ministère
de l'Équipement
des Transports
du Logement
du Tourisme
et de la Mer

centre d'Études
techniques
de l'Équipement

CETE
de Lyon

laboratoire
régional
des ponts
et chaussées
de Lyon

CFBR-CFGI-CFMR-CFMS

Journée Technique « enrochements »

Extraction-Production et Qualité-Durabilité des enrochements
Projet « Rock Manual »

Sébastien Dupray,
LRPC de Lyon

Contenu de la présentation

1. Éléments de contexte
2. Extraction des enrochements
3. Production des enrochements
4. Qualité-durabilité des enrochements
5. Aspects normatifs
6. Projet *'Rock Manual'*

1.a Qu'est ce que l'enrochement ?

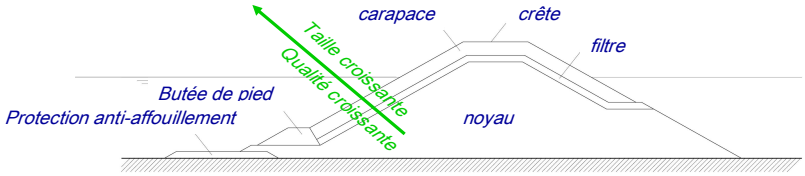
- **Enrochement** :
  - '*matériau granulaire utilisé dans les ouvrages hydrauliques et d'autres ouvrages de génie civil'* (NF EN 13383)
  - taille supérieure à 45mm jusqu'à quelques dizaines de tonnes
- **Origine industrielle**:
  - carrières dédiées à cet usage
  - 'oversize' de carrières de granulat
  - 'déchets' de carrières de pierre ornementale

1.a Pourquoi utiliser l'enrochement ?

- Largement utilisé dans les ouvrages hydrauliques, car
  - *Coût modéré* par rapport à d'autres matériaux de construction
  - *Disponible localement* mais avec parfois une *qualité moindre*

1.b Le point de vue du projeteur

- *stabilité* de l'ouvrage en service ou en conditions ultimes
  - Externe : sismique, géotechnique, hydraulique, glace
  - Interne : structurelle (notamment filtres) et hydraulique
- *performance* hydraulique : franchissement et réflexion



- Les *caractéristiques dimensionnantes* du point de vue hydraulique:
  - densité de la roche
  - masse médiane m_{50} en carapace, butée de pied ou protection anti-affouillement
  - gradation D_{n85} et D_{n15} en filtre
- + les *caractéristiques mécaniques*

Ref : Dupray, S er F Daly : GEOLINE 2005

1.b Le point de vue du projeteur

Le projeteur devra identifier le gisement qui pourra produire l'enrochement :

1. aux *caractéristiques dimensionnantes* requises,
2. avec *durabilité* compatible avec l'environnement du projet
3. en *quantités* suffisantes,
4. dans des *délais compatibles* avec le projet,
5. à un *coût* minimal,
6. en minimisant les *impacts* sur l'environnement.

Un gisement compatible avec les exigences 1 à 4 peut alors se trouver assez loin du lieu de construction et entraîner :

- des impacts environnementaux et des coûts de transport élevés
- le recours à des solutions alternatives ex: blocs artificiels

