

1316

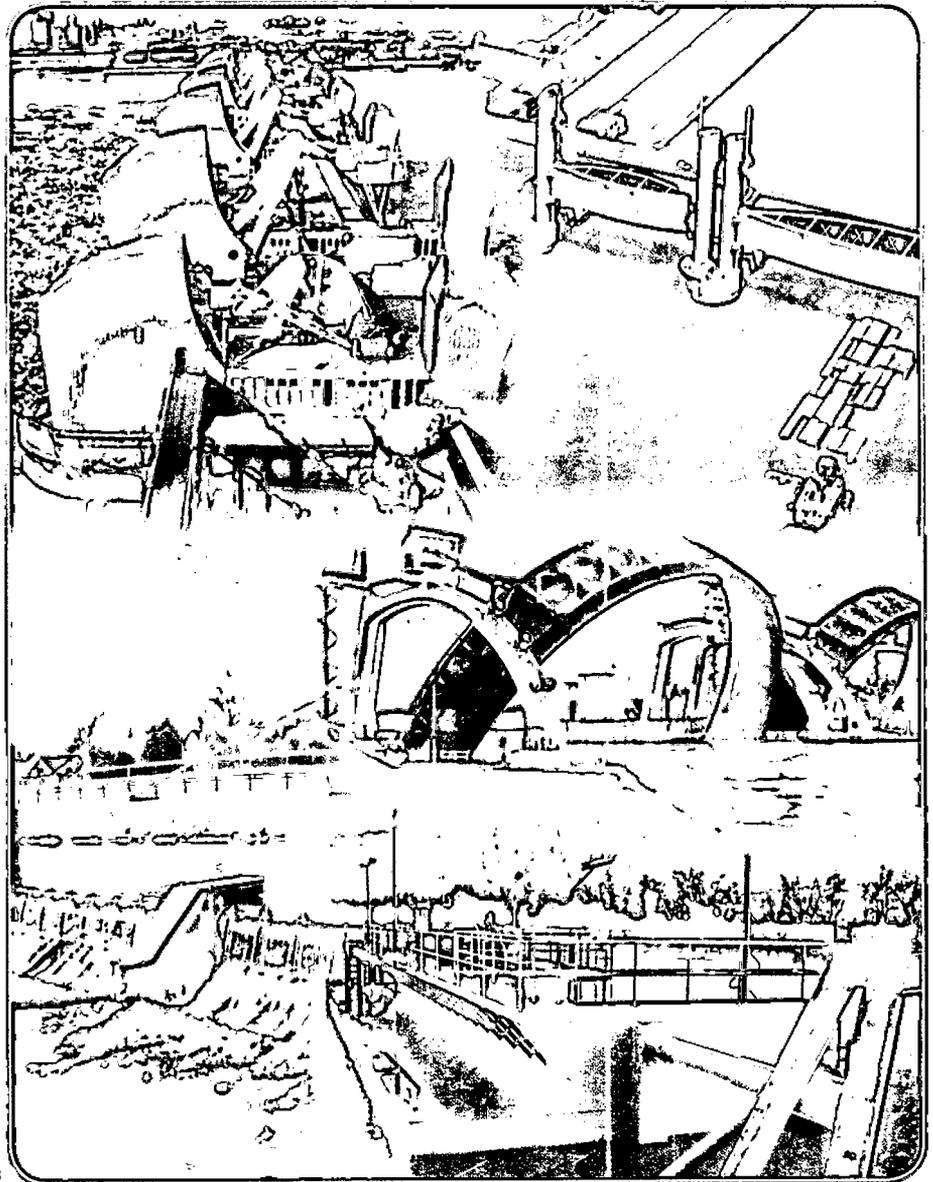
13641



PIANC

Rapport n° 101 - 2008

Conception
des
barrages
mobiles
et des
barrières
anti-tempêtes



"Navigation, Ports, Waterways"
"Navigation, Ports, Voies Navigables"

13641



PIANC

"Navigation, Ports, Waterways"
"Navigation, Ports, Voies Navigables"

Rapport du GT PIANC 101

COMMISSION POUR LA NAVIGATION INTERIEURE

CONCEPTION DES BARRAGES MOBILES ET DES BARRIERES ANTI-TEMPETES

2008

PIANC a constitué des Commissions Techniques compétentes en matière de voies navigables et ports intérieurs (INCOM), de routes et accès maritimes et côtiers (y compris les ports et havres) (MARCOM), d'environnement (ENVICOM) et de navigation de sport et de plaisance (RECCOM).

Le présent rapport a été établi par un Groupe de Travail international institué par la Commission pour la Navigation Intérieure (INCOM). Les membres de ce Groupe de Travail représentent plusieurs pays et sont tous des experts reconnus en la matière étudiée.

Le but de ce rapport est de fournir des informations et des recommandations de bonne pratique. Il n'est pas obligatoire de s'y conformer, et l'ingénieur doit les utiliser avec discernement, particulièrement dans des circonstances spéciales. Ce rapport d'experts pourra guider l'ingénieur et fournir l'état actuel des connaissances et pratiques. PIANC décline toute responsabilité si ce rapport serait présenté comme norme formelle et officielle de la profession.

PIANC Secrétariat Général
Boulevard du Roi Albert II 20, B 3
B-1000 Bruxelles
Belgique

<http://www.pianc.org>

VAT BE 408-287-945

ISBN 2-87223-167-6

© All rights reserved

LA CONCEPTION DES BARRAGES MOBILES ET DES BARRIÈRES ANTI-TEMPÊTES

GROUPE DE TRAVAIL 101 (ex InCom n° 26)

TABLES DES MATIÈRES	3
RÉSUMÉ	4
MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL	5
1. INTRODUCTION	6
1.1 OBJECTIFS DU GT 101	8
1.2 CD-ROM DU GT 101	9
1.3 PRESENTATION DES PROJETS - ETUDES DE CAS	9
2. VANNES DES BARRAGES MOBILES ET DES BARRIÈRES ANTI-TEMPÊTES	11
2.1 PRESENTATION DE PROJETS - «PROJECT REVIEWS»	11
2.2 LEXIQUE ET TERMINOLOGIE	24
3. PROCEDURE DE CONCEPTION	30
3.1 PARAMETRES DU SITE	31
3.2 INFORMATIONS REQUISES	32
3.3 LES SOLLICITATIONS	35
3.4 EXIGENCES DUES A LA NAVIGATION	37
3.5 EXIGENCES OPÉRATIONNELLES	38
3.6 ETUDES D'AVANT PROJET SOMMAIRE (APS)	40
3.7 FIABILITÉ ET DURÉE DE VIE	41
4. ANALYSE MULTICRITERES	41
4.1 POURQUOI UNE ANALYSE MULTICRITERES	41
4.2 QUELQUES CONSIDERATIONS HISTORIQUES	42
4.3 METHODES D'EVALUATION QUALITATIVE	43
4.4 METHODES D'EVALUATION QUANTITATIVE	45
4.5 AUTRES METHODES D'ANALYSE COMPAREE	52
4.6 CONCLUSIONS	54
5. PARAMETRES ET CRITERES DE CONCEPTION	55
5.1 CONSIDERATIONS STRUCTURELLES	55
5.2 HYDRAULIQUE ET ECOULEMENT	66
5.3 FONDATION ET GENIE CIVIL	73
5.4 CONTROLE, FONCTIONNEMENT ET MAINTENANCE	79
5.5 DISPOSITIFS DE FERMETURE TEMPORAIRE	88
5.6 SECURITE, FIABILITE ET RISQUE	92
5.7 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET ESTHETIQUES	102
5.8 COUT (CONSTRUCTION, MAINTENANCE ET FONCTIONNEMENT)	106
6. OUTILS DE CONCEPTION ET D'EVALUATION	112
6.1 TYPES D'OUTILS REQUIS PAR LES INGENIEURS ET CONCEPTEURS (SUR BASE DE L'ENQUETE)	114

7. TECHNIQUES DE PREFABRICATION	123
7.1 DESCRIPTION	123
7.2 QUELQUES TECHNIQUES ENVISAGEABLES	124
7.3 CONSTRUCTION DES CAISSONS PREFABRIQUES	128
7.4 PREPARATION DE LA FONDATION	128
7.5 ASSEMBLAGE DES ELEMENTS PREFABRIQUES	130
8. CODES, REGLEMENTS ET NORMES	133
8.1 APPLICATION DES NOUVELLES NORMES AUX STRUCTURES HYDRAULIQUES	133
8.2 CODES, REGLEMENTS, NORMES ET DIRECTIVES EN RELATIONS AVEC LES THEMES DU GT 101	135
9. CONCLUSIONS & RECOMMANDATIONS	135
10. REFERENCES	137
10.1 QUELQUES SITES WEB PERTINANTS	142

Annexe A: INVENTAIRE DES OUTILS DE CALCUL
POUR LA CONCEPTION DES BARRAGES MOBILES
ET BARRIÈRES ANTI-TEMPÊTES..... 143

Annexe B: LISTE DES SPONSORS 147

CD-Rom du GT 101 (ex InCom 26)

- Présentation de 50 projets de barrages mobiles et de barrières anti-tempêtes («Project Reviews», Répertoire A1 sur le CD).
- Une copie partielle PDF de ce rapport, en anglais (Répertoire A2 sur le CD).
- Les références des compagnies "sponsors" (Répertoire A3 sur le CD) – voir aussi Annexe B.
- Des informations complémentaires sur les Sections 3; 4; 5; 6; 7 et 8 de ce rapport (Répertoire /Annex Section #/ sur le CD).
- Diverses directives techniques (Répertoires B# sur le CD) telles que :
 - o B1: "Dictionnaire Technique Illustré" de PIANC.
 - o B2: Recommandations pour la justification des structures métalliques mobiles en site aquatique.
 - o B3: Les Barrages Mobiles de Navigation (VNF).
 - o B4: Les Barrages gonflables (Allemagne).
 - o B5: Les batardeaux de maintenance et les systèmes temporaires de protection contre les inondations.
 - o B6: Exemples de réhabilitation de barrages mobiles.
 - o B7: Protection contre les inondations (UK).
 - o B8: Les lubrifiants biodégradables.
- Photos des réunions du GT26, Répertoire C sur le CD.

RESUME

Le groupe de travail n° 101 (ex InCom n° 26) de PIANC présente ici l'état de l'art concernant les technologies modernes, les outils de conception et les recherches récentes utilisés pour la conception et la construction des ouvrages contrôlant le niveau d'eau et régulant les débits dans les rivières, voies navigables et accès portuaires (pour la navigation et la protection contre les inondations).

Le GT a étudié les ouvrages de régulation des barrages mobiles et des barrières anti-tempêtes en se concentrant sur la conception et la sélection des vannes. Ceci inclut :

- Les vannes contrôlant le niveau d'eau et le débit dans les rivières (même non navigables) et les voies navigables (vannes levantes, clapets, segments, secteurs, etc.; conçues en une seule pièce ou munies d'un clapet supérieur). Il s'agit des barrages mobiles.
- Les vannes contrôlant le niveau d'eau et le débit dans les fleuves et estuaires pour faire face aux marées et crues exceptionnelles (vannes levantes, pivotantes, clapets, roulantes, flottantes, etc.). Il s'agit des barrières anti-tempêtes (et marées tempêtes).

Le rapport de ce GT aborde les aspects suivants :

- Analyse d'une série de projets récents de barrages mobiles et de barrières anti-tempêtes (Etudes de cas ou «Project Reviews») présentant leur conception, les innovations et les critères fondamentaux pris en compte pour concevoir ces ouvrages (Section 2.1).
- Un lexique de termes techniques courants relatifs aux barrages et barrières anti-tempêtes (Section 2.2).
- Le processus de conception des barrages mobiles et des barrières anti-tempêtes (Section 3).
- Les méthodes d'analyse multicritères pouvant être employées pour effectuer les choix les plus appropriés en matière de conception et de sélection entre les variantes (Section 4). On y propose des listes de critères pour les barrages mobiles et les barrières.
- Les considérations techniques à prendre en compte, y compris les aspects environnementaux, économiques et de sécurité, concernant

les différentes phases d'un projet, à savoir la conception, la construction, la maintenance et l'exploitation (Section 5).

- Les considérations structurelles à prendre en compte pour les divers types de vannes, en comparant les avantages et inconvénients (Section 5.1).
- Les connaissances techniques exigées pour effectuer les études hydrauliques (écoulement) pour les divers types de vannes (Section 5.2).
- L'interaction entre la fondation et la structure du barrage mobile ou d'une barrière anti-tempête (Section 5.3).
- Les procédures de contrôle du fonctionnement et de la maintenance des barrages mobiles (Section 5.4).
- Aperçu des systèmes de fermeture provisoire (batardeaux,...) pouvant être utilisés pour l'inspection et l'entretien (Section 5.5).
- L'état de l'art en matière d'analyse du risque en phase de conception des barrages de navigation et des barrières anti-tempêtes (Section 5.6).
- Les interactions entre les aspects techniques liés à la conception d'un barrage (une barrière) et les considérations environnementales et esthétiques (section 5.7).
- La procédure d'évaluation, en phase de conception, du coût global de construction d'un barrage mobile (Section 5.8).
- Un inventaire des outils de conception et de calcul pouvant être utilisés en phase d'avant-projet et d'études détaillées (Section 6 et Annexe A).
- Une liste de techniques de préfabrication (Section 7).
- Les codes, règlements et normes en vigueur: au niveau national et international; y compris l'utilisation du concept semi- probabiliste des Eurocodes (Section 8).
- Une liste de références: livres techniques, sites Web, guides (Section 10).

Ce rapport du groupe de travail 101 (ex InCom n° 26) est accompagné d'un CD-Rom contenant une série de documents techniques (principalement en langue anglaise), à savoir :

- Environ 50 présentations de projets de barrages mobiles et de barrières anti-tempêtes conçus avec divers types de vannes: clapet, segment, levante, secteur, gonflable, ... («Project Reviews», Répertoire A1 sur le CD).

- Une copie partielle (PDF) de ce rapport, en anglais (Répertoire A2 sur le CD)
- Les références des compagnies ayant sponsorisé ce rapport (Répertoire A3 sur le CD) – voir aussi Annexe B à la fin du rapport.
- Diverses informations complémentaires sur les sections 3; 4; 5; 6; 7 et 8 de ce rapport (Répertoire Annexe Section # sur le CD).
- Diverses directives techniques (Répertoire B sur le CD), à savoir:
 - o B1: "Dictionnaire Technique Illustré" de PIANC (Écluses, Vannes, Dispositifs de mise à sec, Protection contre les chocs des bateaux, ...).
 - o B2: Recommandations pour la justification des structures métalliques mobiles en site aquatique & "ROSA 2000: Recommandations pour le calcul aux états limites des ouvrages en site aquatique" (France).
 - o B3: Les Barrages Mobiles de Navigation (Guide du chef de projet, VNF, en français).
 - o B4: Les Barrages gonflables (en Allemagne).
 - o B5: Les batardeaux de maintenance et les systèmes temporaires de protection contre les inondations. Plusieurs rapports techniques sont disponibles à ce sujet.
 - o B6: Des exemples de réhabilitation de barrages mobiles.
 - o B7: La protection contre les inondations (UK).
 - o B8: Les lubrifiants biodégradables.
- Photos des réunions du GT 101 (Répertoire C sur le CD).

MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL PIANC GT 101 (ex InCom GT 26)

M. RIGO Philippe (Président)
Université de Liège, ANAST,
Département ArGenCo (Génie Civil)
Belgique

M. ABDELNOUR Razek,
BMT Fleet Technologies Limitée,
Canada

M. BULCKAEN Dirk
IMDC (Int. Marine & Dredging Consultants nv.),
Belgique

M. DALY Fabrice
Département Ports Maritimes et Voies Navigables
CETMEF,
France

M. DANIEL Ryszard A.
Ministry of Transport, Public Works & Water Management,
Civil Engineering Department,
Pays-Bas

Mme. DE LA PERSONNE Corinne
VNF (Voies Navigables de France),
France

M. DIXON John (Vice-Président)
British Waterways, Leeds,
UK

M. HIVER Jean-Michel
Ministère de l'Équipement, Laboratoire de Recherches
Hydrauliques,
Belgique

M. KUPSKY Miloslav
AQUATIS, Mechanical Department,
Czech Republic

M. MEINHOLD Wilfried
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe,
Allemagne

M. MILLER Dale
INCA Engineers,
USA

M. NAGAO Takashi
Port Facilities Division, National Institute for Land,
Infrastructure Management, Ministry of Transport,
Japan

M. PERILLO Giovanni
I.T.S. Ingegneria Tecnologia Servizi srl,
Italie

M. SARGHIUTA Radu
Technical University of Civil Engineering - Bucarest
(UTCB), Département des Structures Hydrauliques
Roumanie

M. STOCKSTILL Richard Lawrence
Coastal & Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer
Research & Development Center, Vicksburg, MS,
USA

M. WILKES David
Environment Agency, Londres,
UK

Remerciements

M. Kawana Futoshi (Japan); Melle. Laura Chapital
et M. Alexandre Lagache (France) pour leur contri-
bution active et leur assistance aux réunions.

M. De Ville V. (Belgique), MM. Beguin P. et Kovarik
J.-B. (France), MM. Yao S., Pena O. et Waller J.
(US), M. Rowe R. (UK), et M. Michael Gebhardt
(Allemagne) pour leur contribution à la rédaction de
ce rapport ou leur participation aux enquêtes et aux
«project reviews». M. S. Batra (INCA, USA) pour
sa relecture attentive du rapport.

L'Environment Agency (UK), Voies Navigables de
France (VNF), BAW (Allemagne) et Balkema Publ.
pour leurs accords relatifs à des Copyright.

Réunions du Groupe de Travail

Le Groupe de Travail PIANC 101 (ex InCom GT 26)
s'est réuni à six reprises à Bruxelles (Février 2003),
Londres (Juin 2003), Pittsburgh (Novembre 2003),
Rotterdam (Mars 2004) et Edinburg (Octobre 2004).

Merci aux organisations qui ont financés et organi-
sés ces réunions, à savoir : Technum et Anast-
Université de Liège (BE), le British Waterways et
l'Environment Agency (UK), le U.S. Army Corps of
Engineering, INCA (US) et le Rijkswaterstaat (NL).

CD-Sponsors

Le GT remercie les sociétés suivantes pour leur
sponsoring: Besix (B), Bridgestone (J. - UK), BRL
Ingénierie (F), CNR (F), Coyne et Bellier (F), ISM In-
génierie (F), Dyrhoff as (N), Rutten s.a. (B), Scaldis
Salvage (B), SVKS (B), Victor Buyck (B).

Des références techniques sur ces sociétés sont
disponibles dans le «Répertoire A3» sur le CD et à
l'Annexe B de ce rapport.

1. INTRODUCTION

Lors des 30 dernières années PIANC, et plus récem-
ment, la Commission de la Navigation Intérieure
(InCom) a organisé des groupes de travail (GT) sur
des sujets tels que 'La Normalisation du dimension-
nement des voies navigables', 'La Standardisation
des navires et des voies d'eau intérieures ...', 'La
gestion automatisée des cours d'eau canalisés',
'Les éleveurs à bateaux', 'Les écluses', etc. En re-
vanche, la problématique de la conception des bar-
rages mobiles, et particulièrement la conception de
leurs parties mobiles (principalement les vannes),
n'avait jamais été traitée par un GT de PIANC.

Alors que les écluses, les ascenseurs à bateaux, les
ponts mobiles, les dimensions des voies navigables,
la protection des berges, les matériaux contaminés
de dragage, etc. ont tous été étudiés dans des rap-
ports de PIANC, les ouvrages clefs qui garantissent
la navigation sur les voies navigables, à savoir les
barrages mobiles, ne l'avaient jamais été.

Il existe plusieurs raisons à ceci, dont en voici cer-
taines :

- Dans les rivières, les barrages mobiles passent
souvent inaperçus. Tel est surtout le cas des
anciens barrages mobiles à aiguilles, à hausses
(Aubert,...)... à poutrelles. De plus, les vannes
toits, vannes segments (en grande partie) et les
vannes clapets ne sont quasiment pas visibles.
Seules les vannes levantes sont apparentes
tout au long de l'année. Par conséquent, ces
«ouvrages discrets et silencieux» n'attirent pas
spontanément l'attention et ne sont pas consi-
dérés comme étant très importants (même s'ils
sont incontestablement des ouvrages détermi-
nants pour la sécurité des riverains de la voie
d'eau).
- Les barrages mobiles en rivière ne sont gé-
néralement pas très spectaculaires. Les ba-
teaux utilisent les écluses et les ascenseurs à
bateaux mais passent rarement aux travers des
barrages mobiles (sauf lorsqu'ils sont démontés
ou couchés). Les barrages mobiles en rivière
n'attirent de ce fait pas ou très peu l'attention
des non spécialistes.
- En Europe, une grande partie des projets actuels
touche aux voies navigables à petit gabarit

(trafic local et navigation de plaisance) et concernent souvent la réhabilitation ou le remplacement d'anciens barrages mobiles (c'est le cas en France). De tels travaux sont évidemment moins attractifs que de nouvelles structures exceptionnelles. Depuis environ 1970, vu la réduction des budgets liés aux travaux de maintenance des infrastructures hydrauliques existantes, la problématique des barrages mobiles n'est pas ou n'est plus une priorité pour nos décideurs (contrairement à la réalisation de nouveaux canaux, écluses, etc.).

- Les barrages mobiles sont des ouvrages massifs comprenant des éléments mobiles (aiguilles, poutrelles, clapets,) relativement simples et, de ce fait, ne suscitent pas une attention très élevée de la part de nos hauts responsables.

Les ingénieurs des voies navigables et plus particulièrement les concepteurs des barrages mobiles de navigation, conviennent que la conception de ce type d'ouvrages n'a pas progressé ces 25-30 dernières années comme ce fut le cas pour d'autres types d'ouvrages (ponts, tunnels,...). Ainsi on constate couramment que :

- Les nouveaux barrages sont souvent la copie conforme de barrages existants (particulièrement au niveau des choix conceptuels).
- Il n'y a pas de place pour l'innovation, car les gestionnaires de barrages mobiles (habituellement des administrations publiques) ne veulent en aucun cas risquer d'éventuels problèmes techniques. Les risques liés à des concepts nouveaux sont généralement évalués comme étant trop élevés par rapport aux avantages potentiels de ces innovations. De plus, pour des raisons de standardisation et/ou de conservatisme, les changements sont également souvent évités.
- Le choix du type de vannes (ou du type de barrage) est trop souvent basé sur l'expérience (souhait) de l'ingénieur responsable (même si une étude comparative est réalisée). La procédure de sélection est souvent plus une justification du choix effectué qu'une réelle investigation pour rechercher la meilleure solution. Trop souvent, plusieurs types de vannes sont trop rapidement classés comme non appropriés (sans véritable analyse). Ensuite, parmi les 5 ou

6 variantes restantes, une solution est retenue sur base d'une série de bonnes raisons mais aussi d'a priori (« trop coûteuse, non adaptée au transport de sédiment, les parties mobiles dans l'eau doivent être évitées, trop complexe, difficile à régler, l'esthétique ou l'intégration est douteuse, non fiable, exige une validation plus approfondie », etc.).

Un changement est apparu dans les années 1970 lorsque la nécessité de protéger les estuaires et les zones portuaires contre les marées, les tempêtes et les crues a conduit à l'apparition d'un nouveau type de barrages mobiles, appelés barrières anti-tempêtes. Ces barrières ne servent pas à contrôler les débits et les écoulements à des fins d'irrigation, de navigation ou dans des buts industriels mais sont conçues pour empêcher des inondations majeures causées par une montée exceptionnelle du niveau d'eau de la mer/rivière (marées, crues, typhons, etc.). En raison de la taille hors du commun de ces barrières, les techniques traditionnelles de conception des barrages mobiles ne pouvaient être utilisées et les maîtres d'ouvrage ont dû recourir à des « concours d'idées » pour développer des concepts innovants. Les exemples les plus connus sont la barrière anti-tempête sur la Tamise, la barrière du Nieuwe Waterweg à Rotterdam et, dans un avenir proche, les barrières à Venise et à La Nouvelle Orléans. De telles conceptions exigent des équipes pluridisciplinaires en vue d'effectuer des analyses multicritères, des études de risques ainsi que des évaluations technico-économiques.

Connaissant cette situation, le présent rapport propose des pistes pour améliorer la conception des barrages mobiles et des barrières anti-tempêtes ainsi que la procédure de sélection du type de vannes. Ces contributions concernent :

- La méthodologie générale de conception
- L'inventaire des divers types de barrages mobiles et quelques concepts innovants (structures flottantes, éléments préfabriqués, barrages gonflables, ...)
- L'inventaire des outils de calcul (logiciels) utiles en phase de conception
- Un guide de bonnes pratiques pour les analyses multicritères

- L'intégration au sein de la procédure traditionnelle de la conception de barrages mobiles des analyses du risque, de la problématique de la maintenance et du contrôle et des nouveaux codes et normes (Eurocodes, états limites, coefficients partiels de sécurité,...)

Le GT espère que les informations contenues dans ce rapport permettront de donner aux responsables chargés de la conception des barrages mobiles un éclairage nouveau et des pistes nouvelles pour les ouvrages de demain.

1.1 OBJECTIFS DU GT 101

Basés sur les termes de référence du GT 101 (ex InCom GT 26), les objectifs du groupe de travail (GT) furent de réaliser une revue complète (état de l'art) des technologies modernes, des outils de conception et des recherches récentes relatives à la conception des ouvrages régulant le niveau d'eau et les débits dans les rivières, les voies navigables et les zones portuaires (pour la navigation et la protection contre les inondations).

Le GT a considéré les structures de régulation telles que :

- Les vannes contrôlant le niveau d'eau et le débit dans les rivières (éventuellement non navigables) et les voies navigables (vannes levantes, clapets, segments, secteurs, etc.; conçues en une seule pièce ou munies d'un clapet supérieur). Il s'agit des barrages mobiles. Ceci n'inclut pas les évacuateurs de crues des barrages fixes (pour ce sujet spécifique, voir ICOLD www.icold-cigb.org). Les barrages d'irrigation ne sont pas non plus considérés dans ce rapport. Les anciens types de barrages comme les barrages à aiguilles, les barrages à hausses, etc. ne sont pas passés en revue ici bien que plusieurs de ceux-ci soient encore utilisés et que des améliorations à leur fonctionnement soient toujours recherchées de nos jours (en France particulièrement).
- Les vannes contrôlant le niveau d'eau et le débit dans les estuaires pour faire face aux marées et crues exceptionnelles (vannes levantes, pivotantes, clapets, roulantes, flottantes, glissantes, etc.). Il s'agit des barrières anti-tempêtes (appelées aussi marées tempêtes).

Les problèmes de génie civil liés à la résistance et à la stabilité des éléments fixes (piles, culées, seuil) des barrages mobiles ne sont en principe pas détaillés dans le rapport à moins qu'il y ait une relation directe entre la conception des pièces mobiles et ces parties fixes. C'est par exemple le cas de la fondation pour laquelle sa composition et sa résistance ont un effet direct sur le choix du type de barrages mobiles approprié et donc, sur le type de vannes.

Ce rapport se concentre donc sur les aspects suivants :

- Une liste de projets récents de barrages mobiles et de barrières anti-tempêtes (Etudes de cas ou «Project Reviews») présentant leur conception, les innovations et les critères fondamentaux ayant été pris en compte pour concevoir ces ouvrages (section 2.1).
- Un lexique de termes techniques courants relatifs aux barrages et barrières anti-tempêtes (section 2.2).
- Le processus de conception des barrages et des barrières anti-tempêtes (section 3).
- Les méthodes d'analyse multicritères pouvant être employées pour choisir les conceptions les plus appropriées (section 4). On y propose des listes de critères pour les barrages mobiles et les barrières.
- Les considérations techniques, y compris les aspects environnementaux, économiques et de sécurité, relatives aux différentes phases que sont la conception, la construction, la maintenance et l'exploitation (section 5).
- Les considérations structurelles à prendre en compte pour divers types de vannes en comparant leurs avantages et inconvénients (section 5.1).
- Les connaissances techniques exigées pour effectuer les études hydrauliques (écoulement) pour les divers types de vannes (section 5.2).
- L'interaction entre la fondation et la structure du barrage ou de la barrière (section 5.3).
- Les procédures de contrôle du fonctionnement et de la maintenance des barrages mobiles (section 5.4).
- Aperçu des systèmes de fermeture provisoire (batardeaux,...) pouvant être utilisés pour l'inspection et l'entretien (section 5.5).

- L'état de l'art en matière d'analyse de risques, en phase de conception des barrages de navigation et des barrières anti-tempêtes (section 5.6).
 - Les interactions entre les aspects techniques liés à la conception d'un barrage (barrière) et les considérations environnementales et esthétiques (section 5.7).
 - Une procédure d'évaluation, en phase de conception, du coût global de construction d'un barrage mobile (section 5.8).
 - L'inventaire des outils de conception, en phase d'avant-projet et d'études détaillées (section 6 et Annexe A).
 - Les techniques de préfabrication (section 7).
 - Les Codes, règlements et normes: au niveau national et international; y compris l'utilisation du concept semi- probabiliste des Eurocodes (section 8).
 - Une liste de références: livres techniques, sites Web, guides (section 10).
- o B2: Recommandations pour la justification des structures métalliques mobiles en site aquatique & "ROSA 2000: Recommandations pour le calcul aux états limites des ouvrages en site aquatique" (France).
 - o B3: Les Barrages Mobiles de Navigation (Guide du chef de projet, VNF, en français).
 - o B4: Les Barrages gonflables (Allemagne).
 - o B5: Les batardeaux de maintenance et les systèmes temporaires de protection contre les inondations. Plusieurs rapports techniques sont disponibles.
 - o B6: Exemples de réhabilitation de barrages mobiles.
 - o B7: Protection contre les inondations (UK).
 - o B8: Les lubrifiants biodégradables.
- Photos des réunions du GT 101, Répertoire C sur le CD.

1.2 CD-ROM DU GT 101

Ce rapport du groupe de travail 101 (ex InCom n° 26) est accompagné d'un CD-Rom contenant une série de documents techniques (à 95 % en langue anglaise), à savoir :

- Environ 50 exemples de projets de barrages mobiles et de barrières anti-tempêtes conçus avec divers types de vannes: clapet, segment, levante, secteur et gonflable («Project Reviews», Répertoire A1 sur le CD).
- Une copie partielle PDF de ce rapport, en anglais (Répertoire A2 sur le CD).
- Les références des compagnies ayant sponsorisé ce rapport (Répertoire A3 sur le CD) – voir aussi Annexe B, à la fin de ce document.
- Des informations complémentaires sur les sections 3; 4; 5; 6; 7 et 8 de ce rapport (Répertoire Annexe Section # sur le CD).
- Des directives techniques (Dossiers B sur le CD) telles que :
 - o B1: "Dictionnaire Technique Illustré" de PIANC (Ecluses, Vannes, Dispositif de mise à sec, Protection contre les chocs des bateaux, ...).

Deux autres documents potentiellement fort utiles sont (en anglais) :

- Manual for River Work in Japan, Japan, (*Manuel pour les travaux en rivières au Japon*)
- Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan, (*Normes techniques - ouvrages portuaires au Japon*)

Malheureusement nous n'avons pas été autorisés à placer une copie de ces 2 documents sur le CD du GT 101.

1.3 PRESENTATION DES PROJETS - ETUDES DE CAS

Le GT a réalisé des présentations synthétiques relatives à 50 projets de barrages mobiles et de barrières anti-tempêtes. La liste est donnée au Tableau 1.1.

Ces 50 présentations de projets (en version complète) sont uniquement disponibles sur le CD-Rom et sont présentés brièvement ci-après à la section 2.1.

De plus, un résumé descriptif des différents types de barrages et de barrières est aussi disponible dans le «Répertoire A1» sur le CD.

