la conception de tout ouvrage en enrochement. Le maître d'œuvre doit considérer des problématiques similaires à celles liées à la construction, mais aussi anticiper que les problèmes liés à la maintenance sont plus complexes. Par exemple, l'accès le long de l'ouvrage et la disponibilité d'équipements appropriés sont probablement plus importants pour la maintenance que pour la construction. Les interventions peuvent être limitées par des contraintes qui n'existaient pas pendant la construction, telles que la nécessité d'éviter la perturbation de l'exploitation ou l'augmentation de la vulnérabilité par la réduction temporaire des caractéristiques de protection offertes par l'ouvrage.

Plus de détails sur la construction, la surveillance et la maintenance des ouvrages sont donnés aux Chapitres 9 et 10.

2.2.2.5 Les informations économiques

Le coût d'un aménagement est toujours une considération majeure pendant la conception et est affecté par de nombreux facteurs listés au Tableau 2.1. Généralement seulement quelques-uns – usuellement ceux liés soit au volume de matériau ou soit à la constructibilité – ont une influence significative. Les autres coûts peuvent être relativement mineurs, mais doivent tout de même être considérés.

La disponibilité et l'origine des fonds sont importantes. Les projets financés par des fonds publics doivent parfois satisfaire des critères économiques, progressant ainsi par étapes à mesure que les critères sont atteints à chaque phase.

Le maître d'ouvrage ou l'exploitant peuvent au début ne pas connaître toutes les conséquences économiques du choix de performance et de niveau de risque à long terme (voir Section 2.3.3.2). Une option peut consister en un ouvrage de coût initial moindre mais avec un risque plus élevé de dommage en service. Ce choix peut être acceptable lorsque les capitaux apportés sont limités, mais le maître d'ouvrage doit être conscient que des coûts de maintenance plus élevés sont possibles. Dans ce cas, la disponibilité dans le futur d'un budget de maintenance adapté doit être assurée. D'autres critères, tels que les exigences sur les conditions de sécurité du public ou de la main-d'œuvre, doivent être également établis.

La Section 2.4 donne des détails sur les considérations économiques d'un aménagement en enrochement.

2.2.2.6 Les informations environnementales

Le maître d'œuvre, le fournisseur, l'entrepreneur et le maître d'ouvrage/exploitant doivent être conscients des implications environnementales liées à l'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. Les problématiques environnementales doivent normalement être considérées à partir de la définition du projet et doivent continuer à être examinées régulièrement au cours du projet. Ces problématiques seront liées aux travaux, telles que les matériaux et les méthodes de construction, et aux impacts des travaux. L'environnement inclut l'environnement physique, les habitats, les espèces naturelles et les activités humaines/sociales. L'utilisation des ressources, la pollution de l'air, de l'eau et des terres et les effets indésirables sur les habitats, la flore et la faune par les activités liées à la construction sont tous des exemples d'impacts environnementaux. L'utilisation de l'enrochement peut aussi fournir des opportunités pour l'amélioration de l'environnement : son utilisation peut être bénéfique lorsque l'enrochement est un sous-produit de d'autres activités, recyclé de travaux antérieurs, ou lorsqu'il crée de nouveaux habitats.

Beaucoup de considérations environnementales sont spécifiques au site, liées aux réglementations et caractéristiques locales. Ainsi, il peut être nécessaire de mener une évaluation environnementale pendant la phase projet. La procédure d'évaluation n'est pas couverte par ce guide, mais il est nécessaire que les personnes impliquées dans la planification et la conception de l'aménagement la comprennent.

Se conformer aux exigences environnementales, qui sont dictées par la législation et la police d'aménagement, peut être long, nécessiter des études approfondies et requérir des mesures de réduction. Les diverses autorisations à obtenir peuvent dépendre d'un certain nombre d'organisations ; la consultation peut aussi être nécessaire. Il est donc important que les aménageurs ou maîtres d'ouvrage, les maîtres d'œuvre et les entreprises communiquent avec les autorités concernées dès que possible pour s'assurer que le processus se déroule en douceur.

Les exigences environnementales varient significativement d'un pays à l'autre et suivant les types d'ouvrage. Par conséquent, elles ne peuvent pas toutes être traitées dans ce guide. Cependant, presque partout dans le monde, sous une forme ou sous une autre, l'Étude d'Impact sur l'Environnement (EIE) est normalement un pré-requis à l'acceptation d'un aménagement. La Section 2.5 présente les principes généraux des EIE et discute des problématiques spécifiques aux ouvrages en enrochement.

Les méthodes de construction et les pratiques locales peuvent être dictées par les impacts environnementaux et sociaux, affectant ainsi fortement le coût de l'ouvrage. Par exemple, le stockage des enrochements peut être réglementé, le transport des matériaux par la route peut être interdit ou il peut être nécessaire d'empêcher les pertes de fines dans l'air ou dans l'eau pendant les travaux.

Les considérations environnementales incluent aussi une utilisation pérenne des ressources en matériaux, ce qui nécessite :

- une utilisation efficace des matériaux;
- la minimisation des déchets;
- le recyclage des déchets.

Ces facteurs peuvent être critiques à la conception : il peut être nécessaire soit d'utiliser la production entière de la carrière pour minimiser les déchets et sous-produits, soit d'utiliser des matériaux recyclés, soit de s'assurer que les matériaux pourront être récupérés et réutilisés dans le futur. Les aspects sociaux, tels que l'hygiène et la sécurité des travailleurs, et la consultation des parties prenantes sont aussi importants. Ces problématiques sont discutées sommairement à la Section 2.6.

Les aspects environnementaux et sociaux doivent être considérés pour tout le cycle de vie de l'ouvrage – y compris en service, en maintenance et fin de vie – pas seulement pour sa conception.

Les Sections 2.5 et 2.6 donnent plus de détails sur les considérations environnementales et sociales.

2.3 CONSIDÉRATIONS TECHNIQUES

Cette section permet à l'utilisateur de comprendre comment les ouvrages en enrochement fonctionnent et également comment les concevoir et les construire efficacement. L'information présentée ici est valable pour tout type d'ouvrages en enrochement. Le lecteur doit se référer aux Chapitres 6, 7 et 8 pour plus de détails sur les différents types d'ouvrages et des discussions sur leur conception. En appui à ces chapitres, les outils de conception sont présentés en détail au Chapitre 5.

2.3.1 Les structures en enrochement et leurs réponses

Cette section décrit les principes généraux des structures en enrochement et leurs réponses aux sollicitations.

À la Figure 2.2, les réponses hydrauliques et structurelles d'enrochement de carapace sont schématisées. Les méthodes de dimensionnement basées sur ces réponses sont présentées au Chapitre 5.

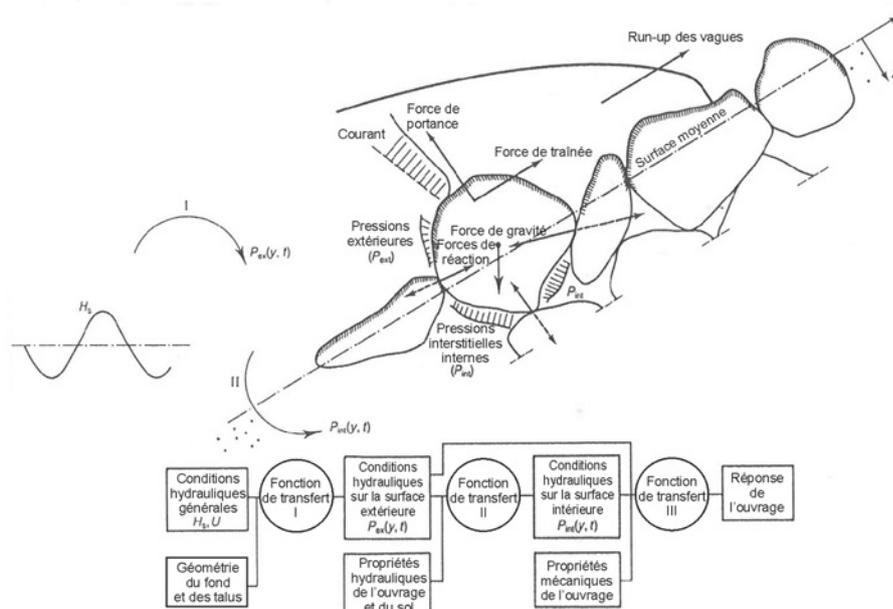


Figure 2.2 Réponse aux actions hydrauliques (houle) de l'enrochement d'une carapace

Un éventail de scénarios doit être considéré pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques, incluant ceux liés au fonctionnement normal de l'ouvrage en service et aussi aux situations extrêmes ou accidentelles. Des dégradations ou même des ruptures de l'ouvrage ou de ses composantes peuvent se produire, résultat des chargements induits par ces situations.

La rupture survient lorsque la réponse excède une valeur de la performance liée aux exigences fonctionnelles des ouvrages. La rupture est une réponse à un chargement défini (la charge de rupture) pour une situation de dimensionnement donnée. En général, les mécanismes de rupture sont dénommés par référence aux déplacements ou aux déformations qu'ils engendrent. La rupture est donc caractérisée par une augmentation importante de la réponse générée par une augmentation mineure des actions. Les principaux mécanismes de rupture des ouvrages en enrochement et leur chargement correspondant sont présentés à la Figure 2.3.

Tous les modes de rupture indiqués à la Figure 2.3 doivent être considérés à la conception des ouvrages en enrochement, bien que leur pertinence varie suivant l'ouvrage, la localisation et les scénarios de dimensionnement. Certains modes de rupture voire leur répétition peuvent être acceptables jusqu'à une certaine limite pendant la phase normale de service, par exemple le franchissement de la houle jusqu'à un certain seuil ou les déplacements de blocs d'enrochement sur un talus dynamiquement stable. D'autres scénarios, comme les chocs de navires ou les actions liées à la glace dans les régions normalement tempérées, sont des événements rares qui peuvent être considérés comme des scénarios de dimensionnement extrêmes. Pour certains modes de rupture, aucune occurrence n'est acceptée, comme la liquéfaction du sol de fondation d'une digue par exemple.

En général, le niveau de dommage de l'ouvrage est très limité pour les scénarios de dimensionnement en service normal, car l'ouvrage a vocation à remplir les exigences fonctionnelles. Pour les événements les plus rares, tels que les situations extrêmes ou accidentelles, un certain niveau de dommage ou des performances inférieures peuvent être acceptés, car il n'est en général pas économique de dimensionner un ouvrage ne présentant aucun dommage dans des conditions extrêmes. Le concepteur doit identifier l'éventail des scénarios de dimensionnement en situation de service normal et extrême et évaluer les dégradations potentielles ou les ruptures associées. Celles-ci peuvent être comparées aux niveaux prédéfinis de performance acceptables, c'est-à-dire dégradation limitée ou significative. Il peut être nécessaire pour le client de confirmer les niveaux de performance acceptables envisagés. Davantage d'informations sur les niveaux acceptables de risques et la sélection des scénarios de dimensionnement sont présentées à la Section 2.3.3. L'utilisation de l'approche exposée ci-dessus est entièrement développée pour les vérifications géotechniques de l'ouvrage à la Section 5.4.

Il est à noter que ces modes de rupture sont souvent étroitement liés : par exemple, un tassement de l'ouvrage peut induire des franchissements plus importants, qui peuvent alors provoquer une instabilité du talus arrière de l'ouvrage. Le Tableau 2.2 présente une synthèse des mécanismes de rupture les plus importants et leurs paramètres caractéristiques ainsi que les interactions entre les modes de ruptures, avec des références à la Figure 2.3. Les mécanismes de rupture sont discutés en détail ci-dessous.

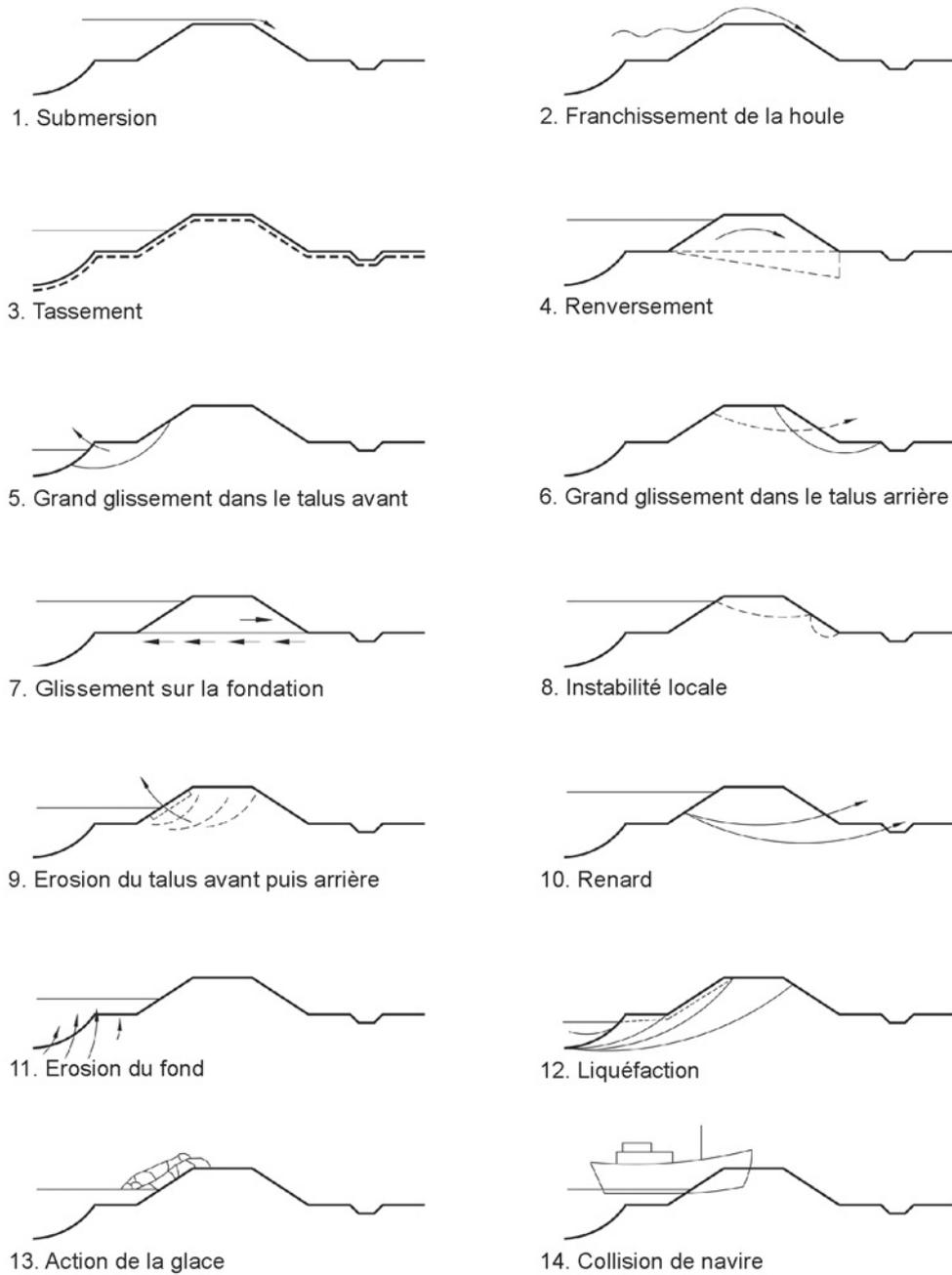


Figure 2.3 Modes de rupture caractéristiques des ouvrages en enrochement

Tableau 2.2 Principaux mécanismes de rupture et leurs paramètres caractéristiques