1.c Le point de vue de l'ingénieur-géologue

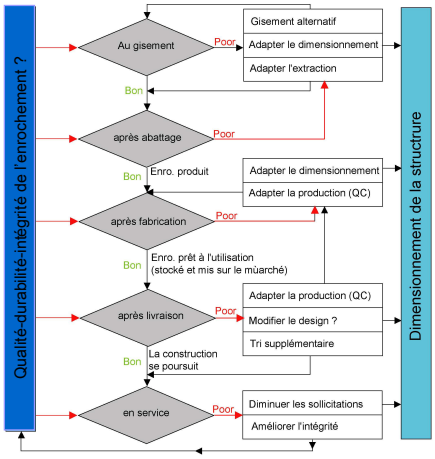
- L'ingénieur géologue cherche à utiliser au mieux les **matériaux locaux** :
  - En optimiser les **techniques d'abattage** et de **production**
  - En s'assurant de la **qualité** et de la **durabilité** de l'enrochement
- Il s'intéressera en particulier à:
  - La **nature pétrophysique du gisement** : de préférence de calcaire, des roches magmatiques ou volcaniques, en évitant les roches plus altérables types sels, grès, craies, schistes… ou présentant des signes d'altération
  - La **structure du massif** et préférera des gisements avec des discontinuités à fort espacement
  - La **tectonique locale** et préférera une tectonique faible pour limiter la fracturation et l'effet du déconfinement

1.c Le point de vue de l'ingénieur-géologue

Son intervention peut avoir lieu à différents moments du cycle de vie du matériau :

- Reconnaissance de la carrière
- Agrément d'un front
- Choix des techniques d'abattage
- Assurance qualité
- Essais de convenance
- Contrôle
- Étude du vieillissement

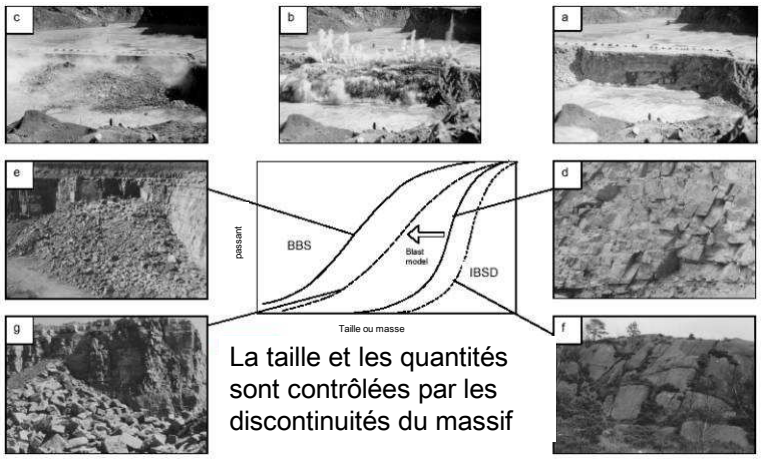
Certaines approches globales intègrent ces différents éléments pour estimer la qualité-durabilité (cf expérience CNR)



Ref : Dupray, S Latham, J-P et JL Durville : ICS 2005

2 L'ingénieur-géologue et l'extraction

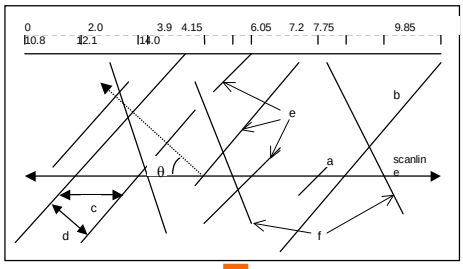
- Il devra identifier les gisements capables de produire la taille maximale et les quantités requises

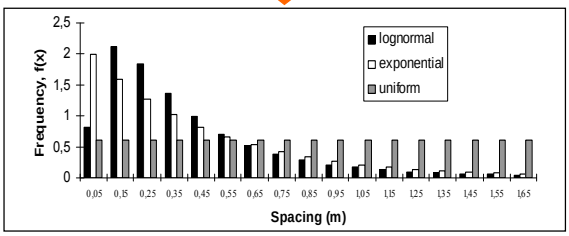


La taille et les quantités sont contrôlées par les discontinuités du massif

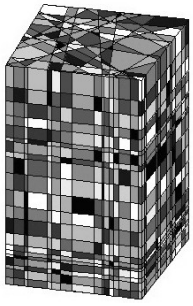
Ref : Latham, J-P, Lienhart, D et S Dupray : Eng. Geol.