Code	Type de vanne	Titre du projet	Pays	Auteur	Fermeture	But
A1	Arc / Voûte	Barrières en arc - Rhin	NL	Daniel	Fréquent	Écoulement
A2	Arc Voûte	Barrière en arc - Osaka	Japon	Nagao	2-3 / an	Inondation
B1	Vanne clapet	Barrage Lagan (Barrière marée tempête)	UK	Dixon	Fréquent	Écoulement
B2	Vanne clapet	Barrage de Tees (barrière de marée tempête)	UK	Dixon	Fréquent	Écoulement
B3	Vanne clapet	Libcice-Donaly (barrage de navigation en rivière)	Rép Czech	Kupsky	Fréquent	Écoulement
B4	Vanne clapet	Veseli (24 m long)	Rép Czech	Kupsky	Fréquent	Écoulement
B5	Vanne clapet	Barrage de Bremen Weser (barrage de navigation)	Allemagne	Meinhold	Fréquent	Écoulement
B6	Vanne clapet	Tube de Torsion - Barrage de Montgomery	USA	Stockstill	Annuel	Écoulement
B7	Vanne clapet	Porte de fermeture - Sauer - Courte présentation	France	Daly	Fréquent	Inondation
B8	Hausse - Wicket	Denouval	France	Daly	Fréquent	Écoulement
B9	Hausse - Wicket	Olmsted, Vanne Wicket	USA	Stockstill	Annuel	Écoulement
B10	Clapet - Gonflable	Barrage Sinnissippi (Obermeyer)	USA	Lagache	Fréquent	Écoulement
B11	Clapet - Flottant	Barrière anti-cruie de Venise	Italie	Perillo	Annuel	Inondation
C1	Barrages gonflables	Barrage gonflable	Canada	Abdelnour	Fréquent	Écoulement
C2	Barrages gonflables	Barrière de Ramspol	NL	Daniel	Annuel	Inondation
C3	Barrages gonflables	Pocaply (barrage de rivière)	Rép Czech	Kupsky	Fréquent	Écoulement
C4	Barrages gonflables	Présentation Générale sur les barrages gonflables	Allemagne	Meinhold	Fréquent	Écoulement
C5	Barrages gonflables	Barrage gonflable sur la rivière Lech	Allemagne	Meinhold	Fréquent	Écoulement
D1	Porte busquée	Caisson de Goole	UK	Dixon		Urgence
E1	Segment - Simple	Haute Meuse	Belgique	Hiver	Fréquent	Écoulement
E2	Segment - Simple	Steti (barrage de navigation en rivière)	Rép Czech	Kupsky	Fréquent	Écoulement
E3	Segment - Simple	Barrière marée tempête de Stör	Allemagne	Meinhold	Fréquent	Inondation
E4	Segment - Simple	Barrage de Braddock	USA	Miller	Fréquent	Écoulement
E5	Segment - Simple	Portes de Fer (barrage de navigation en rivière)	Roumanie	Sarghiuta	Fréquent	Écoulement
E6	Segment - Simple	Olt River (partie aval de la rivière)	Roumanie	Sarghiuta	Annuel	Écoulement
E7	Segment - Double	Barrage de Eider (Barrière marée tempête)	Allemagne	Meinhold	Fréquent	Inondation
E8	Segment - Double	Barrière marée tempête de Haringvliet	NL	Daniel	Annuel	Les deux
E9	Segment - Innovation	Vanne segment baissante et levante (Concept)	Belgique	Rigo	Fréquent	Écoulement
E10	Segment - Innovation	Barrages flottants préfabriqués: Alu + béton de fibres	Belgique	Rigo	Fréquent	Écoulement
F1	Roulante & à chariot	Porte roulante de l'écluse de Selby	UK	Dixon	3 par an	Inondation
F2	Roulante & à chariot	Porte roulante de Berendrecht	Belgique	Bulckaen	Annuel	Écoulement
G1	Vanne Toit	Porte de Tee	UK	Dixon	Fréquent	Écoulement
H1	Secteur - Horiz.	Roudnice (barrage mobile en rivière)	Rép Czech	Kupsky	Fréquent	Écoulement
H2	Secteur - Horiz.	Barrage sur la Moselle à Lehmen (barrage de nav.)	Allemagne	Meinhold	Fréquent	Écoulement
H3	Secteur - Levante	Barrière Marée Tempête de la Tamise	UK	Wilkes	5 - 30/an	Inondation
H4	Secteur - Levante	EMS (Barrière marée temp - Nav. dans les pertuis)	Allemagne	Meinhold	Fréquent	Les deux
I1	Secteur - Verticale	Barrière Marée Tempête - Maeslant, Rotterdam	NL	Dan.& Bulk.	Annuel	Inondation
I2	Secteur - Verticale	Barrières marées tempêtes : Alternatives de conception	NL	Rigo	Fréquent	Inondation
I3	Secteur - Verticale	Porte d'écluse d'Amagasaki	Japon	Nagao	2-3 / an	Inondation
J1	Poutrelles & B/H	Caisson flottant du Kentucky Lock	USA	Miller	Annuel	Inondation
J2	Poutrelles & B/H	Batardeaux de maintenance d'Olmsted	USA	Miller	Annuel	Inondation
J3	Poutrelles & B/H	Tees - Poutrelles	UK	Dixon	Annuel	Maintenance
J4	Poutrelles & B/H	Murray River -Poutrelles	Australie	Rigo	Fréquent	Écoulement
K1	Pivotante	Bayou DuLarge : Porte barge de 17 m	USA	Miller	Annuel	Inondation
K2	Pivotante	Porte-barge de Bayou Lafourche	USA	Miller	Annuel	Inondation
K3	Pivotante-Flottant	Barrière marée tempête : (Concept innovant)	BE, NL	Rigo	Fréquent	Inondation
L1	Vanne levante	Barrage mobile de Beernem	Belgique	Bulckaen	Fréquent	Inondation
L2	Vanne levante	Barrière marée tempête du Canal Hartel	NL	Daniel	Annuel	Inondation
L3	Vanne levante	Ivoz-Ramet (rénovation du barrage + Batardeaux)	Belgique	Dermience	Fréquent	Écoulement
L4	Vanne levante	Barrage mobile - Kamihirai	Japon	Nagao	2-3 / an	Inondation
L5	Vanne levante	Barrage mobile sur la rivière Shinanogawa	Japon	Nagao	2-3 / an	Inondation
L6	Vanne levante	Blanc Pain (porte de garde)	Belgique	Rigo	Fréquent	Urgence
L7	Vanne levante	Barrière marée tempête de Hull	UK	Wilkes	10-30/an	Inondation
L8	Vanne levante	Cardiff Bay - Barrière marée tempête	UK	Wilkes	Fréquent	Marée
M1	Bouées flottantes	Ice boom - Lac St. Pierre	Canada	Abdelnour	Annuel	Inondation
M2	Non classé	Barrière Rideau - Temporaire	Canada	Abdelnour	Annuel	Inondation
		Batardeaux d'entretien et de maintenance - Voir CD Annex Section 5.5		Rigo	Annuel	Maintenance

Tableau 1.1 : Liste des projets «Project Reviews»

2. VANNES DES BARRAGES MOBILES ET DES BARRIERES ANTI-TEMPETES

2.1 PRESENTATION DE PROJETS - «PROJECT REVIEWS»

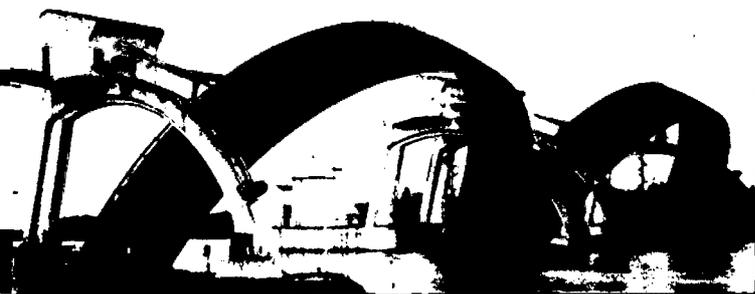
Des exemples représentatifs de chaque type de vannes sont présentés dans ce chapitre. Des présentations détaillées (Project Reviews) de chacun de ces types d'ouvrages sont incluses sur le CD du GT 101/Répertoire A1/. Ces études de cas contiennent une description complète du barrage mobile, des vannes, des fondations, ..., des caractéristiques de fonctionnement et, si disponible, du coût. Des photographies et des schémas techniques sont également disponibles pour plusieurs projets.

A. BARRAGE EN ARC (VOUTE)

Une vanne (porte) en arc est une ossature en voûte dont la portée est identique à la largeur de la voie navigable. Elle est articulée aux butées et pivote autour d'un axe horizontal. Elle est abaissée pour fermer le canal.

A.1 Les barrages mobiles en arc du Rhin

Cette double porte en arc, chacune d'une portée de 54 mètres, est employée pour contrôler l'écoulement nécessaire à la production d'électricité et à la navigation. Il y a 3 barrages semblables sur le Rhin.



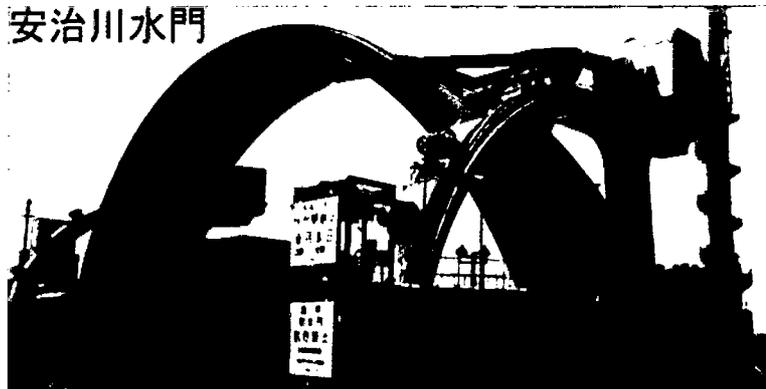
Hagestein, Pays-Bas (~1960)

A.2 Barrière en arc de la rivière Aji

C'est l'une des 3 portes de garde construites pour la protection contre les inondations et les crues de

la ville d'Osaka au Japon. Cet ouvrage a une portée de 57 mètres.

安治川水門



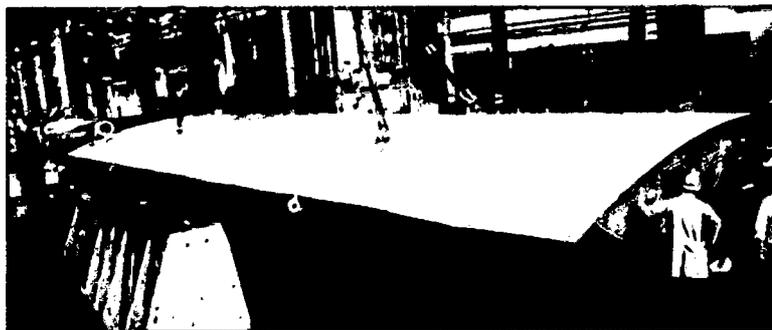
Osaka, Japon, 1970

B. VANNES CLAPETS

Les vannes clapets sont articulées à leur base où elles sont fixées à la fondation. Elles pivotent vers l'aval et se couchent dans un décrochement prévu à cet effet dans le radier. Pour obstruer l'écoulement, la vanne est remontée progressivement.

B.1 Barrage de Lagan (barrière anti-tempête)

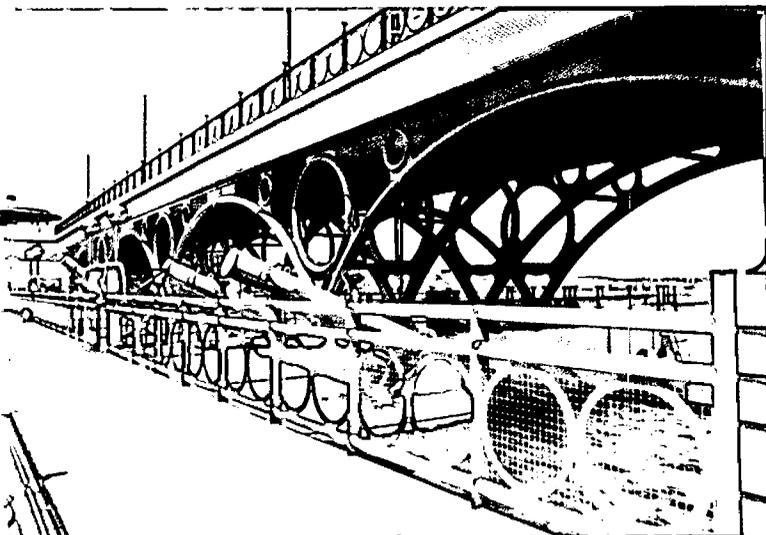
La barrière se compose de 5 vannes clapets caissons, articulées à la base. Chaque vanne a une longueur de 20 m et une hauteur de 4,5 m. Elles sont utilisées pour contrôler le passage des crues et améliorer la qualité de l'eau.



Belfast, Irlande du Nord, 1994

B.2 Barrage de Tees (barrage anti-tempête)

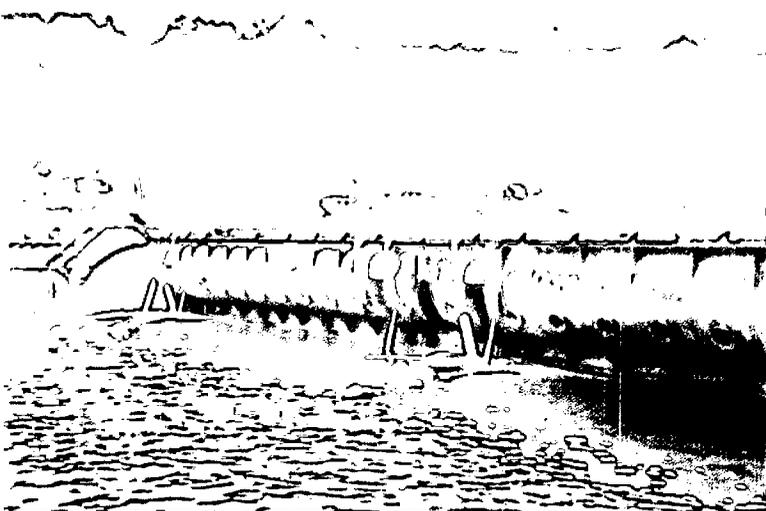
Ce barrage a été réalisé pour améliorer la qualité de l'eau et pour assurer une protection contre les inondations. Le barrage est muni de 4 vannes clapets articulées à leur base. Chaque vanne a une longueur de 13,5 m et une hauteur de 8 m.



Barrage de Stockton, Tees/Teesside, UK, 1995

B.3 Libcice-Dolany (barrage mobile de navigation)

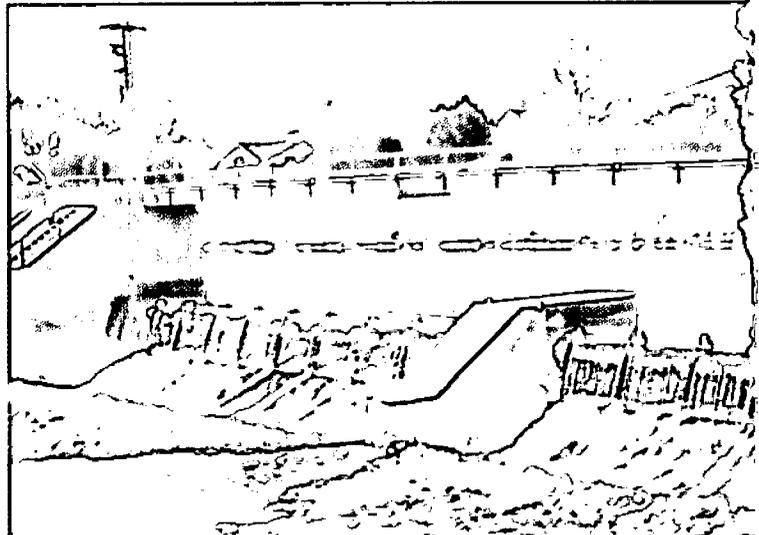
Le barrage est composé de 3 passes qui garantissent la navigation et la production hydro-électrique sur le fleuve Vltava. La passe de droite est de 19,85 m et les 2 autres de 43,0 m. Elles ont une hauteur de contrôle de 3, 3m.



Libcice, Fleuve Vltava, République Tchèque, 1989

B.4 Barrage mobile de Veseli (CZ)

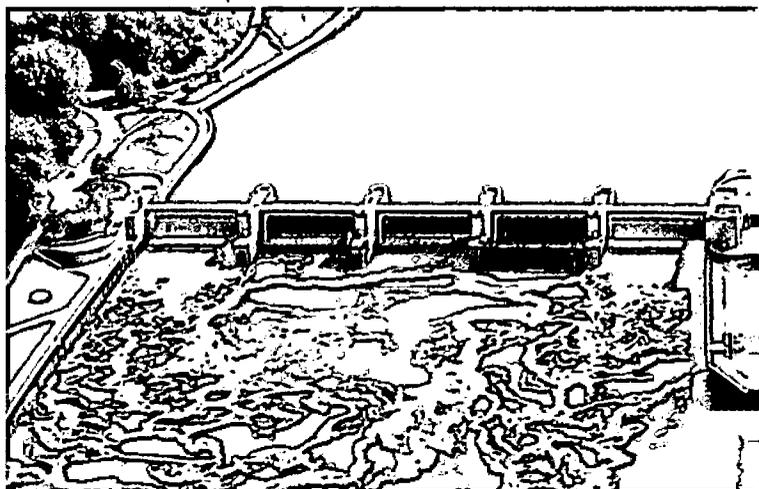
Le barrage mobile de Veselí se compose de deux vannes clapets de 24,4 m ayant une hauteur de contrôle de 1,4 m. Le barrage permet la navigation et la production hydro-électrique. Une échelle à poissons est également présente.



Veseli, Rivière Morava, République Tchèque, 2002

B.5 Barrage mobile de Bremen Weser (navigation)

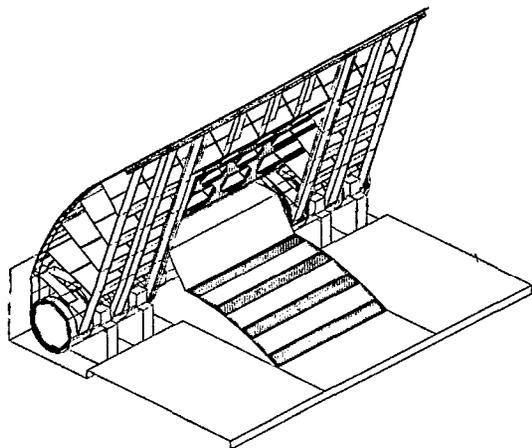
Les cinq vannes clapets caissons ont une portée de 31 m, et une hauteur de contrôle de 3,8 m. Le barrage permet la protection contre les inondations et garantit un tirant d'eau minimum pour la navigation.



Bremen, Allemagne, 1993

B.6 Barrage Montgomery avec «tube de torsion»

Le projet se compose d'une écluse de navigation, d'une passe navigable de 91,4 m équipée avec 10 vannes clapets possédant un «tube de torsion», et d'un déversoir fixe non contrôlé. La longueur de déversement est de 61,0 m. Chaque vanne a une portée de 9,1 m et régule une chute de 3,96 m au dessus du déversoir.



Desha County, Arkansas, USA, 2004

B.7 Barrière de Sauer

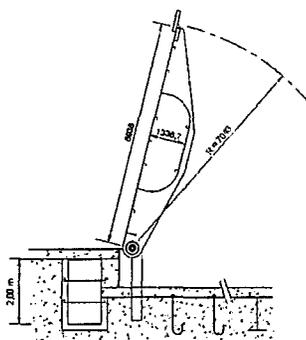
Le but de cet ouvrage est de protéger les villes et les terres contre les crues du Rhin. Elle est constituée d'une vanne clapet unique de 7,04 m de haut et de 60 m de long.

B.8 Barrage mobile à hausses de Denouval

Les 30 hausses (clapets) régulent une largeur de rivière de 70 m. Chaque élément a une hauteur de 3,3 m et une largeur de 2,5 m. Les hausses sont à commande hydraulique et il y a quatre positions possibles. Elles garantissent la navigation sur la Seine (France).



Andresy, Seine, France, 1980



B.9 Barrage mobile à hausses de Olmsted

La passe navigable du barrage est de 420 m avec 140 hausses métalliques de 2,95 m de large (Wicket gate), manœuvrée à partir d'un bateau. Le projet permet la navigation et le contrôle des inondations.



Olmsted, Illinois, USA, Prévu pour 2009.

B.10 Barrage mobile de Sinnissippi

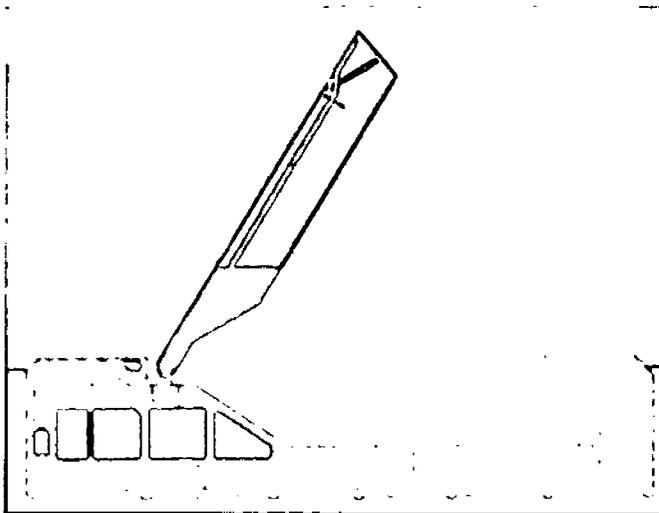
Le barrage possède 3 volets métalliques de 16 m de long, de 4 de 32 m et un déversoir fixe conventionnel en béton de 168 m. Ils sont actionnés de manière pneumatique (système Obermeyer). Le barrage assure la protection contre les inondations, la production hydro-électrique et la navigation



Sterling – Rock Falls, Illinois, 2002

B.11 Vannes clapets flottantes – Mose System

Ces vannes clapets rabattables, flottantes et oscillantes assureront la protection contre les inondations à Venise et constituent une barrière anti-tempête. Les 78 clapets de protection seront placés à 4 endroits. Leur largeur varie de 3,6 m à 5 m, et leur longueur de 18 à 28 m.



Venise, Italie (en projet)

C. BARRAGES MOBILES GONFLABLES

Il s'agit de barrages mobiles qui se composent de longues membranes souples, fixées à leur base sur la fondation. Le barrage est manoeuvré en gonflant et dégonflant les réservoirs membranaires avec de l'eau ou de l'air.

C.1 Barrage gonflable de régulation (Canada)

Le barrage gonflable a été construit en amont d'une chute et en aval de la prise d'eau d'une centrale afin de contrôler et d'optimiser le niveau d'eau, tout en maintenant un écoulement minimum continu.



Chute Bell, Rivière Rouge, Québec, Canada, 1994

C.2 Barrière de protection de Ramspol (NL)

La barrière est composée de 3 éléments gonflables

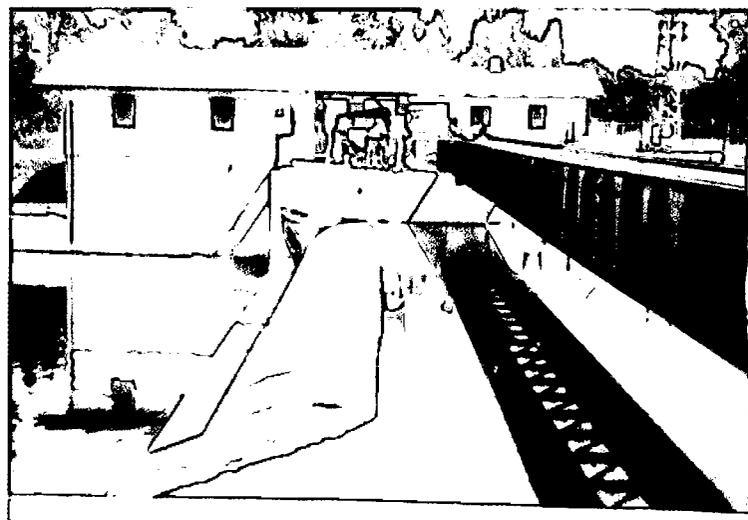
ayant une largeur totale de 60 m. Elle assure une protection vis-à-vis des inondations causées par une surélévation du plan d'eau jusqu'à 2,7 m. Les éléments gonflables sont remplis d'eau et d'air de façon à résister à la charge créée par la retenue.



Kampen, Pays-Bas, 2002

C.3 Barrage mobile gonflable de Pocaply

Ce barrage gonflable a une longueur de 21 m et une chute de 1,6 m. Il est gonflé à l'eau et crée un réservoir pour une centrale hydro-électrique.



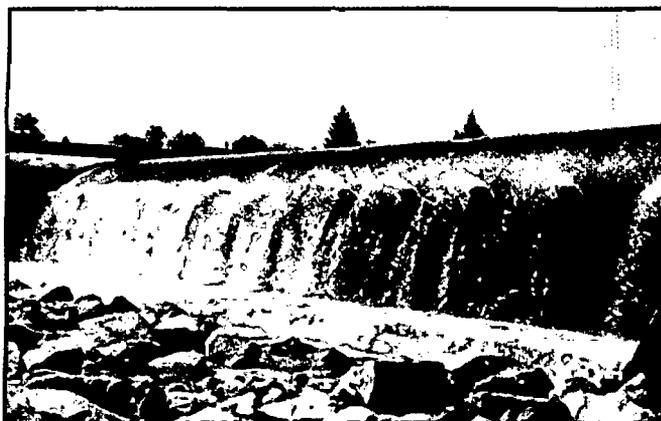
Pocaply, Loucna, République Tchèque, 1998

C.4 Les barrages gonflables en Allemagne

Le BAW présente le mode de fonctionnement et la conception des barrages gonflables.

C.5 Barrage mobile gonflable sur la rivière Lech

Ce barrage mobile crée une retenue pour la production d'hydro-électricité. Il est composé de 4 passes, dont une a une largeur de 26,65 m et une hauteur de 3,35 m. Les trois autres de 46,67 m ont une hauteur de 1,25 m.



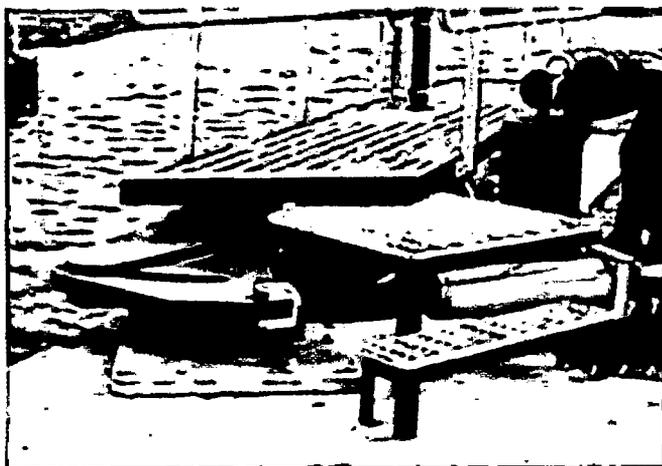
Füssen, Allemagne, 2001

D. PORTES BUSQUEES

Les portes busquées sont typiquement utilisées pour les écluses de navigation plutôt que pour le contrôle des inondations. Cependant, elles sont parfois utilisées comme portes de garde.

D.1 Porte de garde de Goole

Les portes busquées se ferment si une brèche apparaît dans une des parois du canal. Ce dispositif évite la vidange du bassin du port si une digue du canal venait à se rompre.



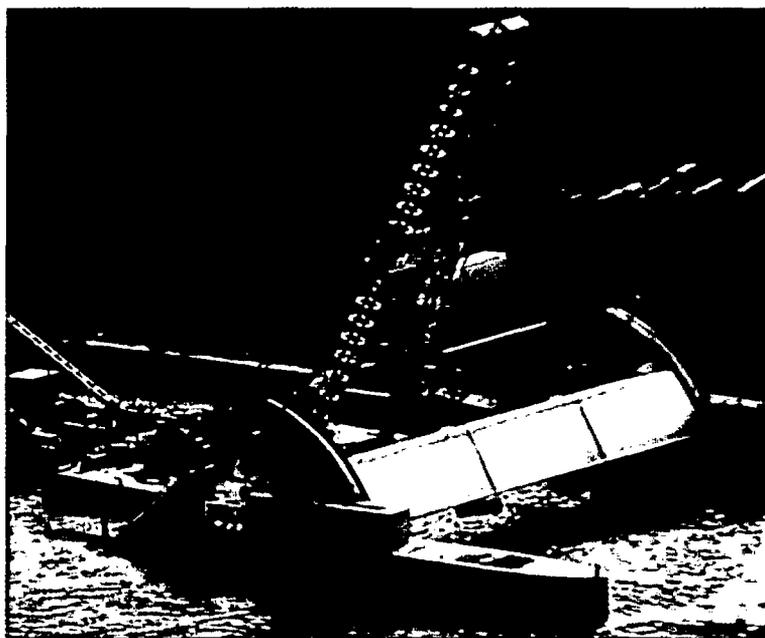
Goole, Grande Bretagne, 2002

E . VANNES SEGMENTS

Une vanne segment est constituée d'une ossature métallique en caisson soutenu à chaque extrémité par un bras articulé lui-même fixé à son autre extrémité sur le haut de la pile/culée. Les bras articulés des vannes segments peuvent se situer à l'amont ou à l'aval du corps de la vanne. La vanne est généralement manœuvrée par des vérins hydrauliques ou des câbles/chaînes fixés sur les bras. Selon la position verticale de la vanne on peut avoir un écoulement de surface (nappe déversante), un écoulement de fond (éventuellement noyé) ou une situation intermédiaire combinant les 2 types d'écoulement (écoulement mixte).

E.1 Vanne segment sur la Haute Meuse (Belgique)

Le projet concerne la reconstruction de plusieurs barrages mobiles de navigation sur la partie supérieure de la Meuse. Il permet essentiellement d'améliorer la navigation. Chaque vanne segment est équipée d'un clapet supérieur qui permet un contrôle de l'écoulement plus économique et plus précis.

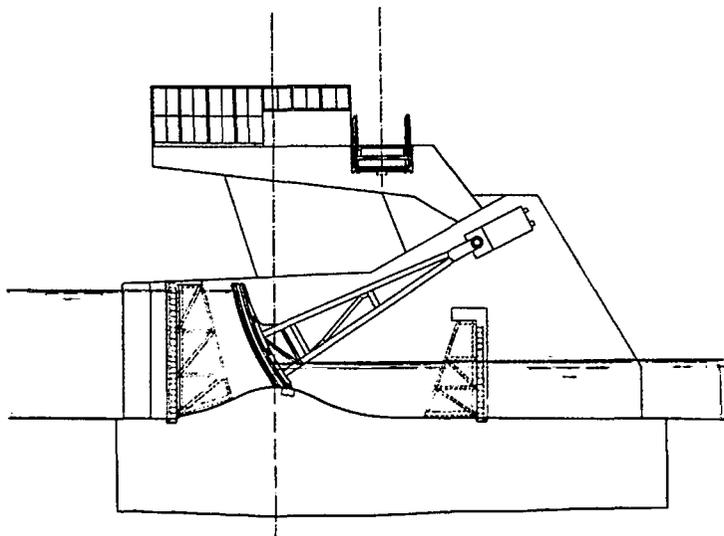


Haute Meuse, Belgique, 1985-95

E.2 Vanne segment de Steti

Le barrage est équipé de 7 passes, deux sont fixes, deux sont équipées d'une vanne segment en acier

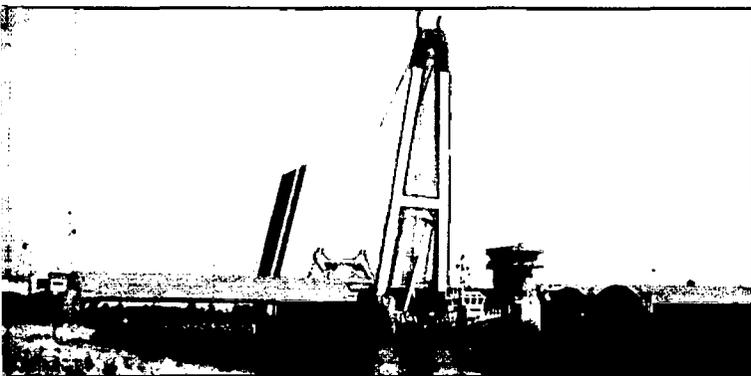
et trois passes d'une vanne segment munie d'un clapet supérieur de contrôle. La chute est de 4,4 m



Steti, Rivière Labe, République Tchèque, 1972

E.3 Barrière anti-tempête de Stör

De chaque côté du complexe d'écluses une passe du barrage mobile est équipée d'une double vanne segment afin d'assurer la navigation et une double protection contre les inondations. Les vannes segments ont une portée de 43 m et une hauteur de 13 m.