Mécanisme	Principaux paramètres des actions	Caractéristiques du système	Caractéristiques de la réponse	Réf. à la Figure 2.3
Franchissement	Houle – hauteur, période Niveaux d'eau	Niveau de la crête ; angle du talus, rugosité et dissipation de l'énergie du talus et de la crête	Dégradation de la crête et du talus arrière ; franchissement non désiré	1, 2
Tassement, renversement	Poids – masse volumique des matériaux ; degré de saturation, pression interstitielle ; temps	Compressibilité et perméabilité du sol de la fondation, épaisseur des couches	Abaissement de la crête ; déformations horizontales ; franchissement accru ; accroissement des actions sur l'ouvrage (p. ex. pour un caisson)	3, 4
Instabilité des pentes	Niveaux d'eau – niveau d'eau différentiel Matériaux – poids des matériaux de construction ; pression interstitielle ; angle du talus	Angle de frottement interne des matériaux	Grand glissement dans le talus	5, 6
Glissement de l'ouvrage	Poids de l'ouvrage ou des éléments – poids des matériaux de construction ; pression interstitielle (influencée par la hauteur et la période de la houle) ; angle du talus	Angle de frottement (entre les couches) ; cohésion et perméabilité du sol de fondation, du noyau et des couches	Glissement de l'ouvrage (ou d'une partie importante de l'ouvrage) ; effondrement (peut aussi survenir à la base d'un caisson)	7
Mouvement d'éléments de carapace	Houle – hauteur, période, angle d'incidence Courants – turbulence, vitesses Glace – épaisseur de la couche et intensité de la dérive	Taille et densité des enrochements ; épaisseur et perméabilité de la carapace	Balancement ; glissement ; soulèvement ; roulement ; perte de blocs d'enrochement conduisant à une érosion du talus avant et des instabilités locales (peut conduire à des ruptures de blocs)	8, 9
Migration des éléments des sous-couches	Changement des niveaux d'eau – houle, mouvements d'eau induits par la navigation, autres abaissements des niveaux d'eau, gradients hydrauliques, vitesses d'écoulement interne	Perméabilités et épaisseurs des couches, tailles des éléments	Taux de transport interne de matériaux ; instabilité locale ou déformation	8, 9
Renard	Gradients hydrauliques – vitesses d'écoulement interne	Longueur du chemin d'écoulement, résistances hydrauliques ; taille des éléments	Taux de transport interne de matériaux	10
Érosion du fond	Houle – hauteur, période Courants – vitesses, turbulence	Taille des sédiments, pente de l'ouvrage ; perméabilité de l'ouvrage	Affouillement du fond au droit de l'ouvrage	11
Liquéfaction	Houle – hauteur et période Séismes – accélération, fréquence, nombre de cycles de chargement, pressions interstitielles, amplitude (relative) de la contrainte de cisaillement	Perméabilité, compacité, épaisseurs des couches, angles de frottement	Déformation sévère de l'ouvrage ; effondrement	12

Franchissement

Des combinaisons de houles et de niveaux d'eau ou des niveaux d'eau extrêmes seuls peuvent conduire à un franchissement en crête de l'ouvrage. Même si des petits volumes de franchissement peuvent être acceptables, des volumes plus importants peuvent endommager la crête ou le talus arrière de l'ouvrage voire inonder les zones situées à l'arrière. Ceci peut être considéré comme étant une rupture de l'ouvrage vis-à-vis des exigences de service. La quantité acceptable de franchissement dépend de la crête de l'ouvrage, en particulier de sa robustesse et de sa capacité à supporter des écoulements à fortes vitesses.

Tassement

Le poids d'un ouvrage produit une action supplémentaire sur le sol de fondation, qui peut se compacter, soit instantanément soit progressivement pour les couches compressibles peu perméables. Une autre conséquence peut être l'effondrement de cavités souterraines. De plus, l'ouvrage lui-même peut se tasser pendant la construction ou en début de service ; le tassement peut atteindre 5 à 10 % de la hauteur de l'ouvrage pour une digue à talus.

Ce processus entraîne un abaissement du niveau de la crête, réduisant l'efficacité de l'ouvrage vis-à-vis du franchissement lors de hauts niveaux d'eau et/ou de houles importantes. Les tassements différentiels engendrent des surfaces irrégulières, ce qui peut augmenter l'occurrence de mouvements de blocs d'enrochement. Les tassements différentiels peuvent aussi conduire à soulever l'élément de crête. Cependant, pour les ouvrages immergés, les tassements peuvent augmenter la stabilité de la carapace car l'ouvrage descend et donc est moins sollicité par les actions hydrauliques.

Instabilité des pentes

Un frottement interne faible ou décroissant dans un ouvrage en enrochement peut générer une rupture par grand glissement. Lorsque l'angle du talus de l'ouvrage est proche de l'angle de frottement, des petites variations des actions peuvent induire une instabilité de la pente. L'érosion du fond devant l'ouvrage peut aussi conduire à une instabilité du talus si l'affouillement endommage ou sape la butée de pied du talus.

L'instabilité peut être également provoquée par la houle ou des variations rapides de niveau d'eau. Par exemple, pendant la marée descendante, si le niveau d'eau dans l'ouvrage descend moins vite que la marée, l'ouvrage est soumis à des actions plus importantes. Le franchissement peut contribuer à une instabilité de pente du talus arrière à cause des actions additionnelles en crête.

Glissement de (ou d'une partie de) l'ouvrage

La stabilité d'un talus en enrochement est contrôlée par l'angle du talus, la masse volumique des blocs, les pressions interstitielles occasionnées par les différences de niveaux d'eau et le mouvement des vagues, le frottement interne et l'imbrication des blocs. D'autres effets sont importants comme les accélérations horizontales qui se produisent pendant des séismes ou l'impact d'une vague, par exemple. Le glissement est davantage susceptible de se produire à l'interface entre différents matériaux, par exemple entre la carapace et la sous-couche, car le frottement y est localement réduit, ou bien lorsque d'autres types de matériaux sont introduits, comme des géotextiles ou des membranes.

Le sous-sol joue un rôle important de support de l'ouvrage, ce qui peut conduire à des pressions interstitielles excessives dans l'ouvrage et sa fondation. La liquéfaction de couches fines en dessous de l'ouvrage en enrochement est importante pour la stabilité de la butée de pied et la tenue du talus. Un excès des pressions interstitielles doit être considéré lors du calcul de la stabilité du talus, par exemple quand le niveau d'eau descend plus rapidement que le niveau de la nappe, ce qui est courant dans le cas d'ouvrages exposés à la marée.

Les ouvrages en crête – généralement des murs en béton – peuvent se déplacer, typiquement en glissant sous l'action de la houle. Par conséquent, un frottement adéquat entre l'ouvrage et les enrochements sous-jacents est critique pour la stabilité au glissement.

Mouvements des blocs d'enrochement de la carapace

La houle et les courants déterminent les forces de soulèvement et de traînée agissant sur un bloc d'enrochement de la carapace. Les forces inertielles sont déterminées par les caractéristiques de l'enrochement. Le poids de l'enrochement et les forces de frottement et d'imbrication inter-bloc sont des actions stabilisantes.

La perte d'équilibre dynamique de toutes ces forces induit un mouvement d'enrochements. Les déplacements sont généralement associés aux faces exposées (côté mer ou côté rivière) des ouvrages mais peuvent aussi se produire sur la face arrière de certains ouvrages, tels que les musoirs des digues, des épis à cause d'un franchissement excessif. Ces réponses peuvent avoir été acceptées lors du dimensionnement, mais il est nécessaire d'éviter qu'elles soient trop importantes au risque d'entraîner d'autres dégradations ou ruptures telles que des dommages à la couche filtre.

À long terme, les matériaux de l'ouvrage peuvent devenir sujets aux détériorations. Cela peut se traduire par une dégradation de la roche, les blocs s'arrondissant et leur imbrication diminuant. Des ruptures d'enrochements peuvent se produire sous l'action de la houle, ce qui peut localement réduire l'imbrication de la carapace ou réduire la masse moyenne de l'enrochement et augmenter la probabilité de rupture de la carapace.

Dans certaines circonstances, particulièrement lorsque des blocométries étendues de petits enrochements sont utilisées, telles que les rip-rap, un transport longitudinal de blocs de carapace peut avoir lieu quand l'ouvrage est orienté suivant la direction de la houle.

Migration des sous-couches

Un écoulement interne peut s'établir à cause d'une différence de niveau d'eau ou de pressions interstitielles locales excessives. Lorsqu'un gradient hydraulique critique est atteint, associé à des vitesses d'écoulement élevées, les éléments fins sont transportés depuis la couche interne de l'ouvrage au travers des éléments plus gros des couches supérieures. Généralement, ces éléments fins passent facilement à travers la carapace, conduisant à une perte de matériau des couches inférieures (filtres et sous-couches) et/ou du noyau, ce qui peut finalement créer des tassements locaux.

Renard

Des chenaux d'écoulement préférentiel peuvent se créer dans le squelette granulaire à cause des migrations d'éléments fins hors de l'ouvrage. Ces courts chenaux peuvent s'interconnecter et permettre ainsi une érosion interne progressive, provoquant éventuellement l'effondrement de l'ouvrage. Ce phénomène est davantage susceptible de se produire aux interfaces structurales, telles que les transitions entre des matériaux perméables et des matériaux moins perméables, ou au contact entre des matériaux granulaires lâches et des matériaux granulaires compactés.

Érosion du fond

La houle et les courants peuvent mettre en mouvement les sédiments. L'interaction avec l'ouvrage (réflexion de la houle, génération de turbulence) peut conduire à un affouillement du fond ou de la plage directement au droit de l'ouvrage, avec pour conséquence potentielle la sape du pied de l'ouvrage.

Liquéfaction

Les actions cycliques peuvent générer des pressions interstitielles excessives lorsque la capacité de dispersion de l'augmentation des pressions interstitielles est faible. La liquéfaction fait référence à des matériaux granulaires fins où les pressions interstitielles induites sont si élevées que les contacts intergranulaires sont perdus. Le milieu dans son ensemble (squelette solide et eau) perd sa résistance au cisaillement et se comporte alors comme un fluide épais. Dans ces circonstances, toute action de cisaillement causera une rupture par glissement ou une instabilité.

2.3.2 La conception de l'ouvrage

2.3.2.1 Les éléments des ouvrages

Cette section montre comment un ouvrage est conçu et construit pour s'adapter et résister aux modes de rupture discutés à la Section 2.3.1.

Un ouvrage comprend différents éléments, chacun ayant une fonction critique associée à la performance de l'ensemble de l'ouvrage et un rôle particulier au sein de l'ouvrage. Les éléments les plus critiques d'un ouvrage en enrochement sont généralement une carapace (qui doit être stable), une fondation (solide pour minimiser les tassements), une protection de pied (pour éviter l'affouillement) et une crête (pour protéger efficacement l'ouvrage). Les éléments et leurs importances relatives diffèrent suivant le type d'ouvrages en enrochement considéré. Ceci est décrit plus en détail aux Chapitres 6, 7 et 8, qui couvrent respectivement les ouvrages maritimes, les ouvrages de fermeture et les ouvrages en canal ou rivière. Pour tous les ouvrages, il est nécessaire de comprendre la fonction de chaque élément et son importance dans la conception de l'ensemble. Il est à noter que tous les ouvrages ne nécessitent pas tous les éléments pour fonctionner correctement.

Les fonctions des éléments peuvent être divisées en deux catégories :

- fonctions relatives à la fonction primaire de l'ouvrage ;
- fonctions relatives au maintien de l'intégrité de l'ouvrage.

Ces fonctions sont plus facilement appréciables à l'aide d'un exemple. La Figure 2.4 présente les éléments importants d'une digue à talus, qui sont aussi listés ainsi que leurs fonctions primaires au Tableau 2.3. Sur cet exemple, le noyau de la digue remplit une fonction primaire en empêchant ou réduisant significativement la transmission de la houle, mais il supporte également les couches d'enrochement et assure la stabilité géotechnique de l'ensemble.

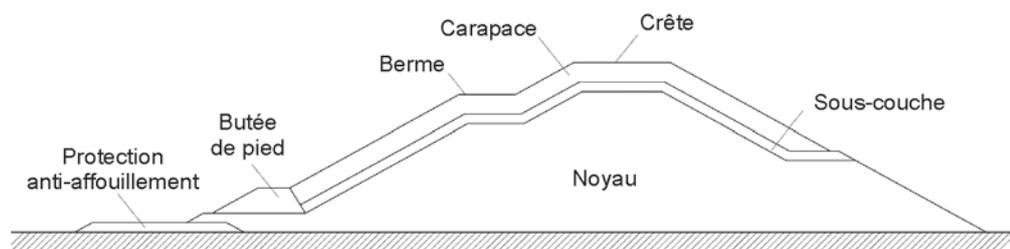


Figure 2.4 Les différents éléments d'un ouvrage en enrochement

Tableau 2.3 Les fonctions des différents éléments d'un ouvrage en enrochement

Éléments	Fonctions
Protection anti-affouillement	<ul style="list-style-type: none"> • Lutte contre l'érosion et l'affouillement du pied
Noyau	<ul style="list-style-type: none"> • Atténuation de la transmission de la houle • Support de la carapace et des sous-couches • Stabilité géotechnique
Berne	<ul style="list-style-type: none"> • Atténuation de l'action de la houle, du run-up et des franchissements • Stabilité géotechnique additionnelle
Butée de pied	<ul style="list-style-type: none"> • Fondation stable pour la carapace
Sous-couche	<ul style="list-style-type: none"> • Filtre • Lutte contre l'érosion du noyau et du sol de fondation • Drainage en surface de l'ouvrage • Nivellement et assise pour le placement de la carapace • Séparation entre la carapace et les matériaux fins et réduction du gradient hydraulique dans le noyau et le sol de fondation
Carapace	<ul style="list-style-type: none"> • Lutte contre l'érosion des sous-couches et du noyau par l'action de la houle • Dissipation de l'énergie de la houle
Crête	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation du franchissement • Accès pour les interventions de maintenance • Fondation pour le couronnement
Mur de couronnement (non montré Figure 2.4)	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation du franchissement • Accès pour les interventions d'entretien • Support des équipements tels que les réseaux
Musoir (non montré Figure 2.4)	<ul style="list-style-type: none"> • Terminaison de l'ouvrage d'une manière stable et signalisation • Diffraction de la houle

2.3.2.2 Les actions appliquées à l'ouvrage

Lors du dimensionnement d'un ouvrage il est important de déterminer quels sont les cas de charges (intensité et durée) appliqués à chaque élément de l'ouvrage. Par exemple, le dimensionnement de la butée de pied ou du tapis anti-affouillement doit tenir compte de plusieurs niveaux d'eau, en combinaison avec différentes houles si approprié, pour établir les conditions critiques de stabilité. Au contraire, pour le dimensionnement de la crête pour des performances de franchissement satisfaisantes, seul le niveau d'eau maximum est généralement important. Un exemple d'actions et des zones où elles s'appliquent sur un ouvrage côtier en zone de marnage est présenté Figure 2.5. Les quatre zones sont définies ainsi :

- Zone I – zone submergée en permanence sous le niveau moyen de basse mer ;
- Zone II – zone entre le niveau moyen de basse mer et celui de pleine mer, subissant une action de la houle continue de faible intensité ;
- Zone III – zone entre le niveau moyen de pleine mer et le niveau d'eau (extrême) de dimensionnement, qui peut être sérieusement attaquée par la houle ; la fréquence de l'attaque de la houle décroît en remontant le talus ;
- Zone IV – zone au-dessus du niveau d'eau de dimensionnement, qui subit le run-up des vagues et leur franchissement.

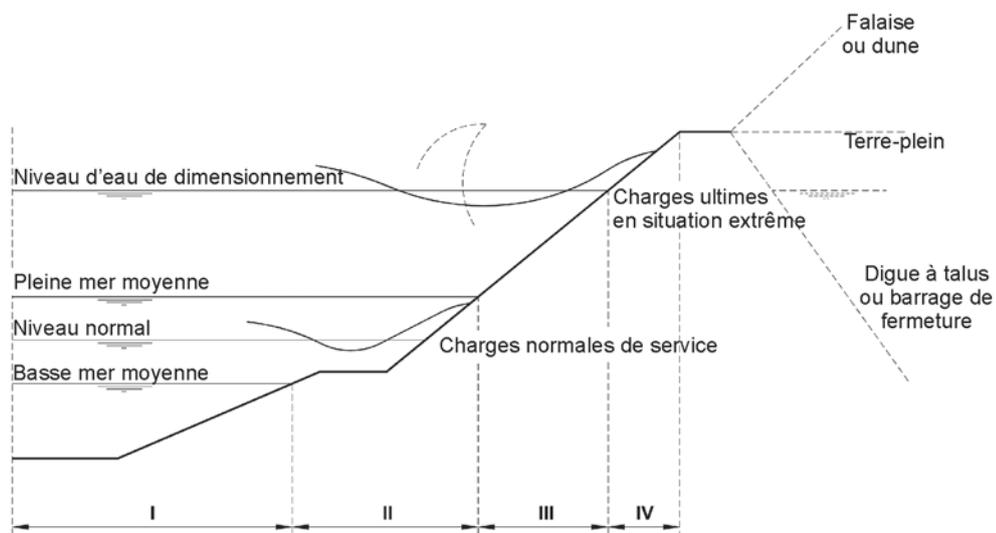


Figure 2.5 Les zones d'exposition pour un ouvrage soumis à la houle

Des zones similaires peuvent être identifiées pour des ouvrages en rivière, dépendantes du niveau d'eau en conditions normales de service ou en conditions extrêmes. Ces zones seront classées par référence aux conditions de l'écoulement et également, si approprié, par référence aux vagues induites par les navires sous différentes conditions de navigation.

