

La révision du « Rock Manual », guide sur l'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques Ouvrage de référence pour l'ingénierie maritime et fluviale

Auteurs : BOUDET Florent¹, DUPRAY Sébastien² et DALY Fabrice³

¹Cerema, 134 rue de Beauvais, 60 280 Margny-Lès-Compiègne, France,
florent.boudet@cerema.fr

²Cerema, 134 rue de Beauvais, 60 280 Margny-Lès-Compiègne, France,
sebastien.dupray@cerema.fr

³Cerema, 134 rue de Beauvais, 60 280 Margny-Lès-Compiègne, France,
fabrice.daly@cerema.fr

RESUME : *Cinq partenaires européens (Royaume-Uni, Pays-Bas, France, Allemagne et Belgique) s'associent pour produire un état de l'art autoporteur sur l'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. Cet article présente tout d'abord l'essentiel des références techniques disponibles sur le sujet, puis l'approche adoptée et les principales évolutions pour la future édition du « Manual on the use of rock in hydraulic engineering » plus connu comme le « Rock Manual ». Enfin, un point d'avancement sur le projet est proposé.*

MOTS CLEFS : enrochement, carapace, digue, structures hydrauliques, ingénierie

ABSTRACT : *Five European partners (United Kingdom, The Netherlands, France, Germany and Belgium) are in association to draft a self explanatory state of the art on the use of rock in hydraulic structures. This paper presents the essential technical documentation on the topic then the approach and the main developments for the future edition of the « Manual on the use of rock in hydraulic engineering », also known under the nick name « Rock Manual ». Finally, the point reached by the project is presented.*

KEYWORDS: rock, armourstone, breakwater, hydraulic structures, engineering

1. Les documents de référence sur l'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques

L'expression « *ouvrages hydrauliques en enrochement* » couvre ici les ouvrages ou parties d'ouvrages partiellement ou complètement construits en enrochement (naturel, artificiel ou recyclé), dans un environnement maritime, côtier et portuaire, les ouvrages en voies navigables ou en rivières, les protections de berges ou d'ouvrages, les protections de barrage, etc.

1.1 Brève revue des documents existants en France sur les enrochements

Jusque dans les années 1980, en France, les ouvrages en enrochement naturel ne faisaient l'objet d'aucune norme spécifique relative à leur conception, à leur dimensionnement, à leur construction, ni aux matériaux utilisés. En 1989, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) a publié le guide technique intitulé « Les enrochements » [1], fruit d'une collaboration entre le Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF, ex-STCPMVN), le Réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (RLPC) et des professionnels. Ce guide traite essentiellement du volet matériau, sous l'angle de la prospection, de la production, du contrôle qualité et des spécifications. Il s'appuie sur des normes ou textes des domaines de la géologie et de la géotechnique, notamment développés pour les granulats ou la mécanique des roches, et propose des méthodes alors innovantes.

Sur les digues à talus en enrochement naturel ou artificiel, le Laboratoire National d'Hydraulique (LNH) de EDF R&D publie en 1987 « Le dimensionnement des digues à talus » [2]. Le CETMEF publie également des guides sur les ouvrages maritimes et fluviaux, et notamment sur la conception et le dimensionnement des digues à talus [3] et des protections de berges [4].

1.2 Le Rock Manual

C'est en 1991 qu'est produite la première version du '*Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering*' [5], plus connu sous le nom de '*Rock manual*', fruit d'une collaboration entre le Construction Industry Research and Information Association (CIRIA, Angleterre) et le Centre for Civil Engineering Research and Code (CUR, Pays-Bas). Ce guide s'intéresse essentiellement à la conception, au dimensionnement et aux matériaux de construction des ouvrages maritimes et côtiers en enrochements. Une édition élargie est proposée par le CUR sous le nom '*Manual on the use of rock in hydraulic engineering*' [6] en 1995. Celle-ci couvre en plus les ouvrages en rivière, en canaux, les barrages, ainsi que les méthodes de construction. Plus tard, une version consolidée est produite en 2009 par le CIRIA, le CUR et le CETMEF intégrant notamment les changements profonds introduits par les normes européennes sur les matériaux et les eurocodes notamment [7].