2 L'ingénieur-géologue et l'extraction



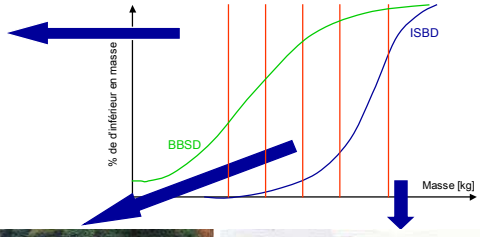


Blocométrie(s) In-Situ : ISBD



2 L'ingénieur-géologue et la production

- Il devra aider le producteur dans le choix des outils de production : tri manuel ou mécanisé…



Ref : Dupray, S et J van Meulen : CIRIA/CUR/CETMEF 2007.

3 L'ingénieur-géologue et la production

- Il est important de noter que l'enrochement ne représente que 5 à 10% de la production d'une carrière,
- soit pour une carrière moyenne (≈ 300 000 tonnes), une production d'enrochement de 15 000 tonnes (toutes blocométries cofondues)…

- En conséquence, il est nécessaire lorsque c'est possible :
  - De faire des **stocks**, ce qui est fort demandeur en espace et nécessite des reprises de chargements
  - De faire des **tirs spéciaux**
  - D'avoir des **blocométries** de productions compatibles avec celles des projeteurs

3 Production : Suppression des fines

3 Production : Tri visuel

- Nécessite un opérateur expérimenté
- Demander la présence de blocs témoins pour NLL, NUL et le bloc moyen
- S'assurer que la production est correcte en début de production puis laisser faire le contrôle qualité de la carrière

15

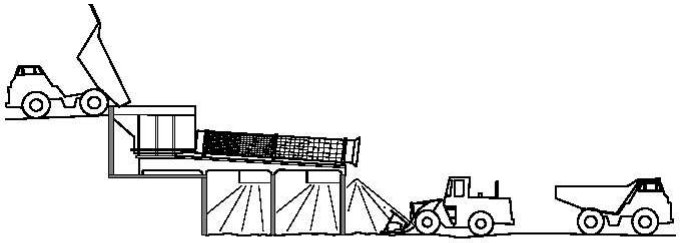
3 Production : Pesée individuelle

- Peson sur le système hydraulique
- Peson spécifique sur la machine
- Bascule ou peson externe
- Il est recommandé d'avoir une masse de vérification à peser avant chaque série (tlj)

16

3 Production : Barres statiques

3 Production : Criblage par Trommel



Partie II
Qualité – durabilité des enrochements

4. Qualité & Durabilité

L'ingénieur géologue devra s'assurer de la qualité et de la durabilité de l'enrochement.

- Les propriétés étudiées sont :
  - ***intrinsèques***, ie liées à la roche en place : densité, porosité et absorption, résistance mécanique à l'échelle centimétrique, durabilité ET liées aux discontinuités du massif : intégrité, durabilité
  - ***liées à l'extraction et à la production*** : classe granulaire et intégrité
  - ***liées à la mise en œuvre*** : porosité, épaisseur et perméabilité d'une couche ou d'un massif d'enrochement.
- Les outils disponibles :
  - ***examen géologique*** qualitatif (altération, fracture…)
  - ***indicateurs*** **de faible** durabilité (minéraux évolutifs, forte porosité)
  - ***systèmes d'évaluation*** (à base d'analyses multicritères),
  - ***modèles de dégradation*** (intégrant l'effet du temps et de l'environnement).