Considérer un ouvrage en termes de zones d'exposition permet de s'assurer que le dimensionnement prend en compte les modes de rupture correspondant à chaque zone. En plus de l'identification des matériaux, l'adéquation du dimensionnement de chaque zone avec les méthodes de construction et de maintenance, avec les conséquences environnementales potentielles de la construction et avec les implications financières doit être vérifiée.

Le Chapitre 4 traite plus en détail les actions hydrauliques.

2.3.2.3 L'analyse

La conception d'un ouvrage en enrochement doit comprendre au minimum l'analyse et le dimensionnement des éléments suivants :

- la carapace (talus avant, crête et protection du talus arrière) ;
- la butée de pied (y compris protection anti-affouillement) ;
- les sous-couches et les filtres ;
- le noyau et les fondations (drainage/tassement).

La conception doit traiter la géométrie en plan, les principaux profils, les dispositions particulières aux limites de l'ouvrage et au niveau des transitions dans l'ouvrage et les dispositions empêchant l'érosion par contournement de l'ouvrage.

La Section 3.1.2 présente les fonctions et les propriétés des matériaux qui sont importantes pour la conception, en relation avec les différents éléments de l'ouvrage. Plus de détails sur les exigences de conception de chaque élément pour des types d'ouvrages spécifiques sont donnés aux Chapitres 6, 7 et 8. Le Chapitre 5 fournit des informations sur les outils de dimensionnement à utiliser pour concevoir les éléments listés ci-dessus. Les étapes types de l'analyse de la structure pour différents types d'ouvrages sont listées à l'Encadré 2.2. Il faut cependant noter que la liste n'est pas exhaustive et que d'autres analyses spécifiques au site peuvent être aussi nécessaires.

Encadré 2.2 Les analyses généralement nécessaires pour les ouvrages en enrochement

L'analyse d'un ouvrage en **milieu marin**, exposé à la houle et au marnage, doit généralement inclure les points suivants :

- le run-up et le franchissement de la houle pour définir la coupe et la hauteur de l'ouvrage ;
- la stabilité de la carapace, pour déterminer la taille de l'enrochement à utiliser et les méthodes de pose pour le talus, la butée de pied et la crête ;
- les règles de filtres pour concevoir les sous-couches, etc. ;
- les réflexions de la houle pour estimer l'affouillement potentiel (et, occasionnellement, l'effet sur la navigation ou les performances en termes de réflexion) ;
- la transmission de la houle pour confirmer la hauteur de la crête ;
- l'affouillement potentiel pour dimensionner la butée de pied ;
- la stabilité géotechnique relative aux pressions interstitielles y compris les tassements, les renards, etc. ;
- la stabilité des pentes et du sol de fondation
- la submersion et l'intégrité du talus arrière en cas de brèche
- l'agitation due à la navigation, les cavitations dues aux propulseurs et le phénomène de squat (dans l'environnement immédiat des navires, p. ex. dans un port).

L'analyse d'un ouvrage en **milieu fluvial**, ne subissant pas l'influence de la marée, doit généralement inclure les points suivants :

- les variations des niveaux d'eau pour définir la coupe et la hauteur de l'ouvrage ;
- la stabilité de la carapace, pour déterminer la taille des matériaux à utiliser et leur méthode de placement pour le talus, la butée de pied et, si requis, pour la crête ;
- les règles de filtres pour le dimensionnement des sous-couches, etc. ;
- l'affouillement potentiel pour le dimensionnement de la butée de pied ;
- les pressions interstitielles pour la stabilité géotechnique, la possibilité d'accepter des tassements ;
- la stabilité des pentes locales et globales ;
- l'impact des vagues si pertinent (p. ex. les vagues soulevées par le vent dans un réservoir de crue, ou induites par la navigation dans une voie navigable).

2.3.3 Le dimensionnement de l'ouvrage**2.3.3.1 Le processus de dimensionnement**

Après avoir choisi une ou plusieurs solutions qui répondent aux exigences fonctionnelles (voir Section 2.2.2.2), la phase suivante s'intéresse au dimensionnement et aux détails de l'ouvrage. La Figure 1.1 (Chapitre 1) présente les phases d'un projet en incluant les références aux différents chapitres du guide. La phase de dimensionnement consiste en une série de calculs, voire d'essais sur modèles réduits, pour vérifier ou ajuster si nécessaire tous les détails de l'ouvrage et de sa construction. C'est souvent un processus itératif qui commence par le développement et l'analyse des différentes options envisagées aux études d'avant-projet et qui permet de choisir l'option préférée. Au stade des études de projet, celle-ci sera détaillée, et de nouvelles variantes peuvent émerger lors de la recherche du meilleur équilibre entre le coût total et l'efficacité fonctionnelle. À ce stade, les variantes sont généralement des variations mineures par rapport à l'option choisie.

Lors des études d'avant-projet, différentes variantes doivent être étudiées. Des méthodes simples peuvent être utilisées pour développer ces solutions préliminaires mais une approche approfondie est nécessaire pour les études de projet. Les outils hydrauliques et géotechniques utilisés pour vérifier et ajuster les performances hydrauliques et géotechniques devraient être une combinaison de modèles théoriques et empiriques établis, associée à des modèles numériques voire physiques quand c'est nécessaire, en particulier pour les ouvrages complexes ou les projets majeurs. Ces approches sont détaillées aux Chapitres 4 et 5.

NOTE: les méthodes empiriques ne couvrent pas toujours toute la gamme de situations qui peuvent être rencontrées – le domaine de validité des règles empiriques doit toujours être vérifié. Les modèles physiques peuvent être utiles pour mieux apprécier la stabilité ou les performances d'un ouvrage particulier. De tels modèles peuvent aussi être utiles pour optimiser le dimensionnement de l'ouvrage et identifier des sources d'économies.

L'objectif des calculs et des modèles physiques est d'assurer que l'ouvrage dimensionné répondra aux exigences fonctionnelles pour son environnement et les conditions aux limites spécifiques. Toutes les conditions aux limites disponibles doivent être intégrées, en particulier tous les détails sur les conditions de site. Selon la cadence des études, il se peut que les résultats d'études commandées plus tôt ne soient disponibles qu'au moment des études de projet. Lorsque c'est possible, les méthodes de construction doivent être prises en compte dans les études.

2.3.3.2 Critères techniques de dimensionnement

Comme indiqué à la Section 2.2.2.2, il est généralement bien de définir une série d'exigences fonctionnelles pour l'ouvrage, qui pourront être validées par le maître d'ouvrage ou l'exploitant. Elles serviront de critères de dimensionnement ou de niveaux acceptables de dommage, qui doivent généralement être définis au stade des études de définition. Les critères de dimensionnement et les niveaux acceptables de dommage doivent être mis en relation avec des méthodes de dimensionnement appropriées. Par exemple, le volume maximum acceptable de franchissement doit être relié à une fréquence d'occurrence particulière qui doit être clairement spécifiée.

L'équilibre entre les considérations économiques et la sécurité d'exploitation de l'ouvrage, liée au niveau de performance requis et de risque acceptable, doit aussi être calculé. Ceci doit être exprimé en termes de risque de non-performance ou de risque de dépassement de conditions spécifiées. Le Tableau 2.4 en présente une illustration et donne le risque d'occurrence d'événements pendant la durée de service de l'ouvrage. Par exemple, un ouvrage construit pour 30 ans (c.-à-d. la durée de vie de projet est 30 ans) a 45 % de chance d'être exposé à une houle de période de retour 50 ans et 14 % de chance d'être exposé à une houle de période de retour 200 ans. Dimensionner l'ouvrage pour cette dernière condition risque d'être plus coûteux. En contrepartie, la probabilité que l'ouvrage requiert des réparations pendant sa durée de vie est beaucoup plus faible.

Tableau 2.4 Probabilité (exprimée en pourcentage) qu'un événement de période de retour donnée se produise pendant la durée de vie de projet d'un ouvrage à la houle

Durée de vie de projet (année)	Probabilité de l'événement (%) pour différentes périodes de retour (année)								
	5	10	20	30	50	100	200	500	1 000
1	20	10	5	3	2	1	< 1	< 1	< 1
2	36	19	10	7	4	2	1	< 1	< 1
3	49	27	14	10	6	3	1	< 1	< 1
5	67	41	23	16	10	5	2	1	< 1
7	79	52	30	21	13	7	3	1	1
10	89	65	40	29	18	10	5	2	1
15	96	79	54	40	26	14	7	3	1
20	99	88	64	49	33	18	10	4	2
30	> 99	96	78	64	45	26	14	6	3
50	> 99	99	92	82	64	39	22	9	4
75	> 99	> 99	98	92	78	53	31	14	7
100	> 99	> 99	99	97	87	63	39	18	10
150	> 99	> 99	> 99	99	95	78	53	26	14
200	> 99	> 99	> 99	> 99	98	87	63	33	18
300	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99	95	78	45	26
500	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99	99	87	63	39
1 000	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99	99	86	63

Le concepteur doit identifier et calculer les réponses pour une gamme d'événements, incluant des conditions au-dessus et au-dessous du niveau nominal de dimensionnement ; il ne doit pas seulement s'appuyer sur un « événement de dimensionnement » unique. Ceci fournit les données nécessaires pour une analyse de sensibilité et/ou une analyse du risque et une estimation du coût global sur le cycle de vie de l'ouvrage. Pour une évaluation cohérente, il est suggéré, comme point de départ et à titre indicatif, que les réponses soient calculées pour des événements de périodes de retour données par le Tableau 2.5.

Tableau 2.5 Événements principaux à considérer pour l'évaluation de l'ouvrage et de sa performance

Sujet de l'évaluation	Fréquence de l'événement et période de retour (années)				
	Fréquent	Probable	Occasionnel	Peu probable	Improbable
Dimensionnement d'un ouvrage permanent (durée de vie 30-100 ans)	0.1	1	10	100	1 000
	D'autres périodes de retour peuvent être choisies (p. ex. 30 ans), notamment pour optimiser l'ouvrage				
Dimensionnement d'une phase temporaire pendant la construction (durée : quelques mois ou années)	0.01	0.1	1	10	100

2.3.3.3 Les approches de dimensionnement

Une conception technique saine est essentielle pour s'assurer que le niveau de stabilité et de protection de chaque partie de l'ouvrage est conforme aux prescriptions. Les risques principaux sont soit un sous-dimensionnement, conduisant à une rupture potentielle, ou un surdimensionnement, conduisant à une sécurité certaine mais aussi à un ouvrage probablement plus coûteux et plus efficace que nécessaire. La probabilité qu'une de ces deux situations se produit dépend en quelque sorte de l'approche de dimensionnement utilisée.

Les approches de dimensionnement sont de trois types :

- **déterministe** – des valeurs caractéristiques uniques sont utilisées pour tous les paramètres de l'ouvrage et les autres données d'entrée des modèles, donnant une seule valeur comme résultat, et donc ne prenant pas en compte les incertitudes dans le résultat ;
- **déterministe couplée à une analyse de sensibilité** – la méthode précédente est utilisée avec une variation des données d'entrée pour estimer la sensibilité des résultats ;
- **probabiliste** – les données d'entrée sont décrites par leur distribution de probabilités, donnant un résultat représenté par sa distribution de probabilités.

Traditionnellement les dimensionnements ont été déterministes, généralement avec une analyse de sensibilité pour conforter le dimensionnement choisi. Dans le passé, il y a eu très peu d'applications complètes des approches probabilistes. Ceci est une conséquence de trois facteurs :

1. Les données existantes sur les mécanismes de rupture progressifs ont été rares à cause du manque de problèmes rencontrés dans le passé.
2. Les modélisations des réponses structurelles (p. ex. les équations de dimensionnement) sont largement déterministes, parce qu'elles ont été développées à partir de critères de rupture.
3. Il y a une méfiance de la part des concepteurs en de tels résultats et un désir de s'assurer que la conception est robuste, procurant une marge de sécurité confortable.

Alors que les deux premiers points limitent l'application de certaines méthodes analytiques, le dernier point provient du manque de connaissance actuel des risques associés au dimensionnement.

L'hypothèse que l'ouvrage reste intact, procurant le même niveau de protection pendant toute sa durée de service, peut aussi être faite lors du dimensionnement. Dans la plupart des cas ceci n'est pas réaliste : en général, à mesure que l'ouvrage vieillit, la probabilité de rupture augmente. De plus, les incertitudes sur les performances d'un ouvrage vieillissant sont inévitablement plus élevées que celles pour un ouvrage neuf. Une approche de dimensionnement basée sur le risque permet des changements dans la probabilité de rupture et tient compte des incertitudes plutôt que de supposer que les données et les méthodes de dimensionnement ou d'estimation sont connues précisément. Cette approche peut être limitée par les points 1 et 2 ci-dessus, mais ne nécessite pas nécessairement une analyse complexe ; elle peut simplement s'appuyer sur une estimation rationnelle des ruptures potentielles en employant un jugement technique. Une approche alternative, qui permet de s'affranchir des trois points, est d'estimer la sensibilité de la rupture à la variation de différents paramètres et d'incorporer ceci dans le dimensionnement. Pour ce faire, la courbe de fragilité qui décrit les performances de l'ouvrage (voir Encadré 2.3) est un outil utile.

Lors du dimensionnement, un éventail de scénarios doit être identifié pour évaluation, en tenant compte des cas de charges, du risque de dégradation et des modes et mécanismes de rupture associés. Par exemple, dans le dimensionnement des ouvrages de défense contre les inondations, il est courant d'inclure au moins un scénario avec une brèche et un scénario avec franchissement ou surverse sans brèche. Il peut être utile d'organiser les mécanismes de ruptures possibles sous la forme d'« arbres de défaillance » ou de « chaînes d'événements ». Lorsque plusieurs mécanismes peuvent conduire à la rupture, ceux-ci doivent être analysés séparément pour établir leur probabilité d'occurrence et leur importance relative. Si nécessaire, ils doivent être combinés pour déterminer la probabilité globale de rupture ; la « résistance » d'un ouvrage est associée au mécanisme de rupture le plus fragile.

Une attention particulière doit être portée aux ouvrages non usuels et aux particularités pour lesquels les mécanismes classiques de rupture peuvent ne pas s'appliquer. La question à se poser est « quel mécanisme ou séquence d'événements peut conduire à des désordres ou à une rupture ? ».

Plus de détails sur les méthodes de dimensionnement probabilistes peuvent être trouvés dans Vrijling (2001), Schiereck (2001), Mockett et Simm (2002), Oumeraci *et al.* (2001), van Gelder (2000). Voir également le site internet du Joint Committee on Structural Safety, www.jcss.ethz.ch

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Encadré 2.3 Courbe de fragilité

Les calculs de la réponse structurelle aux actions induites par des événements de période de retour donnée (voir Tableau 2.5) permettent d'obtenir la probabilité de rupture pour cet événement. La rupture peut être décrite par une situation pour laquelle la fonction de sécurité, Z , devient négative, lorsque les équations ou modèles de dimensionnement sont exprimés sous la forme générale suivante :

$$Z(\text{sécurité}) = R(\text{résistance}) - S(\text{action}) \quad (2.1)$$

où R représente la résistance caractéristique de l'ouvrage et S représente la valeur caractéristique des actions.

Une simulation de Monte Carlo basée sur la fonction de sécurité définie à l'Équation 2.1 peut être utilisée pour déterminer la probabilité de rupture. Les valeurs de la probabilité de rupture (ou la probabilité que Z soit négatif) peuvent être exprimées sous forme d'une courbe de fragilité. Une courbe de fragilité (voir l'exemple de la Figure 2.6) exprime la probabilité d'une rupture suivant le mode D_i , $P(D_i|x)$, dépendante des conditions de chargement données, x .