1.3 Littérature étrangère sur les ouvrages en enrochements

Dans la littérature étrangère, il existe de nombreuses publications sur les digues et ouvrages en enrochement. En 1990, aux États-Unis, le US Army Corps of Engineers (USACE) publie le guide '*Construction with large stones*' [8]. Ce guide a principalement pour cible les maîtres d'œuvre. Il présente les spécificités liées à l'utilisation de blocs de rocher dans les ouvrages hydrauliques et il fait des recommandations pour la production, le contrôle et les spécifications de ces matériaux. La conception et le dimensionnement sont traités dans le '*Shore Protection Manual*' [9] dans ses différentes versions successives, et dans sa version la plus récente, renommée '*Coastal Engineering Manual*' [10].

Quelques autres documents doivent être mentionnés pour compléter l'inventaire des documents de référence : les actes de la conférence de 1991 sur la durabilité des enrochements pour les digues [11], deux publications sur l'utilisation des enrochements pour la lutte contre l'érosion de l'ASTM [12] et de Thorne [13], le bilan des derniers développements sur l'évaluation des propriétés des granulats et des enrochements, édité par Latham [14].

1.4 Autres documents de référence en lien avec les ouvrages en enrochement

Plus récemment, différents ouvrages ont été publiés et permettent de compléter le panorama et de prendre en compte la gestion des risques, les solutions basées sur la nature ou des sujets techniques spécifiques pour leur dimensionnement comme les sollicitations dues à la houle, aux courants, ou l'élévation du niveau de la mer. Par exemples :

- Le Guide international sur les digues [15], publié en 2019 en version française. Ce guide, fruit d'une collaboration entre les États-Unis, la France et le Royaume-Uni, traite de l'évaluation de la sécurité, la gestion, la conception et la construction des digues fluviales et côtières, et intègre des bonnes pratiques y compris pour les protections de berge ;
- Le « Manual on wave overtopping of sea defences and related structures », également appelé « EurOtop » [16]. Il s'agit du manuel de référence pour la prédiction des franchissements sur les ouvrages de défenses côtiers, dont la seconde version a été publiée en 2018 ;
- Le guide de l'USACE « *International guidelines on nature and nature-based features for flood risk management* » [17], publié en 2021, qui présente les recommandations internationales sur les solutions basées sur la nature pour la gestion des risques inondation, complémentaires aux ouvrages de génie-civil ;
- Le rapport de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) « *Impacts, adaptation and vulnerability* » [18], faisant suite à la publication du sixième rapport du Giec (2022) qui met en évidence la nécessité de mieux intégrer cette problématique pour les ouvrages neufs et pour la gestion du patrimoine existant.

2. Le projet « Rock Manual » – Future édition

2.1 La méthode de travail

Les partenaires ont décidé de se réunir et d'étudier l'opportunité, la faisabilité et les conditions de réussite de la révision de la version actuelle du Rock Manual. Une étude de pré cadrage est en cours depuis 2021, traitant à la fois le fond et la forme de la révision, pour :

- identifier les sujets nécessitant une adaptation ou une révision en profondeur en relation avec les développements indiqués ci-dessous : des groupes de travail thématiques ont été constitués avec des représentants anglais, hollandais, français, allemands et belges ;
- déterminer le format du guide, en étudiant notamment les alternatives et les compléments à un document comme l'édition précédente ;
- dimensionner l'effort pour conduite ces travaux et valider le modèle économique viable.

2.2 L'équipe de projet

L'équipe de projet est composée d'environ 50 personnes, structurées en quatre groupes thématiques. L'animation globale du projet est assurée par un comité de pilotage qui s'appuie sur les groupes thématiques.

Les principaux partenaires dans l'équipe projet sont :

- pour le Royaume-Uni : CIRIA, en tant que pilote, avec l'appui de HR Wallingford, Jacobs, Imperial College ;
- pour les Pays-Bas et la Belgique : CROW, en tant que pilote, avec l'appui de Rijkwaterstaat, Deltares ;
- Pour l'Allemagne : BAW

La composition de l'équipe française est indiquée dans l'encadré ci-dessous. Cette composition n'est pas définitive et peut faire l'objet d'amendements pour intégrer de nouveaux membres. Cette équipe associe le Ministère de la Transition Écologique, des entreprises, des bureaux d'études privés ou publics, des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre privés et publics.