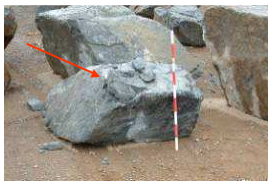
4.a Les types de rupture des enrochements

Ruptures majeures

- Propagation de défauts préexistants
- nombre limité de blocs

Ruptures mineures

- écrasement des aspérités
- nouvelles fissures
- fragments de qq kg

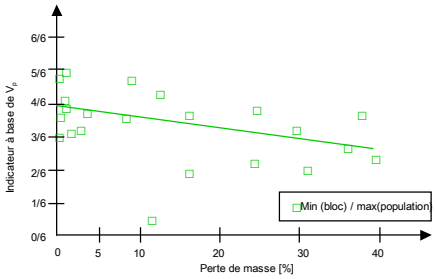


4.a Intégrité – essais de chute

- La prise d'essai doit comporter au moins 30 blocs (conseillé : 50 blocs)
- Le bloc à tester est soulevé à 3 m au dessus d'une enclume de réception, puis lâché verticalement (utiliser un grapin et une chaine de contrôle pour la hauteur)
- le pourcentage acceptable de blocs cassés (en nombre) est généralement :
  - 5% pour des ouvrages particulièrement exposés,
  - 15% dans le cas d'ouvrages normalement exposés,
  - 30% dans le cas d'ouvrages peu exposés.

4.a Intégrité : Indice de continuité

- La prise d'essai doit comporter au moins 30 blocs - Vitesse de propagation des ondes P, mesurée dans 3 directions – chaque bloc est caractérisé par la valeur mini.
- Pour entrer dans une catégorie, les résultats doivent respecter les 2 conditions :
  - La valeur moyenne en nombre sur les blocs doit être supérieure à X,
  - Moins de 10% des blocs ont une valeur inférieure à X.
- 3 catégories indicatives :
  - Ic80, Ic70 et Ic60
- Degré de fissuration
  - Il permet d'estimer la perte d'Ic due à la fissuration
  - Df = 100-Ic-1.4n
  - Df<20%

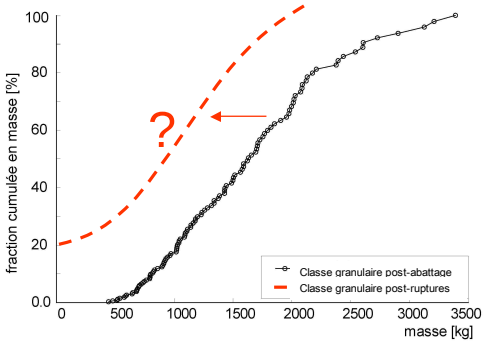


4.a Intégrité de l'enrochement

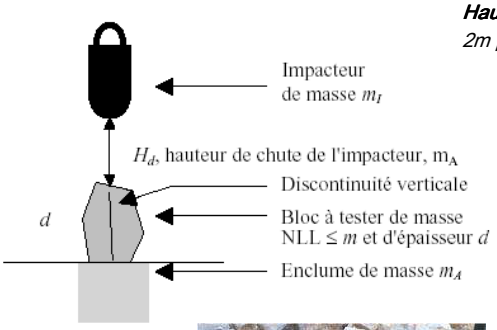
Rupture *mineure*

Rupture *majeure*

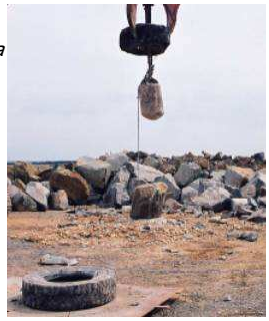
- Quelle est la blocométrie réelle ? à la livraison, à la construction, en service
- En minimiser et/ou quantifier les effets ?