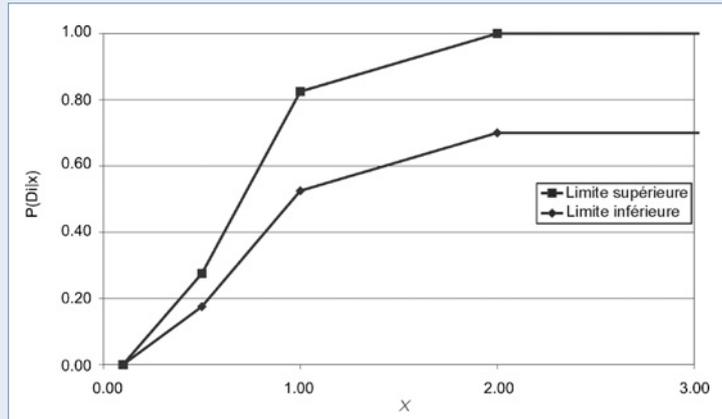


Figure 2.6 Exemple de courbe de fragilité

Pour identifier quelles réponses doivent être calculées, il est nécessaire de se reporter aux objectifs du dimensionnement et aux modèles décrits au Chapitre 5. Généralement, la probabilité de la réponse hydraulique pertinente (p. ex. le taux maximum de franchissement voulu) et la réponse structurelle pertinente devront être calculées. La réponse hydraulique peut être à calculer en tenant compte de la réponse structurelle se produisant (p. ex. abaissement de la crête). La courbe de fragilité peut être convertie en *courbe de performance* pour laquelle l'axe des abscisses est la probabilité d'un événement de chargement et l'axe des ordonnées la probabilité de rupture, $P(D_i|x)$ (voir Figure 2.7). L'aire en dessous de cette courbe est la probabilité annuelle de rupture, un nombre très utile, qui peut être incorporé directement dans l'analyse du coût global.

Davantage d'informations sur l'utilisation des courbes de fragilité sont données dans Dawson et Hall (2001) et Buijs *et al.* (2005).

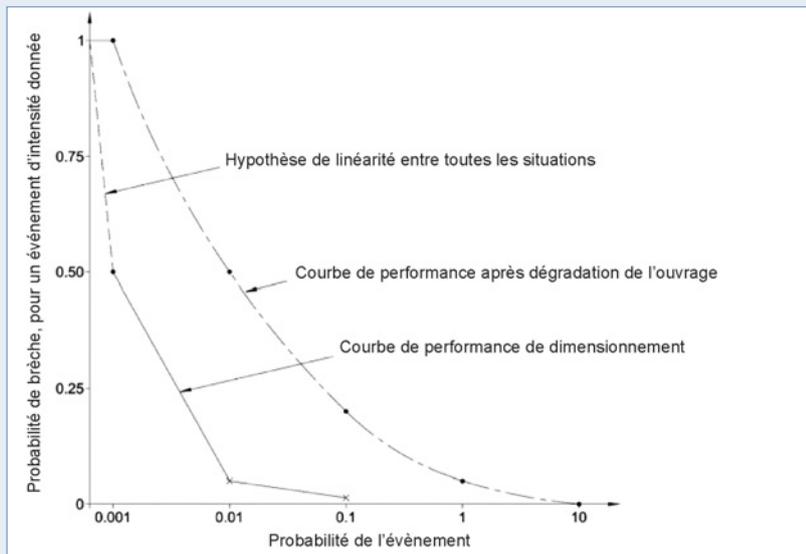


Figure 2.7 Exemple d'une courbe de performance d'un ouvrage en enrochement

2.4 CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUES

Il est essentiel d'avoir une bonne compréhension du coût de l'ouvrage au cours de son cycle de vie. Diverses méthodes et exigences existent pour déterminer les coûts, souvent spécifiques à un pays ou à la fonction de l'ouvrage.

2.4.1 Coût sur le cycle de vie

Comme pour tout projet, un principe fondamental dans la conception des ouvrages hydrauliques en enrochement est la minimisation de son coût total dans les limites des exigences fonctionnelles et des conditions aux limites. Le coût sur le cycle de vie tient compte du coût total de l'ouvrage durant sa vie depuis sa construction jusqu'à son éventuel démantèlement ou remplacement. Il inclut le coût de la maintenance et de l'exploitation de l'ouvrage. Il peut également inclure la réutilisation éventuelle des matériaux dans le futur.

Le coût sur le cycle de vie peut être utilisé comme aide aux décisions prises lors du processus de financement. Par exemple, il peut être utilisé pour identifier si un investissement initial plus important est justifié par rapport à un coût initial moindre mais avec un coût de fonctionnement et de maintenance supérieur pendant l'exploitation de l'ouvrage. Dans cette approche, les coûts sont souvent exprimés en termes de *valeur actualisée* (la valeur actualisée étant la valeur capitalisée des futurs coûts, pertes et bénéfices) en utilisant la technique économique dite de *l'actualisation*, voir Équation 2.2.

$$\text{Valeur actualisée ou valeur capitalisée} = \sum_{t=1}^N \left\{ \frac{C_t}{(1+r)^t} \right\} \quad (2.2)$$

où

N = durée de vie (années);

t = temps (années);

C_t = coût des dépenses à l'année t (€);

r = intérêt du marché diminué du taux d'inflation (-).

Ceci permet le calcul du coût total de l'ouvrage sur son cycle de vie, basé sur l'investissement et le coût actualisé moyen annuel de la maintenance (inspection, évaluation et réparation), avec également les coûts actualisés de toute réparation importante, réhabilitation ou travaux de démolition prévus pendant la vie de service de l'ouvrage.

L'optimum économique peut être un investissement réduit nécessitant des dépenses de maintenance plus fréquentes. Cependant, des solutions nécessitant un haut niveau de maintenance peuvent être irréalistes pour des raisons pratiques ou environnementales qui doivent être considérées en même temps que l'aspect économique. De plus, l'obtention de fonds pour la maintenance peut être difficile. Certains maîtres d'ouvrage ou certaines autorités publiques peuvent faire le choix de financer les projets avec un apport initial important, pour assurer une meilleure sécurité et réduire la maintenance pendant la vie de l'ouvrage. Il peut aussi y avoir des incertitudes importantes dans l'estimation des coûts de maintenance à cause du grand nombre de variables impliquées. Cette incertitude peut également influencer la décision finale. Pour les développements commerciaux, les mouvements de trésorerie peuvent être importants. Ainsi, un ouvrage construit rapidement avec un investissement réduit mais un coût de maintenance élevé peut être plus attractif car il génère des bénéfices plus tôt, qui peuvent financer les futures opérations de maintenance.

En plus des coûts précédemment cités, il peut être nécessaire de tenir compte du coût des intérêts induits par le financement du projet. L'équilibre relatif des composants du coût n'est pas seulement spécifique au projet ou au site mais est aussi affecté par les conditions économiques des pays de construction, d'entretien ou de provenance de l'ingénierie, des matériaux de production, et des ressources financières.

Pour plus d'information sur le coût du cycle de vie, voir Mockett et Simm (2002) et AIPCN (2001).

2.4.2 Les éléments de coût

2.4.2.1 Les catégories des coûts

Les coûts d'un ouvrage en enrochement se déclinent généralement suivant les catégories ci-dessous :

- approvisionnement en matériaux ;
- construction ;
- maintenance et réparation ;
- démolition.

Ces catégories sont discutées en détail aux Sections 2.4.4 à 2.4.7. De plus, il faut aussi tenir compte des coûts associés aux reconnaissances et aux études conduisant au dimensionnement détaillé et à la préparation des documents contractuels. Ces coûts ne constituent généralement pas plus de 5 à 10 % du montant global de l'ouvrage. Un investissement additionnel dans les premières phases d'études est souvent relativement peu coûteux, peut réduire les incertitudes et générer une économie importante pour le projet dans son ensemble. Par exemple, le coût des études sur un modèle numérique détaillé de propagation de la houle ou des essais sur modèles physiques est souvent équivalent à la construction de seulement 2 à 3 m de digue. Ceci illustre l'avantage de conduire les études initiales à un niveau approprié pour optimiser le dimensionnement. Des arguments similaires peuvent s'appliquer à d'autres aspects du processus de conception.

2.4.2.2 Les coûts fixes et variables

Les coûts d'un projet peuvent être séparés en coûts fixes et coûts variables. Les coûts variables sont liés au temps passé ou à la quantité de matériaux manipulés. Des exemples de coûts fixes et variables sont présentés à l'Encadré 2.4, alors que plus de détails en relation avec la construction sont présentés à la Section 2.4.5.

Encadré 2.4 Exemples de coûts fixes et variables pour des ouvrages en enrochement

Coûts fixes :

- Ouverture/fermeture d'une carrière dédiée (si nécessaire ou bénéfique)
- Amenée/repli des équipements flottants ou terrestres
- Établissement/démolition des accès
- Essais et planches d'essais pour identifier les propriétés générales des matériaux et les caractéristiques du site

Coûts variables (dépendant de la durée) :

- Entretien des activités en carrière
- Entretien des équipements flottants ou terrestres
- Immobilisation des équipements (p. ex. pour intempéries lorsque la météo ou les conditions hydrauliques empêchent la progression des travaux)
- Entretien des accès
- Inspections de la carrière par la maîtrise d'œuvre
- Supervision et tâches administratives
- Entretien des équipements de levé et suivi (p. ex. houlographe)

Coûts variables (dépendant des quantités) :

- Reconnaissances du site incluant les mesures géotechniques, de houle etc.
- Extraction (et ré-extraction)
- Extraction annexe (p. ex. reprofilage d'un talus de carrière)
- Remplissage (p. ex. par des enrochements placés en vrac ou individuellement)
- Remplissage annexe (p. ex. profilage d'un talus, mise en place d'un géotextile)
- Essais (pour confirmer l'adéquation des matériaux)

Généralement, l'estimation des coûts doit se concentrer sur :

- les plus grandes contributions au coût total ;
- les éléments qui sont sujets à des incertitudes importantes ou qui ont un impact majeur sur le projet.

Par exemple, les coûts dépendant du temps peuvent être importants lorsqu'il y a un risque que le planning ne soit pas tenu. Les conséquences économiques de cadences de production supérieures ou inférieures doivent être considérées lorsque le planning et les recettes sont critiques pour le maître d'ouvrage. Dans cette situation, une réduction de la durée du chantier en contrepartie d'un coût de construction supérieur peut être plus économique pour le maître d'ouvrage.

2.4.3 Estimation du coût

Lors du processus de conception, l'optimisation du coût est recherchée à différents niveaux et différentes phases des études (voir Tableau 2.6).

L'élaboration du programme et les études de définition conduisent à des solutions alternatives dont les coûts doivent être déterminés. Parmi les choix qui en découlent, une solution sera probablement la base des études de projet. Tout doit donc être mis en œuvre pour produire des solutions aussi réalistes que possibles.

À cause des incertitudes inhérentes aux estimations initiales, il est souvent souhaitable de retenir plus d'une solution, éliminant les options à mesure que l'estimation s'affine. Les coûts des études et de la construction (production, transport, placement) sont estimés plus précisément que les coûts de maintenance et de réparation car ces derniers sont plus incertains (voir Section 2.4.1). En évaluant les options, leur coût minimal doit être considéré, en y ajoutant les risques potentiels liés aux erreurs dans les estimations à cette étape et à la précision des diverses estimations. À ce niveau, il est souvent souhaitable de privilégier un coût d'investissement légèrement supérieur et un coût de maintenance inférieur.

Au début des études, les estimations basées sur des prix historiques sont suffisantes pour définir un coût approximatif. Une approche rudimentaire consiste à prendre les quantités principales, de les estimer séparément et d'ajouter une marge pour couvrir le coût des aspects mineurs restants. Le problème avec cette approche est que les prix peuvent être sommaires ou spécifiques au site et donc difficiles à actualiser ou à adapter. Une meilleure précision peut être obtenue en utilisant des techniques analytiques d'estimation dès que les caractéristiques principales du projet sont connues.

Une estimation analytique peut être considérée comme un modèle mathématique de l'aménagement qui donne un prix en résultat. Ceci implique d'étudier toutes les opérations nécessaires à la construction, de répertorier le besoin en main-d'œuvre, équipements et matériaux et leur durée de mobilisation, puis de leur appliquer des prix actualisés et, enfin, d'ajouter les coûts de toutes ces opérations. Des logiciels existent pour réaliser cette analyse. Cette technique générera également un programme de construction réaliste. Il sera aussi nécessaire de tenir compte des coûts de mobilisation, de démobilisation et des travaux temporaires essentiels, des coûts de fonctionnement, des marges de profit et le risque ou les imprévus.

Pendant la phase d'appel d'offres, les différentes entreprises de travaux vont utiliser le même processus d'estimation du coût, en tenant compte de leur propre expérience, en optimisant l'utilisation d'équipements spécialisés qu'ils possèdent ou qu'ils peuvent mobiliser et en incluant les marges pour la supervision, les frais généraux, les marges de profit et le risque pour arriver au montant total de leur offre. Différentes formes de prix peuvent être adoptées, telles qu'un prix unitaire appliqué sur des quantités mises en œuvre ou un forfait pour une activité planifiée. Des primes pour une exécution rapide et le respect du budget peuvent aussi être convenues entre le maître d'ouvrage et l'entreprise. Ce processus est différent dans le cas d'une carrière dédiée et lorsque la conception est adaptée au gisement en matériau, voir Section 3.9.5.

Le Tableau 2.6 donne plus de détails sur les coûts de chaque phase décrite au-dessus. Il donne une indication sur la précision qui peut être généralement attendue à chaque étape, bien que celle-ci peut varier considérablement suivant les incertitudes associées au type d'ouvrage, à sa localisation et aux informations disponibles.

Tableau 2.6 Estimation des coûts associés à chaque phase des études

Phases	Type de détermination du coût	Bases caractéristiques pour la détermination du prix	Notes/exemples
Phase d'études			
Programme	Estimation sommaire	Données historiques et projets similaires incluant la maintenance à long terme (précision : ± 40 %)	1 digue x prix d'une digue similaire + archive sur le coût d'inspection et de maintenance
Études de définition	Estimation	Coûts classiques ou coûts unitaires approximatifs + coût du cycle de vie (précision : ± 20-40 %)	800 m d'ouvrage en enrochement x taux par mètre linéaire d'un ouvrage de taille de blocs similaire + coûts de maintenance
Études d'avant-projet	Calcul approché	Coûts unitaires spécifiques et quantités de matériaux approchées + coûts administratifs (pour le maître d'œuvre et l'entreprise) et du cycle de vie (précision : ± 10-20 %)	80 000 t d'enrochement x le prix d'une tonne d'enrochement d'un projet similaire dans la région + coûts de maintenance
Études de projet, incluant les détails estimatifs et les spécifications	Estimation technique	Coûts unitaires et quantités + les coûts ci-dessus (précision : ± 5-10 %)	80 000 t d'enrochement x prix par tonne d'enrochement + coûts annexes, des travaux, des contraintes et du cycle de vie
Phase du marché			
Appel d'offres	Budget cible	Idem à ci-dessus moins le coût du cycle de vie	Management du projet, assurances, taxes etc. compris
Élaboration de l'offre	Calcul du soumissionnaire	Estimation analytique basée sur le total des ressources requises pour la construction de l'aménagement	Données des entreprises
Soumission de l'offre	Offre du soumissionnaire	Idem à ci-dessus + profit et risque	Expérience de l'entreprise sur des projets et conditions similaires
Notification	Valeur du contrat	Prix accepté	Budget cible vs prix
Phase de construction			
Préparation des travaux	Budget du projet	Dernières modifications, y compris les suggestions de l'entreprise	Changement d'options, variations des coûts
Exécution	Coût du projet	Planification et contrôle d'exécution	Management du projet
Exécution	Prix contractuel	Surveillance	Ingénieur à demeure
Phase de maintenance (en exploitation)			
Inspections de routine	Surveillance planifiée	Comme identifié dans le coût global du cycle de vie	Inspections annuelles pour les désordres, usures et dégradations courants
Maintenance de routine	Maintenance planifiée ou modifications	Comme identifié dans le coût global du cycle de vie modifié par les exigences actuelles sur l'ouvrage	Les retours peuvent modifier le programme de surveillance et les coûts des futures maintenances
Inspections critiques	Requises après tout événement majeur qui pourrait causer des dommages	Réparations critiques – Celles-ci devraient avoir été prévues dans le coût du cycle de vie modifié par une formule adaptée, basée sur la probabilité et le temps	Des changements importants par rapport au scénario initial peuvent nécessiter des modifications pour limiter les coûts de la future maintenance
Modifications non-prévues	Modifications non-prévues Changement imprévu des conditions d'usage et des conditions de site	Ceci risque de nécessiter une réévaluation à grande échelle, commençant à la phase étude; un facteur important est la détermination de l'étendu de la réutilisation de l'existant	Une diminution des stocks de pêche peut conduire à la transformation d'un port de pêche en un port de plaisance; l'exploitation d'un puits de pétrole offshore peut conduire à une modification pour accueillir les équipements de navires; un effondrement sous-marin ou un changement de la bathymétrie ou du niveau de la mer peuvent altérer le climat de houle

2.4.4 Recherche, production et transport d'enrochement

Une part significative du coût d'un ouvrage en enrochement est associée à la recherche, la production et le transport d'enrochement.