Composition de l'équipe française :

Membres français des groupes de travail
Cerema, Artelia, Concrete Layer Innovation (CLI), ID Océan, Compagnie Nationale du Rhône (CNR), EGIS, ISL Ingénierie, BRL Ingénierie, DREAL Centre Val de Loire, Université Gustave Eiffel, ESITC, Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG), Bouygues Travaux Public, SPI Fondation

2.3 Les grands principes du guide

Les principes qui régissent le guide dans sa version française de 2009 sont rappelés ci-dessous :

- le ‘Rock Manual’ est un guide technique présentant un bilan des bonnes pratiques dans l’utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. Les innovations du domaine sont mentionnées pour tenir le lecteur au fait des derniers développements dans les domaines scientifiques et techniques concernés. Le guide technique propose des méthodes et des outils appropriés à la résolution de problèmes identifiés, mais il n’a légalement ni le statut de norme ni de recommandation ;
- les lecteurs ciblés pour ce guide sont les maîtres d’œuvre et d’ouvrage, les bureaux d’ingénierie, les producteurs d’enrochements, les entreprises et les laboratoires ;
- les structures visées par ce guide sont les ouvrages en enrochement, notamment les ouvrages maritimes, côtiers et portuaires, les ouvrages en rivières et en voies navigables, les barrages en enrochements et les protections de barrage ;
- le guide est ‘autoporteur’. Ainsi, il couvre la conception, le dimensionnement, la construction et la maintenance des ouvrages concernés, ainsi que les matériaux de construction, i.e. les enrochements naturels et l’essentiel des solutions alternatives proches, à savoir, les blocs artificiels en béton et les gabions ;
- le guide est actuellement disponible en anglais et en français.

Pour la future édition, la majorité de ces principes sont conservés, mais il reste à ce jour quelques aspects encore en discussion ou restant à déterminer :

- le choix de la traduction en diverses langues dont le français ;
- le format de publication (papier, électronique, plateforme en ligne, etc);
- le modèle de financement du projet ;
- les services additionnels (formation, etc).

2.4 Le contenu du « Rock Manual – future édition »

La table des matières de la version en vigueur est présentée ci-dessous et permet d’appréhender le contenu du guide. Une évolution à la marge est envisagée dans le cadre de la future édition.

1 INTRODUCTION

Ce chapitre traite du contexte et de l'organisation du guide, du public cible, et des structures couvertes par le guide.

2 CONCEPTION ET REALISATION

Ce chapitre traite de la définition des exigences fonctionnelles, des aspects techniques, économiques, environnementaux et sociétaux.

3 MATERIAUX

Ce chapitre traite des propriétés et des caractéristiques des enrochements naturels, des blocs artificiels en béton, des gabions, des géotextiles et des autres matériaux. Pour les enrochements naturels, les notions de qualité, durabilité, d'essais et de coût sont également abordées.

4 CARACTERISATION DU SITE ET COLLECTE DE DONNEES

Ce chapitre traite des données bathymétriques, hydrauliques (pour les domaines maritimes, côtiers, fluviaux et de navigation intérieure), géotechniques et liées à la glace.

5 PHENOMENES PHYSIQUES ET OUTILS DE DIMENSIONNEMENTS

Ce chapitre traite de la performance et de la réponse structurelle des ouvrages aux sollicitations hydrauliques, de la modélisation des interactions hydrauliques et du comportement des ouvrages, et enfin de la conception géotechnique.

6 CONCEPTION DES OUVRAGES 'A LA MER'

Ce chapitre traite de la conception des digues à talus, des protections d'ouvrages portuaires, des protections d'ouvrages côtiers et des ouvrages off-shore.

7 CONCEPTION DES OUVRAGES DE FERMETURE

Ce chapitre traite de la conception des fermetures d'estuaires, des fermetures de rivières, des barrages-réservoirs, des barrages fluviaux, des barrages de dérivation, des seuils ainsi que de la modélisation relative au modèle d'écoulement, d'affouillement et de la protection du fond.

8 CONCEPTION DES OUVRAGES EN RIVIERE ET EN CANAL

Ce chapitre traite de la conception des aménagements fluviaux, des canaux de navigation, des ouvrages en rivière et des ouvrages spéciaux.