Etat fédéral Schleswig-Holstein, Allemagne, 1974

E.4 Barrage mobile de Braddock (navigation)

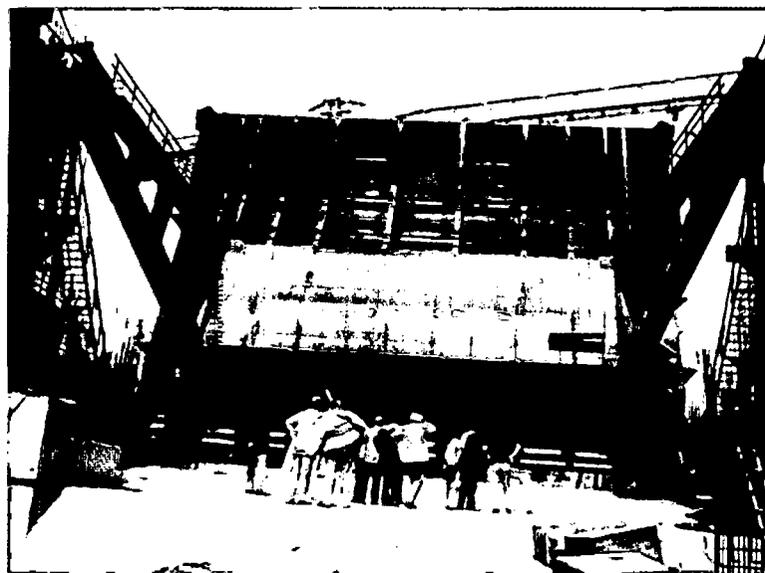
Les 4 vannes segments de 33,53 m de portée ont une hauteur totale de 6,4 m. Les vannes sont utilisées pour la protection vis-à-vis des crues et pour maintenir la navigation. Elles sont à commande hydraulique.



Braddock, PA, USA, 2003

E.5 Les Portes de Fer (barrage mobile de navigation)

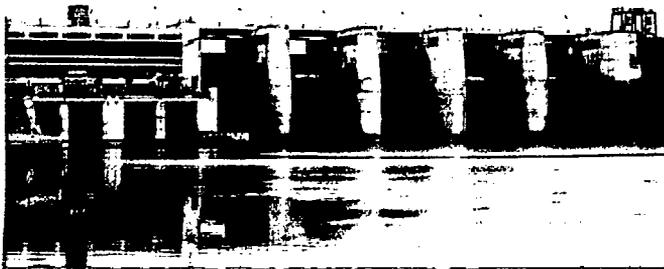
Les 2 barrages sont composés de 7 passes de 21 m équipées avec des vannes segments, dont 3 sont munies de clapets supérieurs d'une hauteur de 2,50 m. Les barrages sont utilisés pour la production d'électricité et la navigation.



Danube, Roumanie et Yougoslavie, 2000

E.6 Cours inférieur de la rivière Olt

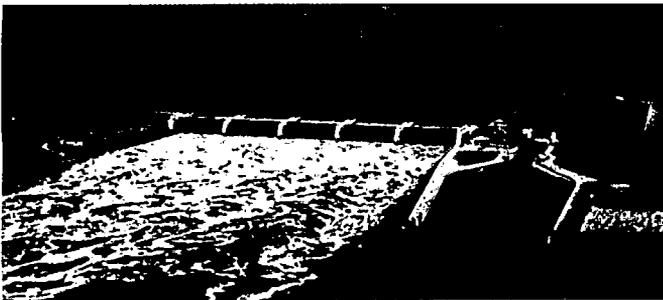
Cinq barrages ont été construits sur la rivière Olt avec des chutes de 13,5 m pour permettre la production hydroélectrique. Chaque barrage est composé de 5 passes de 15 m de portée. Les vannes sont des vannes segments munies d'un clapet.



Olt River – cours inférieur, Roumanie, 1990

E.7 Barrière anti-tempête de l'Eider

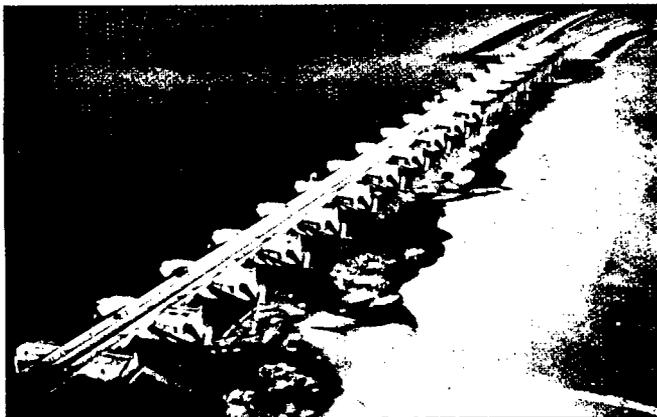
La barrière se compose de cinq passes de 40 m de portée. Chaque passe est munie de 2 vannes segments pour assurer une double protection.



Schleswig-Holstein/Nordfriesland, Allemagne, 1973

E.8 Barrière anti-tempête du Haringvliet

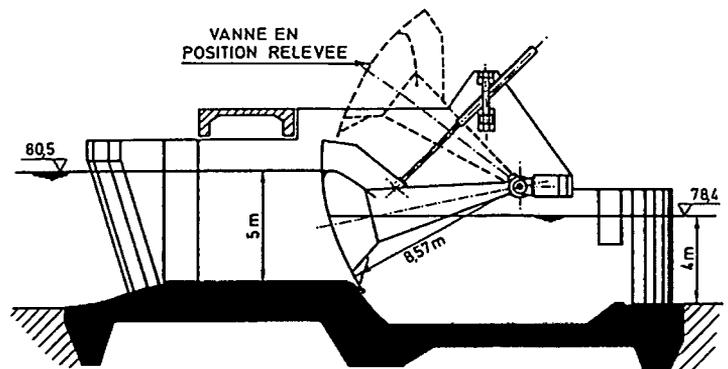
Cet ouvrage de protection contre les inondations est constitué de 17 passes navigables équipées chacune d'une double vanne segment (en position inversée). La barrière a une longueur totale de 1048,5 m et la portée des vannes est de 62 m.



Hellevoetsluis, Pays-Bas, 1970

E.9 Vanne segment avec écoulement de fond et de surface

Ce concept de vannes segments (toujours à l'étude) a été conçu pour permettre un contrôle précis de l'écoulement sans avoir recours à un clapet supérieur pour la régulation fine. En abaissant la vanne, on crée un écoulement de surface (régulation fine) et en la soulevant un écoulement de fond permettant l'évacuation des crues et sédiments. Ce concept original combine économie, simplicité et régulation effective.



Haute Meuse, Belgique (projet)

E.10 Barrages mobiles préfabriqués - Concept innovant

Le projet concerne le remplacement de 9 barrages mobiles de navigation. À cette fin une étude de faisabilité a été réalisée avec un concept innovant de préfabrication. Chaque barrage mobile serait constitué de 4 éléments flottants préfabriqués, transportés par flottaison sur le site, et immergés sur une fondation préparée à cet effet. Les éléments sont en aluminium pour flotter en eau peu profonde (60 cm), l'acier pourrait également être employé. La structure (30 m de long, 29,5 m de large et 7,6 m de haut) comprend 2 passes équipées chacune d'une vanne segment de 12 m de portée. Le béton de remplissage est renforcé avec des fibres métalliques plutôt qu'avec des armatures traditionnelles. Ceci facilite la mise en oeuvre sous eau. Le concept a été développé pour la Sambre, Belgique (étude en cours).

F. BARRIÈRES ROULANTES

Ce type de barrière est semblable aux portes d'écluses dites roulantes ou brouettes. Lors de la manœuvre, elles roulent pour fermer la passe en

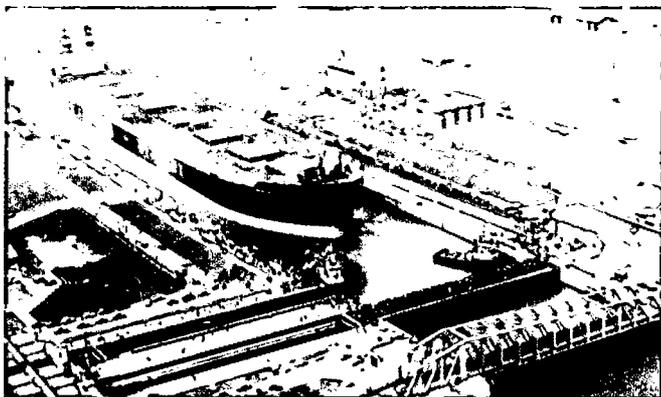
prévision d'une inondation. Ces vannes roulantes sont soutenues sur le fond et/ou par le dessus (soutenu uniquement au fond : vannes dites « wagon », soutenue aussi par le dessus : vannes dites « brouette »).

F.1 Barrière roulante de l'écluse de Selby

Cette barrière de prévention des inondations est logée dans une chambre à côté de la voie navigable et est déplacée en travers de la rivière pour fermer la passe. La porte a 6,4 m de large, 3,85 m de haut et une épaisseur de 0,35 m. Elle est partiellement flottante et l'étanchéité est assurée par un seuil équipé d'un madrier en bois.

F.2 Porte roulante de Berendrecht

Ces portes d'écluses roulantes dites brouettes sont requises pour garantir l'accès au port mais aussi pour protéger les installations portuaires des inondations. Les portes sont flottantes et soutenues d'une part par un chariot submergé et un chariot de surface à l'autre extrémité. Les dimensions des portes sont de 69,69 m de long, 22,60 m de hauteur et 9 m d'épaisseur.



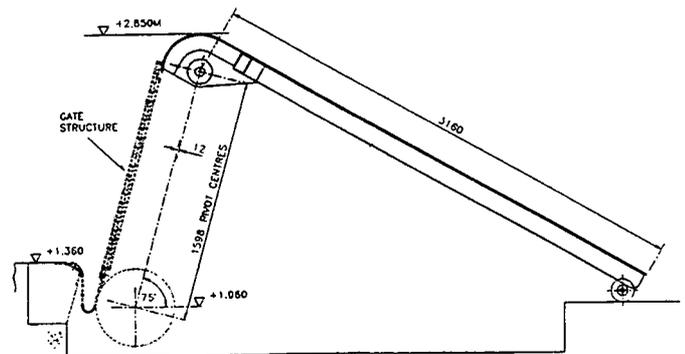
Anvers, Belgique, 1989

G. VANNES TOIT

Les vannes toit ne sont plus très utilisées de nos jours pour la régulation en rivière. Une vanne toit est constituée de deux panneaux qui glissent l'un sur l'autre. Lors des crues, elles peuvent se loger dans le radier. Afin de contrôler l'écoulement, la vanne est levée (abaissée) en ajustant la pression dans la chambre sous les panneaux. L'utilisation récente de vannes toit a été observée dans 2 parcs aquatiques en Angleterre pour contrôler le débit dans des stades d'eaux vives pour les kayaks et le rafting. La difficulté du parcours est réglable en ajustant les vannes pour modifier l'écoulement/débit.

G.1 Vanne toit du barrage de Tees

Cette vanne toit a une largeur de 5,95 m. Le panneau amont fait 1,598 m de long et le panneau aval 3,16 m. La vanne est utilisée pour contrôler les écoulements d'un stade d'eaux vives pour canoës et kayaks.



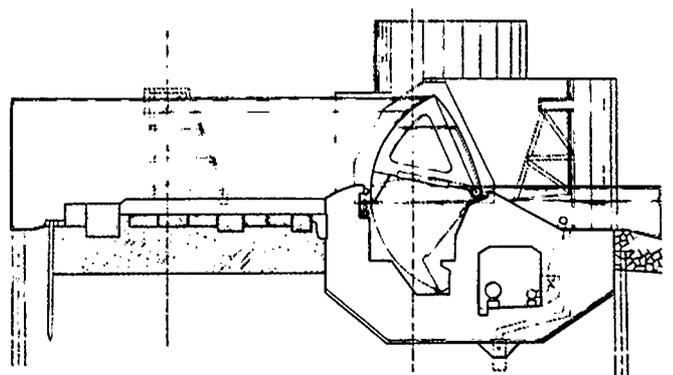
Tees, Royaume-Uni, 1984

H. VANNES SECTEUR - AXE HORIZONTAL

Les vannes secteur à axe horizontal sont des ossatures ayant un bordé circulaire amont et une articulation du côté aval. Elles pivotent dans un plan vertical autour d'un axe horizontal situé au niveau du radier. Une fois abaissée, la face supérieure de la vanne coïncide approximativement avec la surface du radier. Les vannes secteurs tournantes sont une variante utilisées pour les barrières anti-tempêtes. Ces vannes sont composées d'un bordé formant un arc circulaire (secteur) et sont articulées à leurs extrémités sur les piles/culées.

H.1 Vannes secteurs de Roudnice

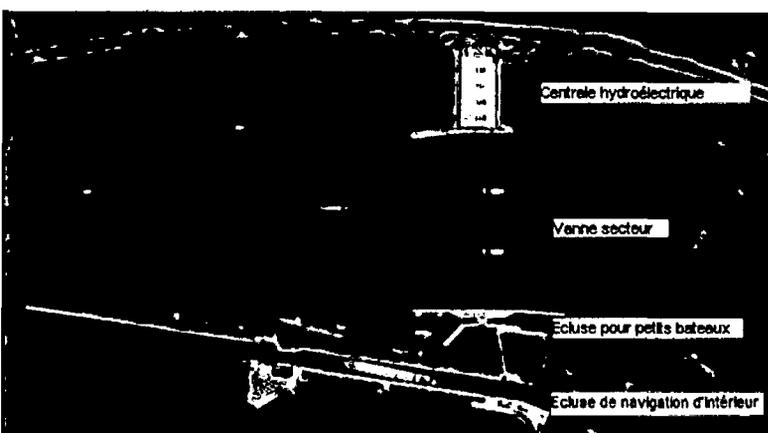
Ces vannes sont utilisées pour la navigation et l'irrigation. Le barrage est constitué de 3 passes de 54,05 m et une retenue de 2,70 m.



Roudnice, Rivière Labe, République Tchèque, 1972

H.2 Barrage sur la rivière Mosel à Lehmen

Onze des 14 barrages construits sur ce tronçon de la Moselle utilisent des vannes secteurs pour contrôler les écoulements pour la navigation et la production hydroélectrique (3 passes de 40 m et une retenue amont de 5,4 m).



La Moselle, Allemagne, 1963

H.3 Barrière anti-tempête sur la Tamise

Cette barrière anti-tempête protège Londres des inondations créées par la Tamise. La barrière a une longueur totale de 520 m. Il y a 4 vannes secteurs de 20 m de haut et d'une portée de 61 m.

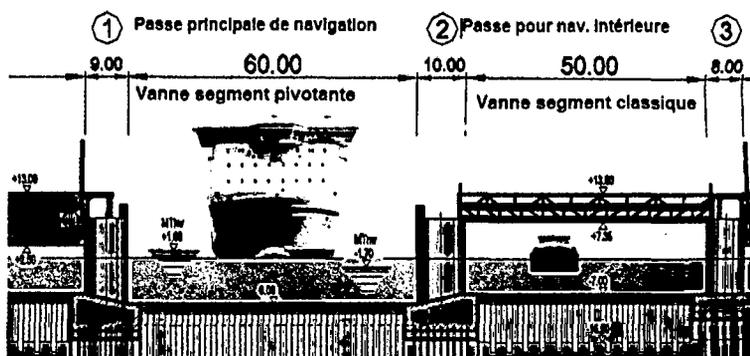


Londres, Royaume Uni, (1982)

H.4 Barrière anti-tempête sur la rivière Ems

La barrière sur l'Ems assure la protection contre les inondations et permet la navigation. Elle a une longueur totale de 476 m entre berges et est con-

stituée de 7 passes. La passe navigable principale est équipée d'une vanne secteur tournante.



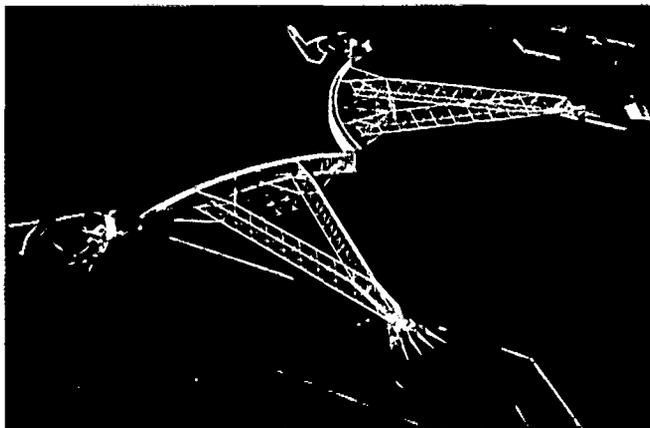
Rivière Ems, Allemagne, 2002

I. VANNES SECTEURS - AXE VERTICAL

Les vannes secteurs à axe vertical sont des ouvertures ayant un bordé circulaire, équipées d'un axe vertical situé au centre du bordé circulaire. Le bordé est uniquement situé sur la face amont de l'arc. Puisque la poussée hydraulique est dirigée radialement, c-à-d vers l'axe vertical, la charge non équilibrée est fortement réduite. Ces vannes peuvent donc être ouvertes et fermées en présence d'une charge différentielle amont-aval.

I.1 Barrière anti-tempête de Maeslant

Cette barrière de protection contre les marées et les tempêtes a une portée utile de 360 m (passe navigable). Elle est composée de 2 vannes secteurs flottantes. Elle est manoeuvrée à l'aide de motrices situées les deux rives. Chaque vanne pivote autour de son axe (vertical) grâce à un roulement sphérique de 10 m de diamètre.



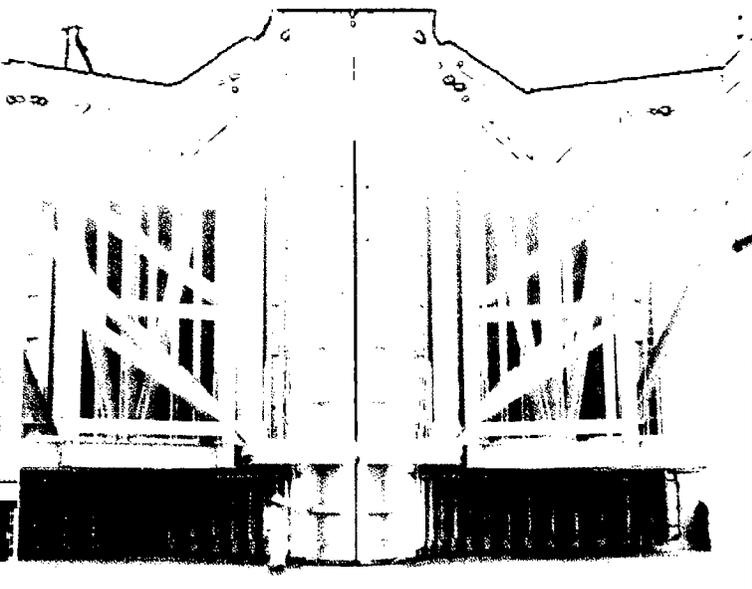
Hoek van Holland, Rotterdam, Pays-Bas, 1997

I.2 Conceptions Alternatives - barrière de Maeslant

Cet article présente des conceptions alternatives aux vannes secteurs retenues pour la barrière de Maeslant (I.1). Il s'agit de clapets ballastables, de vannes segments, d'une porte à déplacement latéral, d'un bateau porte et d'une vanne pivotante flottante (K.3).

I.3 Porte d'écluse d'Amagasaki

Ces vannes secteurs à axes verticaux permettent l'entrée dans une écluse de largeur 17 m, tout en assurant la protection des zones urbaines environnantes contre les inondations, dues aux marées et aux typhons.



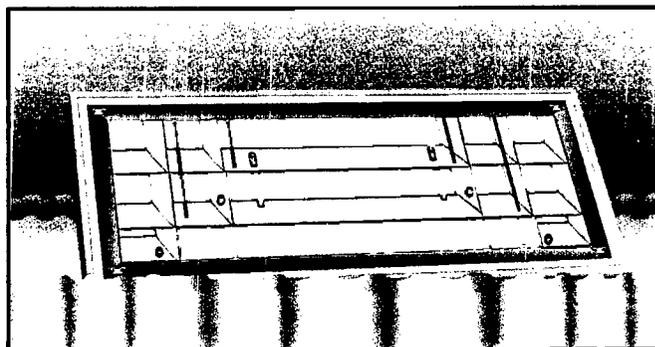
Amagasaki City, Japon, 2003

J. BARRAGES A POUTRELLES ET BATARDEAUX

Les batardeaux de maintenance sont typiquement composés d'une double poutre horizontale en treillis et d'un bordé. Ils sont stockés à proximité du pertuis et sont mis en place par une grue ou un pont mobile. Ils sont conçus pour franchir l'entièreté de la passe navigable ou une portée réduite entre des poteaux intermédiaires qui sont installés à intervalles réguliers à travers la passe. Ils peuvent couvrir toute la hauteur de la retenue ou être composés de plusieurs petites unités empilées et jointes les unes aux autres (poutrelles).

J.1 Caisson flottant de l'écluse du Kentucky

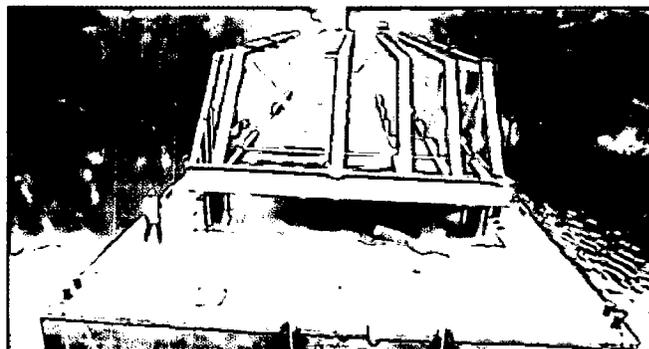
Ce caisson flottant est un batardeau, utilisé pour l'entretien afin d'assécher le sas des écluses. Le batardeau est remorqué d'un emplacement à un autre comme une barge. Il est alors ballasté avec de l'eau afin de le faire pivoter en position verticale (axe horizontal), puis de le positionner et enfin de l'échouer dans sa position définitive. Le caisson a une portée de 34,3 m, une hauteur de 9 m et une épaisseur de 3,2 m.



Batardeaux, Tennessee et Kentucky, USA, 1969

J.2 Batardeaux de maintenance à Olmsted

Quatre batardeaux de 34,1 m de portée ont été construits pour permettre la mise à sec pour l'entretien des écluses et des vannes segments du barrage mobile. Les batardeaux sont empilés et peuvent ainsi s'adapter à des sites différents. L'élément inférieur (3,4 m ou 5,5 m de haut) est conçu pour soutenir un élément supérieur de 11,6 m de haut.

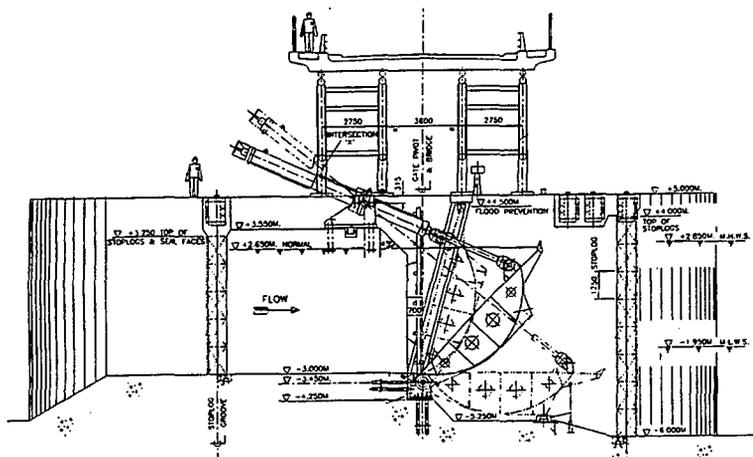


Olmsted, Illinois, USA, 2004

J.3 Batardeaux du barrage de Tees

Treize poutrelles batardeaux de 1,25 m de hauteur ferment une passe de 13,89 m de large. Huit sont utilisées pour l'aval de la vanne et 5 pour l'amont.

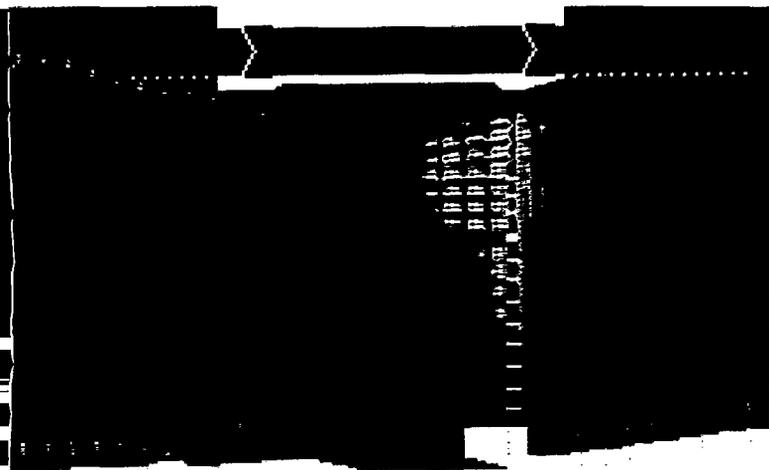
Elles sont mises en place avec une grue et une poutre de levage qui attachent et détachent automatiquement ces poutrelles.



Stockton, Tees/Teeside, RU, 1995

J.4 Barrages à poutrelles sur la rivière Murray

Ces barrages à poutrelles sont utilisés comme support à la navigation et au contrôle des crues. Ils résistent à une hauteur de charge variant de 4,5 m à 6 m.



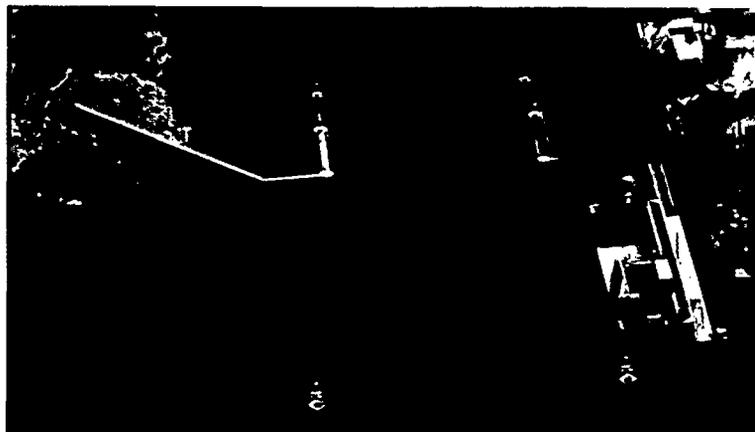
Adelaide - Mildura, Australie (vers 2000)

K. VANNE PIVOTANTE

La vanne pivotante, positionnée sur le côté de la voie navigable, pivote autour d'un axe vertical pour s'appuyer contre ses culées, de chaque côté de la voie navigable. La vanne pivotante peut être flottante afin de réduire les efforts sur la charnière et les efforts de manœuvre.

K.1 "Porte-barge" de Bayou Dularge

Cette barrière de contrôle des inondations est mise en place par des treuils avant la montée des eaux. Une fois en position, elle est ballastée. Elle ferme une passe de 18,3 m et la retenue est de 6,25 m.



Bayou Dularge, Louisiane, USA, 1996

K.2 "Vanne-barge" de Bayou Lafourche

Cette barrière de contrôle des inondations est similaire à celle de Bayou Dularge. Elle ferme une passe de 22,9 m, a une hauteur de 3 m, et est munie d'une rehausse étanche d'une hauteur de 1,5 m.

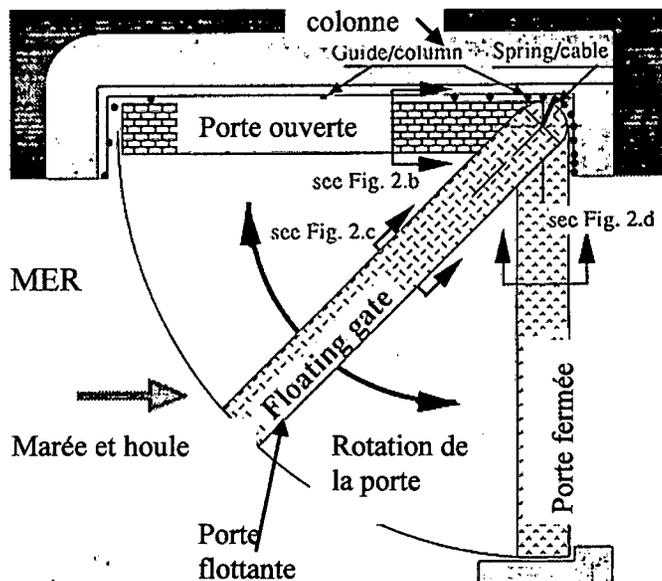


Bayou Lafourche, Louisiane, USA

K.3 Barrière pivotante, flottante, à axe vertical

Cette conception alternative de barrière pivotante flottante a été développée pour la fermeture de

grandes passes navigables (supérieures à 400 m) sans limitation sur le tirant d'air, ni contact avec la fondation, aussi bien durant la construction qu'en fonctionnement (Rigo et al. 1996).



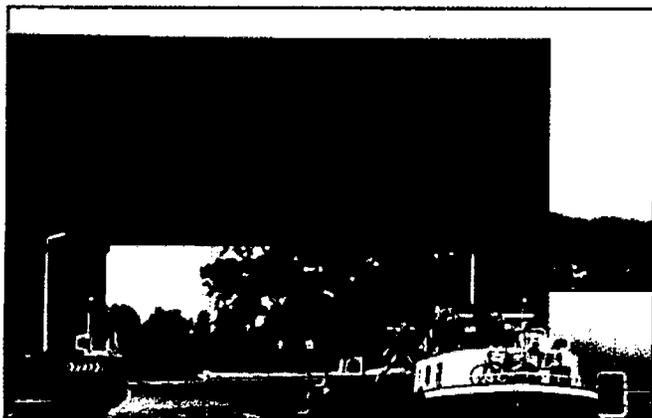
Projet en Belgique et aux Pays-Bas (concept uniquement)

L. PORTE LEVANTE VERTICALE

Les portes levantes se lèvent et s'abaissent. Elles peuvent être soit positionnées sous l'eau et levées pour obstruer l'écoulement, soit placées en position haute, reposant sur des tours ou un portique et abaissées pour réguler/couper l'écoulement.

L.1 Barrage de Beernem

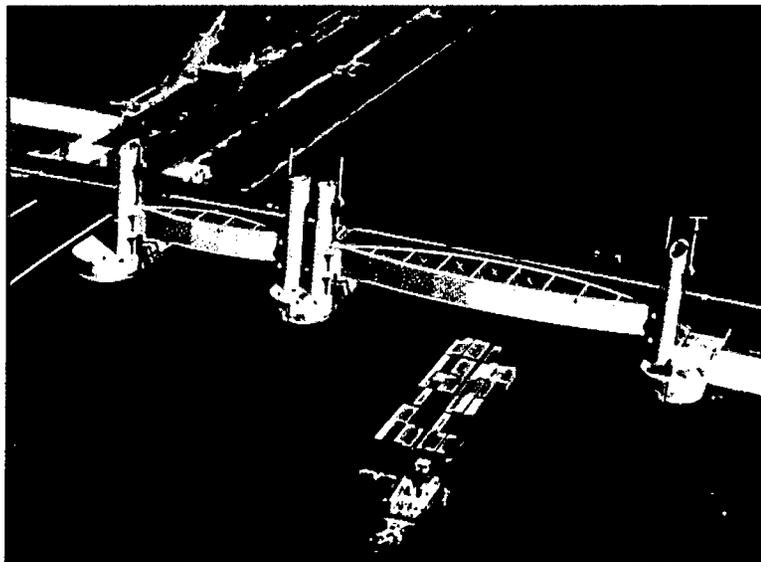
Cette porte levante verticale assure la protection contre les inondations. Elle a une hauteur de 8,05 m et une largeur de 17,9 m.