Recherche et production

Un des premiers enjeux est la disponibilité d'enrochement de taille, de quantité, de qualité et de durabilité suffisantes. En effet, la taille maximale d'enrochement pouvant être produit est bornée quelle que soit la carrière. Lorsqu'une carrière locale doit être utilisée, la conception de l'ouvrage doit refléter la taille, la qualité et la quantité des enrochements disponibles, lorsque cela est possible (appelé « conception basée sur la ressource »). Les carrières locales sont souvent préférables parce qu'il peut être difficile d'obtenir des enrochements de taille ou de qualité supérieure d'une autre carrière à cause du transport et des facteurs économiques et environnementaux. Par exemple, plusieurs digues à berme en Islande furent conçues et construites en utilisant au maximum la production des carrières adjacentes au site. La sélection d'un gisement local d'enrochement peut contraindre à utiliser des enrochements de qualité inférieure (moins durable) (voir Section 3.6). La conception et la planification de la maintenance de l'ouvrage doivent en tenir compte (voir Section 10.2) et cet aspect doit être évalué en termes de coût sur le cycle de vie du projet (voir Section 2.4.1). La Section 3.1 donne plus de détails sur la sélection des matériaux appropriés.

Transport

Le transport au site – par exemple par voie d'eau ou par voie terrestre – peut imposer le lieu d'approvisionnement en enrochement. Le choix du mode de transport est influencé par la méthode préférentielle de construction, l'accessibilité (au chantier et à la carrière), les contraintes et coûts environnementaux, en reconnaissant que le coût final est influencé par chacun de ces facteurs. Les lois de la concurrence peuvent être aussi impliquées, par exemple la disponibilité au niveau régional d'un petit nombre de barges servant à tous les projets en cours.

2.4.5 Construction

L'opération la plus coûteuse sur le cycle de vie d'un ouvrage est en général sa construction. Son coût est divisé en trois types de coûts, dont l'importance variera suivant la nature de l'ouvrage, le type de contrat et les équipements utilisés. Ce dernier est important lorsque des équipements flottants sont utilisés pour la construction d'une grande partie de l'ouvrage, d'autant plus que ceux-ci risquent d'être unique. Il y aura donc des problèmes de disponibilité et d'adaptation précise à la tâche. Les coûts peuvent donc être divisés selon les trois catégories suivantes :

1. **Les coûts fixes.** Ceux-ci incluent la mobilisation, la démobilitation et remobilisation des installations et des équipements de chantier; la réalisation et la démolition des éléments du chantier et des ouvrages ou accès temporaires; les assurances, les essais, l'ouverture et la fermeture de carrières dédiées ou le site de fabrication des blocs préfabriqués, la fabrication des moules; les clôtures ou les barrières temporaires pour séparer l'espace public du chantier ou pour des raisons d'hygiène et de sécurité; les protections individuelles des ouvriers, les zones de visite pour le public et les panneaux d'information, les fermetures ou des déviations de routes ou de chemins piétonniers; les relations avec les autorités de pêche, l'installation de lieu de mouillage et d'amarrage et des appontements temporaires; et le nettoyage final du site. De nombreuses entreprises vont inclure des marges pour tenir compte du risque qu'elles doivent anticiper dans le contrat (durée d'immobilisation due aux intempéries, tassements, etc.) et de toute inflation.
2. **Les coûts dépendants de la durée.** Cette catégorie comprend la supervision du chantier et les équipements (particulièrement les équipements qui ne sont pas utilisés tout le temps, mais qui doivent rester constamment sur le chantier tels que les pelles, les grues) et la location des bureaux; le contrôle du public aux interfaces chantier/public, la mise à jour des panneaux d'information et la maintenance des équipements et ouvrages cités au-dessus;

- 3. Les coûts réévaluables.** Ces coûts sont directement reliés à l'avancement des travaux, à la quantité de matériaux utilisés (en tenant compte des transformations et des déchets) et à la main-d'œuvre et aux équipements nécessaires à la fabrication, la manutention, la préparation et la mise en œuvre des matériaux.

Certaines dépenses ne vont pas toujours être classées dans la même catégorie, telles que les plongeurs (qui peuvent être employés pour un coût minimal à la commande), les opérations de forage et d'abattage, les opérations de contrôle qualité, le remplissage et la re-préparation des moules, les coûts liés à des activités partielles ou discontinues, le travail à la marée et phasé. La méthode de chiffrage de ces dépenses dépendra de la sensibilité du coût unitaire aux changements de quantité.

Pour optimiser les coûts des travaux, le concepteur et/ou le maître d'ouvrage doit traiter un certain nombre de sujets. Ceci peut être formulé en une série de questions qui doivent avoir trouvé une réponse claire avant que le dimensionnement et les documents de consultation des entreprises soient finalisés. La liste ci-dessous donne une grande partie des questions associées à un projet important d'un ouvrage maritime ou côtier, incluant le placement d'enrochement naturel ou artificiel :

- est-ce que l'entreprise peut acheminer efficacement les équipements et les matériaux sur le site ? Si non, comme ceci peut être réalisé ?
- est-ce que l'entreprise dispose de suffisamment de place pour ses bureaux, pour le stockage et d'une zone d'abri en cas de mauvais temps ? Si non, où et comment de telles installations peuvent être fournies ?
- est-ce que des installations de production (zone de préfabrication des blocs, carrière etc.) sont nécessaires ? Si oui, où peuvent-elles être situées ?
- est-ce que le planning prévoit suffisamment de temps de préparation pour mettre en place les installations, fabriquer les moules, ouvrir la carrière, faire ou trier les stocks initiaux, et commencer la fabrication à une cadence faible le temps que l'équipe sur chantier se mette en marche ?
- est-ce que des heures ou des phases de travail doivent être mises en place, par exemple pour le travail à la marée ? Si oui, est ce que l'entreprise peut accomplir les travaux dans le temps imparti ? Quelles sont les implications financières, particulièrement si des équipements coûteux, tels que les équipements flottants, ne peuvent pas être utilisés de manière efficace ?
- est-ce que des matériaux locaux peuvent être utilisés ? (vis-à-vis de leur qualité, durabilité, taille et taux d'approvisionnement) ;
- est-ce qu'il y a un avantage à s'assurer que toute la gamme de production de la carrière est utilisée ? Ceci est en général un enjeu pour des carrières dédiées au projet ou pour des carrières locales, qui ne produisent généralement pas les granulométries demandées et qui ont besoin de maintenir leur activité principale ;
- quelle est la masse maximale à placer et à quelle distance ? Est-ce que la portée des équipements peut être réduite en modifiant le dimensionnement ?
- des géotextiles seront-ils mis en place sous l'eau ? Si oui, est-ce que les méthodes de ballastage sont acceptables ?
- les tolérances et profils donnés dans le cahier des charges sont-ils cohérents avec ce qui peut être réalisé en conditions réelles de chantier ?
- le dimensionnement impose-t-il l'utilisation d'équipements flottants ? Est-ce que le dimensionnement peut être modifié pour permettre l'utilisation d'équipements terrestres moins coûteux ?
- de la main-d'œuvre suffisamment qualifiée est-elle disponible localement ? Si non, est-ce que des logements sont disponibles pour la main-d'œuvre importée ? Est-ce qu'un nouveau dimensionnement permettrait d'utiliser la main-d'œuvre locale ?

- le dimensionnement est-il trop complexe ? Peut-il être simplifié pour utiliser moins de blocométries ou de types différents d'encrochements et donc pour accroître l'efficacité des travaux avec une quantité réduite d'équipements ?
- y-a-t-il un équipement clé nécessaire pour les travaux ? Le dimensionnement peut-il être modifié pour accroître sa productivité ?

Les réponses à cette liste doivent permettre de faire le meilleur usage des moyens financiers pour des conditions et des contraintes de site données quel que soit le chantier. Le lecteur doit se référer au Chapitre 9 pour plus de détails sur les problématiques liées à la construction à prendre en compte dans la conception.

L'Encadré 2.5 donne des décompositions caractéristiques des coûts pour différents ouvrages en enrochement.

Encadré 2.5 Exemple des coûts relatifs pour des ouvrages en enrochement

Les cas d'études ci-dessous illustrent comment les coûts peuvent varier suivant que la source d'enrochement est considérée en même temps ou en aval des études hydrauliques et suivant les méthodes de transport. Les coûts sont seulement indicatifs et des facteurs spécifiques au site affecteront les coûts quel que soit le projet.

Cas d'étude 1 : modification de la production d'une carrière de granulats - transport des matériaux par la route (source : J. Bros)

Lors d'un projet d'extension d'un port, une digue d'enclosure fut construite pour contenir les matériaux de remblai issus des dragages. 120 000 t de matériaux furent utilisés pour le noyau et 30 000 t d'enrochement naturel de 1 à 3 t pour la carapace. L'entreprise a pris à sa charge l'exploitation de quatre fronts dans deux carrières produisant des granulats et accédait au chantier par la route. L'excédent de production fut stocké puis utilisé pour la surface de la zone de remblai après que les matériaux de dragage aient été déposés. Les pourcentages relatifs pour la production du noyau et des enrochements et pour leur transport sont donnés à la Figure 2.8.

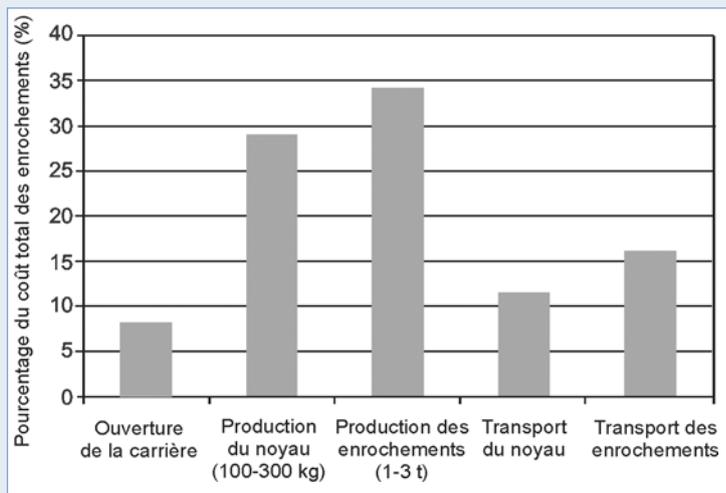


Figure 2.8 Répartition des coûts - cas d'étude 1

Cas d'étude 2 : modification de la conception d'un ouvrage pour utiliser l'ensemble de la production d'une carrière existante - transport des matériaux par voie maritime (source : Foster Yeoman et RJ McLeod)

Pour le développement d'un port situé sur la côte ouest du Royaume-Uni, les quantités en matériaux étaient de 700 000 m³ de matériaux de remblai ou de noyau, dont 550 000 m³ étaient importés et 150 000 m³ étaient obtenus en réutilisant les matériaux du site, 29 500 m³ d'enrochement pour la carapace et 14 250 m³ d'enrochement pour les sous-couches. Les matériaux ont été extraits d'une carrière située à environ 50 km du chantier. L'entreprise a produit un dimensionnement alternatif, moins cher, utilisant l'ensemble des granulométries disponibles dans la carrière. Les enrochements ont été délivrés au site par chargements d'environ 40 000 t à l'aide d'un navire spécialisé auto-déchargeant. La décomposition en pourcentage des principaux coûts de fourniture des matériaux naturels est donnée à la Figure 2.9. Celle-ci inclut les taxes qui ont dû être payées pour l'extraction de granulats naturels (par opposition à l'utilisation de granulats recyclés).

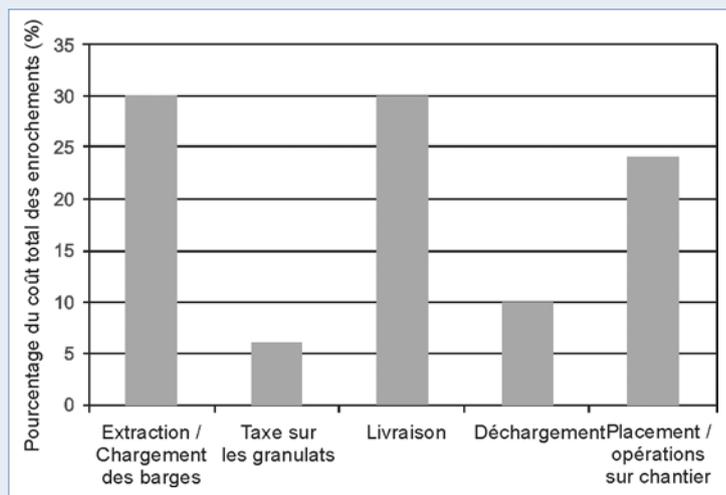


Figure 2.9 Décomposition des coûts – cas d'étude 2

2.4.6 Maintenance et réparation

Pendant la période de service d'un ouvrage, certaines dépenses sont récurrentes, dont les suivantes :

- surveillance et auscultation de l'ouvrage et de l'environnement proche (p. ex. le niveau d'une plage) ;
- évaluation de l'état et des performances ;
- réparation ;
- réhabilitation et remplacement.

Le niveau de complétude, et donc le coût, des opérations ci-dessus dépendent de facteurs comme la fréquence et la sévérité des tempêtes et les désordres accidentels. Leur coût est aussi influencé par les décisions prises lors de la conception de l'ouvrage sur la durée de vie, le niveau de dommage admissible et la fréquence de surveillance (voir Section 2.3.3.2). Une dépense dont la probabilité d'occurrence dans l'année peut être estimée (p. ex. à partir d'une courbe de fragilité – voir Encadré 2.3) peut être incluse comme le produit du montant de la dépense et de sa probabilité d'occurrence. Par exemple, une dépense de 10 000 € avec une probabilité d'occurrence de 10 % pendant un laps de temps de 10 ans (p. ex. entre la 10^e et 20^e année) peut être incorporée à chaque année de cette période comme étant égale à $0.1 \times 10\,000 = 1\,000$ €.

Pour la réhabilitation ou le remplacement d'un ouvrage, les facteurs exposés pour la construction à la Section 2.4.5 s'appliquent, par exemple le coût de l'extraction et de transport des matériaux, des équipements et des accès.

Le Chapitre 10 traite des stratégies et des méthodes de surveillance, d'auscultation, de maintenance et de réparation en détail.

2.4.7 Démolition

Dans certaines circonstances, il pourra être envisagé de mettre un ouvrage hors service et de le démolir. Le coût de cette opération peut inclure :

- les équipements ;
- l'enlèvement des matériaux du site ;
- une mise en décharge ou une réutilisation des matériaux ;
- le traitement des matériaux pollués.

Dans cette situation, ces dépenses doivent être prises en compte à la conception et vont probablement influencer le choix de dimensionnement.

2.5 CONSIDÉRATIONS ENVIRONNEMENTALES

Les ouvrages en enrochement peuvent potentiellement avoir des impacts importants sur l'environnement et ceux-ci doivent être considérés à chaque phase du projet. Cette section met en avant les problématiques environnementales qui apparaissent pendant la planification, la conception ou la construction d'un ouvrage en enrochement. Les problématiques environnementales ne sont pas à évaluer seulement dans la zone de chantier mais aussi sur le site d'extraction et de stockage des matériaux et sur les trajets empreintés lors du transport. Elles s'appliquent aussi lorsque des modifications des conditions de site peuvent provoquer des désordres sur les habitats ou causer des changements d'activité.