9 CONSTRUCTION

Ce chapitre traite des travaux de construction: préparation du site, équipements, transport et manutention, risques et sécurité sur chantier, techniques de mise en œuvre, contrôle qualité, techniques de levées et de mesures...

10 SURVEILLANCE, INSPECTION, MAINTENANCE ET REPARATION

Ce chapitre traite de la politique de gestion et des stratégies de maintenance, de la surveillance et du suivi, de l'évaluation des performances de l'ouvrage et enfin de la réparation et de la réhabilitation.

2.5 Les principales évolutions pressenties à ce stade

Des changements importants dans le domaine rendent nécessaire la mise à jour du « Rock Manual » afin de le rendre conforme au contexte législatif et normatif européen et d'intégrer

les récentes recherches et les meilleures pratiques actuelles. Une relecture de la version actuelle est en cours dans le cadre de l'étude de précadrage et les principaux sujets nécessitant a priori une révision sont repris ci-dessous.

De manière générale :

- un certain nombre de travaux d'ingénierie et de recherches ont été conduits depuis la publication de la dernière version. Les résultats de ces projets, les évolutions et les dernières innovations méritent d'être intégrés afin d'être mis à disposition pour l'ingénierie, notamment sur les interactions fluide/structure appliquées aux digues à talus, sur leur stabilité et leur dimensionnement, y compris en faible profondeur ;
- depuis la mise en place des Eurocodes, un nouveau formalisme a été introduit pour la justification des infrastructures sans que les ouvrages maritimes et côtiers ne soient explicitement intégrés. L'**Eurocode** 1-8, en cours de préparation, et traitant de la prise en compte de la houle et des courants pour la conception des ouvrages côtiers, maritimes et portuaires, pourra être inclus ;
- les retours d'expérience depuis l'application de la directive « *Produits de construction* » (89/106/CEE) [19] et de la norme spécifique au matériau enrochement EN 13383 [20], [21] ;
- le recours aux nouveaux outils de **modélisation numérique** (BIM, modélisation 3D, jumeau numérique...) ;
- les progrès réalisés concernant les **outils et méthodes** permettant de mesurer, connaître et maîtriser les conditions de l'environnement physique dans lequel sont implantés les ouvrages : systèmes de relevé topographique et bathymétrique, techniques de mesure in situ, installations d'essais en laboratoire ou encore évolution du matériel de chantier ;
- l'utilisation de matériaux alternatifs, secondaires ou recyclés se développe pour limiter leur mise en décharge et préserver la ressource naturelle dans le cadre d'une attente forte de développement de l'économie circulaire. Des recherches récentes proposent des méthodologies pour en étudier les utilisations possibles et pour évaluer les impacts de ces matériaux sur l'environnement ;
- l'estimation du coût global des structures incluant les études, la construction, la maintenance, ainsi que l'impact environnemental et les mesures compensatoires se généralise. Ainsi, les éléments nécessaires à l'évaluation de solutions alternatives (utilisant des blocs artificiels en béton ou des gabions) doivent être présentés.
- la prise en compte de solutions basées sur la nature ;
- la prise en compte du changement climatique ;
- évaluation de l'impact carbone des projets en enrochement.

De manière plus spécifique :

- la prise en compte des spécificités des nouveaux blocs artificiels en béton dont le comportement est comparable à celui des blocs naturels et dont ils sont une alternative courante. Leur utilisation récente pour de grands chantiers permettent en effet de capitaliser les retours d'expérience : nouveaux blocs, évolution des techniques et des cadences de pose, définition de tolérances de pose...
- la mise à jour sur les nouvelles données et méthodes disponibles pour la détermination des niveaux d'eau extrêmes de dimensionnement et de la séparation marée/surcôte ;

- les relations entre les paramètres statistiques et spectraux de la houle ainsi que les méthodes de détermination des hauteurs de vagues en eau peu profonde et dans la zone de déferlement ;
- les méthodes d'analyse pour la combinaison hauteur de houle / niveau d'eau et des périodes de retour associées, y compris pour des faibles hauteurs d'eau ;
- les méthodes d'évaluation du franchissement et du run-up qui ont évolué depuis la parution de la dernière version de l'Eurotop en 2018 [16] ;
- l'érosion et l'affouillement liés aux vitesses des jets d'hélice sur les structures, suite aux nouvelles publications disponibles (y compris le recours à des matériaux dérivés comme les enrochements liés par exemple) ;
- les méthodes de conception et l'analyse de stabilité de différentes zones d'ouvrage, suite aux nouvelles publications disponibles : tapis de protection et butées de pied pour certains cas particuliers (eau peu profonde, estran en pente douce...), murs de couronnement, talus arrière, musoirs, filtres granulaires ouverts.