Beernem, Belgique, 1998

L.2 Barrière du canal de Hartel

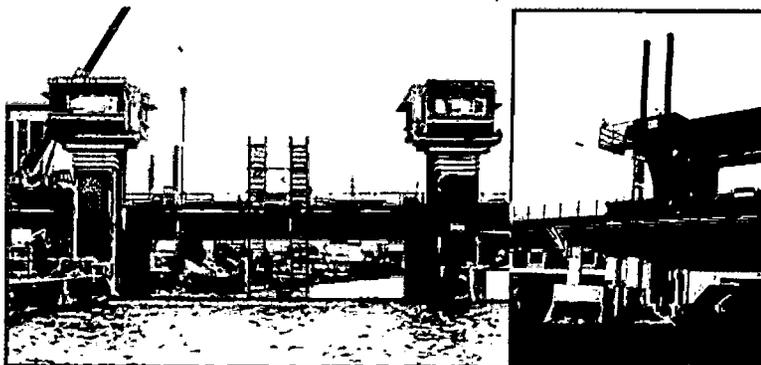
Cette large barrière anti-tempête comporte deux passes de 98 m et 49,3 m de portée. Chaque passe est équipée d'une vanne levante d'une hauteur de 9,3 m. Pour faciliter le contrôle de la retenue, les vannes ne sont jamais complètement fermées et, en période de crue, les vannes sont mêmes noyées (écoulement de surface).



Spijkenisse, Pays-Bas, 1996

L.3 Ivoz-Ramet

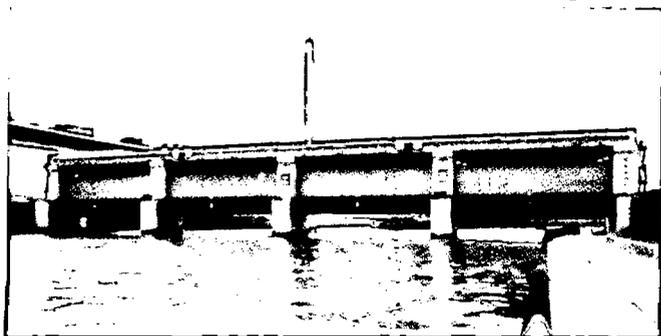
Ceci est un bon exemple de réhabilitation de barrage mobile de navigation.



Liège, Meuse, Belgique, 2000-2001

L.4 Barrière de Kamihirai

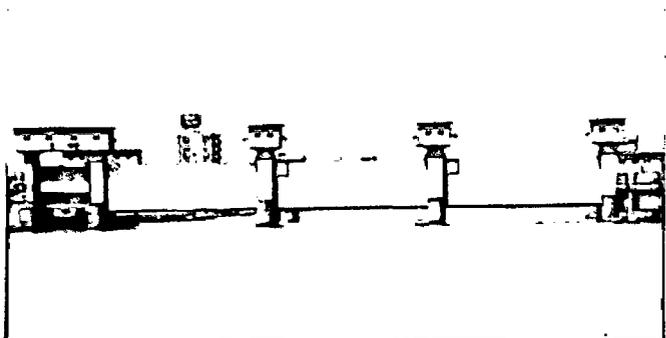
Les 4 passes du barrage sont fermées à l'approche d'une inondation. Chaque passe a une portée de 30 m; 2 vannes ont une hauteur 9,2 m et les 2 autres de 9,5 m.



Tokyo, Japon, 1990

L.5 Barrière sur la rivière Shinanogawa

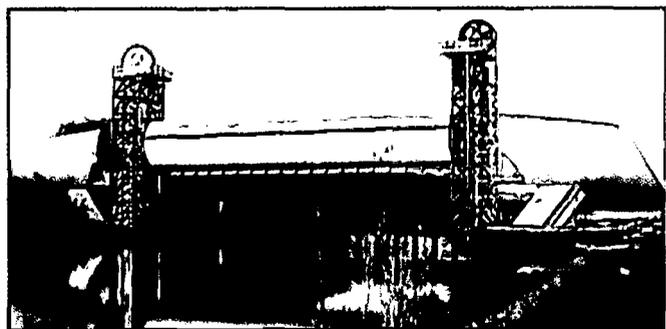
Cette structure de protection contre les inondations est constituée de 3 passes identiques de 30 m de portée et d'une hauteur de 24,5 m.



Préfecture Niigata, Japon, 1974

L.6 Porte de Garde du Blanc Pain

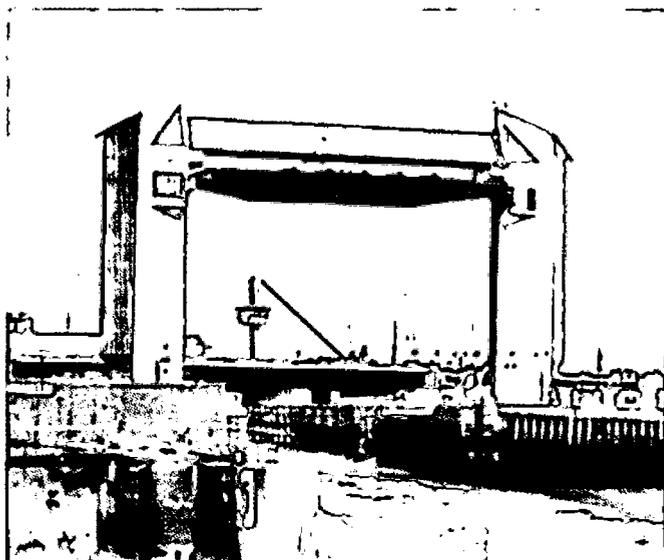
Cette porte de garde levante protège l'ascenseur hydraulique à bateaux de Strépy (73 m de chute) et la campagne environnante contre des inondations créées par la rupture d'une digue ou la destruction d'un ouvrage d'art sur le canal. Cette porte abaissante de 32,4 m de portée permet de fermer en urgence le canal et garantit un tirant d'air de 7 m en période de navigation.



La Louvière, Canal du Centre, Belgique, 2003

L.7 Barrière de Hull

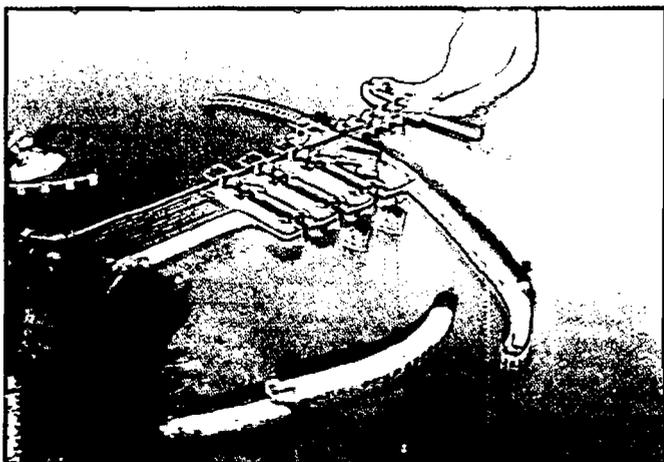
La barrière anti-tempête de Hull est constituée par une vanne levante qui assure le contrôle d'une passe navigable de 30 m de portée et apporte une protection contre une surélévation du niveau de la rivière de 6,3 m. La porte a été conçue pour être esthétiquement agréable. Elle pivote de 90 degrés en position haute pour maximiser le tirant navigable et minimiser l'impact visuel.



Hull, UK, 1979

L.8 Barrière de la baie de Cardiff

Le barrage de la baie de Cardiff est une barrière anti-tempête conçue pour la protection contre les inondations. Il comporte 5 passes (9 m de large x 7,5 m de haut) munies de portes levantes à double panneaux (Faganello E., 2004).

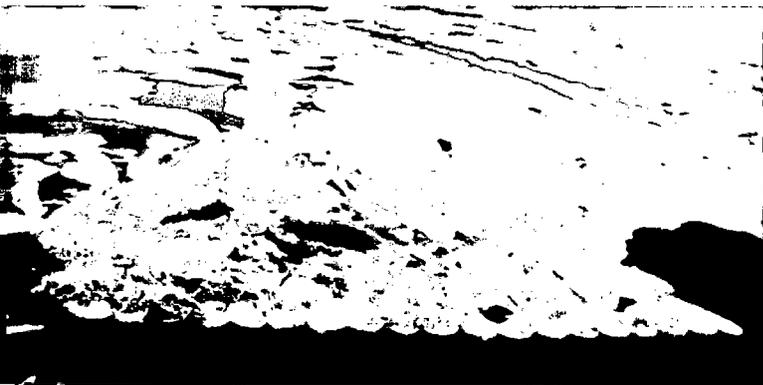


Baie de Cardiff, RU, 1998-99

M. AUTRES TYPES DE VANNES

M.1 Barrage flottant «Ice Boom» - Lac St. Pierre

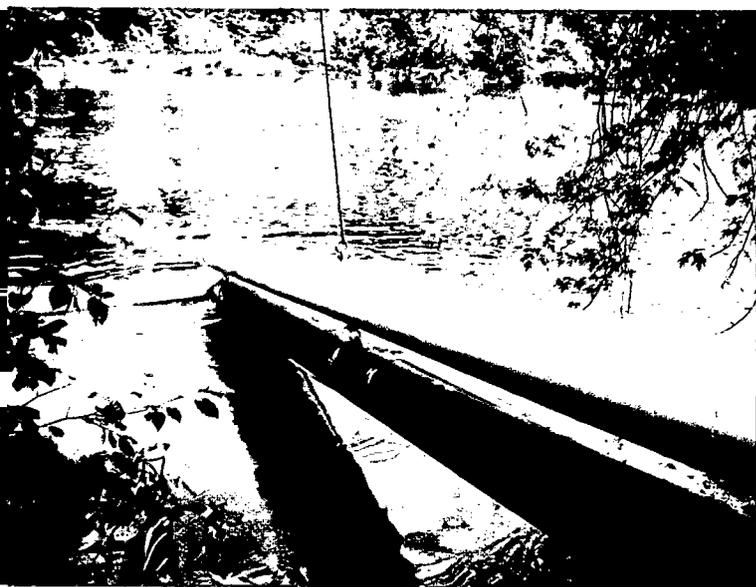
Cette structure flottante protège un important canal de navigation contre sa fermeture par les glaces. Les éléments flottants (ice booms) du barrage sont ancrés par des câbles métalliques au fond du lac.



Trois Rivières, Québec, Canada, 1994

M.2 Barrière «rideau»

Cette barrière «rideau» a été conçue pour créer une perte de charge et, temporairement, pour forcer la déviation de l'écoulement loin d'un affluent. Elle est composée d'un rideau fixé au fond de la rivière et à un boudin en caoutchouc ou un tube en plastique, en flottaison.



*Essai en laboratoire et mise en place du rideau,
2004.*

2.2 LEXIQUE ET TERMINOLOGIE

2.2.1 Termes techniques dans différentes langues

2.2.1.1 Les Dictionnaires de PIANC

Pour favoriser l'utilisation des termes techniques adéquats et homogènes dans les différentes langues, les dictionnaires techniques de PIANC (disponible dans six langues : français, allemand, anglais, espagnol, italien, et néerlandais) peuvent être utilisés.

L'édition de ces dictionnaires techniques de PIANC a débuté en 1930. Malheureusement, certains n'ont pas encore été édités et d'autres ne sont plus disponibles. Ces dictionnaires (édités ou pas) sont :

- Chapitre I: La mer (*)
- Chapitre II: Rivières, Ruisseaux, Canaux (*)
- Chapitre IV: Bateaux et navires, Propulsion (1967)
- Chapitre V: Les matériaux (1951)
- Chapitre VI: Équipement et Méthodes de Construction (1959)
- Chapitre VII: Les Ports (1938)
- Chapitre VIII: Écluses et Cales Sèches, (1936)
- Chapitre IX: Les signaux maritimes (1963)
- Chapitre X: Les barrages en rivières (barrages fixes, barrages mobiles), (1935, *)
- Dictionnaire Technique Illustré PIANC, 1985, ébauche

(*) *Ne fait pas partie (ou plus) du catalogue actuel des publications de PIANC*

Le *Dictionnaire Technique Illustré* (PIANC, 1985) n'est actuellement pas publié. Son contenu concerne les écluses, les centrales hydro-électriques, les barrages, les systèmes d'assèchement, les systèmes de protection contre les impacts et les différents équipements les composant. Le contenu comprend des termes techniques relatifs à l'hydraulique, aux ouvrages hydrauliques et à quelques types de structures hydrauliques (portes d'écluse et vannes de barrages mobiles).

Néanmoins une ébauche est disponible sur le CD dans quatre langues (allemand, anglais, français, et néerlandais). Le dictionnaire, convertit en fichier pdf, peut être consulté sur le CD, Répertoire / B1- Dictionary (PIANC 1986)/.

La table des matières (fichiers pdf) inclut:

- Page 02-19: Écluses (Types, Éléments, Sections transversales)
- Page 20-41: Portes (Incluant les équipements)
- Page 42-53: Dispositifs de mise à sec
- Page 54-57: Protection contre les chocs de bateaux
- Page 58-65: Niveaux d'eau / Conditions de navigation

2.2.1.2 Dictionnaire d'Elsevier

Le dictionnaire "*Water and Hydraulic Engineering*" (Elsevier 1987) est également recommandé. Ce dictionnaire est disponible en anglais, français, espagnol, néerlandais et allemand.

2.2.1.3 Terminologie proposée par ICOLD

ICOLD-CIGB (International Commission on Large Dams-Commission Internationale des Grands Barrages) a aussi édité un excellent guide terminologique mais qui est plutôt spécifique aux vannes des évacuateurs de crues des barrages

fixes plutôt que des barrages mobiles de navigation.

Le dictionnaire technique de l'ICOLD peut être trouvé sur le site web

<http://www.icold-cigb.org>

et il existe également un dictionnaire en ligne :

<http://www.icold-cigb.org/services.htm>

2.2.2 Les termes techniques usuels relatifs aux barrages mobiles et aux barrières

Avant d'aborder les aspects techniques de la conception des barrages, il est nécessaire de définir :

- Les types et les paramètres principaux des barrières anti-tempêtes et des barrages mobiles
- Le nom (terminologie) des principaux éléments constitutifs d'un barrage mobile (d'une barrière)

Ci-après, les termes techniques sont expliqués en utilisant des images et des croquis (images explicites).

La Fig. 2.1 (page suivante) présente un schéma des principaux éléments constitutifs d'un barrage mobile et de ses parties mobiles (vannes et batardeaux) et la signification de quelques termes techniques (cfr.numérotation sur le schéma).

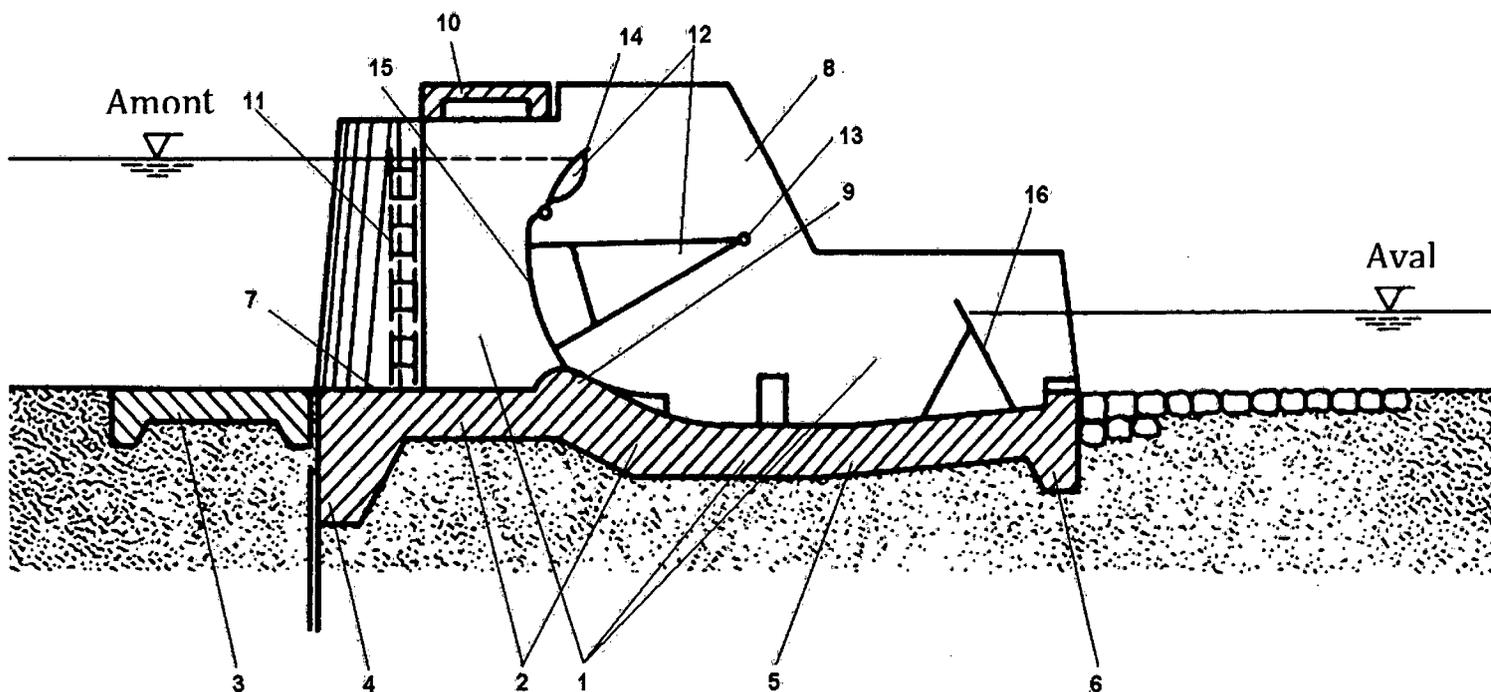


Figure 2.1 : Vue générale des principaux éléments de la structure d'un barrage mobile

Nombre	Signification
1	Structure du barrage mobile
2	Radier du barrage
3	Radier amont
4	Redent (bec) amont avec rideau étanchéité (ici un rideau de palplanches)
5	Bassin de dissipation
6	Redent (bec) aval
7	Radier (prise d'eau)
8	Pile du barrage
9	Seuil
10	Pont de service
11	Batardeau amont ou vanne de secours (ici: poutrelles)
12	Vanne (ici: vanne segment avec un clapet/hausse supérieur)
13	Articulation
14	Briseurs de jet ou aérateurs (pour l'aération de la nappe)
15	Bordé - Face amont de la vanne (élément étanche assurant la retenue)
16	Structure de mise à sec (aval) ouatardeau aval

Divers types de vannes de barrages mobiles parmi les plus courants sont présentés aux Tableau 2.1 à Tableau 2.3.

Code	Types de vannes en français allemand (D), anglais (E) et néerlandais (NL)	Croquis des types de vannes
1	<p>Vanne segment avec bras en compression</p> <p>D: Drucksegment E: Radial or taintor gate with compression gate arms NL: Segmentschuiif</p>	
2	<p>Vanne segment avec un clapet supérieur</p> <p>D: Drucksegment mit Aufsatzklappe E: Radial gate (or Taintor Gate) with compression gate arms and upper flap gate NL: Segmentschuiif met klep</p>	
3	<p>Vanne segment à bras tendu</p> <p>D: Zugsegment E: Radial gate (or Taintor Gate) with tension gate arms NL: Segmentschuiif met trekarmen</p>	
4	<p>Vanne clapet (en ventre de poisson)</p> <p>D: Stauklappe, Fischbauchklappe E: Flap gate (Fishbelly-type) NL: Bodemklep</p>	

Tableau 2.1 : Schéma des types de vannes des barrages mobiles (Partie I)

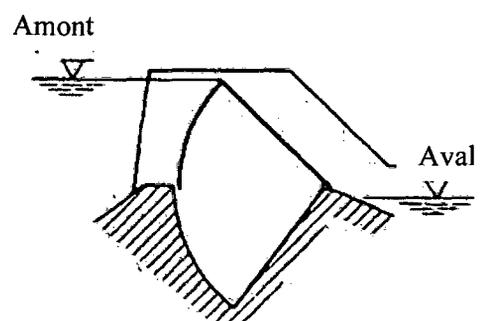
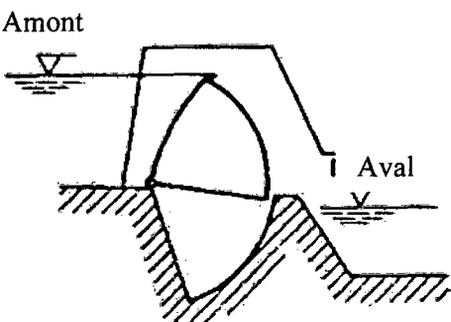
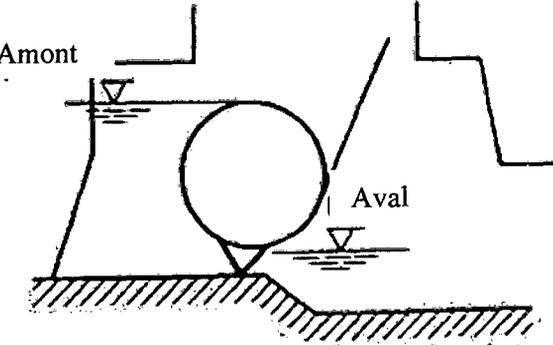
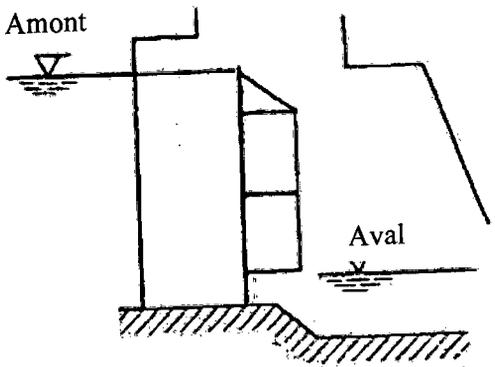
Code	Types de vannes en français allemand (D), anglais (E) et néerlandais (NL)	Croquis des types de vannes
5	Vanne secteur D: Sektor E: Sector gate NL: Verticale sectordeur	
6	Vanne tambour D: Trommel E: Drum gate NL: Luchtkistdeur (trommeldeur)	
7	Vanne cylindrique D: Walze E: Roller drum gate NL: Cilinderdeur	
8	Vanne levante (en une pièce) D: Einteiliges Hubschütz E: Vertical lift gate (one-piece gate) NL: Hefschuif	

Tableau 2.2 : Schéma des types de vannes des barrages mobiles (Partie II)

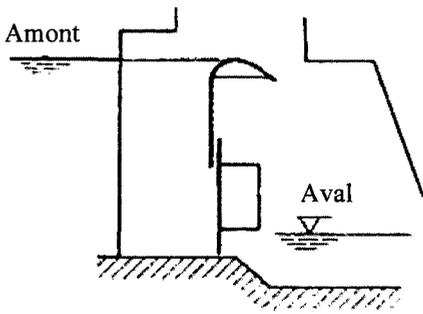
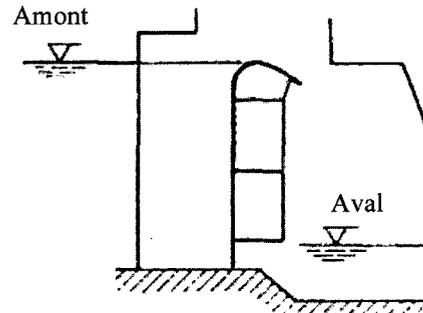
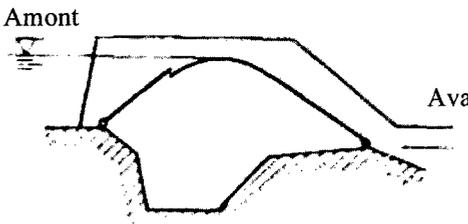
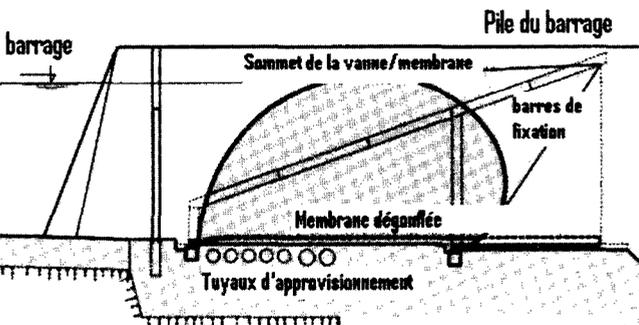
Code	Types de vannes en français allemand (D), anglais (E) et néerlandais (NL)	Croquis des types de vannes
9	<p>Vanne levante avec hausse supérieure (ou double corps)</p> <p>D: Hakendoppelschütz E: Double leaf gate (Upper gate: Lifting hook type) NL: Dubbele hefschuif met overlaat</p>	
10	<p>Vanne levante avec lame déversante</p> <p>D: Hakenschütz E: Vertical lift gate (Lifting hook type) NL: Hefschuif met overlaat</p>	
11	<p>Vanne toit</p> <p>D: Doppelklappe, Dachwehr E: Beartrap gate, roof weir NL: Dubbelklep, dakstuw</p>	
12	<p>Vanne gonflable</p> <p>D: Schlauchwehr E: Inflatable weir / Rubber dam NL: Balgstuw</p> <p><u>Traduction des légendes sur la figure:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Damming = retenue - Top of the rubber dam = Point haut de la vanne gonflable - Fixing bars = Fixations - Deflated rubber membrane = vanne dégonflée - Pier of the weir = pile du barrage - Supply pipes = conduite d'alimentation (air/eau) 	

Tableau 2.3 : Schéma des types de vannes des barrages mobiles (Partie III)

3. PROCEDURE DE CONCEPTION

Cette section présente un résumé des procédures de conception des barrages mobiles/barrières et de leurs vannes qui sont des éléments essentiels pour la sécurité des ouvrages durant leur exploitation, en prenant en compte les diverses contraintes (environnementales et autres) pouvant se produire durant toute leur durée de vie.

En introduction, il est utile de signaler que Voies Navigables de France (VNF 1998) a publié un guide détaillé "Les Barrages Mobiles de Naviga-

tion", à destination du chef de projet pour la conception des barrages mobiles de navigation, (voir CD-Rom du GT 101 Répertoire /B3.../),. D'autres publications intéressantes ont été éditées par l'U.S. Army Corps of Engineers, à savoir "Engineering and Design, River Hydraulics" (1993) qui présente les critères de conception des structures hydrauliques telles que les écluses, les barrages, les vannes et les évacuateurs de crues. "Hydraulic Design of Navigation Dams" (1987), "Vertical lift gates" (1997) et "Design of Spillway Tainter Gates" (2000) sont d'autres sources intéressantes publiées par l'U.S. Army Corps of Engineers.

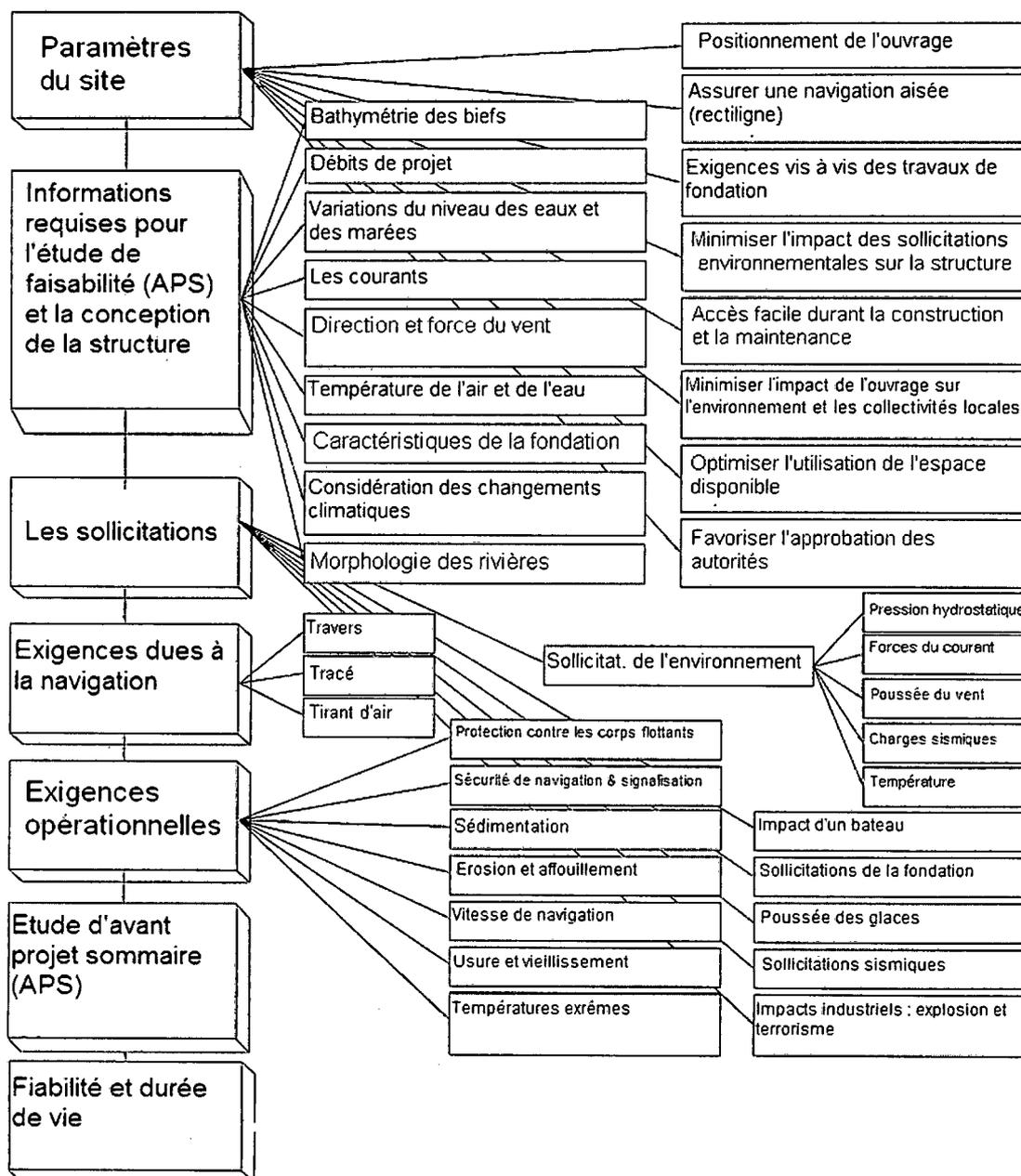


Fig. 3.1: Procédure de conception des barrages mobiles et barrières anti-tempêtes

Il existe de nombreux livres et ouvrages assez détaillés traitant des barrages mobiles qui peuvent être utilisés comme références. Par exemple : Bouvard (1991), Burt (1996) et Mockett et al. (2003).

La procédure de conception des barrages mobiles, des barrières anti-tempêtes et de leurs vannes comprend plusieurs étapes associées à divers paramètres qui sont les suivants (Fig. 3.1) :

- Les paramètres du site, tel que le choix du site, qui dépendent de plusieurs facteurs (Section 3.1).
- Les informations requises, la bathymétrie, les débits, le vent, ..., et les sollicitations, qui sont nécessaires à l'analyse technique afin de réaliser un avant projet sommaire et, plus tard, une conception détaillée de la structure du barrage (Section 3.2).
- Les exigences opérationnelles et de navigation, telles que la protection contre les corps flottants, la sécurité de la navigation, la sédimentation ..., qui correspondent aux exigences de l'utilisateur afin de garantir la sécurité et un fonctionnement efficace et fiable de l'ouvrage.
- Les critères de conception qui permettent de vérifier la faisabilité du projet en évaluant le degré d'applicabilité de chaque type de structures (variantes) pour le site concerné par le projet (Section 3.6).