Il y a une grande quantité de documents techniques et réglementaires traitant de l'évaluation environnementale d'un projet. Cette section traite des considérations environnementales spécifiques à l'utilisation des enrochements en site aquatique et identifie le type d'information qui peut être utilisé pour l'évaluation environnementale de ces ouvrages. Une vue d'ensemble de l'étude des impacts environnementaux est donnée à la Section 2.5.4. De plus, la Section 3.13.4 traite de l'analyse du risque environnemental associé aux matériaux alternatifs et secondaires.

2.5.1 Utilisation durable de l'enrochement comme matériau de construction

Les matériaux alternatifs devraient être évalués suivant leur performance environnementale plutôt que simplement utilisés parce que préférés a priori. Le rapport Brundtland (WCED, 1987) encourage l'utilisation accrue de matériaux provenant de sources alternatives pour répondre aux besoins de la construction nécessitant des granulats et des enrochements naturels. Ceci inclut les matériaux secondaires, les dérivés et les déchets de l'industrie. Le principe d'industrie de la construction durable nécessite :

- une utilisation efficace des matériaux ;
- une minimisation de la production de déchets ;
- le recyclage des déchets.

Des ouvrages durables en enrochement doivent viser à réduire la consommation d'énergie et de matériaux, le transport et la production de déchets. Pour chaque option de conception, utilisant de l'enrochement naturel ou des matériaux alternatifs, l'extraction, le transport, la mise en œuvre, l'exploitation et le démantèlement doivent être étudiés sur la durée du cycle de vie de l'ouvrage – « du berceau à la tombe ». Des critères portant sur l'énergie, les déchets, les matières premières et la perception humaine doivent être évalués pour classer les options par ordre de préférence. Un outil pour noter les impacts environnementaux des options de conception sur la durée de vie de l'ouvrage est donné par Masters (2001) dans un document sur l'utilisation durable de matériaux neufs et recyclés dans l'ingénierie côtière et fluviale. Les calculs portent sur les quantités de chaque type de matériaux, la distance de transport au site de construction et la durée de service prévue. Ces paramètres sont ensuite liés aux impacts environnementaux prévus, tels que les émissions de gaz à effet de serre, associés à la production et le transport de chaque matériau.

Les matériaux alternatifs aux enrochements naturels et les problématiques associées sont spécifiquement traités à la Section 3.13. Une revue de matériaux alternatifs est donnée dans Brampton *et al.* (2004) et Masters (2001).

2.5.2 Évaluation des impacts environnementaux

De nombreuses questions environnementales doivent être résolues au cours de la planification, de la conception, de la construction et de l'exploitation de l'ouvrage. Beaucoup de celles-ci sont communes à tous les aménagements construits en environnement maritime ou fluvial, et comprennent les effets sur l'environnement physique du site (géomorphologie, paysage) et les effets sur les phénomènes physiques (houle, courants). Souvent ces impacts sont en fait la fonction première de l'ouvrage ! Les constructions peuvent affecter l'écologie, la fonction sociale, les loisirs, les aménagements, les perceptions humaines, la qualité de l'air et de l'eau, etc. Tous ces facteurs nécessitent d'être considérés comme faisant parti du projet, mais ne sont pas traités plus en détail ici.

Le reste de cette Section 2.5.2 traite seulement des aspects spécifiques aux ouvrages en enrochement à l'attention de ceux en charge de mener de telles évaluations. Les problématiques environnementales suivantes sont traitées :

- les aspects physiques ;
- les aspects écologiques et biologiques ;
- la qualité de l'air, de l'eau et du sol ;
- le paysage et le patrimoine ;
- les aspects sociaux et socio-économiques ;
- les risques naturels et industriels.

Les considérations associées à ces sujets sont détaillées au Tableau 2.7. Cette liste inclut des facteurs qui sont aussi applicables à d'autres projets, pas seulement ceux utilisant des enrochements. Cette liste n'est pas exhaustive et certains projets peuvent rencontrer d'autres problématiques spécifiques au site. Les sections suivantes discutent des aspects environnementaux associés aux ouvrages en enrochement pour chaque phase du projet. De nombreux points listés au Tableau 2.7 nécessitent des données qui peuvent être également utiles pour le dimensionnement. Par conséquent il est avantageux de traiter ses aspects environnementaux le plus tôt possible pendant la phase d'étude. Ceci permettra de programmer la collecte de données de façon à fournir les résultats nécessaires à la fois aux études de conception et aux études environnementales et également de fournir toutes données nécessaires à la planification des travaux.

Des discussions générales supplémentaires sur l'évaluation environnementale peuvent être trouvées par exemple dans Morris (1995), Simm *et al.* (1996), Budd *et al.* (2003), VNF (1998), Michel (1998, 2001), SETRA (1996) et CETMEF (1978).

Tableau 2.7 Principales considérations environnementales pour les ouvrages en enrochement

Aspects physiques	<ul style="list-style-type: none"> • Changement climatique : élévation du niveau moyen des mers, changements dans les processus physiques, p. ex. le transport sédimentaire • Conditions climatiques et liées à la glace • Modifications de la houle, des courants, des écoulements dues aux ouvrages • Données de site pour la conception, la construction et la surveillance (bathymétrie, houle, courants, niveaux d'eau) • Modifications potentielles des conditions de calcul pendant la vie de l'ouvrage • Interruption du système hydrographique fluvial • Modifications potentielles de la géomorphologie des systèmes physiques existants : estuaires, littoraux, marais salants, dunes, bathymétrie et morphologie de rivière • Recul du trait de côte • Stabilisation des sédiments, diminuant le transit littoral et affectant l'évolution côtière • Affouillement, contournement et besoin d'étendre les défenses • Perte des formes du terrain ou d'affleurement sous la surface de l'ouvrage
Aspects écologiques et biologiques	<ul style="list-style-type: none"> • Impact direct sur ou réduction des habitats protégés (vasières, marais salants, dunes, berges des rivières) et des espèces à cause de l'emprise de l'ouvrage • Pertes indirectes d'habitats et de formes de terrain – déplacement de l'érosion, affouillement aux limites du projet, érosion de plages • Stabilisation d'habitats ou de formes de terrain naturellement dynamiques à l'arrière de l'ouvrage • Risque de perturber les oiseaux qui se nourrissent et nichent sur l'aménagement, p. ex. pendant la construction • Modification des habitats à cause de l'ouvrage en enrochement • Impact des accès pour la construction et l'entretien sur les habitats • Destruction d'habitats possibles sur l'ouvrage en enrochement pendant l'enlèvement de l'ouvrage
Qualité de l'air, de l'eau et du sol	<ul style="list-style-type: none"> • Émissions dues aux transports d'enrochement, à la construction et à la maintenance • Rejets accidentels de polluants pendant le transport des enrochements, la construction et la maintenance • Révélation possible de contamination existante • Modification de la qualité de l'eau et de l'air dû à la mise en suspension d'éléments fins pendant la construction
Perceptions humaines, patrimoniales et paysages	<ul style="list-style-type: none"> • Intrusion visuelle, p. ex. teinte, forme des enrochements et type de placement • Bruit et vibrations dus au transport et au placement des enrochements • Odeur imputable au tas de déchets ou matières organiques • Impact sur les plages d'agrément dû aux fragments d'enrochements laissés après la construction • Modification du paysage • Impact sur la vue des maisons riveraines • Recouvrement d'objets archéologiques • Autres problèmes : éclairage, aspects historiques et culturels, paléontologie
Aspects sociaux et socio-économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Modifications des emplois locaux pendant la construction et l'exploitation • Immigration dans de petites communautés pendant la construction • Effets sur le commerce local • Effets sur les loisirs, p. ex. perte de plage d'agrément à cause de l'emprise de l'ouvrage, perte de lieu sûr pour les jeux d'enfants • Effets sur les accès piétonniers ou routiers à la plage, au littoral ou à une rivière, incluant les accès pour handicapés • Effets sur la pêche • Effets sur le risque d'inondation des propriétés adjacentes • Vulnérabilité au vandalisme • Santé publique et risque et sécurité • Sécurité des ouvrages en enrochement • Effets sur la navigation • Développement durable
Risques naturels et industriels	<ul style="list-style-type: none"> • Hygiène et sécurité des travailleurs • Sécurité des ouvrages en enrochement • Présence de câbles ou de pipelines • Nécessité d'avoir des autorisations pour les travaux en sites industriels dangereux

2.5.2.1 Au cours des études de conception

Lors de la phase « études », plusieurs opportunités se présentent pour réduire les impacts environnementaux. Celles-ci comprennent la sélection et la spécification des matériaux et l'intégration des considérations environnementales dans la comparaison des options.

Les ouvrages en enrochement sont généralement considérés comme moins réfléchissants vis-à-vis de la houle que les ouvrages verticaux. Ceci peut être important lorsque l'affouillement du fond marin ou du lit de la rivière est un problème. Lorsqu'un habitat physique au voisinage de l'ouvrage est protégé par la loi (p. ex. en Europe, la directive sur les habitats) les impacts négatifs sur cet habitat physique doivent être évités.

Le transport des matériaux de construction peut être le plus important problème environnemental. Une liste hiérarchisée des options d'approvisionnement des matériaux à considérer lors des études est donnée ci-dessous (voir Masters, 2001).

1. Utilisation de matériaux adéquats disponibles sur le site provenant d'un aménagement antérieur ou d'un ouvrage existant.
2. Utilisation de matériaux récupérés localement ou recyclés remplissant les fonctions identifiées dans l'analyse fonctionnelle.
3. Utilisation de matériaux récupérés ou recyclés provenant de plus loin mais qui peuvent être acheminés par la voie d'eau ou par train ou utilisation de matériaux naturels extraits localement.
4. Utilisation de matériaux récupérés ou recyclés lointains transportés par la route ou utilisation de matériaux naturels lointains transportés principalement par la voie d'eau ou par train.
5. Utilisation de matériaux primaires lointains transportés par la route.

En évitant une sur-spécification des matériaux lors de la phase de conception il est possible de réduire les déchets et d'encourager le recyclage des matériaux. Quelques organisations ont d'ores et déjà mis en place des plans de gestion des déchets de chantier qui analysent les déchets qui vont probablement être produits sur le chantier et réduisent ainsi ce qui est mis en décharge. Lorsque cela est possible, les facteurs environnementaux doivent être inclus dans l'analyse coûts-bénéfices. Ceci peut être réalisé en utilisant une évaluation des imprévus, ce qui nécessite de demander aux intéressés combien ils seraient prêts à payer pour des services environnementaux spécifiques ou, alternativement, de quantifier la compensation qu'ils seraient prêts à accepter contre l'abandon de services environnementaux spécifiques.

La perception du public des avantages ou désavantages d'un projet doit être traitée. Les exercices de consultation du public seront plus productifs s'il y a une intention de faire une place à ces avis dans la conception du projet. Il peut y avoir des exigences prévues par la loi pour l'information et la consultation du public. Des consultations et communications anticipées avec les usagers du site et les associations (les organismes de loisirs, de pêche et environnementaux) sont conseillées pour améliorer la perception du projet par le public lorsqu'il est prévu d'utiliser des enrochements naturels et peut être plus particulièrement lorsque des matériaux alternatifs sont proposés.

La liste des problématiques du Tableau 2.7 doit être examinée pour déterminer celles qui doivent être considérées à cette phase. En particulier, les principales problématiques à considérer pendant la phase conception sont :

- des modifications locales de la houle, de la marée et des courants et la localisation de nouvelles zones d'affouillement et de dépôt ;
- la mise à disposition d'habitats alternatifs sur le littoral, en estuaire ou en rivière ;
- une identification des mesures compensatoires éventuelles avec un contrôle environnemental ;
- les problématiques liées au paysage, particulièrement vis-à-vis de la teinte, de la forme et du type de placement des enrochements ;
- un enfouissement d'objets archéologiques ;
- la sécurité des ouvrages en enrochement.

2.5.2.2 À la validation du projet

Comme décrit à la Section 2.5.4.2, le dossier environnemental représente une partie importante de la demande d'autorisation de travaux. L'étude d'impact aborde les problématiques telles que les impacts sur les habitats protégés et la réduction de la surface des habitats marins. L'étude d'impact fait partie à part entière du processus de consultation du public.

2.5.2.3 Au cours de la construction de l'ouvrage

Lorsque l'utilisation d'enrochement naturel est envisagée, les questions environnementales suivantes se posent pendant la construction :

- l'approvisionnement des enrochements ;
- leur transport ;
- leur mise en œuvre.

Approvisionnement des enrochements

L'enrochement naturel dans les ouvrages hydrauliques est généralement un granulats naturel et n'est donc pas une ressource renouvelable. Dans certains cas, cependant l'enrochement est un granulats secondaire, sous-produits de l'extraction de d'autres matériaux, par exemple de pierres de taille, de granulats pour béton ; il est ainsi utilisé comme déchet de ces autres opérations.

L'enrochement naturel est généralement extrait par forages puis tirs d'abattage ou par découpage. Le matériau naturel approprié à cette utilisation particulière est sélectionné et traité par différentes méthodes de tri (voir la Section 3.9.7) et par découpage du bloc rocheux. Les impacts environnementaux éventuels dus à l'extraction et aux opérations associées de traitement des enrochements comprennent :

- le bruit et les vibrations dus aux tirs, au concassage et au tri/criblage ;
- le dérangement et la destruction d'habitat ;
- la modification et l'enlèvement de la terre arable ;
- les émissions de particules dans l'air et dans l'eau ;
- l'interruption de l'écoulement des eaux de surface et souterraines ;
- le dérangement du trafic local ;
- les émissions de dioxyde de carbone dues à la combustion des énergies fossiles ;
- la consommation d'énergie pendant le criblage, le tri, le concassage, la foration et le transport ;
- la production de déchets solides ;
- les impacts visuels.

L'utilisation de l'enrochement doit être comparée à celle des matériaux alternatifs communément utilisés en site aquatique, comme le bois et le béton. En environnement marin, le bois est en général un bois dur exotique pour obtenir une bonne durabilité et une bonne résistance aux xylophages marins. Le bois est théoriquement une ressource renouvelable, mais, malgré les efforts considérables faits par certains organismes (p. ex. des Offices Nationaux des Forêts et d'autres organismes certifiés), des doutes persistent sur la durabilité des pratiques d'exploitations forestières dans les zones équatoriales. Le bois peut être recyclé pour un ouvrage côtier mais il a une durée de vie limitée, après laquelle il doit être remplacé. Le béton est un matériau manufacturé mais il requiert des matières premières telles que des granulats et du ciment pour lesquels les mêmes arguments que pour l'enrochement naturel s'appliquent.

Une estimation complète des impacts environnementaux relatifs aux enrochements et à d'autres matériaux de construction nécessite une analyse du cycle de vie. Celle-ci ne s'attache pas simplement au caractère durable de ces matières premières mais s'intéresse aussi aux impacts environnementaux associés à l'extraction ou la production des matériaux, à leur transport, à leur utilisation et éventuellement la démolition des ouvrages, incluant la consommation d'énergie pour ces différentes phases. Un large éventail de concepts et d'outils analytiques a été développé pour cela (p. ex. Howard *et al.*, 1999). Les résultats d'une telle estimation seront inévitablement dépendants des pondérations de chaque facteur lors de l'analyse multicritères. Cependant, en ce qui concerne sa durabilité et sa flexibilité d'utilisation, il est au moins défendable de stipuler que l'enrochement, particulièrement lorsque c'est un sous-produit de carrière, est souvent plus acceptable et durable sur le plan environnemental que le bois, et n'endommage pas plus l'environnement que l'approvisionnement des matériaux nécessaire à la fabrication de béton.

Transport des enrochements

Pour beaucoup de projets, en particulier pour les ouvrages maritimes, les enrochements naturels sont livrés par barges directement sur le chantier. Ceci évite les impacts sur le réseau routier et peut constituer un avantage de l'enrochement sur d'autres matériaux en vrac qui sont livrés par camions. D'autre part, le transport par barges utilise nettement moins d'énergie et émet moins de dioxyde de carbone que le transport routier. Cependant, il doit être noté qu'une double manipulation est souvent nécessaire : de courts trajets routiers peuvent tout d'abord être requis pour charger le navire, puis les grandes barges doivent souvent être déchargées sur de plus petites embarcations qui peuvent atteindre la côte. Des pertes accidentelles doivent être évitées lors du transbordement des enrochements d'une barge à l'autre.