3. Conclusion et appel à contributions

Cet article a présenté les motivations qui poussent à réviser la version actuelle du Rock Manual, l'organisation de ce projet ainsi que les principales évolutions qui devraient apparaître dans la future édition. Ce projet est un bel exemple de collaboration entre des acteurs publics et privés au sein de l'Europe pour aboutir à un document au niveau de l'état de l'art, avec une utilisation pratique pour l'ingénierie.

Afin de valoriser les pratiques et le savoir-faire national, toute personne/toute société désireuse d'être impliquée dans l'équipe française est invitée à se faire connaître auprès des auteurs de l'article.

4. Références

- [1]. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), (1989). *Les enrochements*. Ministère de l'Équipement, LCPC: Paris. 106 p.
- [2]. Feuillet, J., Coeffé, Y., Bernier, J., Chaloin, B., (1987) Le dimensionnement des digues à talus. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'EDF. Vol 64. Editeur Eyrolles. 172 p.
- [3]. Ropert, F. , Bouttes, F., (1997). *Conception et dimensionnement des digues à talus*. CETMEF: Compiègne. 84 p.
- [4]. Etienne, D., Richard, F., (1996). *Défenses de berges en enrochements*. CETMEF: Compiègne. 35p.
- [5]. CIRIA/CUR, (1991). *Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering - CIRIA special Publication 83*. CIRIA : London. 607 p.
- [6]. CUR/RWS, (1995). *Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering - Report 169*. A.A. Balkema. 800 p.

- [7]. Dupray, S., Trichet, J.J., Fons, M., (2004), *Rédaction d'un guide sur l'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques 'Rock Manual – 2ème édition'*, VIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, Compiègne. pp. 595-602.
- [8]. USACE, (1990). *Report EM 1110-2-2302 - "Construction with large stones"*. Washington: US Army Corps of Engineers. 50 p.
- [9]. US Army Corps of Engineers USACE (1984) *Shore protection manual*. 4th ed.
- [10]. US Army Corps of Engineers (USACE) (2003) *Coastal Engineering Manual*. Disponible en ligne via Internet sur le site : <http://chl.erdc.usace.army.mil>)
- [11]. Magoon, O.T., Baird, W., (1991) *Durability of stone for rubble mound breakwaters*. Cleveland, Ohio: American Society for Civil Engineering 177 p.
- [12]. McElroy, C., Lienhart, D. (1993). *Rock for erosion control*, A.S.T.M. Special Publication 1177 : Philadelphia: ASTM. 131 p.
- [13]. Thorne, C.R., et al., eds, (1995) *River, Costal and Shoreline protection : erosion control using riprap and armourstone.*, Wiley. 765 p.
- [14]. Latham, J.P., ed. (1998). *Advances in aggregates and armourstone evaluation*. The Geological Society: London. 197 p.
- [15]. Cerema, (2019). *Guide international sur les digues – The international Levee Handbook (2013) – version française (2019) – Oeuvre collective – Edition Cerema*, 1485p.
- [16]. EurOtop, (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*
- [17]. US Army Corps of Engineers USACE, (2021). *International guidelines on nature and nature-based features for flood risk management*,
- [18]. Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, (2022), *Impacts, adaptation and vulnerability – Summary for Policymakers*
- [19]. CEE. (1989). *Directive Produits de Construction (89/106/CEE)* Journal officiel des Communautés européennes n° L 40/12, 15 p.
- [20] AFNOR (2003). *NF EN 13383-1 Enrochements - Partie 1 : spécifications* Indice de classement : P18-661-1. 45 p.
- [21]. AFNOR (2003). *NF EN 13383-2 Enrochements - Partie 2 : méthodes d'essai* Indice de classement : P18-661-2. 44 p.