4.a Intégrité : *Essai de fendage in-situ*



Hauteur de chute :
2m pour Rt=7.4MPa



Impacteur :
m_I = (NLL+NUL)/2
: 2 tonnes
D_I = [(NLL+NUL)/2ρ]$^{1/3}$
: 91cm

Enclume :
m_A = NUL
: 4.5-5 tonnes

4.b La forme

4.c Résistance à l'usure

4.d Durabilité et stabilité

5. Les aspects normatifs

Ancien référentiel	Nouveau référentiel
- Pas de normes spécifiques - guide technique 'les enrochements' du LCPC-CETMEF (1989)	- NF EN 13 383-1 spécifications - NF EN 13 383-2 méthodes d'essais > Norme harmonisée > Annexe ZA : Marquage CE uniquement pour les enrochements utilisés en ouvrages hydrauliques de protection ou de régulation
	P 18-662 'Modalité d'application des normes NF EN 13 383-1 et NF EN 13 383-2' : *application volontaire*
	Guide technique 'Rock Manual' : *application volontaire*

5. Marquage = mise sur le marché

CE

01234

Any Co Ltd, PO Box 21, B-1050

02

0123-CPD-0456

EN 13383-1

Aggregates obtained by processing natural, manufactured or recycled materials and mixtures of these materials for use as armourstone

Particle shape	Category	(e.g. LT_A)
Particle size	Categories	(e.g. $CP_{63/90}$, $LM_5/40$ $HM_5300/1000$)
Particle density	Declared value	(Mg/m^3)
Resistance to fragmentation/crushing	Category	(e.g. CS_{85})
Resistance to breakage		
Resistance to attrition	Category	(e.g. $M_{DE}10$)
Release of dangerous substances	e.g Substance X: 0,2 μm^3	
Durability against weathering		
Dicalcium silicate disintegration of air-cooled blastfurnace slag	Declared value	(Visual - Pass/ fail)
Iron disintegration of air-cooled blastfurnace slag	Declared value	(Visual - Pass/ fail)
Disintegration of steel slag	Category	(e.g. DS_A)
Durability against freeze/thaw	Category	(e.g. FT_A)
Durability against salt crystallisation	Category	(e.g. MS_{35})
Durability against weathering	Category	(e.g. SB_A)

- Pour chaque propriété :
  - Valeur standard : eg HMA300-1000
  - Valeur déclarée par le producteur
  - APD
  - Valeur non requise dans le pays
- Dans le cadre d'un **marché spécifique** :
  - des propriétés complémentaires peuvent être demandées
  - Des essais complémentaires peuvent être requis
- 2 Niveaux :
  - Niveau 4 : déclaration par le producteur
  - Niveau 2+ : déclaration et certification du système qualité

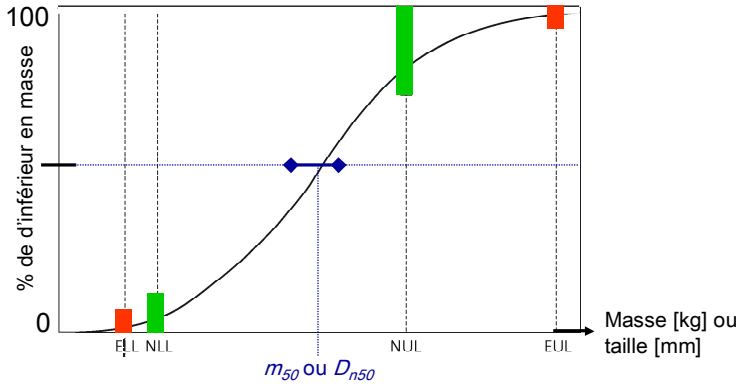
5. Les propriétés dans la norme

- **Caractéristiques géométriques** : Classes granulaires, Forme, Proportion des surfaces cassées
- **Caractéristiques physiques et mécaniques**: Masse volumique, Résistance à la fragmentation, Résistance à l'usure, Caractéristiques associées au scellement, Couleur
- **Caractéristiques chimiques** : Impuretés, Constituants solubles à l'eau
- **Caractéristiques de durabilité** : Absorption d'eau, Résistance au gel-dégel, Résistance à la cristallisation des sels, Coup de soleil

5.a Classe granulaire

5.a Classe granulaire

- ***La Classe granulaire de l'enrochement*** est la désignation normalisée des enrochements en terme de:
  - limites nominales, à rapprocher de spécifications à atteindre
  - limites extrêmes, à rapprocher de tolérances



Ref : Latham, J-P, van Meulen, J et S Dupray : Q. J. Eng. Geol.