Le transport par barges a des conséquences sur les autres utilisations et sur les usagers du domaine maritime tels que les activités de loisir, la navigation et particulièrement les pêcheurs. Les équipements fixes de pêche tels que les filets et les casiers sont vulnérables aux dégâts provoqués par les barges qui ont besoin de s'approcher près de la côte pour décharger. Ceci est généralement résolu en instituant un point unique de livraison à chaque façade, avec une route de navigation des barges, notifiée et si possible acceptée d'avance par les pêcheurs. Les règles standard de sécurité maritime doivent pourvoir à d'éventuels conflits avec les autres bateaux, les activités de loisir pourront nécessiter la mise en place de restrictions pendant la livraison d'enrochement. La notification en avance aux marins des travaux qui vont avoir lieu peut être rendue nécessaire par des exigences locales.

Le transport de matériaux de construction par voie d'eau peut être possible dans les rivières navigables et les canaux, mais pour beaucoup de rivières et de petits cours d'eau le seul moyen de transport pratique est la route. Les méthodes de transport et les itinéraires doivent être choisis en prenant en compte la vulnérabilité de l'environnement.

Le transport ferroviaire a une capacité importante et un impact limité sur l'environnement, permettant le transport de grande quantité d'enrochement. Suivant la proximité de la carrière et du chantier au réseau ferré, des manipulations additionnelles peuvent être nécessaires ainsi que du transport routier dans certains cas.

La livraison des enrochements peut nuire aux riverains, particulièrement si elle a lieu la nuit, résultat d'un travail 24 heures sur 24 ou d'un travail à la marée. Le déchargement nécessite souvent des équipements lourds, inévitablement bruyants. Leurs alarmes de recul sont souvent considérées comme la source de bruit la plus dérangeante due à leur tonalité et à leur volume. À moins de trouver une méthode sûre pour permettre leur débranchement sans risque, les travaux de nuit risquent d'être dérangeants s'ils ont lieu près de quartiers résidentiels. Les approches pour réduire les nuisances peuvent être les suivantes :

- effectuer les livraisons près des habitations en journée, avec des livraisons de nuit sur les autres parties du chantier ;
- mettre en place des dispositifs anti-bruit temporaires entre les habitations et le chantier ;
- sur les lieux touristiques, planifier la livraison en dehors des mois d'affluence.

En zone côtière, une alternative peut consister à déverser les enrochements directement sur la plage à l'aide d'un bateau spécialement conçu pour cet usage, ce qui permet non-seulement d'éviter d'utiliser des pelles, des tombereaux et des chargeuses mais aussi de réduire la consommation d'énergie et le bruit.

Mise en place des enrochements

Les impacts environnementaux lors de la mise en place des enrochements sont les suivants :

- nuisance sonore ;
- impacts sur l'environnement du site (p. ex. les plages ou le lit d'une rivière), perturbations des habitats et des sédiments dues aux excavations (bien que celles-ci sont généralement moins importantes que pour les ouvrages en béton, car les enrochements ne nécessitent pas de fondations aussi importantes) ;
- impacts visuels et perturbations des habitats au niveau des zones de stockage des enrochements ;
- consommation d'énergie des machines ;
- perturbation de la faune locale telle que les oiseaux, en réduisant la zone de nourrissage et les perchoirs.

Les bénéfices environnementaux de l'utilisation d'enrochement proviennent du peu de déchets produits et des faibles risques de pollution de l'air et de l'eau comparativement à l'utilisation de béton prêt à l'emploi ou gâché sur place. L'excédent d'enrochement peut être ajouté à l'ouvrage ou stocké pour subvenir aux besoins des futures opérations de maintenance.

Les travaux de construction peuvent générer des emplois bienvenus pour la communauté ou peuvent interférer avec les sources de revenu des riverains. D'autres impacts sociaux peuvent résulter de l'afflux de main-d'œuvre extérieure pendant la construction d'un projet important dans une zone peu peuplée.

Une fois en place, l'ouvrage en enrochement a peu de risque de causer des problèmes de nuisance sonore et est peu vulnérable au vandalisme. Les mesures pour diminuer les problèmes environnementaux sur chantier peuvent être trouvées dans *Environmental good practice-working on site* (Coventry *et al.*, 1998) et dans *Coastal and marine environmental site guide* (Budd *et al.*, 2003).

2.5.2.4 Pour l'ouvrage en service

Les ouvrages en enrochement peuvent fournir des habitats ou de nouvelles niches écologiques aux organismes tels que les crustacés, les mollusques, les poissons, les algues et les oiseaux. Ces habitats peuvent être considérés étrangers puisque l'enrochement provient souvent de zones extérieures au site, particulièrement en zone côtière tendre (p. ex. sableuse). Pour cette raison, le gain en biodiversité peut ne pas être accepté comme répondant aux objectifs de sauvegarde de la nature, même si les impacts sur les ressources de la pêche peuvent être bénéfiques. Par exemple, la surveillance du nord-est de la côte Norfolk au Royaume-Uni a montré que la construction d'une série de grands brise-lames en enrochement est associée à une augmentation importante de la population de crevettes. D'autre part, les brise-lames ont limité l'accès des chalutiers aux zones côtières, où les crevettes se concentrent.

Les ouvrages en enrochement nécessitent généralement une maintenance, car ils sont situés dans un environnement aquatique dynamique. Les enrochements peuvent donc être déplacés, usés par frottement ou fracturés. Des équipements lourds peuvent être nécessaires pour la maintenance, bien que les impacts environnementaux associés sont généralement limités.

À moins d'être enfouis sous les matériaux existants ou sous l'eau, les ouvrages en enrochement peuvent avoir un impact significatif sur le paysage et dans le champ de vision. Ce problème est souvent soulevé quand de tels ouvrages sont proposés. Néanmoins, il est possible de mettre en avant que les ouvrages en bois tels que les épis ont un impact similaire, mais après de longues

périodes d'utilisation, ces ouvrages ont été acceptés comme faisant partie de nombreux paysages de plages. Au cours du temps, il pourrait en être de même pour les ouvrages en enrochement.

Les effets sur les équipements de loisir sont une autre source de problèmes. Les ouvrages en enrochement peuvent retenir les plantes aquatiques et les déchets, ce qui n'est pas attrayant et peut provoquer des problèmes d'odeurs lorsqu'ils se décomposent. Ceci est un moindre problème lorsque les vides sont largement remplis (p. ex. avec du sable) ou dans des zones exposées où les vides sont régulièrement nettoyés par la houle et les courants. Ceci peut être plus embarrassant dans les zones qui sont déjà sujettes à l'accumulation de végétation ou de déchets, dans ce cas un accord doit être trouvé avec le maître d'ouvrage ou l'autorité locale pour que les ouvrages en enrochement soient nettoyés régulièrement.

Les ouvrages en enrochement sont potentiellement dangereux pour le public, car des personnes risquent de glisser ou de tomber. Des accès piétons le long de l'ouvrage en enrochement peuvent être difficiles à mettre en place. Dans certains cas il peut être nécessaire de maintenir un accès piéton à un tronçon de littoral ou de berge. Néanmoins, même si certaines personnes considèrent positivement l'accès le long de l'ouvrage, il peut être plus économique et plus sûr d'en empêcher l'accès. Une autre source d'inquiétude est le risque que des personnes se trouvent coincées dans les vides entre les blocs et se noient. Ces risques sont généralement abordés par des signalétiques avertissant le public de ne pas grimper sur l'ouvrage. Localement, un enchevêtrement serré de blocs d'enrochement afin de constituer une rampe ou un passage au niveau des zones choisies peut également réduire les risques. La dangerosité des ouvrages en enrochement n'est potentiellement pas supérieure à celle des autres ouvrages côtiers tels que les murs en béton ; les deux présentent des risques de blessures par chute.

Les impacts environnementaux potentiels associés à la phase de service d'un ouvrage comprennent aussi :

- la perte directe ou le recouvrement d'habitats côtiers sous l'emprise de l'ouvrage ;
- l'intrusion dans le champ de vision et l'impact sur le paysage (p. ex. vue sur la mer des maisons) ;
- les impacts sur les loisirs (incluant les changements des accès au littoral et la perte de zones sûres et peu profondes pour les jeux d'enfants) ;
- la sécurité des ouvrages en enrochement ;
- les besoins d'un suivi écologique.

2.5.2.5 Au cours de la démolition de l'ouvrage

Les problématiques environnementales à considérer lors de la phase de démolition d'un ouvrage en enrochement sont sensiblement les mêmes que celles des autres phases de la vie de l'ouvrage. Un avantage souvent mis en avant est que les ouvrages en enrochement sont assez simples à déconstruire et que les enrochements peuvent être réutilisés ou recyclés directement dans d'autres ouvrages. Même si les enrochements ont été sévèrement usés et dégradés par l'environnement marin, ils peuvent toujours être recyclés en granulats naturels.

Les aspects environnementaux à considérer pendant la phase de démolition sont les suivants :

- la destruction des habitats potentiels dans les ouvrages en enrochement ;
- la réactivation d'un ancien apport en sédiment et recréation d'habitats côtiers naturels ;
- les rejets accidentels pendant la démolition, ou échec involontaire dans l'enlèvement de l'ensemble de l'ouvrage ;
- la modification du paysage à nouveau ;
- la présence de servitudes sur ou dans l'ouvrage.

2.5.3 Les opportunités pour l'amélioration de l'environnement

Les ouvrages en enrochement peuvent offrir une opportunité d'amélioration de l'environnement, par exemple en fournissant un habitat pour la vie marine et fluviale. Des recommandations sont données par Jensen *et al.* (1998), qui traitent de la création d'habitats, font des suggestions pour favoriser la colonisation par la vie aquatique qui est naturellement attirée par les surfaces dures, et identifient les types d'espèces concernées.

La conception de l'ouvrage doit avoir pour but d'imiter les environnements rocheux, comme les littoraux et les lits de rivière, tels qu'ils sont dans la nature. L'ouvrage doit comporter des tailles d'enrochement et de vides variées, des formes et des orientations irrégulières afin de fournir une variété de micro-habitats pour les petites espèces mobiles et sédentaires ainsi qu'aux plus grandes espèces. Pour les ouvrages en zone côtière, les caractéristiques du littoral rocheux doivent être imitées en créant des vasques et des cavités pour former des flaques, des saillies pour créer des surplombs et en plaçant des blocs isolés pour créer des zones d'affouillement local. Le coût et la mise en œuvre de telles mesures doivent être considérés en même temps que les aspects de conception.

La colonisation et la répartition des plantes sont régies par leur capacité à survivre à différents niveaux de sécheresse (normalement liés à la hauteur au-dessus du niveau d'eau) ou de pénétration de la lumière lorsqu'elles sont sous l'eau. Les éléments des ouvrages maritimes situés au niveau ou en dessous du niveau des basses mers peuvent être colonisés par du goémon, qui, comme la plupart des algues, attire un large éventail d'espèces animales en les abritant et en fournissant de la nourriture. Au niveau moyen des plages, des algues telles que les ficus vésiculeux peuvent coloniser.

Les poissons et les crustacés peuvent utiliser les vides au sein de l'enrochement et de blocs béton pour se protéger des prédateurs, y pondre, ou s'y nourrir d'organismes vivant dans l'ouvrage. Si l'ouvrage est submergé, des abris pour les tourteaux (des cavités du côté extérieur de l'ouvrage) et pour les homards (des galeries dans l'ouvrage), et des abris pour les espèces de poissons telles que les girelles, les lompes et les congres, peuvent être tous incorporés à l'ouvrage.

Dans des conditions normales, les surfaces des ouvrages en béton et en enrochement naturel dans un environnement marin et fluvial sont rapidement colonisées par des micro-organismes naturellement présents qui consomment les substances dissoutes ou en suspension dans l'eau. Des organismes plus importants, tels que les berniques et les moules, qui peuvent directement filtrer les matières en suspension pour se nourrir, peuvent également coloniser les ouvrages. La faune nomade vivant le long des ouvrages en enrochement dévore beaucoup de plantes et d'animaux vivants une vie sédentaire sur les surfaces dures, créant une possibilité pour une colonisation continue.

Lorsqu'un ouvrage est construit une perte d'habitats se produit inévitablement, ainsi qu'une disparition des espèces associées. Les fonds marins et les estrans sableux ou vaseux ainsi que les lits et les berges de rivière contiennent une multitude d'organismes (vers, crabes, mollusques, etc.). Certains sont importants pour la chaîne alimentaire des espèces de poissons commercialisables et des oiseaux (particulièrement dans la zone intertidale).

Comme point de départ à une amélioration écologique, les points exposés à l'Encadré 2.6 doivent être considérés lors de la conception d'un ouvrage en enrochement en environnement aquatique. Voir également Irving et Northen (1999) pour des détails sur l'étude écologique des ouvrages en enrochement.

Encadré 2.6 Considérations pour l'amélioration écologique des ouvrages en enrochement

Les points suivants doivent être considérés afin de fournir des opportunités pour une amélioration environnementale (adapté de Jensen *et al.*, 1998) :

1. Repérer. Étudier les configurations que peuvent prendre les habitats rocheux et les imiter sur le site de construction de l'ouvrage en enrochement. Pour les ouvrages maritimes en dessous du niveau de basse mer, les opportunités pour l'enrichissement des habitats pour poissons augmentent avec la profondeur.
2. Accroître la variété des cavités créées. Plus l'hétérogénéité des habitats est grande plus la population biologique finale a des chances d'être diversifiée.
3. Considérer l'utilisation de divers matériaux. Est-ce que tout l'ouvrage doit être construit à partir du même type d'enrochement ?
4. Être créatif. Construire un ouvrage aux surfaces rugueuses plutôt qu'un ouvrage lisse, bien arrangé et symétrique.
5. Construire des environnements favorables à la faune aquatique, des bassins intertidaux, des blocs isolés pour créer des zones d'affouillement local, des saillies pour créer des surplombs.
6. Consulter les riverains et les usagers. Les groupes ou organisations de protection de la nature au niveau local et national, les autorités écologiques locales, les universités et les sociétés de pêche sont également des professionnels qui seront ravis que la sauvegarde de la nature et/ou les stocks de pêche soient examinés.
7. Valoriser l'attention particulière porter à l'environnement, pour promouvoir l'approche choisie en matière de construction de l'ouvrage en enrochement. Un projet qui se fond dans le paysage existant sera plus populaire qu'un projet qui rentre en conflit visuellement.
8. Être réaliste. Aucun projet ne peut tout faire. Prendre du recul et avec le temps les bénéfices augmenteront.
9. Être prêt à surveiller afin d'estimer ces bénéfices. La quantification des bénéfices peut nécessiter une étude approfondie, particulièrement en zone subtidale. Cependant une évaluation descriptive permet aux volontaires locaux d'être impliqués. Encourager les établissements scolaires locaux et/ou les associations de protection d'adopter l'ouvrage comme site d'études (l'écologie du littoral et des rivières est un thème favori pour des visites de terrain). Il sera également possible de valoriser leurs données et leurs photos pour suivre le développement de la population biologique à travers le temps.

2.5.4 Vue d'ensemble du processus de l'Étude d'Impact sur l'Environnement

2.5.4.1 La législation autour de l'Étude d'Impact sur l'Environnement (EIE)

Les projets doivent respecter un grand nombre d'exigences légales. Pour beaucoup de projets, il est nécessaire de préparer une étude d'impact avant que le projet puisse se poursuivre. L'EIE est un outil pour estimer les impacts de la construction et de la phase opérationnelle. Pour les sites où la sauvegarde de la nature est primordiale ou les sites Ramsar affectés par des travaux, les exigences définies par les directives européennes sur les habitats doivent être respectées. Certaines autorités réclament des études destinées à assurer l'amélioration de la biodiversité, particulièrement concernant les habitats et espèces protégés. Au Royaume-Uni, ceci est couvert par les plans d'action pour la biodiversité. De plus en plus, il est attendu que les EIE considèrent aussi les problématiques environnementales associées à l'approvisionnement des matériaux.