3.1 PARAMETRES DU SITE

Le choix du site dépend de plusieurs facteurs interconnectés et dont l'importance (c-à-d la pondération) dépend des aspects techniques, environnementaux, économiques et politiques. Plusieurs de ces facteurs sont listés et commentés ci-dessous.

3.1.1 Positionnement de l'ouvrage

L'ouvrage doit se trouver dans un site qui permet de réduire autant que faire se peut les courants transversaux dans les zones de navigation. L'importance des courants traversiers, prévus sur une année, doit être considérée en fonction des types de bateaux devant naviguer et de leurs possibilités de manoeuvrer aux abords de l'ouvrage et au travers des éventuels pertuis navigables. C'est essentiel lorsque l'écoulement de la rivière atteint ses débits extrêmes (maximum et minimum).

3.1.2 Assurer une navigation aisée (rectiligne)

L'ouvrage doit être positionné afin de fournir un accès direct (rectiligne) aux passes navigables et de faciliter l'entrée et la sortie du bateau sans demander de manoeuvres délicates. L'importance du vent et son effet sur les conditions de la navigation des bateaux, prévus pendant l'année, doivent être considérés.

3.1.3 Exigences vis-à-vis des travaux de fondation

Si la fondation est peu porteuse (souple), la structure devra être massive. Le choix du site doit inclure une évaluation des conditions géologiques existantes afin de réduire au minimum les travaux de fondation. L'élargissement de la structure peut influencer d'autres facteurs comme le coût et les incidences sur l'environnement.

3.1.4 Minimiser l'impact des sollicitations environnementales sur la structure

Les vents existants, les courants et les forces hydrodynamiques associées à la pression hydrostatique doivent être connus. Leur prise en compte permet de minimiser l'exposition de la structure aux sollicitations environnementales. Par exemple, la structure doit, si possible, être positionnée afin de ne pas faire face aux vents dominants et ainsi éviter les vagues associées. C'est particulièrement important lorsque la structure est établie à l'entrée d'un grand lac où le vent est important. Un «*fetch*» important aura comme conséquence des vagues importantes et donc un impact significatif sur la structure.

Pour les ouvrages situés dans un environnement froid, la position de la structure doit essayer de minimiser les charges de glace, tout en s'assurant que tous les autres facteurs soient optimisés. En outre, la position de l'ouvrage doit aussi minimiser l'emprise des glaces (*ice fetch*), qui augmente les charges appliquées, celles-ci étant fonction de la dilatation thermique de la couche de glace.

Pour une installation située dans un environnement chaud, la position de la structure doit être optimisée vis-à-vis de facteurs comme les écoulements durant la saison des pluies ou la mousson, la période de retour des sécheresses et inondations, les migrations humaines ou de la faune, etc.

3.1.5 Accès facile au site durant la construction et la maintenance

La facilité d'accès au site, durant la période de construction et ensuite lors de son fonctionnement ou pour l'entretien, est une considération importante. Dans certains cas, l'ouvrage incorporera également un pont. Cela ajoute une seconde dimension à la conception du barrage.

3.1.6 Minimiser l'impact de l'ouvrage sur l'environnement et les collectivités locales

Les modifications de la voie navigable existante doivent être choisies de manière à minimiser les impacts environnementaux de la structure ainsi que leurs impacts sur les collectivités locales (durée des travaux, bruits, ...).

Par conséquent, lorsque tous les autres facteurs ont été considérés, le barrage mobile devrait être placé dans un site où il existe une réduction naturelle du débouché de la rivière.

Il est important d'évaluer les effets, à long et à court terme de la construction de la structure sur l'habitat des poissons particulièrement dans les zones critiques (faune et flore).

La plupart des projets exigent une enquête d'incidences sur l'environnement avant que le permis de construire ne soit accordé.

3.1.7 Optimiser l'utilisation de l'espace disponible

Le choix du type de structure doit prendre en compte l'espace disponible sur le site. C'est particulièrement important dans des secteurs fortement peuplés pour lesquels une perturbation minimale des résidants, commerces et entreprises installés le long de la rivière/du canal est essentielle afin de diminuer les objections potentielles des riverains à la réalisation du projet (cf enquête d'incidences).

3.1.8 Favoriser l'approbation des autorités

La conception doit être conforme aux règlements des diverses autorités concernées (nationale, régionale et locale), et cela dans de nombreux domaines (transport, environnement, permis de construire,).

En vue d'un bon avancement de l'étude et ensuite des travaux, une étude d'avant-projet (APS) doit être effectuée et soumise pour approbation aux autorités compétentes. Ceci permet d'ajuster/modifier le projet pour satisfaire aux directives et règlements qui n'auraient pas été correctement considérés lors de la conception (APS).

3.2 INFORMATIONS REQUISES

Les informations requises pour l'étude de faisabilité (APS) et la conception de la structure sont les suivantes :

3.2.1 Bathymétrie des biefs

Les progrès technologiques dans le domaine des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), du tracé des rivières et des mesures de courant permettent une collecte aisée de données bathymétriques suffisamment précises.

3.2.2 Les débits de projet

La structure doit être conçue pour prendre en compte les débits de projet, soit les valeurs maximales, minimales, et moyennes (annuelle et saisonnière). La réduction du débouché hydraulique créé par l'ouvrage et son impact sur les lignes d'eau et donc sur les zones inondables environnantes doit également être considéré.

La possibilité d'une modification des débits de projets doit être considérée (causée par une révision des prévisions basées sur l'analyse statistique des débits durant la durée de vie de l'ouvrage). Par exemple, la déviation d'une partie du cours d'eau, les pertes en eau dues à l'évaporation, la construction d'un barrage en amont, ainsi que le réchauffement global, peuvent affecter l'écoulement, et doivent être considérés. Le calcul des débits de projet doit intégrer l'évolution du recouvrement des sols du bassin hydrographique et les futurs développements de la région qui pourraient affecter les débits par modification du ratio entre ruissellement et infiltration (pluie et fonte des neiges).

Sur ces bases, l'historique du débit de crue de la rivière doit être analysé très soigneusement et les débits de projet doivent être calculés pour des périodes de retour de 1, 10, 100 voir 1000 ou 10.000 ans pour les ouvrages de protection contre les inondations.

3.2.3 Variation du niveau des eaux et des marées

Les niveaux d'eau sont affectés par les variations du débit de la rivière et les ouvrages de régulation amont et aval de la structure considérée. Les niveaux d'eau de projet, minimum, maximum et moyen, comme pour les débits, (section 3.2.2), doivent être calculés en se référant aux valeurs historiques.

La différence maximale de niveau d'eau entre l'amont et l'aval (différence de niveau d'eau dite de projet), doit être considérée en prenant en compte tous les scénarios possibles (vannes ouvertes et fermées) y compris les cas accidentels. C'est important de prendre en compte les poussées hydrostatiques sur les structures, les excavations exigées pour permettre le passage des navires et les courants et érosion sur le fond et berges qui peuvent résulter de la navigation.

3.2.4 Les courants

L'ouvrage doit être positionné afin que les courants autour de la structure, amont et aval, soient acceptables pour la navigation. La vitesse et la direction du courant doivent également être pris en compte pour calculer la vitesse de dérive potentielle d'un navire afin de réduire le risque d'un dommage causé à la structure par un navire qui heurterait l'ouvrage et en particulier une vanne.

Des modèles numériques et/ou physiques peuvent être utilisés pour étudier la distribution du courant (l'Annexe A de ce rapport contient une liste de modèles numériques permettant d'étudier les courants et les évolutions bathymétriques). La distribution des courants de projet dépend directement des débits de projet. Les débits et les niveaux d'eau de projet (calculés pour des périodes de retour de 100 à 10 000 ans), sont utilisés comme données dans les modèles mathématiques aujourd'hui disponibles afin de prédire les distributions de courants.

L'obtention de la distribution des courants est particulièrement importante dans les estuaires soumis à marée où les courants changent de manière significative à chaque cycle de marée.

3.2.5 Direction et force du vent

La vitesse et la direction du vent peuvent être obtenues à partir des données historiques. Sur base de leur analyse, la rose des vents peut être obtenue pour les périodes de retour prises en compte par le projet. In fine, la vitesse maximale du vent doit être obtenue pour chacune des grandes directions.

La vitesse maximale du vent et sa direction sont utilisées comme données par différentes études :

- La manœuvre des bateaux et l'effet d'une perte de contrôle sur la dérive de ceux-ci ;
- L'effet du vent sur les plans d'eau : création d'ondes, (seiches) et de vagues (houles), particulièrement pour les directions correspondant à un *fetch* important ;
- Dans les régions à climat polaire où les glaces recouvrent les retenues en amont des ouvrages, la force du vent, due à la force de traînée du vent sur la surface de glace, génère une pression additionnelle de la glace sur la structure.

Dans le cas de deux grands lacs connectés par un canal de longueur relativement courte, des vents unidirectionnels et persistants peuvent entraîner le mouvement d'une masse d'eau d'un lac vers l'autre. Ce phénomène est similaire à celui des seiches. Il peut contribuer de manière significative à l'augmentation des pressions hydrauliques sur les ouvrages et en particulier sur les vannes des barrages mobiles et barrières anti-tempêtes.

3.2.6 Température de l'air et de l'eau

Les structures des barrages doivent résister aux dilatations thermiques et aux contraintes internes associées aux variations de température journalières et saisonnières, et cela durant toute la durée de vie de l'ouvrage.

L'historique des températures doit être analysé et les températures de projet (maximum, minimum, nombre de jours de gel, nombre de jours de canicule....) doivent être calculées pour les périodes de retour considérées (100, 1000 ans, ...). Pour la partie des ouvrages au dessus de la surface de l'eau, les températures de projet doivent prendre en compte l'effet des radiations thermiques qui conduisent à une température plus élevée que la température ambiante.

En principe, les valeurs extrêmes des températures de l'air et de l'eau doivent être considérées indépendamment. Toutefois, dans certains cas, ces valeurs peuvent être corrélées pour déterminer les valeurs extrêmes à chaque saison.

3.2.7 Caractéristiques de la fondation

Les caractéristiques du sol peuvent souvent être obtenues à partir de projets antérieurs réalisés dans le bief concerné. Si les données ne sont pas disponibles, des forages doivent être effectués pour obtenir des échantillons afin d'identifier la profondeur des couches de sol au-dessus de la roche et leur composition. Une carte géotechnique locale du sol et des coupes géotechniques doivent être tracés pour illustrer clairement la présence de chaque type de matériaux : sable, limon, vase, argile.... Les types des diverses couches de roche doivent également être définis jusqu'à la profondeur exigée définie par les géotechniciens.

Dans certains secteurs (habituellement fortement urbanisés), le fond de la rivière au droit de l'ouvrage peut avoir été significativement modifié par les activités humaines antérieures. Ceci comprend des objets ayant une valeur historique, des vieilles fondations, des épaves de navire, des munitions, des résidus et dépôts industriels, etc. Des investigations appropriées et une procédure d'excavation adaptée doivent être mises en place dans de tels cas.

Ce sujet est développé plus en détail dans la section traitant de la fondation des ouvrages (Section 5.3).

3.2.8 Considérations relatives aux changements climatiques

L'augmentation du niveau des mers est une des préoccupations principales lors de la conception des barrières anti-tempêtes. C'est pourquoi leur conception doit prendre en compte les changements climatiques mondiaux. Ceci comprend les changements au niveau des débits, du niveau des mers, de la température de l'air et de l'eau, du vent, etc.

L'IPPC(2001) a publié un rapport relatif à l'effet de serre et l'augmentation du niveau des mers «Greenhouse Effect and Sea Level Rise: The Cost of Holding Back the Sea», qui a conduit à la prévision présentée à la Fig. 3.2.

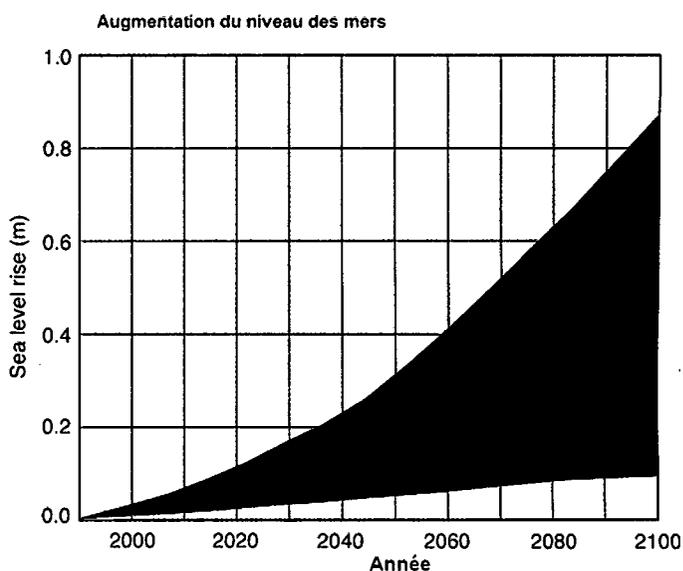


Fig. 3.2: Estimation de l'augmentation du niveau des mers (IPCC 2001).

Sur base de ce rapport de l'IPPC, le niveau des mers peut augmenter durant les 100 prochaines années entre 10 et 100 cm (dépendant de la tendance future de la terre à se réchauffer). Pour simplifier les critères de conception et réduire les risques potentiels d'inondations ou de dommages aux ouvrages, une valeur doit être choisie. Une augmentation du niveau d'eau des mers de 40 cm dans les 100 prochaines années est recommandée comme valeur moyenne mondiale. Aux Pays-Bas, on considère une augmentation du niveau des mers de 25 cm en 50 ans, et de 50 cm en 100 ans. Remarquons toutefois que les hollandais ont opté pour une surélévation de 65 cm pour les 100 prochaines années pour tenir compte de l'effet local d'une subsidence de leur pays (Mockett et Simm, 2003).

3.2.9 Morphologie des rivières

La morphologie est un facteur important à considérer afin d'évaluer l'impact de l'ouvrage sur la rivière. La présence d'une structure dans une rivière ou un estuaire affecte le régime hydraulique du chenal en modifiant l'écoulement et en affectant le transport des sédiments.

Les niveaux d'eau et les écoulements sont affectés par les opérations d'ouverture et de fermeture des vannes des barrages mobiles et barrières de protection. Le passage des bateaux vient s'ajouter à ces phénomènes en introduisant d'autres

phénomènes physiques comme les érosions induites par les hélices de bateaux, phénomène amplifié par l'effet de sur-abaissement que connaissent les bateaux en eau peu profonde (le rapport InCom-GT 27 de PIANC examine en détail cette problématique - publication prévue en 2008).

Les études liées au projet doivent inclure des mesures pour traiter le changement éventuel de régime de la rivière et s'assurer qu'il ne puisse pas créer de problèmes significatifs. Ainsi, l'évaluation des quantités de sédiments transportés dans le chenal doit être faite et des solutions doivent être proposées et, à terme, mises en œuvre.

3.3 LES SOLLICITATIONS

Les diverses sollicitations sur la structure sont listées dans cette section. Ces forces et leur valeur sont en relation directe avec les paramètres environnementaux définis à la section 3.3.1, à savoir :

3.3.1 Sollicitations de l'environnement

- **Pression hydrostatique:** à savoir la pression hydrostatique et la distribution de pression sur la structure et les vannes. La pression doit être calculée pour la différence maximale de niveau d'eau entre l'amont et l'aval de l'ouvrage. Dans les estuaires soumis à marée, la pression hydrostatique doit être calculée pour les écoulements montant et descendant. La différence de niveau d'eau est obtenue grâce aux enregistrements des années antérieures et en considérant la durée de vie de la structure.
- **Forces du courant:** Les forces induites par le courant proviennent des courants existants dans le bief amont et des courants locaux générés par l'ouverture des vannes. L'évaluation de ces forces doit également tenir compte de la turbulence générée et des mouvements vibratoires associés à l'ouverture et à la fermeture des vannes.
- **Poussée du vent:** L'effet des charges de vent sur la structure et les problèmes de sécurité et de fonctionnement associés doivent être pris en compte. Ces charges comprennent :
 - Les charges de vent sur la structure dues aux forces de traînée ;

- Les vagues générées par le vent (lequel dépend de la longueur du *fetch*) et les forces provenant du déferlement des vagues ;
- La pression hydrostatique supplémentaire induite par l'augmentation du niveau d'eau (seiche, ...);
- Les forces du vent sur les bateaux, afin d'évaluer le risque d'accidents, et donc les probabilités d'arrêt du fonctionnement de l'ouvrage pour des vents qui dépassent les limites prescrites.

- **Les sollicitations d'exploitation :** Les forces de frottement (articulations, étanchéité sur béton, ..) doivent être considérées car leur oubli ou leur sous estimation peut mener à une défaillance de la vanne et donc de l'ouvrage.
- **Charges sismiques :** Les charges sismiques doivent être calculées pour les structures concernées sur base des directives existantes et des cartes sismiques (Section 3.3.5).
- **Les effets de la température :** Les contraintes et les déformations thermiques, dues aux changements de température de la masse de la structure, doivent être considérées.
- **La pression des glaces :** La présence de glaces peut augmenter considérablement le poids mort sur la structure et en particulier sur les vannes. La quantité de glace accumulée doit être calculée et prise en compte lors de la conception (section 3.3.4).

3.3.2 Impact d'un bateau

Les barrières anti-tempêtes construites sur les voies navigables doivent être conçues en tenant compte des forces d'impact résultant de la collision d'un bateau sur une structure fixe.

La collision d'un bateau est un cas de charge ayant une faible probabilité d'occurrence mais pouvant avoir de grandes conséquences. Il n'est pas envisageable de concevoir la structure pour résister à toutes les collisions de bateaux théoriquement possibles. De ce fait, le concepteur essaiera plutôt de minimiser les dégâts aux éléments mécaniques.

3.3.4 Poussée des glaces

Généralement, les analyses sont basées sur une série de scénarios d'accident et de caractéristiques du bateau, telles que le type du bateau, la position de la barrière, la vitesse du bateau (vis-à-vis de la vitesse admissible), l'angle d'impact sur la structure.... L'utilisation de modèles mathématiques de simulation de la navigation des navires aide à estimer les difficultés pouvant être rencontrées par un navire pour chaque scénario envisagé. La modélisation physique est une autre option qui, dans certains cas, peut être plus rentable (rapport qualité prix).

Lorsque le bateau et les paramètres environnementaux sont connus, les forces d'impact sont déterminées en utilisant des tableaux ou abaques disponibles dans la littérature, ou en effectuant une simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis. Les efforts de collision apparaissent durant la déformation plastique de la structure du bateau contre une structure acier-béton beaucoup plus rigide (Le Sourné, 2003). Ces forces peuvent être utilisées pour dimensionner la structure et sa fondation (PIANC-GT 19, 2001).

Ces analyses peuvent de plus conduire au développement de nouvelles recommandations pour la navigation à proximité des ouvrages hydrauliques situés dans les chenaux de navigation de façon à limiter la probabilité et le dommage de l'impact d'une collision de bateau. Ce type de recommandations peut limiter la vitesse de navigation et imposer des restrictions aux bateaux supérieurs à un certain tonnage.

3.3.3 Sollicitations de la fondation

Les fondations doivent être capables de résister aux forces appliquées par l'environnement et au poids propre de la structure. L'ampleur du tassement sous la structure ne doit jamais excéder la valeur admissible.

Les caractéristiques des sédiments et la présence de roches peuvent affecter le choix du type et l'agencement de la structure. Une fondation sur pieux ou un système d'ancrage adapté doit être envisagé pour renforcer les sols à faible capacité portante. Le coût de la structure peut en effet augmenter significativement si la capacité portante de la couche sédimentaire est très faible en comparaison à celle de la fondation rocheuse.

La structure doit être capable de résister à la poussée des glaces à laquelle elle est soumise pendant toute sa durée de vie. Les poussées apparaissent si la glace se forme à la surface de la retenue. Les poussées comprennent les dilatations thermiques et les charges dynamiques résultant de l'impact de la glace lorsqu'elle se brise. Le type de glace, son épaisseur, ses propriétés, et particulièrement sa dureté, doivent être connus lors de la conception de l'ouvrage.

Divers phénomènes induisent la poussée des glaces. Les plus significatifs sont :

- La pression statique due à la dilatation thermique ;
- La pression statique due à la variation du niveau d'eau ;
- Les charges statiques induites par la force de traînée des courants et du vent sur la glace, en amont de la structure ;
- Les charges dynamiques dues aux impacts des blocs de glace sur la structure et ses composants.

L'état de l'art en matière de procédures de conception sous charges statiques comprend : Comfort et al. (2003 et 2004); "Ice Engineering and Design", U.S. Army Corp of Engineers (2002), et "Technical and Economic Problems of Channel Icing" (PIANC GT 23, 2004).

Sur le CD, le dossier «Annexe Section 3» contient une brève présentation du calcul des charges sur la structure et les vannes d'un barrage mobile ou d'une barrière.

3.3.5 Les sollicitations sismiques

De nombreux scientifiques et ingénieurs du monde entier ont étudié l'effet des tremblements de terre sur les structures du génie civil (Hadjian 2004, Dowrick 2003, and Naeim et al. 1999). Récemment, de nombreuses études se sont intéressées à la réponse sismique des barrages (<http://www.struc.polymtl.ca/dams/chapter15.htm>).

Ces études produisent des directives et des normes à prendre en compte lors de la conception des ouvrages hydroélectriques qui peuvent être utilisés en partie pour les barrages mobiles et barrières anti-tempêtes.

3.3.6 Impacts industriels et terrorisme: explosion et déflagration

Les barrières anti-tempêtes et ouvrages de protection construits dans les zones industrielles (comme un port), doivent être dimensionnés pour résister à des explosions accidentelles et aux activités industrielles normales.

Les activités industrielles existantes à proximité de la (future) barrière doivent être identifiées ainsi que les règlements concernant les activités autorisées, existantes mais également possibles durant toute la durée de vie de la barrière. Selon le type d'activités existantes et/ou futures dans les environs, des explosions peuvent avoir lieu. Généralement, une distinction est faite entre les ondes de pression de détonation et celles de déflagration, et les probabilités respectives d'occurrence.

De plus, les directions de propagation des ondes de choc doivent être déterminées. Sur le côté, sous le vent de la barrière (pile, vanne...), les forces sont différentes que sur le côté au vent où la réflexion des ondes de pression s'effectue. Les éléments de la structure exposés sont alors dimensionnés pour une pression résultante en tenant compte du déphasage entre l'onde de pression entre le côté au vent et celle sous le vent, ainsi que du phénomène de réflexion sur le côté au vent.

Si la structure ne peut pas résister à ces efforts et si aucune autre alternative de conception n'est possible, alors un système de protection physique doit être envisagé. Plusieurs concepts existent sur le marché avec un bon potentiel pour réduire le risque de ces explosions (Voir "Seacor" et "Whisper Wave" sur les sites web repris à la Section 10.1).

La protection contre le terrorisme est une considération importante, principalement pour les structures dont la destruction ou le non fonctionnement, même temporaire, pourraient entraîner de graves conséquences. La structure doit être conçue afin de minimiser le risque des dégâts liés au terrorisme.

3.4 EXIGENCES DUES A LA NAVIGATION

Pour la navigation intérieure, les dimensions des bateaux sont définies dans des règlements. En Europe, chaque rivière correspond à une classe (la

Classe VI est la classe la plus élevée) qui se réfère à des dimensions maximales pour les bateaux voulant utiliser cette voie navigable. Les exigences de la navigation sont donc totalement définies par la classe de la rivière. Une réglementation similaire existe aux USA (US Class). Un ouvrage (barrage mobile...) ne peut donc, en aucun cas, compromettre les capacités de la navigation existante ou future sur la voie navigable. Par exemple, le barrage de Tees (Voir «Project Review» sur le CD Répertoire A1) n'avait pas initialement d'écluse à cause des contraintes de coût, mais sous la pression publique des clubs de bateaux et des diverses pétitions, une écluse a finalement été construite.

La structure devra permettre le passage de la classe de bateaux la plus élevée pouvant naviguer sur le canal, au moment du projet ou dans le futur. Dans un estuaire, l'ouvrage sera limité par la largeur et les tirants d'eau du plus grand navire pouvant passer le point le plus étroit et le moins profond du chenal de navigation, en amont et en aval de l'ouvrage. Des changements en matière de sédimentation et d'érosion pouvant affecter la profondeur de la passe navigable et donc restreindre la navigation doivent également être considérés. Ceci est discuté plus en détail dans les sections 3.5.3 et 3.5.4.

Les dimensions d'un navire type ne doivent pas excéder les aisances admissibles fixées pour garantir la sécurité lors de l'exploitation de l'ouvrage. La longueur du navire est limitée par l'infrastructure du chenal de navigation. De plus, les dimensions suivantes du navire doivent être considérées dans la procédure de conception :

- **Largeur** : En plus de la largeur du navire, la structure doit avoir une surlargeur pour minimiser les dégâts aussi bien au navire qu'à la structure.
- **Enfoncement (tirant d'eau du navire)** : La structure doit permettre le passage des bateaux dans les meilleures conditions et aussi rapidement que possible.
- **Tirant d'air** : La hauteur libre maximale sous structure doit être supérieure à la hauteur du navire (déchargé) pour le niveau d'eau le plus élevé.

Pour des raisons fonctionnelles des impositions sur les paramètres suivants sont généralement considérés :

- Un débit maximum (et parfois minimum), et des niveaux d'eau au plus haut et au plus bas, quand le bateau franchit l'ouvrage ;
- Le courant dans le chenal de navigation doit être inférieur à la vitesse critique du courant qui créerait un risque pour les bateaux lorsqu'ils manoeuvrent dans le chenal de navigation ;
- La vitesse d'avancement des bateaux doit être limitée si la profondeur de l'eau est inférieure à la profondeur limite pour éviter le talonnement d'un navire qui pourrait causer des dégâts au navire ou au radier de l'ouvrage, et présenter un risque pour la sécurité de la voie navigable.

3.5 EXIGENCES OPERATIONNELLES

3.5.1 Protection contre les corps flottants

La présence de corps flottants et leur accumulation le long de l'ouvrage représentent un autre risque pour celui-ci. Cela peut se manifester par un mauvais fonctionnement des vannes ou générer une charge trop élevée sur les composants de la structure.

Ce problème est particulièrement important dans les rivières où la présence de corps flottants est récurrente. Les débris peuvent empêcher le bon fonctionnement des vannes et de leurs équipements (vérins...). À cela s'ajoutent les coûts complémentaires de maintenance.

La structure (vannes) doit être positionnée afin de minimiser l'effet des corps flottants, algues, végétaux, etc. et de faciliter leur collecte et leur évacuation.

Des barrages flottants, spécialement conçus pour dévier et récolter les corps flottants sont disponibles sur le marché. Il en existe divers types et le choix dépendra du type de corps flottants rencontrés et de leur volume. Des batardeaux en bois ou en acier peuvent être utilisés pour dévier les corps flottants vers une zone de collecte où il est facile d'enlever les corps flottants avec un équipement terrestre. Abdelnour et al. (2003) ont présenté un état de l'art en matière de conception des barrages flottants.

Un entretien fréquent des berges de la rivière, y compris le ramassage des arbres et les corps flottants à partir des rives, peut être moins coûteux que de récolter ces corps flottants au niveau du barrage et des prises d'eau.

3.5.2 Sécurité et signalisation

À l'approche d'une zone dangereuse, des panneaux de signalisation doivent être positionnés afin d'être vus d'une distance suffisamment grande.

Selon les dimensions de l'ouvrage et les conditions hydrauliques du chenal de navigation, les signaux classiques peuvent ne pas être suffisants et une signalisation flottante peut alors être un moyen de dissuasion plus efficace pour les bateliers. Des barrages flottants, spécialement conçus à cet effet, ont été utilisés avec succès pour des barrages hydroélectriques, sur la partie non navigable de l'ouvrage. Divers types et formes sont disponibles sur le marché. Remarquons toutefois que les critères de conception doivent être adaptés au site concerné. La conception doit être telle que les barrages flottants puissent protéger les petits bateaux et les personnes de tout danger. Le barrage flottant doit être conçu pour les débits les plus élevés et doit garantir qu'une défaillance ne puisse apparaître lorsque le danger est maximum. De ce fait, le coefficient de sécurité associé au barrage flottant doit être grand.

Le barrage flottant doit également être conçu de sorte que dans aucune circonstance, s'il est endommagé, le barrage ne puisse devenir un corps pouvant heurter les vannes et empêcher leur manoeuvre. Le mécanisme de ruine du barrage flottant doit être correctement contrôlé.

3.5.3 Sédimentation

Les rivières transportent par charriage ou suspension des sédiments érodés à l'amont (dans la rivière ou sur les sols des bassins versants). La sédimentation se produit lorsque la vitesse du courant devient inférieure à la vitesse du courant critique qui est nécessaire au transport de ces sédiments (maintient en suspension charriage).

Plusieurs facteurs favorisent l'érosion du sol. Les sols sont principalement érodés à cause des

courants et plus particulièrement durant la saison des pluies. Les sédiments viennent parfois de très loin. Ils sont très différents d'un site d'érosion à un autre, et peuvent varier significativement d'une saison à l'autre, et même d'un jour à l'autre.

Dans un chenal navigable, l'érosion peut également être causée par les remous engendrés par les hélices de bateaux car ces courants peuvent être très violents (bien que localisés), spécialement dans les zones peu profondes du chenal de navigation. L'érosion peut aussi être importante si la section transversale du bateau (maître couple) est relativement grande par rapport au canal. La densité du trafic des bateaux ainsi que leur puissance et vitesse sont aussi des facteurs très importants.

C'est pourquoi la sédimentation potentielle le long des chenaux et dans les zones proches des vannes des barrages doit être soigneusement évaluée et minimisée. La cause principale des problèmes potentiels est la réduction de la profondeur d'eau dans les chenaux d'accès (amont et aval) menant aux passes navigables qui peuvent se combler de sédiments, jusqu'à atteindre une profondeur d'eau inférieure au minimum requis. Le problème peut être fort important si la concentration de sédiments en suspension est forte et que la vitesse moyenne du courant est faible (ou si le courant varie durant l'ouverture et la fermeture des vannes).

Un autre problème important est la remise en suspension des sédiments pollués du lit de la rivière de certains secteurs industriels, dus à des rejets de produits chimiques toxiques. Ceci est un problème sérieux surtout dans des pays comme les États-Unis, l'Allemagne, les Pays-Bas, le Canada, l'Angleterre et la Belgique. Dans ces circonstances il est nécessaire de neutraliser et de nettoyer les sites pollués pour éliminer les problèmes potentiels.

Selon le type de sol, la distribution de particules de sol et la distribution du courant, un modèle physique et/ou numérique peut être utilisé pour prédire les zones susceptibles de présenter une sédimentation/érosion.

3.5.4 Érosion et affouillement

L'érosion en divers endroits autour de la structure et le long du chenal de navigation, peut être cau-

sée par l'obstruction de l'écoulement naturel de la rivière engendrée par la présence de l'ouvrage lui-même.

L'érosion est due aux courants locaux générés par les houles ou par les mouvements des bateaux à proximité de l'ouvrage. L'ouverture des vannes de la structure génère aussi des courants locaux importants (ressaut hydraulique...) devant être pris en compte lors de la conception du système protection à l'amont mais surtout à l'aval de la structure.

Des modèles hydrauliques peuvent être utilisés afin de définir les zones susceptibles d'être érodées.

3.5.5 Vitesse de navigation

Comme discuté ci-avant, la vitesse des navires est une cause d'érosion. La vitesse de navigation doit être régulée (réduite) dans les zones où les courants sont relativement élevés et/ou imprévisibles.

La vitesse de navigation des navires dans la zone de l'ouvrage affecte la sécurité de fonctionnement des vannes. Dans la plupart des chenaux de navigation, il existe des règles limitant la vitesse des navires (PIANC-GT 41, 2003).