5.a Classe granulaire

- Les **catégories standard A** d'enrochement sont définies par :
  - Des limites nominales & des limites extrêmes
  - Une gamme de masse moyenne
- Les **catégories standard B** d'enrochement sont définies par des limites nominales & des limites extrêmes (uniquement)
- **Trois familles** de classes granulaires :
  - Petit enrochement : 45mm < NLL et NUL < 250mm
  - Enrochement moyen : 5kg < NLL et NUL < 300kg
  - Gros enrochement : 300kg < NLL

5.a Les *enrochements moyens (kg)*

Classes:	A&B	A&B	A	A&B	A&B
Catégorie	**ELL**	**NLL**	**Moyenne***	**NUL**	**EUL**
LMA 5/40	**1.5 kg**	**5 kg**	**10 à 20**	**40 kg**	**80 kg**
LMA 10/60	**2 kg**	**10 kg**	**20 à 35**	**60 kg**	**120 kg**
LMA 40/200	**15 kg**	**40 kg**	**80 à 120**	**200 kg**	**300 kg**
LMA 60/300	**30 kg**	**60 kg**	**120 à 190**	**300 kg**	**450 kg**
LMA 15/300	**3 kg**	**15 kg**	**45 à 135**	**300 kg**	**450 kg**
% en masse inférieur à la masse des blocs	**0-2**	**0-10**	**Plage pour la moyenne**	**70-100**	**97-100**

Attention : $m_{moyen} \neq m_{50}$

5.b La forme

- Proportion de blocs avec L/E<3

Rapport L/E supérieur à 3			
% en masse		% en nombre	Catégorie
Petit enrochement	Enrochement moyen	Enrochement lourd	LT
≤ 20	≤ 20	≤ 5	LT_A

- Pour des usages spécifiques, les exigences complémentaires du guide LCPC-CETMEF peuvent être requises (L+G)/2E < 2 ou 2.5

5.c Propriétés physiques et mécaniques

- **Masse volumique** ≥ 2.3 tm^3 – sinon problème de durabilité possible
- **Résistance mécanique** :
  - Catégorie CS80 (Rc ≥ 80 Mpa) en carapace et filtre
  - Catégorie CS60 (Rc ≥ 60 Mpa) pour un usage non-sollicité
- **Intégrité :** pas de recommandations
- **Absorption** :
  - catégorie $WA_{0.5}$ (absorption ≤ 0.5) : pas de problème de durabilité à priori
  - dans le cas contraire, il est nécessaire de réaliser des essais de durabilité (gel-dégel, résistance au sel, etc…)

5.d Résistance à l'usure

- La résistance à l'usure est mesuré à l'essai de l'essai Micro-Deval :

catégorie	Suggestions d'usage des catégories
MDE_{10} (ie ≤ 10)	Environnement extrêmement abrasif, comme mers avec de fréquentes tempêtes et interaction entre l'ouvrage et des galets, torrents
MDE_{20} (ie ≤ 10)	Environnement très abrasif, comme mers avec des tempêtes occasionnelles avec plage de galets ou de sable
MDE_{30} (ie ≤ 10)	Environnement modérément abrasif, comme mers avec de grosses vagues occasionnelles ou une action du courant chargé de sédiment

5.e Durabilité

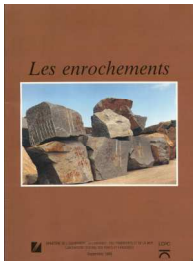
Zone d'exposition	Conditions d'exposition	
	Méditerranéen	Océanique et continental
Zones submergées en permanence (comprenant les zones immergées situées au-dessous de la profondeur de pénétration du gel dans les régions soumises au gel)	**modérées**	**modérées**
Saturation partielle ou totale en eau douce	**modérées**	**sévères**
Saturation partielle ou totale en eau salée	**sévères**	**sévères**