Ce document ne décrit pas entièrement les exigences définies par la loi en matière d'études d'impact, car celles-ci varient suivant les pays et sont aussi sujettes à des changements dans le temps. Les principaux textes européens et internationaux à respecter sont listés au Tableau 2.8. Il est fait référence dans cette section à cette législation même s'il est reconnu que certaines de ces lois peuvent ne pas s'appliquer hors d'Europe.

Tableau 2.8 Principaux textes internationaux et européens liés aux études d'impact

Problématique	Textes européens	Textes internationaux
Sauvegarde de la faune sauvage et de la nature	<ul style="list-style-type: none"> • Directive n° 85/337/CEE amendée par la n° 97/11/CEE concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement • Directive n° 75/440/CEE concernant la qualité requise des eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire dans les États membres • Directive n° 76/160/CEE concernant la qualité des eaux de baignade • Directive n° 76/464/CEE concernant la pollution causée par certaines substances dangereuses déversées dans le milieu aquatique de la Communauté • Directive n° 78/659/CEE concernant la qualité des eaux douces ayant besoin d'être protégées ou améliorées pour être aptes à la vie des poissons • Directive n° 86/278/CEE relative à la protection de l'environnement, et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture • Directive n° 91/271/CEE relative au traitement des eaux urbaines résiduaires • Directive n° 91/676/CEE concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles • Directive n° 2001/42/CEE relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement • Directive n° 79/923/CEE relative à la qualité requise des eaux conchylicoles • Directive n° 79/409/CEE concernant la conservation des oiseaux sauvages • Directive n° 92/43/CEE concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages 	<ul style="list-style-type: none"> • Convention de Ramsar sur les zones humides d'importance internationale – 1971 • Convention de Stockholm concernant la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel - 1972 • Charte mondiale pour la nature – 1982 • Convention de Bonn sur la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage - 1979 • Convention de Berne sur la conservation de la faune sauvage et des habitats naturels de l'Europe – 1982 • Convention de Rio sur la préservation de la diversité biologique – 1992 • Convention d'Espoo - 1991
Pollution marine Pollution de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> • Directive n°2000/60/CEE établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> • Convention Marpol – 1973-78 • Convention de Londres – 1972 • Convention Oskar – 1992 • Convention de Barcelone – 1976, amendée en 1985 • Déclaration de Bremen - 2003

Note : ce tableau a été compilé à partir de Fowler *et al.* (2001), André (2003), Sunkin *et al.* (1998) et Morris et Therivel (1995).

Le maître d'ouvrage peut percevoir l'étude d'impact comme une charge financière supplémentaire. Cependant, le coût des études d'impact, qui dépend de la taille du projet, des données environnementales existantes et de la sensibilité de l'environnement, sera dans la plupart des cas une petite proportion du coût global de l'aménagement.

La procédure de l'étude d'impact a les avantages suivants pour le maître d'ouvrage :

- l'identification des impacts environnementaux pendant la phase de définition et d'études de projet conduira à une incorporation économique des mesures environnementales pour réduire les impacts négatifs ;
- la communication et la concertation, qui font parti intégrante de l'évaluation, réduiront le risque d'un refus inopiné du projet au dernier moment ;
- les raisons probables d'objection au projet seront identifiées suffisamment tôt pour permettre de traiter les questions sensibles et de diminuer les retards sur le projet ;
- l'opportunité pour le public d'être consulté peut conduire à une meilleure acceptation du projet par les personnes affectées ;
- les impacts environnementaux négatifs imprévus qui peuvent engendrer des conséquences financières significatives seront minimisés ;
- l'établissement des autorisations formelles ou des consentements nécessaires peut faciliter certains aspects de l'évolution du projet.

Ne pas réussir à mener les études d'impact appropriées à temps peut être coûteux, le début du projet pouvant en être retardé.

2.5.4.2 Dossier d'étude d'impact

Le résultat de l'EIE est normalement présenté sous forme d'un dossier d'étude d'impact. Pour les études réglementairement obligatoires, ce dossier va former la partie principale de l'autorisation de travaux (ou autre).

Le dossier d'étude d'impact contient :

- une description complète de l'aménagement proposé ;
- une description de l'état initial du site et de son environnement qui peut être affecté par l'aménagement proposé ;
- une brève description des options qui ont été considérées (y compris celle de ne rien faire) et les motifs de leur rejet ;
- une analyse des impacts environnementaux prévus de l'aménagement proposé ;
- lorsque les impacts prévus sont négatifs, une description des mesures qui seront prises pour les réduire ;
- une description des méthodes d'analyse utilisées.

2.5.4.3 Le processus d'étude d'impact

La directive européenne sur les EIE décrit les principales phases de l'EIE, qui sont :

- faire une compilation des informations sur les effets environnementaux probables de l'aménagement sous forme d'un dossier d'étude d'impact (essentiellement les quatre étapes exposées ci-dessous) ;
- rendre publique le dossier d'étude d'impact et d'aménagement auquel il se rapporte pour recueillir l'opinion du public ;
- déterminer l'acceptabilité de l'aménagement par les autorités concernées, appelées « les autorités compétentes » (normalement les autorités locales du lieu d'aménagement), en prenant en compte le dossier d'étude d'impact, les mesures de réduction ou compensatoires possibles proposées et le retour ou commentaires reçus lors de la concertation.

La compilation des informations sur les impacts potentiels sur l'environnement comporte quatre étapes:

- **la définition du champ de l'étude**, pour identifier les problématiques prioritaires à une évaluation détaillée;
- **l'analyse de l'état initial**, pour définir l'environnement existant;
- la projection de l'aménagement proposé sur l'environnement existant et **l'évaluation des impacts probables** (bénéfiques ou négatifs);
- l'investigation de **mesures de réduction des impacts** qui ont été identifiées comme négatives, et une incorporation possible de ces mesures dans la conception.

La définition du champ de l'étude

L'étude de champ identifie les problématiques prioritaires à évaluer. Les aspects environnementaux que des ouvrages en enrochement peuvent affecter comprennent ceux listés au Tableau 2.7, en y ajoutant les interactions entre eux.

Les concertations initiales doivent se tenir avec les autorités de planification, de protection côtière, les agences de bassins et autorités de navigation et d'autres organismes de droit public dont le consentement sera nécessaire pour permettre au projet de se faire. Les organismes mandatés conseillent sur les aspects liés à la sauvegarde de la nature (p. ex. la faune sauvage) et d'autres aspects environnementaux (p. ex. la géologie, l'eau, le paysage). Il est en général bénéfique de consulter tous les organismes dont les intérêts risquent d'être directement affectés par l'aménagement proposé. Comme règle générale, la concertation doit être la plus large possible.

L'analyse de l'état initial

Les données environnementales peuvent être collectées au travers des documents existants ou de reconnaissances *in situ*. Ces dernières peuvent être longues et coûteuses, mais elles sont parfois le seul moyen de conforter les informations locales. Les objectifs doivent être la description de l'environnement existant, en s'appuyant sur les données antérieures afin d'estimer les futures modifications qu'apportera le nouvel aménagement.

L'identification et la prédiction des impacts

Cette phase identifie les divers impacts environnementaux potentiels et s'assure de leur importance. Ceci peut être complexe et long. Les effets sur l'environnement peuvent être classés ainsi: bénéfique ou négatif, direct ou indirect, étendu ou localisé, permanent ou temporaire, réversible ou irréversible, à court ou long terme, cumulatif ou immédiat.

Les mesures de réduction ou compensatoires

Afin d'obtenir un consensus, il peut être nécessaire d'identifier des mesures qui peuvent permettre d'éviter, de réduire ou de compenser les principaux impacts environnementaux négatifs prévus des aménagements littoraux, en estuaire ou en rivière. Elles peuvent également avoir pour but d'accroître les effets positifs. Toutes les mesures doivent être intégrées dans un programme de surveillance de l'environnement (voir ci-dessous).

Le suivi environnemental

Les objectifs du suivi environnemental sont de fournir:

- avant le début des travaux: les données de calibration des modèles numériques et l'état initial;
- pendant et après la construction de l'aménagement: des indicateurs et des paramètres environnementaux pour quantifier les impacts prévus et les mesures d'atténuation, ainsi que les mesures curatives ou la mise en garde sur des impacts non prévus.

Le site et les impacts potentiels de l'aménagement dicteront la fréquence et l'ampleur de la surveillance.

2.6 CONSIDÉRATIONS SOCIALES

Les travaux d'aménagement sont en général réalisés au bénéfice de la société. Les aspects sociaux qu'il est nécessaire de considérer pendant la phase projet sont les suivants :

- l'hygiène et la sécurité ;
- les impacts sociaux de la construction et de l'exploitation de l'aménagement ;
- l'implication des parties concernées.

2.6.1 L'hygiène et la sécurité

Les travaux en milieu aquatique sont souvent dangereux de part la nature de l'environnement. L'environnement côtier ou marin peut être très instable, et parfois imprévisible, avec des changements soudains et importants de vent, de houle et des niveaux d'eau. Les rivières peuvent également être difficiles, sujettes aux crues éclair et aux débits saisonniers importants. Les risques pour les travaux, les équipements et les personnels ne doivent pas être sous-estimés et doivent être considérés pendant la planification, les études et la construction.

Les risques potentiels pour la sécurité dans un environnement dynamique incluant les changements dans les conditions de sol (au fond de la rivière ou de la mer), les accès et la zone de chantier. La planification du chantier et la conception de l'ouvrage doivent avoir pour but d'éviter ces dangers. La protection des personnels est une exigence fondamentale. Le maître d'œuvre doit s'interroger sur la méthode de construction de l'ouvrage, afin de s'assurer que le dimensionnement permet d'adopter des opérations de construction sûres.

La protection du public et/ou des futurs usagers de l'aménagement est importante. Les ouvrages en enrochement dans les zones accessibles au public sont souvent dangereux. Par exemple, les enfants peuvent se trouver coincés dans les vides de la carapace ou blessés voire écrasés par le mouvement des blocs d'enrochement instables. De tels problèmes doivent être considérés dès le début de la conception, peut-être en exigeant une forme d'enrochement adéquate (p. ex. rugueux et anguleux, et pas lisse et arrondi) pour s'assurer que l'imbrication est correcte.

Une signalisation appropriée peut être utilisée pour informer le public des dangers et attirer son attention sur les rôles de l'ouvrage.

Il est essentiel de supprimer ou de réduire les risques à la source, tôt dans la phase de conception. La Section 9.5.3 traite des aspects d'hygiène et de sécurité et des mesures à prendre. Simm et Cruickshank (1998) donnent plus de détails sur ces points.

2.6.2 La construction

Les travaux de construction peuvent perturber et gêner les riverains. Les contraintes et les opportunités doivent être déterminées en associant le public (voir Section 2.6.3) et identifiées dès la phase projet. Lorsque cela est possible, les contraintes doivent être surmontées dès la phase de conception. Les points à résoudre sont les suivants :

- les opportunités d'emplois locaux ;
- les plans d'accès au chantier ;
- des heures de travail réduites ;
- les méthodes de construction spécifiques ;
- l'accès du public sur et autour des ouvrages ;
- la valeur esthétique ou d'agrément potentiel (p. ex. pêche à la ligne ou accès au bord de mer).

2.6.3 L'engagement des parties concernées

Lorsque les parties concernées sont consultées dès le début, une conception plus acceptée peut être produite et des problèmes évités. Il peut y avoir une grande différence entre ce que le concepteur conçoit comme étant un problème et la perception des parties concernées. Dans de nombreux cas, la prise en compte des besoins locaux a un impact faible sur le coût ou la construction de l'ouvrage, mais peut améliorer la qualité de service de l'ouvrage.

L'engagement dès le début des parties concernées aide à informer les personnes affectées par le processus technique – sur les motivations et raisons techniques qui conduisent à certaines décisions, par exemple. Cette compréhension peut résulter en une acceptabilité des méthodes de construction choisies malgré les perturbations à court terme.

Dans certaines parties du monde, l'utilisation de matériaux locaux et de main-d'œuvre locale apporte des bénéfices importants pour la population en termes de revenus et d'emplois. Des conceptions différentes peuvent être à prévoir dans ces circonstances.

2.7 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AIPCN (2001). *Gestion du cycle de vie des infrastructures portuaires – principes généraux*. Rapport du Marcom GT31, AIPCN, Bruxelles

André, P, Delisle, E, Reveret, J P et Sene, A (2003). *L'évaluation des impacts sur l'environnement : processus, acteurs et pratique*, 2^e édition. École Polytechnique de Montréal

Budd, M, John, S, Simm, J et Wilkinson, M (2003). *Coastal and marine environmental site guide*. C584, CIRIA, Londres

Brampton, A, Wallis, M et Holliday, E (2004). *Potential use of alternatives to primary aggregates in coastal and river engineering*. C590, CIRIA, Londres

Buijs, F, Segura Dominguez, S, Sayers, P B, Simm, J D et Hall J W (2005). "Tiered reliability-based methods for assessing the performance of coastal defences". *Proc ICE conf breakwaters, coastal structures and coastlines, Avril 2005*. Thomas Telford, Londres

CETMEF (1978). *Les études préalables aux aménagements portuaires*. CETMEF, Compiègne

Coventry, S, Kingsley, M et Woolveridge, C (1998). *Environmental good practice – working on site*. C503, CIRIA, Londres

Dawson, R J et Hall, J W (2001). "Improved condition characterisation of coastal defences". *Proc ICE conf breakwaters, coastal structures and coastlines, Septembre 2001*. Thomas Telford, Londres

Fowler, R E, Harvey, R N, Harding, C et Atkins, R W (2001). "Implementation of European Union Habitats Directive in developing and designing coastal defence schemes". *Proc ICE conf breakwaters, coastal structures and coastlines, Septembre 2001*. Thomas Telford, Londres

Howard, N, Edwards, S et Anderson, J (1999). *Methodology for environmental profiles of construction materials, components and buildings*. Building Research Establishment, Garston

Jensen, A C, Hamer, B A et Wickins, J F (1998). "Ecological implications for developing coastal protection structures". *Proc ICE conf coastlines, structures and breakwaters, 1998*. Thomas Telford, Londres

Irving, R et Northen, K (1999). *An ecological survey of selected rock islands and rock groynes on the West Sussex coast*. Environment Agency, Southern Region, Worthing

Masters, N (2001). *Sustainable use of new and recycled materials in coastal and fluvial construction: a guidance manual*. Thomas Telford, Londres

Michel, P (1998). *L'étude d'impact des ports de plaisance*. Secrétariat d'état chargé de l'environnement/Délégation à la qualité de la Vie, Atelier Central de l'environnement, Imprimerie Nationale, Paris

Michel, P (2001). *L'étude d'impact sur l'environnement*. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Paris

Mockett, I D et Simm, J D (2002). *Risk levels in coastal and river engineering: a guidance framework for design*. Thomas Telford, Londres

Morris, P et Therivel, R (1995). *Methods of environmental impact assessment*. Oxford Brookes University, Oxford

Oumeraci, H, Kortenhaus, A, Allsop, W, De Groot, M, Crouch R, Vrijling, H et Voortman H (2001). *Probabilistic design tools for vertical breakwaters*. AA Balkema, Rotterdam (ISBN 90-5809-248-8)

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)

SETRA (1996). *Projets routiers: Le dossier d'étude d'impact: guide méthodologique*. SETRA, Bagneux

Simm, J D, Brampton, A H et Beech, N W (1996). *Beach management manual*. Report 153, CIRIA, Londres

Simm, J D et Cruickshank, I C (1998). *Construction risk in coastal engineering*. Thomas Telford, Londres

Sunkin, M, Ong, D et Wright, R (1998). *Sourcebook on environmental law*. Cavendish, Londres

van Gelder, P H A J M (2000). *Statistical methods for the risk-based design of civil structures*. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report no 00-1, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Technische Universiteit Delft (ISSN 0169-6548 00-1)

VNF (1998). *Les barrages mobiles de navigation – guide du chef de projet*. Groupe Moniteur, Paris

Vrijling, J K (2001). "Probabilistic design of water defence systems". *The Netherlands Reliability Engineering and System Safety*, vol 74, n° 3, Décembre 2001, pp 337–344

WCED (1987). *Our common future. Report of the 1987 World Commission on Environment and Development (the Brundtland Report)*. Oxford University Press