3.5.6 Usure et vieillissement

Il faut minimiser l'usure des parties mobiles et la corrosion de toutes les structures en acier et des armatures dans le béton. La structure doit être conçue pour résister à l'usure et à la corrosion, et pour assurer que son intégrité structurelle ne sera pas compromise durant sa durée de vie.

L'action des houles et des courants sur la structure doit être évaluée. Les composants de la structure sont exposés à divers niveaux de détérioration et, selon ce niveau, doivent être conçus pour minimiser l'usure des composants utilisés.

La protection contre la corrosion doit être considérée, particulièrement lorsque la structure est exposée à l'eau de mer. Une protection cathodique peut être employée sur tous les composants de la structure exposés à l'eau de mer (PIANC-GT 17, 2004).

Les systèmes de protection appliqués contre la corrosion doivent être choisis en prenant en compte les problèmes environnementaux. Ces systèmes doivent périodiquement être renouvelés. Si l'ancien enduit, enlevé par sablage, n'est pas correctement collecté, cette opération peut nuire significativement à l'environnement.

3.5.7 Les températures extrêmes

3.5.7.1 Protection contre le froid

Ce problème doit être considéré quand la structure est construite dans une région froide. Le "niveau de froid" d'une région est exprimé par un indice relatif à la température moyenne journalière. L'indice retenu (Assel, 2000) est le nombre de jours de gel \times la température (0° C-jours) pour la saison d'hiver entière. Un indice de froid supérieur à 50° C-jours, correspond au début de la formation des glaces à la surface de la retenue. L'analyse des enregistrements des températures antérieures permet de vérifier si la conception considère correctement les basses températures.

Les points suivants doivent être considérés pour concevoir des structures soumises aux basses températures :

- Calculer l'augmentation de l'épaisseur de glace naturelle moyenne et maximum attendue dans le canal de navigation.
- Estimer les charges de glace sur la structure à partir d'informations publiées dans la littérature (Comfort et al. 2003, 2004, et WG 29-CD - Dossier /Annexe Section 3/).
- Concevoir la structure pour minimiser l'effet de la glace et la formation de glace sur la structure et les vannes. La glace, si elle n'est pas prise en compte, peut empêcher l'ouverture des vannes. Les solutions à ce problème de gel consiste à utiliser des rideaux de bulles d'air, des pompes de circulation d'eau, des plaques chauffantes au niveau du système de guidage des vannes, de la vapeur pour dégeler les vannes.... Ce dernier procédé est manuel, et est justifiable si le gel est considéré comme étant un événement rare dans la région considérée.
- La glace dans les chenaux de navigation doit être brisée afin de permettre le passage de la navigation. Des brise-glaces sont utilisés pour casser

la glace, et s'assurer que la couverture de glace demeure stable tout au long de la saison d'hiver. Des solutions à ce problème sont présentées dans le rapport PIANC-GT 23 (2004).

3.5.7.2 Protection contre les fortes chaleurs

Les fortes températures et l'exposition directe au soleil doivent être considérées lorsque la construction est réalisée dans un environnement chaud. Les hautes températures affectent les matériaux de la structure (dilatation, contraintes de bridage, ...). Il accélère de plus la corrosion de l'acier et la détérioration du béton dans un environnement salé.

3.6 ETUDES D'AVANT PROJET SOMMAIRE (APS)

L'examen des critères de conception présentés dans cette section aide au développement d'une méthodologie d'avant-projet sommaire (APS) permettant de décider du degré d'applicabilité de chaque type de structure pour le site concerné ou une rivière donnée. Ces alternatives sont évaluées (Voir Section 4: Décision Multicritères) et les 2 ou 3 meilleures solutions alternatives sont ensuite retenues pour un examen et une analyse plus approfondis. Les études complémentaires à considérer sont celles appropriées à la conception, à la construction et au fonctionnement de la structure.

Une liste non exhaustive de critères pour l'analyse multicritères est présentée ci-dessous (voir aussi Tableau 4.6) pour effectuer le choix du type de structure/vannes le plus approprié, pour un site et un environnement donné.

Pour un projet donné, les critères choisis doivent être évalués avec le concours des communautés locales où le projet proposé doit être mis en application. Dans la Section 4, la méthode de l'analyse multicritères appliqués aux barrages mobiles est discutée en détails. Dans le paragraphe suivant, seul une introduction est donnée.

Les critères sont :

- La fiabilité et la performance en fonctionnement : Fournir une structure qui est efficace, c.-à-d., ayant une bonne capacité et précision de régulation du débit de la rivière, et une fiabilité élevée de manoeuvre.

- Sécurité : Assurer un haut niveau de sécurité pour le personnel de maintenance et les usagers.
- Impact sur l'environnement : Minimiser l'impact de la structure sur l'environnement, localement et globalement. Ceci aide à obtenir l'approbation du projet par les autorités durant l'enquête publique.

- Sédimentation et érosion du lit de la rivière ;
- Impact sur l'habitat des poissons ;
- Risque de pollution avec les lubrifiants ;
- Érosion générée par le passage des bateaux ;
- Niveau de bruit généré par le trafic et les mécanismes (pompes...) ;
- Architecture de l'ouvrage en harmonie avec l'environnement.

- Coût : Le coût, c-à-d l'investissement initial (capital), le fonctionnement et la maintenance, est un facteur essentiel qui influence le choix de la structure proposée. L'évaluation de la rentabilité de l'investissement est habituellement complexe à réaliser puisque plusieurs critères sont difficilement monétarisables. Les considérations pour l'analyse coût/bénéfice du projet incluent :

- Le coût de construction ;
- Le coût associé à la fabrication des composants de la structure ;
- La durée totale maximale de construction et les impacts sur le coût liés au respect ou non respect de la date limite prévue ;
- L'attribution d'un coût lié aux arrêts de la navigation ;
- Le nombre d'emplois directs créés pendant la construction et ensuite lors du fonctionnement de l'ouvrage ;
- Le coût de la maintenance, des réparations, et du management du personnel et du fonctionnement de l'ouvrage.

3.7 FIABILITE ET DUREE DE VIE

La fiabilité et la durée de vie (exploitation) sont deux paramètres importants pour la conception de barrages mobiles. La fiabilité est exprimée en terme de probabilité de ruine, et la durée de vie (exploitation) en nombre minimum d'années de fon-

ctionnement, compte tenu d'un plan d'entretien et de maintenance donné. Ce sujet est discuté en détail à la section 5.6.

4. ANALYSE MULTICRITERES

4.1 POURQUOI UNE ANALYSE MULTICRITERES

Les barrages mobiles de navigation et les barrières marées tempêtes sont deux types de structures ayant d'importants impacts socio-économiques et environnementaux sur des zones relativement étendues. Les barrages mobiles et les barrières de protection affectent les populations de différentes manières, allant de la sécurité de leur habitation à la protection de leur source de revenus. Les processus qui génèrent ces impacts sont souvent complexes et peuvent aussi bien être à court terme (comme par exemple les effets immédiats d'une inondation) qu'à long terme (par exemple, changements agricoles, écologiques, ou même climatiques).

Le choix du type de vannes est un élément important qui conditionne les impacts de l'ouvrage et peut avoir des répercussions importantes. Bien que le choix du type de vannes soit souvent effectué lorsque les exigences globales du projet sont connues, il peut avoir des conséquences sur :

- La localisation du barrage et des vannes – tous les types de vannes ne conviennent pas à tous les sites ;
- La navigabilité de la voie navigable – le type de vannes retenu peut favoriser ou interdire la navigation ;
- Le risque d'inondations – tous les types de vannes ne sont pas identiquement résistants, étanches, etc. ;
- Les écoulements, l'érosion du fond et du rivage – différents types de vannes induisant différentes formes d'écoulement ;
- L'écosystème aquatique – tous les types de vannes ne permettent pas, par exemple, le passage des poissons ;
- L'économie locale – un type de vannes peut promouvoir une activité économique et/ou en pénaliser une autre ;
- L'équilibre local de l'énergie – les vannes peuvent être ou non adaptées à la production d'énergie.

Il est donc évident que le choix du type de vannes est une question technologique, économique, politique, ... et touche même à bien d'autres disciplines. En fait, c'est un problème pour les communautés environnantes, ayant souvent d'autres intérêts dans la région en question. Ces communautés et ces régions peuvent être très diversifiées. Dans des cas extrêmes, des intérêts divergents aboutissent à des désaccords internationaux. Pour des raisons pratiques, le choix du type de vannes est souvent fait par les ingénieurs. Ceux-ci doivent, cependant, se rendre compte des différents intérêts en jeu et chercher un équilibre/compromis pour répondre aux besoins du maître d'ouvrage et de la collectivité, exprimé au travers d'un programme d'opérations. Le choix du type de vannes peut être grandement facilité en s'appuyant sur les analyses multicritères dont il est question ci-après.

4.2 QUELQUES CONSIDERATIONS HISTORIQUES

Historiquement – aussi loin que l'on puisse remonter – les ingénieurs ont toujours effectué des études de faisabilité pour plusieurs types de vannes et ont soumis leurs recommandations à la communauté et aux décideurs afin de leur permettre de prendre la décision finale¹. Ce qui diffère de la pratique courante actuelle, c'était principalement le caractère moins approfondi de l'analyse, et un choix (souvent arbitraire) potentiellement moins équilibré. Ceci n'a pas empêché la réalisation de nombreuses prouesses technologiques en vue de la construction de vannes de barrages mobiles. Par exemple, la première porte busquée au monde – en toute vraisemblance – fut construite au 15^{ème} siècle dans un embranchement du canal Navigilio Grande à Milan en Italie. Un seul critère de sélection de la solution avait été retenu: la porte devait faciliter le passage des bateaux pour le transport du marbre afin de construire la cathédrale de Milan (Erbisti 2004), (Site web Canal Monuments, 2004).

La renaissance médiévale de l'ingénieur hydraulicien en Europe donna lieu à l'introduction graduelle de critères supplémentaires. Au moins trois d'entre eux (navigation – pas seulement pour construire des cathédrales, approvisionnement en eau et sécurité des terres) furent couramment pris en

compte. La relation entre ceux-ci et le choix du type de vannes était cependant toujours dépendante de la vision personnelle de l'ingénieur et de son directeur. Dans diverses régions (Pays-Bas, Flandre, et plus tard, France) un nombre relativement plus important d'acteurs que dans d'autres pays (Royaume Uni, Autriche, et Allemagne), était impliqué dans la prise de décision, sans pour autant garantir un choix plus équilibré. Aux Pays-Bas, par exemple, les décideurs étaient nombreux mais ceux-ci représentaient l'oligarchie (les négociants, banquiers, etc.) qui n'hésitait pas inonder de nombreuses plaines agricoles afin de gagner une guerre locale. Ils ont également fait beaucoup pour perturber la navigation vers le grand port concurrent d'Anvers (Belgique).

Aux 17 et 18^{ème} siècles, il existait déjà de bons dessins montrant le tracé et les détails de vannes de barrages mobiles. Une barrière contrôlait l'accès aux fossés de la ville et consistait en des portes et des barrières extérieures. Le péage était une source de revenus appréciée par certains états en Allemagne et par les provinces néerlandaises. La Fig. 4.1 (page 43) présente quelques systèmes différents de portes/vannes. Ceci démontre déjà qu'une analyse comparative des types de vannes avait été réalisée.

La Révolution Industrielle apporta plusieurs changements. La Révolution Française et l'émergence des Etats-Unis donnèrent la parole à de nouveaux groupes sociaux, alors que l'industrialisation de la Grande-Bretagne et de l'Allemagne comprenait la réalisation de grands projets hydrauliques. De nouveaux concepts de vannes ont ainsi pu être développés, ce qui a renforcé l'importance de la question du choix entre les différents systèmes. Cependant, personne ne parlait encore de critères de choix ; les types de vannes étaient considérés comme ayant différents avantages et inconvénients et cela dans divers domaines. Chaque ingénieur avait ses propres préférences. Ce fut l'époque où, par exemple, Isambard Kingdom Brunel construisit des portes busquées de 42,7 m de large pour les écluses de Portbury à Bristol, qui est resté actuellement la plus large de ce type (Pugsley, 1974). Aujourd'hui, nous sélectionnerions probablement un autre type de portes pour ce projet.

¹Les exceptions – comme le Tsar Peter Le Grand qui étudia l'ingénierie maritime aux Pays-Bas, et apporta une contribution personnelle à des projets à St. Petersbourg; ou George Washington, géomètre et ingénieur, qui lança un certain nombre de projets de canaux aux USA – servent uniquement à démontrer cette règle.

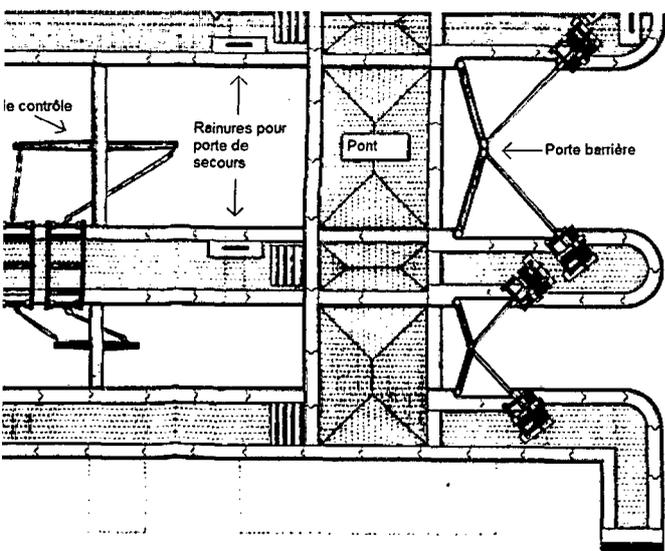


Fig. 4.1: Ecluse maritime de Muiden, Hollande, 17ième siècle, (Van den Horst, 1981)

- Le désir d'une optimisation des coûts et de leur contrôle;
- L'apparition de l'informatique et du désir d'avoir des procédures de sélection programmables.

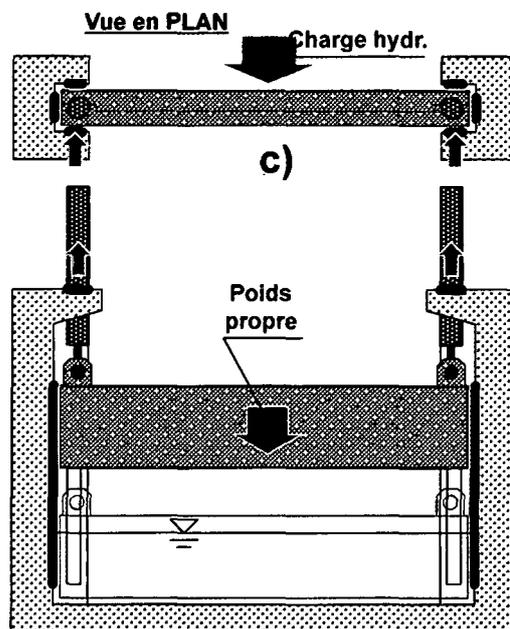
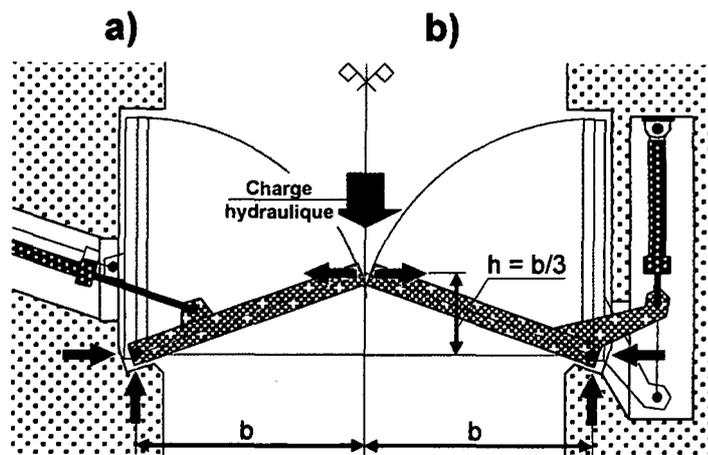


Fig. 4.2 : Quelques types de vannes considérés pour la barrière de protection sur la canal Meuse-Waal à Heumen (Pays-Bas)

Un consensus commence à apparaître à la fin du 19ième et au début du 20ième siècle. L'avancement de l'instruction technique et l'émergence de la littérature correspondante y jouèrent un rôle majeur. L'ingénierie n'est plus une activité élitiste où règne la loi du silence (secret). Ce processus d'ouverture est mené à l'initiative de célèbres écoles : françaises, *Ecole des Ponts et Chaussées* et *Ecole Polytechnique*, anglaise *Mechanics' Institutes* et allemande *Technische Hochschulen* – il ne faut toutefois pas minimiser le rôle des institutions et universités dans d'autres pays. Un exemple typique est la discussion de H. Kulka (1928) sur les avantages et les inconvénients des divers types de vannes de barrages. L'auteur conclut sa présentation sur chaque type de vannes par une section "Kritik der ...wehre" (évaluation du barrage), où une large gamme de critères est considérée. Plusieurs de ces jugements peuvent encore être appliqués aujourd'hui.

Les analyses multicritères, telles qu'elles sont réalisées de nos jours, ont été largement introduites après la seconde guerre mondiale. Les raisons principales de leur développement étaient (et sont encore) les suivantes:

- L'urbanisation croissante et la complexité des grands projets d'infrastructure;
- Le développement de différents groupes sociaux, intérêts, idées, etc.;
- La demande de plus de transparence et d'équilibre concernant l'environnement dans les projets;

4.3 METHODES D'EVALUATION QUALITATIVE

En général, une analyse multicritères est une procédure qui aboutit à la constitution d'un tableau dans lequel les différentes options sont évaluées à l'égard des différents critères (Tableau 4.1, page 44). Effectuer une telle analyse signifie – simplement parlant – donner des valeurs aux éléments du tableau.

Option	Porte busquée (a)	Porte busquée (b)	Vanne levante (c)
Coûts totaux	-	--	+
Fonctionnement	+/-	+/-	++
Navigation	+/-	+	-
Maintenance	+/-	+	+
Environnement	+	+	++
Esthétique	+	+	-
Total	+/-	+/-	+

Légende:
 ++ très bon;
 + bon;
 +/- moyen;
 - faible;
 -- mauvais

Tableau 4.2.: Analyse multicritères de base (uniquement qualitative) pour la barrière de protection contre les crues de Heumen (Allemagne)

Option	Type de porte 1	Type de porte 2	Type de porte n
Critère 1	ESTIMATION DES RESULTATS		
Critère 2			
Critère m			
Total			

Tableau 4.1 : Matrice de base d'une analyse multicritères

Les deux critères principaux d'une estimation multicritères relative au choix du type de vannes sont :

1. Comment et dans quelle unité mesurer le résultat de chaque critère pour chaque type de vannes?
2. Comment convertir ces résultats dans une unité commune afin de réaliser une estimation totale?

La solution la plus simple est d'ignorer ces questions en utilisant une simple évaluation qualitative (sans effectuer d'estimation quantitative). Plusieurs alternatives de vannes ont été considérées dans cette optique. La Figure 4.2 montre un exemple d'analyse du type de vannes pour une barrière de protection sur le canal Meuse-Waal, à Heumen, en Allemagne. Via une rapide présélection, seuls trois types de vannes ont été considérés comme étant adaptés à ce projet : deux options de porte busquée et une vanne levante. Le tableau de l'analyse multicritères fut complété comme montré dans le Tableau 4.2.

La vanne levante apparut comme étant la meilleure solution dans ce cas particulier. Les portes busquées étaient plus coûteuses et moins fiables dans le cas où une fermeture d'urgence était requise. Le tirant d'air non limité pour la navigation

et l'esthétique ne furent pas considérés comme suffisamment importants pour compenser les deux désavantages cités.

Une telle analyse est entièrement basée sur les jugements subjectifs d'une personne ou d'une équipe. Comme le tableau ne contient pas de valeurs numériques, il n'existe pratiquement pas de moyens de vérifier la performance de l'évaluation des types de vannes considérés. Néanmoins, cette méthode, bien que simpliste, peut être considérée comme suffisante dans un certain nombre de situations quand, par exemple :

- On n'a pas le temps ou l'argent pour réaliser une meilleure analyse quantitative. Le manque de moyens financiers est souvent un mauvais prétexte pour éviter de faire une analyse plus approfondie car, in fine, un mauvais choix de vanne est toujours plus coûteux. Ce problème apparaît parfois lorsque le financement provient de plusieurs sources.
- Le cas analysé est assez simple – comme dans l'exemple discuté. Il peut ensuite être efficace de faire une simple estimation qualitative et de décider plus tard si plus d'efforts doivent être apportés au choix de la vanne. Ceci fût, en fait, l'approche adoptée dans le cas présenté.
- Le client a déjà fait un choix et il ne veut pas en discuter. Il souhaite cependant l'obtention d'une étude justifiant son choix au cas où il serait invité à l'expliquer. Si le choix «prédéterminé» n'est pas en conflit avec les idées/analyses de l'ingénieur «concepteur», une analyse multicritères dite qualitative est justifiable. Toutefois, cette situation montre que la méthode d'estimation qualitative est manipulatrice. En général, il est conseillé de la mettre dans les

mains de personnes plus spécialisées que les décideurs et, si possible, venant d'autres organisations, ayant des profils variés, etc. Cette méthode peut malheureusement fortement ralentir la vitesse d'avancement du projet. Une estimation plus approfondie (quantifiée) et rapide est en effet préférable à des longues discussions/polémiques qui peuvent aboutir à affaiblir le projet dans son ensemble et à l'obtention d'un projet peu cohérent.

4.4 METHODES D'EVALUATION QUANTITATIVE

4.4.1 EVALUATION EN TERMES DE COUT

Afin de permettre une sélection plus fiable du type de vannes, il faut apporter des réponses aux deux questions fondamentales de la section 4.3, à savoir:

1. Comment et dans quelle unité mesurer le résultat de chaque critère pour chaque type de vannes?
2. Comment convertir ces résultats dans une unité commune afin de réaliser une estimation totale?

Il n'est pas facile d'apporter des réponses à ces questions car certaines performances de la vanne peuvent être quantifiées en critères monétarisables (euros, dollars,...) alors que d'autres le sont moins (par exemple la navigation dans les passes à bateaux) ou pas du tout (comme l'esthétique ou l'impact sur l'environnement, voir section 5.7). Il n'est généralement pas possible de sélectionner une unité unique pour tous les critères.

Il existe communément deux approches pour aborder ce problème (en complément de l'évaluation

qualitative, voir Section 4.3):

- Exprimer tous les critères en terme de coût (€, \$, £,...);
- Evaluer séparément chaque critère et appliquer un facteur de pondération (d'importance) à chaque critère.

Un argument en faveur de la première approche est que le coût du projet est toujours un des critères les plus importants – et ce critère est certainement le plus facilement quantifiable. Comme ce critère domine souvent l'analyse, l'idée est de donner des valeurs en unités monétaires aux performances des vannes pour tous les autres critères. Une telle approche répond de plus aux deux questions fondamentales posées ci-avant. Avec cette approche, certains critères – comme la maintenance ou le fonctionnement – peuvent, dans une certaine mesure, être aussi évalués en unités monétaires. Pour la durée de vie totale de l'ouvrage, les coûts de fonctionnement et d'entretien doivent être capitalisés et ensuite additionnés aux coûts de construction.

Un exemple de cette approche est une étude sur les options de modernisation du barrage existant sur la Meuse à Sambeek, Pays-Bas (Pouw et al. 2000). Quatre options étaient proposées pour ce projet (Fig. 4.3):

- a) Vanne levante munie d'un clapet supérieur,
- b) Vanne secteur comme pour la barrière de la Tamise,
- c) Vanne clapet suspendue, articulée en haut,
- d) Vanne clapet classique, articulée sur le radier.

L'analyse en termes de coût aboutit à un tableau comme celui montré au Tableau 4.3, page suivante.

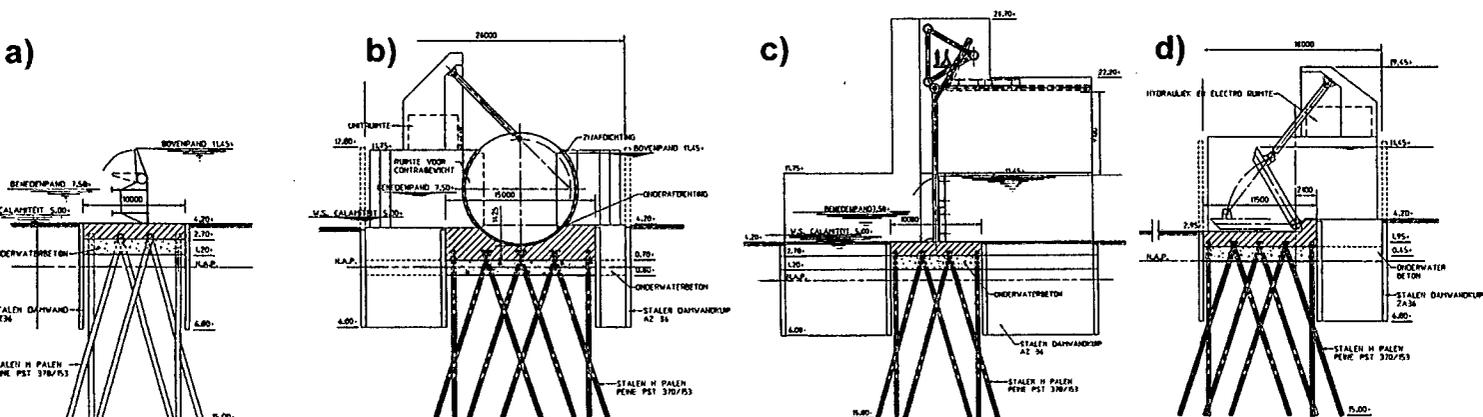


Fig. 4.3 : Types de portes considérés pour le barrage de Meuse à Sambeek

Option Coût (€)	Vanne levante avec clapet (a)	Vanne secteur (b)	Vanne clapet suspendue (c)	Vanne clapet classique (d)
Construction	36.000.000	37.000.000	34.000.000	32.000.000
Maintenance:				
- par an	340.000	447.000	365.000	421.000
- capitalisé	7.596.000	9.987.000	8.155.000	9.406.000
Fonctionnement:				
- par an	246.000	246.000	246.000	246.000
- capitalisé	5.496.000	5.496.000	5.496.000	5.496.000
Total (€)	49.092.000	52.483.000	47.651.000	46.902.000

Tableau 4.3 : Analyse en termes de coût pour un barrage mobile de la Meuse, Sambeek (PB)

Pour ce barrage, une durée de vie (n) de 50 ans a été considérée pour capitaliser les coûts de maintenance et de fonctionnement. Une différence (i), constante, entre le taux d'intérêt et d'inflation, est supposée durant cette période : $i = 0.04$ (4 %).

Les coûts de maintenance et de fonctionnement capitalisés C_c ont été calculés sur base des coûts annuels estimés C_y , en utilisant la formule suivante :

$$C_c = C_y \cdot \frac{1 - (1 + i)^n}{1 - (1 + i)^{-1}} \quad (4.1)$$

A titre d'exemple, pour la porte levante munie d'un clapet, option (a), les coûts totaux sont les suivants :

$$C_c = 36.000.000 + [340.000 + 246.000] \cdot \frac{1 - (1 + 0,04)^{-50}}{1 - (1 + 0,04)^{-1}} = 49.092.000 \text{ euros} \quad (4.2)$$

Malgré le choix d'unité monétaire (l'Euro dans cet exemple), cette approche présente de nombreux inconvénients. Les plus importants sont :

- Tous les critères ne peuvent être quantifiés dans une unité monétaire. Les performances de certains critères comme la navigation, l'environnement, l'esthétique, les contraintes locales (trafic, terrain utilisé, économie locale, effets sociaux, etc.) peuvent être ou ne pas être facilement mesurables de cette manière.
- Une estimation financière stricte de la maintenance et du fonctionnement tient difficilement compte, par exemple, des conditions d'inspection, (→ affectant l'efficacité et la fiabilité

de l'inspection), des risques et des perturbations de trafic dus à la maintenance, de la facilité de fonctionnement, de la sécurité pour le personnel d'entretien, etc.

- Le maître de l'ouvrage désire toujours que ses coûts soient parfaitement et totalement capitalisés. Or les coûts indirects comme par exemple les obstacles à la navigation, l'impact sur l'infrastructure... sont souvent sous-estimés.
- Une analyse orientée-coût pousse à tout traduire en unités monétaires, même le coût d'une vie. Ceci peut être perçu comme immoral et est un sujet de controverse², par exemple, en ce qui concerne le respect de la vie humaine, les dommages irréversibles pour l'environnement, etc.

Quoiqu'il en soit, cette approche peut être utilisée avec succès dans plusieurs cas, comme par exemple :

- Une estimation rapide «Quick-Scan» des différents types de vannes pour un projet dont les vannes ne sont pas les éléments prépondérants (en tout cas pas immédiatement). C'était typiquement le cas de l'exemple présenté pour le barrage de Sambeek.
- Dans la procédure de choix du type de vannes pour laquelle les critères non directement financiers ne sont pas très importants, par exemple, si le barrage ou la barrière est dans une zone inhabitée, écologiquement peu importante.
- Pour un projet où les performances relatives aux différents types de vannes ne diffèrent significativement que par des critères financiers.

² Ce rapport n'émet aucun jugement moral. Ne donner aucun prix à la vie humaine peut également être considéré comme controversé.

On doit cependant être prudent avant de classer un projet dans cette catégorie.

- Dans les pays, les régions, les époques, les situations, etc. où les ingénieurs sont forcés (souvent pour de bonnes raisons) de considérer les coûts comme le principal ou le seul critère de choix.

L'exemple présenté ici est de plus assez simple. Ainsi aucun effort n'a été réalisé pour estimer les différences de coûts de fonctionnement pour les types de vannes considérés. Cela serait certainement nécessaire pour des analyses comparatives plus approfondies.

Dans certaines estimations, les coûts sont souvent estimés comme des valeurs stochastiques (c'est-à-dire avec des écarts types) plutôt que déterministes. Divers risques financiers et autres peuvent aussi être pris en compte. La discussion sur les extensions à apporter de cette méthode sort malheureusement du cadre de ce rapport.

4.4.2 EVALUATION DES PERFORMANCES AVEC DES FACTEURS DE PONDERATION

Comme mentionné dans la sous-section 4.4.1, une autre stratégie d'évaluation est d'associer les indicateurs de performance à des facteurs de pondération (poids). Cette approche ne repose pas sur des unités de mesure associées aux différents critères mais elle introduit un système de mesure qui est applicable à tous les critères. Généralement, la valeur de chaque critère varie de 0 à 10 afin de quantifier les performances de la vanne, d'autres échelles (allant de 0 à 5) sont également utilisées. Les cotes les plus élevées représentent

généralement des meilleurs résultats, bien que des systèmes inverses (le plus élevé, le pire) sont également possibles. Dans ce rapport, une échelle décimale (0 à 10), avec un indice de performance progressif, est utilisé.

En général, l'indice de performance se détermine selon un des procédés suivants :

- Pour les critères quantifiables : Mesurer l'indice de performance du critère dans une unité quantifiable (par exemple en argent pour le critère

de coût); choisir une gamme d'estimation couvrant l'éventail de performance; et convertir les valeurs mesurées au système d'estimation.

- Pour les critères non quantifiables : Permettre à un groupe de spécialistes d'évaluer subjectivement la performance de la vanne, leur demander de proposer un consensus ou les indices de performances moyens.

Une fois l'étude réalisée, on ne peut pas simplement additionner les indices de performance des différents critères car leur importance (pondération) n'est pas identique. Afin d'obtenir les résultats totaux, l'importance relative de chaque critère doit être fixée. Ceci est réalisé en utilisant les facteurs de pondération. Un facteur de pondération représente l'importance relative d'un critère particulier dans l'analyse par rapport à tous les autres. La meilleure façon est d'assigner une valeur allant de 0,00 à 1,00 à tous les critères, de façon à ce que la somme de tous les facteurs soit égale à 1,00. Les résultats totaux apparaîtront alors dans la même échelle d'évaluation que les résultats pour chaque critère. Cela donne à la méthode plus de crédit et permet d'éviter des confusions. Néanmoins, d'autres échelles de facteurs poids (par exemple, en pourcentages) peuvent être utilisées.