	Modérées	Sévères
Gel-dégel : climat océanique et continental	**Catégorie NR**	**Catégorie A**
Résistance au sel : climat méditerranéen	**Catégorie NR**	**Catégorie A**
Climat méditerranéen ⇒ résistance au gel non-requise		

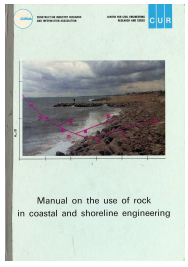
Partie III

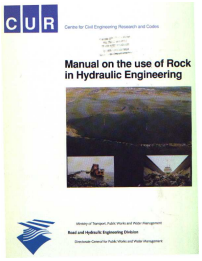
Le projet de guide méthodologique sur l'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques

6. Les 'guides' de référence



- *Les enrochements* (LCPC, 1989)
- Guides CETMEF
- *Rock manual* (CIRIA, 1992)
- *Rock manual* (CUR, 1995)
- *C.E.Manual* (USACE, 2002)





6. Les motivations pour une nlle édition

- Incorporer de nouvelles références :
  - La norme EN 13383,
  - Des recherches récentes ou en cours,
- Couvrir les domaines :
  - Conception, dimensionnement, construction, suivi et maintenance des ouvrages maritimes et intérieurs,
  - Les matériaux alternatifs,
  - Les blocs bétons.
- Inclure:
  - Estimation des coûts sur le cycle de vie,
  - Les nouvelles exigences environnementales.

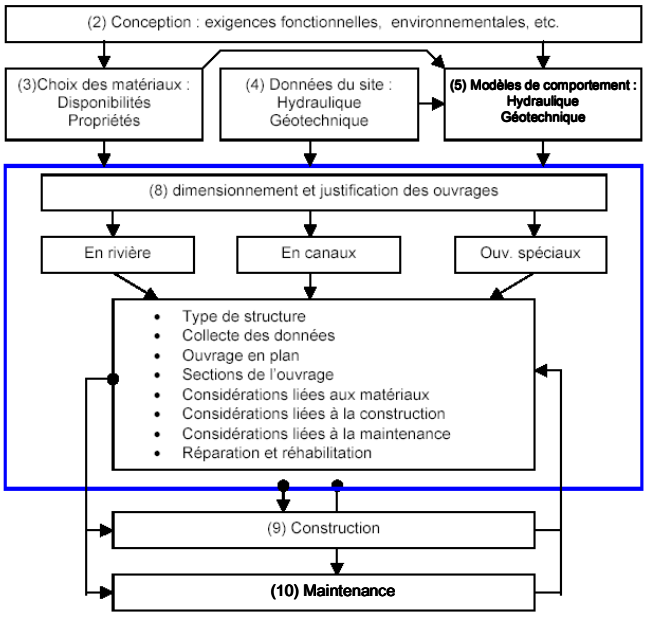
6. Les objectifs…

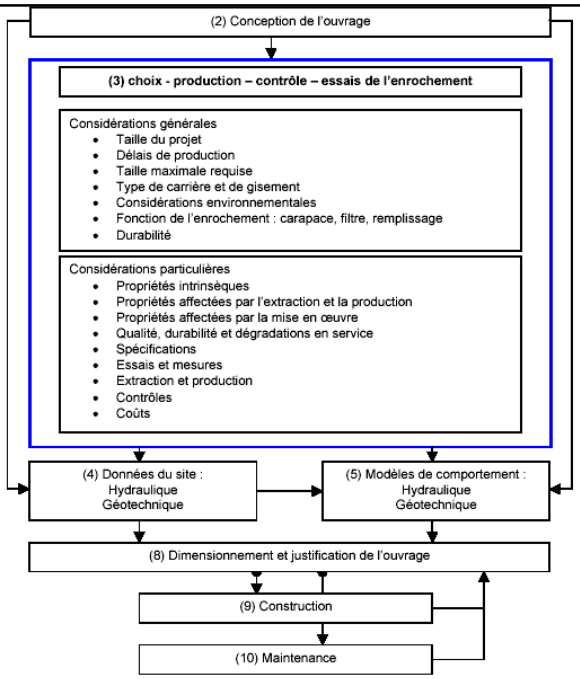
Produire un guide :