Il est conseillé (et important) de faire choisir les facteurs de pondération par une équipe représentant les initiateurs du projet (autorités locales et autres parties impliquées), agissant indépendamment de l'équipe de professionnels qui évalue les performances de la vanne. Ceci diminue le risque que les membres de l'équipe technique «détournent» l'analyse en faveur de leur type de vanne préféré. Une bonne approche est de demander à une équipe multidisciplinaire (décideurs et, si possible, autres parties impliquées) d'établir les critères et leur facteurs poids; et à une équipe de spécialistes de sélectionner les solutions possibles (variantes) et de leur donner les indices de performance. La communication entre les deux équipes est un point sensible. D'un côté, elle doit fournir des critères compréhensibles et réalisables et d'un autre côté, elle ne doit pas être utilisée pour orienter ou manipuler l'autre groupe. Une telle approche est particulièrement conseillée pour les grands projets relatifs à la gestion des ouvrages hydrauliques.

4.4.3 INDICES DE PERFORMANCE - EXEMPLES

Ci-dessous, retrouvons deux exemples caractéristiques d'évaluation des indices de performance. Le premier cas concerne le choix du type de portes pour une double écluse servant de barrière de protection entre deux lacs, l'IJsselmeer et le Markermeer (Fig. 4.4), qui se sont formés suite à la fermeture d'une mer intérieure au Pays-Bas, le Zuiderzee. «L'écluse-barrière» fut construite en 2003 et est appelée "naviduct". Il s'agit en fait d'une double écluse construite au dessus d'un tunnel routier (Daniel et al., 2003). Combiner les fonctions de barrière et d'écluse est une pratique très courante aux Pays-Bas et en Belgique. L'idée est que les organes de fermeture fonctionnent comme des portes d'écluse dans des conditions normales, et lorsqu'un risque de crue est imminent, la navigation s'arrête, et les portes sont fermées pour fonctionner comme des vannes d'un barrière de protection, qui protège les terres et les voies navigables intérieures contre les inondations.

Dans un premier temps, quatre types de vannes/ portes furent considérés comme étant possible pour ce projet :

1. Porte busquée;
2. Vanne à simple hausse ;
3. Porte roulante (ou glissante);
4. Vanne secteur.

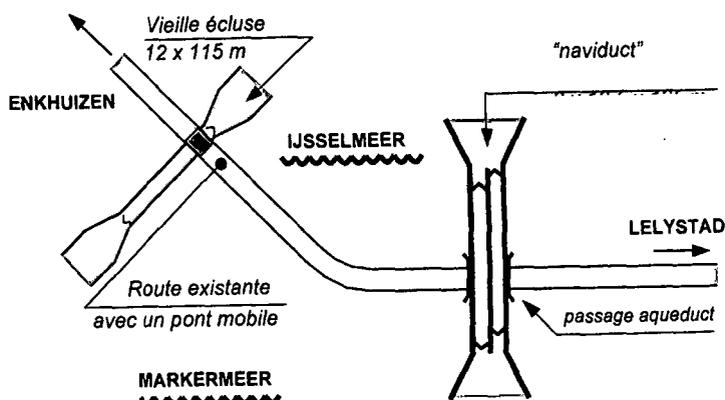


Fig. 4.4 : "Naviduct" à Enkhuizen, carte de la situation

Les critères considérés et leur pondération sont donnés dans le Tableau 4.4. Le "coût total" représente les coûts capitalisés de construction et de maintenance. Le "fonctionnement" a été évalué séparément; en ne considérant pas uniquement les aspects financiers. Les "contingences locales" couvrent les aspects comme l'esthétique, la place disponible, la possibilité de passage (passerelle), la perturbation des communications radar, etc. Le critère "navigation" n'exige pas de commentaires. L'"environnement" est centré sur l'impact environnemental dans un contexte global (par exemple, la consommation d'énergie, les émissions diverses dues au transport des matériaux, l'usinage, etc.) ainsi que local (par exemple, les pollutions dues aux graisses, aux peintures, l'impact sur la vie sauvage, etc.).

Option	Facteur poids	Type de porte			
		Porte busquée	Vanne à simple hausse	Porte roulante	Vanne secteur
Critères					
1. Coût total	0,40	8	9	6	6
2. Fonctionnement	0,35	9	8	8	7
3. Contingences locales	0,10	8	7	8	7
4. Navigation	0,10	8	7	8	6
5. Environnement	0,05	7	7	6	7
Résultat total	1,00	8,30	8,15	7,10	6,50

Tableau 4.4. Comparaison du type de vannes via des indices de performance pour le projet Naviduct Enkhuizen (*)

(*) Cet exemple est disponible dans un fichier MS Excel, sur le CD's Répertoire / AnnexSection4/GateSelectExample3.xls/

Le second exemple concerne le choix du type de vannes pour la barrière anti-tempête du canal d'Hartel, une des deux voies navigables du port de Rotterdam. Ce projet fut terminé en 1996 et le choix du type de vannes a été effectué en 1992. Pour plus de détails, voir "Project Review" inclus sur le CD de PIANC GT 101 (Répertoire A1).

Durant la première phase (initiale), environ 40 types de vannes furent proposés durant un brainstorming. Ensuite, six d'entre eux furent considérés comme étant adaptés au projet lors d'une présélection basée sur des études de faisabilité. Ces types de vannes (Fig. 4.5) (Daniel, 1996) sont:

1. Porte levante;
2. Porte en arc;
3. Vanne/porte roulante;
4. Double vannes/portes roulantes;
5. Vanne clapet articulée et suspendue;
6. Vanne pivotante.

Dans une phase initiale, les critères considérés furent aussi collectés durant un brainstorming. Ils furent ensuite regroupés dans les 6 catégories suivantes :

1. Fiabilité : Probabilité d'occurrence de pannes lors de l'ouverture et de la fermeture, stabilité sous les charges hydrauliques provenant des deux directions, sensibilité aux obstacles, sédimentation, facilité de fonctionnement, etc.;
2. Contrôle du projet: Risques dans la procédure de conception et d'exécution du projet, impact sur le temps et le coût;
3. Navigation : Largeur navigable, profondeur, tirant d'air, obstacles durant la construction et durant la maintenance, perturbation des communications radar, etc.;
4. Contingences locales : Esthétique, espace requis, impact sur le trafic, nuisance de la construction;
5. Coût total : Coûts de conception et de construction, de fonctionnement et de maintenance (capitalisés);
6. Temps de réalisation: Temps requis pour la recherche, la conception et la construction.

L'équipe de spécialistes, impliquée dans l'analyse des variantes était plus grande que celle du projet Naviduct. Environ 20 personnes, de disciplines

différentes, y ont pris part alors que dans le projet Naviduct, ce nombre était de 4 à 5. Les résultats de l'analyse multicritères sont présentés au Tableau 4.5, page suivante.

Observons que les critères et les pondérations utilisées dans les 2 exemples précédents sont différents et que les pondérations ne sont pas toujours des nombres ronds. La raison est que ces facteurs furent l'objet d'un consensus pour le projet Naviduct, ce qui ne fut pas le cas pour le projet d'Hartel. Par conséquent, les valeurs moyennes furent considérées. Une autre différence entre les 2 projets est, pour le cas de Hartel, une uniformité beaucoup plus grande au niveau des pondérations et - en particulier - une valeur beaucoup plus faible pour le critère de coût.

Ceci peut également s'expliquer par la taille et le profil différents des équipes d'estimation. Dans les équipes multidisciplinaires, les opinions tendent à être plus fortement divergentes lorsque celles-ci sont grandes; ce qui conduit à une forte uniformisation des pondérations. Malgré ce fait, le tableau final de sélection a clairement mis en évidence une «meilleure» solution, à savoir une porte levante.

Les critères considérés, les pondérations et les indices de performance des six types de vannes sont présentés au Tableau 4.5.

Les choix du type de vannes furent acceptés dans les deux cas. Les portes busquées du Naviduct sont en fonctionnement depuis 2003, et les portes levantes de la barrière de Hartel sont en service depuis 1997.

4.4.4 INDICE DE PERFORMANCE - ANALYSE DE SENSIBILITE

Comme montré ci-dessus, la méthode reposant sur les indices de performance est assez vulnérable vis-à-vis d'opinions arbitraires. Sauf pour les critères relatifs aux coûts, il semble assez difficile d'établir un système de comptabilisation objectif. Le choix des pondérations semble également assez arbitraire. Il est toutefois pratiquement impossible d'éliminer ce caractère arbitraire, mais il est possible d'estimer son influence sur les résultats finaux. Une façon de le faire est de réaliser une analyse de sensibilité. Nous nous concentrerons ici

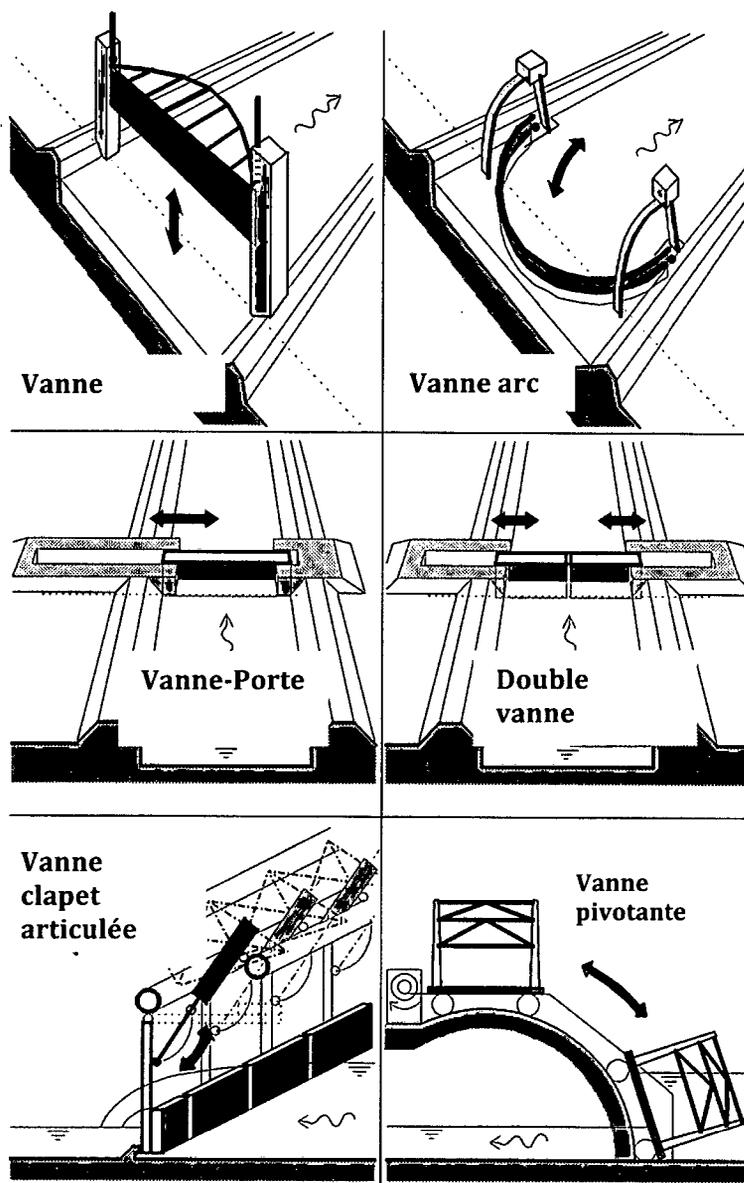


Fig. 4.5 : Différents types de vannes pour la barrière du Canal d'Hartel (Pays-Bas).

Critère	Option	Facteur poids	Type de porte					
			Porte levante	Vanne arc	Vanne-porte roulante	Double vanne roulante	Vanne clapet articulée au-dessus	Vanne pivotante
1. Fiabilité		0,27	9,0	8,5	8,0	7,0	6,0	8,0
2. Contrôle et fonctionnement du projet		0,20	8,5	6,0	7,0	6,0	6,0	6,0
3. Navigation		0,19	8,0	7,0	8,0	8,0	8,0	7,0
4. Contingences locales		0,12	7,0	8,0	7,0	7,0	6,5	7,0
5. Coûts (totaux)		0,11	9,0	8,0	6,0	6,0	7,5	5,0
6. Temps de réalisation		0,11	8,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Résultat total		1,00	8,36	7,33	7,24	6,77	6,61	6,74

Tableau 4.5 : Estimation du type de vannes sur base des taux de performance pour la barrière du canal d'Hartel (*)

(*) Cet exemple est présenté dans un fichier MS Excel, voir CD - Répertoire / Annex Section 4/GateSelectExample4.xls/

sur la sensibilité des pondérations sur le choix final, de façon à vérifier si une variation au niveau de ces pondérations est susceptible ou non de modifier le résultat. Cependant, ceci ne couvre pas complètement le sujet. On peut également analyser la sensibilité de l'approche d'évaluation en tant que telle, c.-à-d. la manière avec laquelle des groupes d'intérêt sont impliqués dans le processus décisionnel. Des exemples intéressants à ce sujet sont les expériences belges et françaises dans la dite approche par «concertation» - une analyse multi-critères pour une prise de décision multi acteurs.

En se basant sur les pondérations, examinons ci-dessous l'exemple d'une analyse de sensibilité utilisant les données relatives à l'évaluation du type de portes pour le Naviduct de Enkhuizen, présenté dans la section précédente (Tableau 4.4).

Observons la sensibilité de l'évaluation vis-à-vis du critère de coût. En d'autres mots : nous ne sommes pas certains de la valeur (0,40) de la pondération de ce critère; et nous désirons voir ce qui advient lorsque on change cette valeur. Dans cette optique, nous prenons 0.10 (au lieu de 0,40) comme pondération pour le coût, et répartissons la différence (soit 0,30) proportionnellement entre les autres critères.

Les nouvelles pondérations deviennent alors :

- | | |
|--------------------------|-------|
| 1. Coûts (totaux): | 0,100 |
| 2. Fonctionnement : | 0,525 |
| 3. Contraintes locales : | 0,150 |
| 4. Navigation : | 0,150 |
| 5. Environnement: | 0,075 |

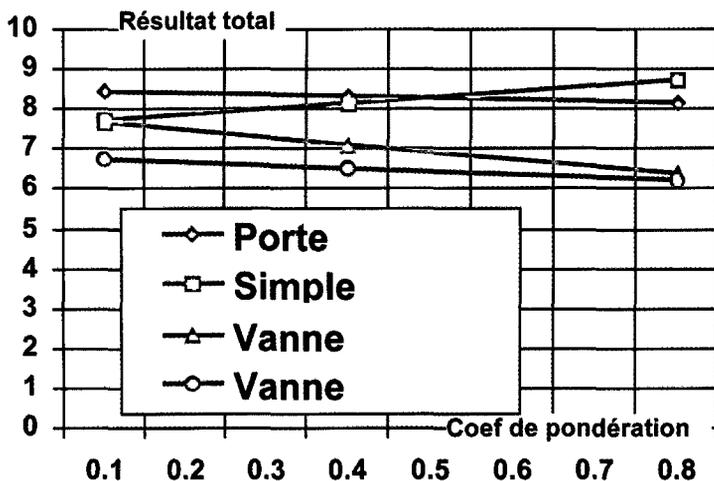


Fig. 4.6 : Naviduct à Enkhuizen, analyse de sensibilité vis-à-vis du critère «Coût »

En réutilisant le fichier Excel *GateSelectExample3.xls*, nous pouvons aisément faire varier la pondération du coût et obtenir des résultats similaires à ceux du Tableau 4.4. Pour chaque type de vannes, nous avons à présent deux ensembles de coordonnées (f_w , s), où f_w est la pondération pour le critère coût, et s est le résultat de l'analyse globale. Ces points définissent des fonctions linéaires des résultats totaux en fonction du critère de coût et peuvent être tracées sur un diagramme tel que celui de la Fig. 4.6.

Dans le cas présent, on observe que la porte busquée atteint le plus haut score dans tous les cas pour une pondération inférieure à 0,46 pour le critère de coût. Si le poids de ce critère est plus élevé, alors la vanne à hausse devient la solution optimale. Les autres types de vannes n'apparaissent jamais en tête dans cette analyse.

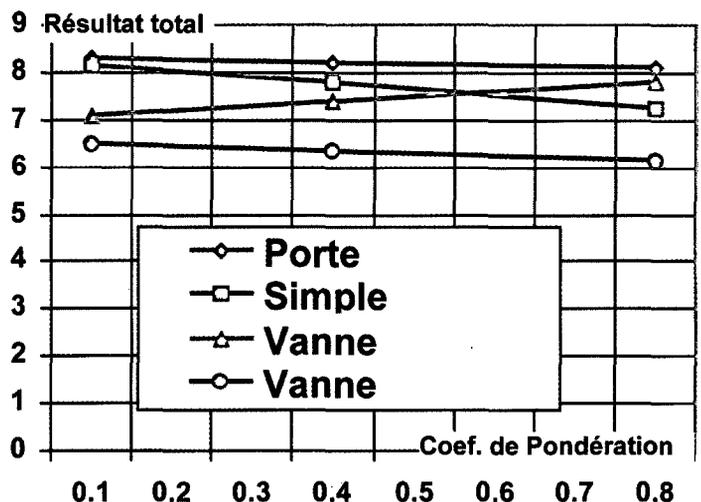


Fig. 4.7 : Naviduct Enkhuizen, analyse de sensibilité pour le critère «Navigation»

D'une façon similaire, des analyses de sensibilité en fonction de tous les autres critères peuvent être réalisées. La Fig. 4.7 présente le diagramme de sensibilité en fonction du critère de navigation. La porte busquée présente le résultat le plus élevé quelque soit sa pondération. Notons que la vanne roulante prend la seconde position lorsque la pondération relative au critère navigation est supérieure à environ $f_w = 0.56$.

Des graphiques similaires peuvent être obtenus pour étudier la sensibilité de l'évaluation d'un critère donné (1 à la fois) dont l'indice de performance est

«incertain». Il est, cependant, aussi possible de le faire pour deux critères. Les graphiques sont alors en 3 dimensions et les lignes représentant les types de vannes deviennent des plans. Certaines présentations sont assez spectaculaires, mais leur valeur principale devient contestable à cause des incertitudes. Elles focalisent l'attention sur les belles présentations et éloignent les décideurs des réalités, devenant ainsi un miroir aux alouettes. Il est dès lors fortement conseillé de ne pas se concentrer sur l'analyse de sensibilité pour mettre en évidence la solution optimale mais de l'utiliser au terme de l'étude pour valider le choix effectué. Les analyses de sensibilité aident aussi à mettre en évidence le besoin d'améliorer l'exactitude d'un indice de performance ou du choix d'une pondération. L'amélioration de l'exactitude demande du temps et de l'argent. La valeur ajoutée de l'analyse de sensibilité doit toujours être évaluée par rapport à ces facteurs temps et coût.

4.4.5 LISTE DE CRITERES

Les exemples présentés à la section 4.4.3 indiquent clairement que différents projets requièrent différents critères et que la pondération d'un même critère varie d'un projet à un autre. Il n'est de ce fait pas possible d'établir un système uniforme, pour tous les projets de barrages mobiles et de barrières de protection, indépendamment du site, des conditions locales, des préférences, etc. Néanmoins, il peut être utile d'avoir un exemple d'un tel ensemble pour aborder une évaluation comparée des types de vannes. C'est à ce titre que comme un exemple – pas comme une recommandation – deux listes génériques de critères sont données, une pour un projet de barrage mobile de navigation et une seconde pour un projet de barrière de protection (voir Tableau 4.6, page suivante).

Dans les deux cas, les critères (ou plutôt sous-critères) sont regroupés en un nombre réduit de grandes catégories qui concernent chacun un domaine spécifique du projet. Les critères proposés ici reposent sur les considérations suivantes:

- Les critères ne peuvent pas être redondants. Chaque problème pertinent doit être représenté par un et un seul (sous-)critère.
- Chaque sous-critère est plus ou moins indépendant. Il n'y a pas ou peu de corrélation entre les critères. Dans le cas où la corrélation ne peut être évitée (par exemple, le fonctionnement de l'ouvrage et la maintenance), une subdivision évidente entre les domaines des sous-critères peut être effectuée.

- Les critères proposés et les pondérations reflètent, en moyenne, l'opinion des pays dits "industriellement développés".

4.5 AUTRES METHODES D'ANALYSE COMPAREE

D'autres méthodes d'analyse comparée du type de vannes existent mais n'ont pas un caractère universel comme c'est le cas des méthodes présentées plus tôt. Dans ces approches, le point de départ est souvent un critère spécifique – en complément du coût qui joue un rôle décisif. Un tel critère devient ensuite délibérément privilégié.

Ce critère peut être les contingences locales. Les contingences locales peuvent être des éléments déterminants lorsqu'un barrage ou une barrière doit être construit, par exemple, dans une zone hautement urbanisée, avec une esthétique complexe, du trafic, et d'autres exigences. Des traces des contingences locales peuvent probablement être trouvées dans le choix des vannes secteurs de la barrière sur la Tamise à Londres, ou de la porte levante pivotante de la barrière de Hull. En dehors des sites urbains, d'autres contraintes peuvent jouer un rôle majeur. Celles-ci peuvent être, par exemple : un paysage exceptionnel, des raisons militaires, des aspects de prestige, des communications radar intensives, le risque de pollution de l'eau, etc. Dans de tels cas, les méthodes d'évaluation seront, entièrement ou partiellement, conditionnées par le critère des contingences locales dominantes.

Un autre critère dominant peut être l'environnement global. Même si de telles situations sont assez exceptionnelles de nos jours, elles seront probablement fréquentes dans le futur. Un aspect important de l'analyse écologique est le choix des matériaux de construction. Il existe des exemples de réussite d'analyses écologiques bien quantifiées dans ce domaine pour d'autres structures que les barrières et les barrages. Un d'eux est la construction d'un nouveau bâtiment facultaire sur le campus universitaire de Carnegie-Mellon à Pittsburgh, USA (Mahadvi, 1998). Un autre est la construction d'un pont piétonnier dans le port intérieur de Noordland aux Pays-Bas (Daniel, 2003). La portée de ces rapports ne permet pas une discussion détaillée des méthodes d'évaluation utilisées dans ces projets. Ces méthodes peuvent, cependant, être appliquées de la même manière aux vannes de barrières et de barrages.

Critères	Projets de barrages		Projets de barrières	
	C.P.	Sous-critères	C.P.	Sous-critères
Coût global	0,30	Coût initial (ingénierie, achat du terrain, construction, etc.);	0,15	Coût initial (ingénierie, achat du terrain, construction, etc.);
		Coût périodique (inspections et maintenance);		Coût périodique (inspections, test/simulation et maintenance);
		Coût de fonctionnement (personnel, énergie, installations, etc.);		Coût de fonctionnement (personnel, énergie, installations, etc.);
		Coût du démantèlement / modernisation après la durée de vie prévue;		Coût du démantèlement / modernisation après la durée de vie prévue;
Fiabilité	0,15	Sensibilité aux dysfonctionnements, erreurs humaines, chocs de bateaux;	0,25	Probabilité de non fonctionnement: non fermeture, non ouverture (si fermé) ;
		Vulnérabilité aux mouvements de la fondation, aux vibrations, à l'érosion des sols, aux tremblements de terre, etc.;		Vulnérabilité aux mouvements de la fondation, à l'érosion des sols, aux tremblements de terre, etc.;
		Vulnérabilité aux sédiments, à la glace, aux corps flottants, aux algues, etc.;		Sensibilité aux dysfonctionnements, aux erreurs humaines, aux chocs de bateaux;
Fonctionnement	0,15	Capacité et précision du contrôle de la rivière à toutes saisons, vulnérabilité du fonctionnement aux désastres;	0,15	Commodité et clarté des procédures, surtout dans les conditions extrêmes;
		Commodité du fonctionnement, clarté de la procédure;		Mise hors service pour cause de maintenance;
		Mise hors service pour cause de maintenance;		Temps de construction, spécialement dans les projets de reconstruction;
		Temps de construction, spécialement dans les projets de reconstruction;		Sensibilité aux technologies vieillissantes, technologie brevetée etc ;
Navigation	0,10	Impact de la construction sur les conditions de navigation;	0,15	Largeur de navigation libre, tirant d'air et profondeur;
		Impact de la maintenance sur les conditions de navigation ;		Clarté du règlement de navigation durant la fermeture et l'ouverture;
		Sécurité et commodités de la navigation (distances, courants etc.) ;		Impact de la construction sur les conditions de navigation;
		Perturbations pour les manœuvres, les signaux radar, etc.;		Impact de la maintenance sur les conditions de navigation ;
Maintenance	0,05	Entretien (pas en termes de coûts!) de toutes les zones et éléments ;	0,05	Conformité avec l'interdiction d'entretien durant les saisons orageuses;
		Accessibilité aux composants sensibles pour la maintenance ;		Entretien (pas en termes de coûts!) de toutes les zones et éléments ;
		Entretien dans des conditions de fonctionnement ;		Accessibilité aux composants sensibles pour la maintenance ;
Environnement	0,15	Santé et sécurité pour le personnel d'entretien ;	0,10	Santé et sécurité pour le personnel d'entretien ;
		Impact du fonctionnement sur l'écosystème (végétation, vie sauvage etc.);		Emprise de l'ouvrage, impact du fonctionnement sur l'écosystème;
		"Empreinte" environnementale des matériaux (pollutions, consommation d'énergie);		"Empreinte" environnementale des matériaux (pollutions, consommation d'énergie);
		Impact environnemental de la construction et de la maintenance (graisses, peintures);		Impact environnementale résiduel du passage d'une inondation;
Impacts sociaux	0,10	Possibilité d'une énergie "propre" (hydro électricité);	0,15	Impact environnemental de la maintenance (graisses, peintures);
		Esthétique, harmonie avec le paysage, culture locale, etc.;		Esthétique, harmonie avec le paysage, culture locale, etc.;
		Impact journalier sur les communautés locales (emplois, économie, transport, agriculture, contacts sociaux);		Impact journalier sur les communautés locales (emplois, économie, transport, agriculture, contacts sociaux);
		Bruit (écoulement des eaux, moteurs, maintenance des bateaux, etc.) ;		Image générale, sentiment de sécurité pour la communauté locale;
		Tourisme, bénéfiques pour les sports et les loisirs, effet de la popularisation des sciences et des technologies;		Tourisme, bénéfiques pour les sports et les loisirs, effet de la popularisation des sciences et des technologies;

Tableau 4.6 :Liste de critères d'évaluation de vannes de barrages mobiles et de barrières de protection

L'environnement peut aussi être un critère dominant lorsqu'il est considéré dans un sens local plutôt que global. Dans cette optique, un outil approprié pour fournir des solutions à un scénario complexe et/ou des indicateurs de faisabilité est l'Evaluation d'Incidences sur l'Environnement (E.I.E.). Un aperçu global de la méthodologie de l'E.I.E. a été présenté par Perillo (1997) avec un certain nombre de formules utilisables pour l'évaluation de différentes alternatives de vannes.

Les méthodes d'estimation décrites dans ce rapport peuvent, en principe, être appliquées aux nouvelles constructions et aux projets de rénovation. Cependant, la dernière catégorie concerne souvent des projets ayant des conditions aux limites et des exigences plus spécifiques que pour des ouvrages neufs. De plus, les évaluations sont également plus profondément enracinées dans des considérations locales. Une approche intéressante, dans cette optique, est "l'analyse de la valeur unité" qui est similaire à l'utilisation de pondérations pour obtenir la performance globale de la solution considérée (voir section 4.4.2), – mais cette méthode est plus spécifique aux projets de rénovation. La méthode, et son application, concernant la stratégie de réhabilitation à suivre pour un ancien barrage en Allemagne a été présentée par Jansen et al (1996). Dans ce cas, un ancien barrage comportant deux vannes levantes principales et deux petites vannes de contrôle fut réhabilité avec trois vannes clapets de portée identique.

4.6 CONCLUSIONS

Le choix du type de vannes est une étape importante dans un projet de barrage mobile ou de barrière de protection. Les conséquences opérationnelles, financières et autres de ce choix sont souvent plus importantes que celles liées à l'ingénierie détaillée. Il est donc recommandé d'apporter une grande considération à ce choix. Ce rapport commente les méthodes d'évaluation comparée existantes et ses conclusions générales sont les suivantes :

- Il y a toujours de nombreux critères à considérer pour effectuer le choix du type de vannes. Ces critères sont, cependant, différents pour chaque projet. D'ailleurs, il n'est pas conseillé de les standardiser, ni d'établir des procédures strictes à suivre en la matière. Pour un projet

donné, tous les efforts doivent être entrepris pour effectuer un inventaire clair et précis de tous les critères intéressants pour un projet particulier.

- De façon similaire, il y a toujours un grand nombre de types de vannes et de variantes envisageables pour un projet donné. Ces types sont différents pour chaque projet et cette sélection ne fait pas partie d'une procédure de choix standardisée. Une liste des types de vannes à considérer peut judicieusement être établie lors d'un brainstorming en s'aidant d'une check-list établie sur base de différentes publications ou du présent rapport.
- Une analyse multicritères des types de vannes peut être réalisée en une ou plusieurs étapes. Une seule étape est suffisante lorsqu'il y a une compréhension générale à propos des critères importants et adaptés aux types de vannes requis – et quand leur nombre n'est pas trop grand. Ceci a souvent lieu pour des petits projets. Pour des grands projets, la situation est plus complexe et une meilleure stratégie est alors de faire un choix en deux ou plusieurs étapes, en se basant, de façon approfondie, sur les critères cruciaux.
- Les méthodes d'évaluation comparée du type de vannes peuvent être qualitatives ou quantitatives. Le choix d'une méthode dépend de la taille et de la complexité du projet, de la transparence exigée, etc. – mais aussi des préférences et des connaissances de l'équipe de sélection.
- Les approches qualitatives sont simples et rapides à effectuer – mais, d'un autre côté, assez arbitraires et pas très transparentes. De telles estimations sont discutées à la section 4.3. Elles sont, en général, utilisées pour des projets de faible complexité ou comme première étape (présélection) pour de grands projets complexes.
- Les approches quantitatives requièrent plus de temps et d'efforts. Avec ces méthodes, les critères sont évalués dans l'unité du critère dominant (par exemple, l'unité monétaire pour le critère coût) ou selon un autre système comme les indices de performance variant de 0 à 10. De telles méthodes d'évaluation sont moins arbitraires et plus transparentes que les estimations qualitatives.

- Les comparaisons basées sur des analyses du coût sont probablement les mieux quantifiables. Ces estimations sont discutées à la section 4.4.1 de ce rapport. Un inconvénient majeur de ces estimations est, toutefois, que tous les critères de sélection ne peuvent être quantifiés dans une unité monétaire. Les critères qui ne peuvent pas l'être sont par exemple : l'entrave à la navigation, l'environnement, l'esthétique, les diverses contraintes locales, etc.
- Une méthode d'estimation plus universelle est celle des indices de performance avec des coefficients de pondération associés aux critères. Cette méthode est discutée dans les sections 4.4.2 à 4.4.4. Les techniques de quantification des autres méthodes et les estimations subjectives non quantifiables sont dans cette méthode converties en indices de performance. Les critères d'évaluation sont associés à des pondérations exprimant leur importance pour le projet concerné.
- La méthode des indices de performance est en quelque sorte aussi arbitraire, mais elle est plus transparente que les méthodes qualitatives et mieux équilibrée que les méthodes basées uniquement sur des analyses de coût. Comme le choix des critères et des pondérations varie avec les opinions individuelles, il est essentiel de confier cette tâche à une équipe liée aux décideurs. En choisissant une telle équipe, on doit garder à l'esprit les remarques de la section 4.4.3.
- Il est conseillé de confier la détermination des critères et de leur pondération à une équipe représentant l'initiateur du projet (autorités locales et autres parties impliquées) et l'évaluation des indices de performance à une équipe de professionnels multidisciplinaires, indépendante de la première. Les deux équipes doivent travailler indépendamment mais il faut toutefois assurer une communication afin d'avoir une même image des critères choisis, des raisons pratiques du choix des pondérations, etc.
- Il est conseillé de sélectionner un nombre réduit de types de vannes à comparer, en général pas plus de 4 à 6. Si plus de types de vannes sont conservés, il est conseillé de faire une présélection. Il est également conseillé de garder le nombre de critères d'évaluation inférieur à 6 ou 8. Si plus de critères sont envisagés, un regroupement doit être considéré via des sous-critères. Il est difficile de fournir une estimation bien équilibrée lorsque le nombre de types de vannes et/ou de critères est trop élevé.
- Comme le choix des coefficients de pondération (C.F.) est assez subjectif, il est souvent discutable et discuté. Un outil pour aider à résoudre une telle discussion est une analyse de sensibilité (voir section 4.4.4). Il est important de garder à l'esprit que les graphiques résultant de l'analyse de sensibilité aident uniquement à analyser les résultats, elle n'introduit pas de nouvelles informations. Elle ne remplacera donc jamais l'évaluation des variantes suivant une série de critères.
- Il n'existe pas de liste générique valable pour toutes les configurations de critères et de pondérations. Il est toutefois possible de se référer à des exemples existants pour sélectionner les critères adéquats pour un cas donné. A titre d'exemple, le Tableau 4.6 présente une liste non exhaustive de critères pour deux projets hypothétiques, un barrage et une barrière.