- européen à portée internationale,
- des bonnes pratiques,
- qui présente les dernières avancées,
- autoporteur,
- à l'intention des professionnels : gestionnaires d'ouvrages, maîtres d'œuvre, contrôleurs, producteurs, entreprises de travaux,
- en anglais et en français.

6. Le contenu du guide

1 INTRODUCTION
2 CONCEPTION ET REALISATION
3 MATERIAUX
4 CARACTERISATION DU SITE ET COLLECTE DE DONNEES
5 PHENOMENES PHYSIQUES ET OUTILS DE DIMENSIONNEMENTS
6 DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES A LA MER
7 DIMENSIONNEMENT DES BARRAGES
8 DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES EN RIVIERE OU CANAL
9 METHODES DE CONSTRUCTION
10 GESTION ET MAINTENANCE DES OUVRAGES





6. Le pilotage du projet

Le comité de pilotage du projet :

- Royaume-Uni : CIRIA, HRWallingford, Imperial College, Halcrow
- Pays-Bas : CUR, Rijkwaterstaat, Delft Hydraulics, Technical University Delft
- France : CETMEF, SOGREAH, Cete de Lyon

Le comité de éditorial :

- Royaume-Uni : HRWallingford
- Pays-Bas : Rijkwaterstaat
- France : Cete de Lyon

Des relecteurs internationaux

6. Partenaires français du projet

Auteurs:

Cetmef, Sogreah, LCPC, Carrières du Boulonnais, Compagnie Nationale du Rhône, Port Autonome de Rouen, Port Autonome du Havre, Marine Nationale, EDF-LNHE, France-Gabion, Cete de Lyon

Relecteurs:

LRPC Blois, LRPC Angers, FRABELTRA, GTM, Bouygues Off-Shore, LCPC, Arrondissement Interdépartemental des Travaux Loire, Service Navigation de la Seine, Port Autonome de Marseille, EDF-CEMETE, ENPC, Union Nationale des Producteurs de Granulats, Antea, Cemagref…

6. Principales contributions françaises

- 2.4 environnement : L. ROUMEGAS
- 3 enrochements naturels : S. DUPRAY, A. MOISET, J. PERRIER
- 3 blocs bétons : M. FONS
- 3 matériaux alternatifs : J. CROSNIER
- 3 gabions : R. MATTRAS, F. DERACHE
- 4 hydraulique maritime et fluviale : M. BENOIT, V. LABORIE, JJ. TRICHET
- 4.4 et 5.4 géotechnique : JP. MAGNAN, O. SOULAT
- 5.3 modèles physiques : M. BENOIT, L. HAMM
- 6.1 digues maritimes : M. FONS
- 8 voies navigables : F. DALY
- 9 construction : Y. RAHN, P. VETRO

6. Le Rock Manual en quelques chiffres…

- 1200 pages (≈ 900 pour les éditions précédentes)
- 1500 illustrations
- Plus de 60 contributeurs
- Plus de 30 relecteurs internationaux
- Plus de 250 commentaires
- Environ 2 M€ (y compris les contributions non financées)
- Environ 36 mois depuis le début du projet

6. Avancement …

Version Anglaise

- Finalisation du texte : fin janvier 2006,
- Publication : fin de l'été

Version Française (soumise à l'acceptation du budget)

- Traduction en français et relecture
- Puis publication fin 2006

Merci de votre attention