5. PARAMETRES ET CRITERES DE CONCEPTION

5.1 CONSIDERATIONS STRUCTURELLES

Le but de cette section est de donner un aperçu des aspects structurels liés à la conception et au calcul des vannes de barrages mobiles et portes marées tempêtes. On y présente les avantages et les inconvénients de divers types de vannes vis-à-vis de divers critères, en fonction des objectifs à atteindre. Ces avantages et inconvénients varient en fonction de l'adéquation du type de vannes aux fonctions escomptées.

L'évaluation des avantages et inconvénients des divers types de vannes peut uniquement être réalisée pour une situation et un contexte donnés. Avant que l'estimation soit effectuée, il est nécessaire de réaliser une étude complète des caractéristiques locales du site, des exigences de l'utilisateur et des objectifs de conception (fonctions du barrage).

Si le contexte change, les avantages et les inconvénients d'une vanne donnée varient également. Par conséquent, les limites d'utilisation et le domaine d'application optimal d'une vanne peuvent changer selon les besoins opérationnels (barrière ou barrage de contrôle de l'écoulement de la rivière, zone rurale ou industrielle, etc.).

Ce chapitre présente d'abord les étapes principales de la conception d'une vanne (Section 5.1.1) et ensuite trois domaines de considération nécessaires à la sélection des vannes :

- Les caractéristiques structurelles de divers types de vannes (Section 5.1.2).
- L'analyse des limitations et fonctions spécifiques des vannes (Section 5.1.3).
- Les problèmes structuraux typiques (disfonctionnements) qui peuvent apparaître dans les barrages mobiles (Section 5.1.4),

La dernière section (5.1.5) de ce chapitre compare les avantages et les inconvénients de 5 types majeurs de vannes au niveau de leur conception, de leur construction, de leur maintenance et enfin de leur fonctionnement. Les gammes standards de dimensions, fonctionnement et utilisation de ces types de vannes sont données afin d'assister le concepteur dans la sélection du type de vannes le plus approprié à une application particulière.

5.1.1 ETAPES PRINCIPALES DE LA CONCEPTION D'UNE VANNE DE BARRAGE MOBILE

Les structures en acier d'un barrage (vannes) doivent être conçues de manière bien plus attentionnée que les structures fixées au sol pour les raisons suivantes :

- Elles sont mobiles.
- Les charges sont difficiles à calculer (particulièrement les effets hydrodynamiques, les charges variables, les interactions fluide-structure).
- Les formes peuvent être complexes (coques cylindriques raidies, structures 3D) et cela rend le calcul structurel (contraintes, déformation) difficile à réaliser sans le recours à des outils spécialisés.
- Ces structures sont principalement sous eau et sont souvent difficiles à inspecter et à entretenir.
- Elles sont sujettes à diverses détériorations dues à plusieurs causes : vibration, corrosion, abrasion, écoulement...
- Les structures sont typiquement maintenues en service bien plus longtemps que leur durée de vie prévue lors de leur conception.

Ceci exige des conceptions robustes et des facteurs de sécurité élevés.

Dans le passé, la structure des vannes (généralement une poutre caisson composée de coques et plaques raidies) était souvent modélisée comme une ossature de type treillis composée de poutres et barres. Aujourd'hui, des outils d'analyse performants et rapides permettent une analyse structurelle approfondie et même l'optimisation de ces structures (Rigo 2000). La modélisation de ces structures tridimensionnelles via des éléments de plaques (méthode des éléments finis) ou de plaque raidies (LBR5) est aujourd'hui un standard.

Ci-dessous, les étapes principales de la conception et du dimensionnement des vannes sont décrites selon les principes de l'approche semi-probabiliste, aujourd'hui couramment utilisée, notamment dans les eurocodes :

→ Conception d'ensemble, forme et dimensions

Les caractéristiques géométriques de la vanne doivent être optimisées sur base de considérations hydrauliques et structurelles afin de :

- Transmettre les charges au génie civil ;
- Améliorer l'efficacité hydraulique ;
- Eviter les vibrations ;
- Contrôler les déformations (flèches) ;
- Résister aux efforts de torsion et de flexion ;
- Minimiser le poids (pour les vannes mobiles) ;
- Simplifier la fabrication ;
- Eviter dans la mesure du possible la corrosion ;
- Simplifier la maintenance (faciliter l'accès aux différentes parties) ;
- Garantir une durée de vie de la structure aussi longue que possible.

Par exemple, le rayon de courbure des bordés de la vanne est un paramètre géométrique important à optimiser car il conditionne l'écoulement autour de la vanne et de ce fait le coefficient de débit et les charges induites par cet écoulement sur la structure (pression dynamique),

→ Détermination des sollicitations caractéristiques (charges de projet)

- Charges hydrauliques (statique et dynamique) ;
- Efforts de manoeuvre (réactions aux charges hydrauliques) ;
- Actions accidentelles (induites par exemple par un système de manoeuvre (câbles, vérins,...) non synchronisés, chocs de bateaux,) ;
- Poids propre ;
- Frottement ;
- Glace et corps flottant ;
- Autres actions: tremblement de terre, houle, vent, explosion, etc.

Ces sollicitations peuvent aujourd'hui être calculées à l'aide de modèles numériques et parfois physiques. Toutefois, elles peuvent aussi être évaluées par des méthodes simplifiées reposant sur la résistance des matériaux et les principes de base de la physique et de la mécanique.

Pour chaque sollicitation, le concepteur doit évaluer la valeur (dite de projet) et cela pour diverses situations et combinaisons avec les autres sollicitations (normales ou exceptionnelles).

Le choix de ces valeurs doit prendre en compte la difficulté de les estimer vu le caractère mobile de la structure et les effets hydrodynamiques.

→ *Analyse structurelle*

Afin de calculer les efforts dans la structure, il est nécessaire d'analyser :

- Les contraintes dans les éléments structuraux de la vanne, en position fixe et en mouvement ;
- Les forces transmises à la fondation et aux structures d'appui ;
- Les réactions sur les articulations, pivots, tourillons, rails, ... ;
- Les déformations, etc.

De plus, le concepteur doit prendre en compte :

- L'immersion de certains composants (câbles, chaînes, articulations, vérins, etc.) ;
- L'usure des dispositifs de guidage conduisant à des charges supplémentaires ou à des variations dans leur distribution ;
- La corrosion durant la durée de vie de l'ouvrage.

→ *Les cas de charge*

Il convient de déterminer différents cas de charges, pour:

- les situations permanentes (cas typique: niveau d'eau normal) ;
- les situations transitoires (cas typique: en période de maintenance...) ;
- les situations accidentelles (cas typique: choc avec des corps flottants, mauvais fonctionnement du dispositif de levage...).

Les cas de charges doivent être réalistes vis-à-vis des conditions hydrauliques et de fonctionnement et de leur probabilité d'occurrence.

→ *Vérifications*

Le concepteur doit combiner les sollicitations (avec des coefficients partiels de sécurité appliqués aux actions) afin de vérifier tous les cas de charges et les divers états limites (de service, ultime, ...). Ensuite, pour chaque cas, il appliquera les coefficients de sécurité appropriés aux divers éléments de la structure.

Ces vérifications s'appliquent à

- la flexion et la torsion globales qui induisent des contraintes de cisaillement, des contraintes longitudinales et transversales dans les plaques raidies ;
- les efforts dans les composants locaux comme les plaques, les cadres (aiguilles), les raidisseurs longitudinaux, via les charges transmises par le bordé à ces éléments ;
- les flèches locales dans ces plaques et raidisseurs ;
- la fatigue et éventuellement des vibrations.

→ *Conception des équipements de manoeuvre*

Une attention particulière doit être apportée à la conception des joints d'étanchéité et des systèmes de manoeuvre (vérins, ..). Un coefficient de sécurité élevé, d'au moins 5 ou 6, doit être appliqué à ces derniers.

→ *Evénements exceptionnels*

Pour les sollicitations exceptionnelles, les mécanismes de rupture devraient être conçus pour assurer une réduction des forces et minimiser les coûts de réparation.

	Description (Voir Tableaux 2.1 à 2.3)	Autres types ou variantes possibles	Fondation & système de transmission des efforts de manœuvre et charges
Vanne clapet	Bordé généralement incurvé, raidi, et articulé au sol	- muni d'un caisson/tube de torsion - panneaux ou hausses - vanne Obermeyer (voir barrage gonflable Tableau 5.2)	Articulée au pied en plusieurs points à la fondation (face aval de la vanne)
Vanne segment	Bordé raidi (souvent incurvée) - lié à 2 bras, - bras articulés aux piles.	- Vanne segment inversée avec les bras et articulations à l'amont - Avec un clapet au dessus du segment (régulation petit débit)	Articulée (tourillons) en 2 points aux extrémités des bras sur les piles
Vanne levante	Bordé plan raidi par des membrures verticales et horizontales. Souvent équipé d'un chariot (roulant) sur chaque côté mais des vannes glissantes sont également possibles (par exemple pour des systèmes de secours).	- Vanne double avec 2 panneaux dont un peut venir se cacher derrière l'autre. - Avec un clapet au dessus de l'élément principal levant (régulation petit débit)	Sur les extrémités latérales de la vanne (dans des rainures) Manœuvré avec des câbles ou des vérins hydrauliques
Vanne secteur	Poutre caisson avec un bordé raidi circulaire à l'amont et plan sur la face aval, articulée sur la fondation du côté aval de la porte.	La vanne tambour n'est pas très différente mais avec un axe du côté amont	Articulée sur toute sa base, au pied du panneau aval
Vanne gonflable	Membrane tubulaire utilisant un matériau souple (souvent une membrane renforcée). Il existe des systèmes gonflables à l'air, à l'eau, voir mixte.	Sorte de boudins gonflables qui supportent des clapets métalliques (système Obermeyer). Cette solution peut aussi être considérée comme une vanne clapet.	Ancrée au pied par des boulons/ancrages (1 ou 2 lignes), Ces derniers exigent une conception et un entretien soigneux afin d'assurer la fiabilité du barrage gonflable !

Tableau 5.1 : Caractéristiques structurelles et mécaniques des types de vannes (Partie 1)

5.1.2 CARACTERISTIQUES STRUCTURELLES DES VANNES

Les tableaux 5.1 et 5.2 comparent cinq types de vannes couramment utilisés (vanne clapet, vanne segment, vanne levante, vanne secteur et vanne gonflable) en fonction de leurs caractéristiques structurelles et mécaniques. D'autres types auraient également pu être considérés comme la vanne tambour, la vanne-arche, barrage à poutrelles,...

D'un point de vue structurel, les divers types de vannes diffèrent principalement par leur manière de transmettre les charges au génie civil et de se mouvoir (translation, rotation...)

5.1.3 ANALYSE GLOBALE DES BESOINS ET DES FONCTIONS

Cette analyse tient compte de la localisation du site, du débit de crue maximal, du type de fondation et des exigences de la navigation pour lesquels la vanne est conçue et utilisée. D'autres paramètres pourraient être ajoutés à ceux-ci.

Avant de déterminer si un type de vannes est approprié au site et aux besoins opérationnels, il est nécessaire d'avoir précisément déterminé et quantifié ces besoins et les contraintes particulières. Ces besoins peuvent être définis en utilisant les paramètres ou les caractéristiques principaux liés aux données géométriques, au fonctionnement, aux fonctions du barrage, et aux considérations environnementales.

Ces paramètres sont :

- Géométriques : largeur, niveau d'eau (amont, aval, crue), hauteur du seuil, niveau du lit, tirant d'air ;
- Fonctionnement : les fonctions et les performances telles que la précision du contrôle, la plage de fonctionnement, la fréquence de la manipulation, la fréquence d'entretien (avec un objectif et une tolérance), les besoins de mise à sec, ... ;
- Conditions environnementales: corps flottants, transport de sédiments, conditions géotechniques pour supporter la fondation et le contrôle des débits de fuite pendant la construction et l'exploitation.

	Mouvement de la vanne et mécanisme de manoeuvre	Type d'écoulement	Charges appliquées: - Charge hydraulique - Poids propre et frottement - Forces de manoeuvre	Forces internes
Vanne clapet	Rotation autour d'une articulation au pied, Manoeuvrée par un ou deux dispositifs de levage	Écoulement de surface - surverse (en général)	<u>Charge hydraulique</u> - radier (2/3) et sur les piles (1/3). <u>Poids propre et frottement</u> - Faibles forces (radier et piles) <u>Force de manoeuvre</u> opposée à la charge hydraulique. Ces forces sont grandes et agissent sur les piles	- Moment de flexion longitudinal combiné à de la torsion. - Torsion importante si la vanne est manoeuvrée par un seul coté.
Vanne segment	Rotation autour des articulations des bras. Systèmes de levage appliqués sur les bras, d'un ou deux cotés.	Écoulement de fond (en général). Possibilité de surverse si la vanne est conçue en 2 pièces.	<u>Charge hydraulique</u> 50 % sur chaque pile <u>Poids propre et frottement</u> Transmis aux piles <u>Force de manoeuvre</u> → opposée au poids - Transmis aux piles, - Faibles forces de manoeuvre,	- Moment de flexion d'ensemble (dans les plans vertical et horizontal) - Torsion limitée à moins qu'elle soit manipulée par un seul coté.
Vanne levante	Translation verticale haut/bas pour ouvrir/fermer la porte. Système de levage sur les deux cotés de la vanne.	Écoulement de fond (en général). Possibilité de surverse si la vanne est conçue en 2 pièces.	<u>Charge hydraulique</u> - Sur les piles (rainures) sur les surfaces de roulement ou glissement. Les points d'application changent avec la position verticale de la porte. <u>Poids propre et frottement</u> → sur les piles <u>Force de manoeuvre</u> → opposée au poids propre ; au sommet des piles,	- Moment de flexion d'ensemble (dans les plans horizontal et vertical) - Le poids propre est fort important
Vanne secteur	Rotation autour d'une charnière (au pied). La pression d'eau interne agit comme une force de levage	Écoulement de surface - surverse (uniquement)	<u>Charge hydraulique</u> - sur le radier uniquement <u>Poids propre et frottement</u> - au radier et aux piles <u>Force de manoeuvre</u> - pas réellement de charge de manoeuvre (la pression est issue de la chute d'eau créée par le barrage)	Pression latérale et transversale, moment de flexion local sur le panneau aval
Vanne gonflable	Gonflée (air ou eau) Pression de l'air comprimé ou de la charge d'eau	Écoulement de surface - surverse (uniquement)	<u>Charge hydraulique</u> - sur le radier via les lignes d'ancrages <u>Poids propre et frottement</u> - très faible <u>Force de manoeuvre</u> - Pas de charge de manoeuvre (pression interne dans la membrane)	Contrainte de traction élevée dans la membrane flexible.

Tableau 5.2 : Caractéristiques structurales et mécaniques des types de vannes (Partie 2)

→ **Paramètres géométriques** (Ract et al., 1970) :

- Dimensions globales (hauteur, largeur) du barrage qui ont une influence sur les charges hydrauliques globales.
- Élévation du seuil du barrage par rapport au lit aval de la rivière afin de déterminer la profondeur disponible pour la fosse/radier aval sans avoir besoin d'une excavation supplémentaire. Pour les vannes clapet et secteur, une profondeur minimum est nécessaire pour loger totalement la vanne sous le niveau du seuil (lorsque la vanne est basse). Si la profondeur disponible

est trop faible, cela peut entraîner une solution coûteuse. En revanche si le seuil est suffisamment haut par rapport au lit aval de la rivière, une vanne clapet ou secteur peut être plus facile à concevoir.

- La hauteur et la largeur des passes vis-à-vis des rigidités en torsion et flexion requises par la vanne.

La structure doit respecter les limites de déformation, et les limites de résistance aux moments de torsion et de flexion, caractéristiques des différents types de vannes.

- Les niveaux des retenues: niveau amont, niveau aval (situation normale et exceptionnelle). Ces valeurs déterminent la position la plus élevée de la vanne et des articulations (pour une vanne segment). Les articulations ne doivent pas être immergés, ou du moins, pas fréquemment (par exemple une fois par an).
- Fiabilité: niveau de fiabilité attendu.
 - o La garantie d'une ouverture sécurisée en cas d'inondation ;
 - o La garantie d'une fermeture sécurisée si celle-ci est plus importante que l'ouverture sécurisée ;
 - o Probabilité de non fonctionnement admise (100, 1000 ans, ..).

→ Paramètres de fonctionnement

- Les exigences de fonctionnement et la raison d'être du barrage (navigation, contrôle des inondations...); par exemple :

- Quand la navigation à travers le barrage est possible, un tirant d'air plus important est nécessaire ;
- La capacité de la vanne à accepter une inversion des charges hydrauliques.

- Performance attendue: précision du contrôle (tolérance sur la hauteur du niveau amont), vitesse de manoeuvre, charge hydraulique, débit,... dépendent des objectifs du barrage. Ainsi, la navigation a besoin d'une précision importante pour le mouillage garanti et le contrôle des vitesses d'écoulement .

- La gamme d'utilisation est liée aux capacités d'ouverture. Selon les fonctions attendues du barrage, il existe diverses situations, par exemple:

- La vanne est utilisée pour toute la gamme d'ouverture (de 0 à 100 %) ;
- La vanne est soit fermée, soit ouverte (0 ou 100 %) ;
- La vanne est utilisée pour réguler de faibles débits, et est ensuite totalement ouverte (par exemple, ouverte de 0 à 30 %, et ensuite à 100 %). Dans ce cas, une vanne à deux éléments est bien adaptée.

- Maintenance: La disponibilité du personnel et des ressources assurant un fonctionnement efficace et économique doit être comparée à la durabilité des matériaux. Si les possibilités d'entretien sont limitées, le fonctionnement peut être compromis par des matériaux peu durables. Les exigences opérationnelles comprennent également la capacité d'arrêter le fonctionnement à n'importe quel instant, la capacité de levage pour le système de mise à sec, etc.

- Autres conditions: environnement, esthétique, ...

→ Conditions environnementales

- Corps flottants qui ont besoin d'être évacués: types (arbres, ...) et quantité ;
- Transport de sédiments qui crée de l'abrasion sur la structure: type (gravier, sable...) et quantité ;
- Climat: gel, température extrême ;
- Conditions géotechniques pour le maintien de la fondation et le contrôle des fuites durant la construction et le fonctionnement: capacité structurelle à accepter des charges élevées sur les piles ou le radier.

5.1.4 LES PROBLEMES STRUCTURAUX TYPQUES

Dans cette section, divers aspects structuraux (problèmes, avantages/inconvénients...) pouvant être rencontrés de la phase de conception de la vanne à la mise en service sont présentés. Pour chaque problème, certaines recommandations sont données.

Les problèmes structuraux peuvent être classés en trois groupes:

- Problèmes de conception et de construction,
- Problèmes de fonctionnement et de maintenance,
- Détérioration de la structure durant sa vie.

L'étape de la conception est le meilleur moment pour chercher des solutions économiques et fiables et pour résoudre les problèmes techniques. Plus tard, ce sera plus difficile, parfois impossible, mais toujours plus coûteux.

5.1.4.1 Problèmes de conception et de construction

Les problèmes structuraux principaux liés à la conception sont la complexité de la structure, le poids propre et l'impact sur le génie civil :

- Complexité de la structure:
Une structure complexe est plus difficile à concevoir et plus tard à construire. Une telle structure présente inévitablement un plus grand risque d'erreurs et de faiblesses qui peut avoir un impact négatif sur la maintenance et la durabilité. Ceci peut également entraîner un coût plus élevé.
- Poids propre, épaisseur et superstructures:
Les problèmes ont lieu lorsque ces éléments sont disproportionnés vis-à-vis des exigences opérationnelles et des manoeuvres. Ils ont un impact négatif sur le coût et les frais de manutention. La conséquence est que certains concepts (types de vannes) ne sont pas réalisables et/ou trop coûteux pour de grandes dimensions. Par exemple, les vannes levantes peuvent (dans certains cas) devenir très chères quand elles sont très grandes.
- Impact de la conception de la vanne sur le génie civil :
Souvent, les problèmes techniques ne concernent pas la structure en acier elle-même (vanne) mais les travaux de génie civil (béton et fondation), et peuvent devenir plus importants, complexes et coûteux. L'impact le plus important vient du transfert des charges (par exemple entre la vanne et les piles), et de la forme des lignes ou des surfaces de contact où les étanchéités sont souvent situées. Si les charges transmises aux piles sont trop concentrées, un renforcement important et coûteux du béton est nécessaire, et les limites de conception peuvent être atteintes (par exemple, la charge sur les articulations des vannes segments). Si les charges sont mobiles (par exemple le chariot d'une vanne levante sur des rails), des précautions particulières et des renforcements doivent être spécialement prévus pour l'usure et le coincement.

5.1.4.2 Problèmes de fonctionnement et de maintenance

Le choix de la structure a un impact sur le fonctionnement et la maintenance. C'est pourquoi certains problèmes particuliers doivent être considérés dès la conception structurelle.

Les problèmes de fonctionnement sont généralement liés à la possibilité de contrôler le niveau d'eau, les débris et les sédiments.

Certains des points essentiels pour la maintenance d'une vanne mobile sont l'inspection et l'entretien des parties qui sont toujours (ou souvent) sous eau et l'estimation des conséquences de la submersion sur la conception et la maintenance. Les points suivants doivent être considérés :

- Robustesse et durabilité de toutes les pièces, probabilité de rupture de mécanismes ;
- Les méthodes d'entretien et de remplacement de toutes les pièces mécaniques, qu'elles soient submergées ou non ;
- Redondance afin de maintenir un fonctionnement acceptable en cas de panne d'éléments clés (vérins, articulations) qui sont difficiles à remplacer ;
- Probabilité d'accident (chocs...) et capacité de la structure à accepter des accidents majeurs sans subir une destruction complète ou un effondrement (par exemple: une vanne clapet avec plusieurs articulations garanti une redondance).

5.1.4.3 Dégradations de la structure durant sa vie

Phénomènes physiques causant des dégradations

Généralement, la dégradation structurelle ne dépend pas spécifiquement du type de vannes. Elle doit être considérée comme normale mais l'ampleur de la dégradation doit être limitée pour la durée de vie prévue pour la structure.

Les sources de dégradation typiques sont :

L'usure:

L'usure due au frottement est importante dans les parties articulées de la vanne, telles que les articulations et les roulements. Pour chaque pièce, la tolérance d'usure doit être connue. Une usure excessive peut entraîner des déformations, des vibrations et mener à une distribution de charges différente pouvant induire des défaillances. Par exemple, le moment induit par le frottement au niveau des articulations qui fut omis lors de la conception des vannes segments de Folsom engendra un dysfonctionnement majeur des vannes. (Todd, 1999).

La fatigue

La fatigue n'est généralement pas un problème majeur pour les vannes des barrages de navigation. En effet, le nombre de cycles de manipulation durant leur vie est généralement faible par rapport à la résistance à la fatigue des éléments de la vanne. Néanmoins, certaines configurations d'écoulement (aux extrémités de la vanne) peuvent induire des vibrations locales et globales (voir section 5.2). Comme la fatigue n'est pas souvent un problème majeur, les concepteurs considèrent la plastification, le flambement et les déformations excessives comme étant les états limites de conception.

L'abrasion

Ce type de dégradation est le résultat du contact avec l'écoulement, principalement en présence du transport de sédiments. L'abrasion est plus importante pour les vannes qui ont des articulations sous eau (comme les vannes clapets).

La corrosion

Elle peut se développer pour toutes les structures en acier proches de l'eau :

- Le problème de l'accessibilité (pour l'inspection et la réparation) est un problème majeur;
- L'utilisation de l'acier inoxydable, de l'aluminium ou de matériaux synthétiques pourrait être une solution contre la corrosion, mais le contact entre des matériaux différents doit être examiné avec soin car la corrosion y est accélérée ;
- L'abrasion peut mener à de la corrosion.

Une protection efficace peut être obtenue par diverses techniques : protection cathodique, anode sacrificielle.... Une prévention efficace contre la corrosion requiert une maintenance planifiée plutôt qu'une approche basée sur la réparation après les dégâts.

Les vibrations

Les vibrations peuvent résulter soit de causes mécaniques, soit des écoulements de fluide. Le manque d'aération de la lame déversante au dessus de la vanne est une des causes majeures de vibration. Elle peut entraîner des contraintes plus élevées, des oscillations (déformations), du bruit et de l'usure, mais des fissures de fatigue n'apparaissent

généralement pas (ou alors localement).

Si les amplitudes sont faibles et ont lieu pendant un temps réduit (pour des configurations particulières d'écoulement), la vibration peut uniquement être une nuisance et ne pas causer de défaillance structurelle ou de problèmes de fonctionnement.

Si l'amplitude de la vibration est assez grande pour introduire des niveaux de contraintes importants et que la vibration persiste pendant un temps assez long, un dégât sérieux ou une rupture complète peut avoir lieu à cause de la fatigue des composants structuraux. De toute façon, de telles vibrations doivent être évitées par une gestion appropriée de la vanne, par exemple en évitant les situations critiques d'ouverture sous eau (une faible ouverture en sousverse doit être évitée) combinée avec une conception appropriée des bords de la vanne.

En effet, la manière dont la vanne est manipulée peut avoir un effet sur l'apparition et la nature des vibrations. Par exemple, les vibrations des vannes les plus importantes ont souvent lieu pour un écoulement de fond, lorsque les vannes sont manipulées pour de petites ouvertures. Dans ce cas, les remous peuvent générer des charges pulsatoires alternatives sur la vanne et induire une vibration.

Les étanchéités elles-mêmes sont une cause majeure de vibrations si elles ne sont pas conçues et installées correctement.

Une procédure de conception doit être suivie pour éviter (ou réduire) les problèmes de vibrations (voir section 5.2).

La cavitation

La cavitation peut conduire à des dégâts aux structures en béton pour les raisons suivantes :

- Une conception inappropriée des rainures de la vanne (et des batardeaux) ;
- Jet d'eau avec une vitesse élevée causé par une fuite importante ;
- Une conception inappropriée du bord inférieur de la vanne.

Conséquences des dégradations

Ces phénomènes physiques (vibration, usure, ...) induisent plusieurs problèmes :

- Réduction de l'épaisseur des tôles,
- Changement dans les distributions de charges,
- Déformations excessives,
- Distorsions géométriques,
- Fuites,
- Contraintes plus élevées dans la structure de la vanne,
- Fissures.

Ces dégradations peuvent mener à des ruptures structurelles ou à des dysfonctionnements du barrage.

5.1.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE DIVERS TYPES DE VANNES

Le Tableau 5.3 (page suivante) présente les avantages et les inconvénients de divers types de vannes sur base de leurs caractéristiques et des problèmes potentiels (listés ci avant). Ce tableau compare les types de vannes en fonction des problèmes de conception, des dégradations potentielles, de la maintenance et du fonctionnement.

Une attention particulière doit être apportée au fait que les avantages et les inconvénients dépendent fortement des conditions locales et des exigences spécifiques. Le Tableau 5.3 ne peut donc pas être considéré comme totalement générique, ni objectif.

5.1.6 GAMMES D'UTILISATION DES DIFFÉRENTES VANNES

Le Tableau 5.4 (page 66) présente les gammes d'utilisation optimale des divers types de vannes associés à leurs limitations et exigences de fonctionnement.

Il n'existe pas d'argument pour exclure définitivement un type de vannes car chaque type possède des avantages et des défauts et aucun d'eux n'a que des avantages. Le choix ne peut donc s'effectuer que pour un contexte donné.

Toutefois, les dimensions optimales diffèrent d'un type de vannes à l'autre à cause des différences

au niveau de leur résistance structurelle et de leur poids propre qui peut conduire à une différence significative de coût.

Dans le Tableau 5.4, les gammes d'utilisation données portent sur les dimensions (portée et hauteur de retenue) : cela signifie que le type de vannes en question a été utilisé à de nombreuses reprises pour ces dimensions. Mais cela ne signifie pas qu'il est techniquement impossible d'aller au delà ou que cela n'a pas déjà été réalisé dans un cas exceptionnel. A titre indicatif, quelques valeurs maximales sont parfois indiquées.

En fait, les considérations traitant des dimensions maximales sont plus complexes que celles présentées dans le Tableau 5.4. En effet, à chaque portée de vanne correspond une retenue maximale et de telles limites pourraient seulement être représentées par des graphiques.

Généralement, la retenue maximum possible diminue lorsque la portée augmente (afin que la charge hydraulique globale n'augmente pas trop). Cependant, cela peut être différent pour certains types de vannes :

- La hauteur d'eau maximum possible diminue avec la portée : → vanne clapet, segment, levante ;
- La hauteur d'eau maximum ne dépend pas de la portée : → vanne gonflable, secteur, barrage à aiguilles, hausses ;
- La hauteur d'eau maximum augmente légèrement avec la portée : → vanne toit, vanne tambour.

Les paramètres et configurations limitantes indiquent les types de vannes qui ne sont pas recommandés (mais pas impossible à utiliser) et les solutions particulières qui doivent être trouvées (probablement avec un coût plus élevé).

Des informations supplémentaires, tirées de Erbisti 2004 et Sehgal 2000 (ICOLD'2000 in Beijing), sont disponibles sur le CD du GT101 dans le dossier / Annexe Section 5.1 – Structure/.

	Vanne clapet	Vanne segment	Vanne levante	Vanne secteur	Barrage gonflable
Conception de la vanne	<u>Avantages</u> <ul style="list-style-type: none"> - Economique - Simplicité du génie civil et de l'équipement de levage - Charge hydraulique sur le radier → (bon pour la stabilité et permet des piles étroites) - peu visible 	<u>Avantages</u> <ul style="list-style-type: none"> - Robustesse et rigidité élevée (moins rigide pour une faible hauteur en présence d'un clapet supérieur) - Charges concentrées (forme radiale) - Faible capacité de levage - Pas de rainure 	<u>Avantages</u> <ul style="list-style-type: none"> - Forme simple - Facile à fabriquer - Large passe possible - Possibilité d'une vanne en deux pièces (avec hausses ou clapet supérieur) - Evite de longues piles - Temps de construction court 	<u>Avantages</u> <ul style="list-style-type: none"> - Pas de limite de longueur - Pas de torsion et de flexion longitudinale: concept structurel simple - Pas visible 	<u>Avantages</u> <ul style="list-style-type: none"> - Pas de limite de longueur - Temps de construction court - Pas visible - Fondation simple - Moins coûteux
	<u>Inconvénients</u> <ul style="list-style-type: none"> - En principe pour de petite retenue (chute) - Manque de rigidité torsionnelle, surtout si elle est manipulée d'un seul coté - Difficulté d'alignement, particulièrement avec deux organes de manœuvre 	<u>Inconvénients</u> <ul style="list-style-type: none"> - Difficile à concevoir si le niveau du sol aval est trop haut (nécessite des excavation pour loger le clapet, danger d'ensablement) - Piles aval longues et épaisses, avec des armatures importantes - Charge hydraulique importante sur le haut des piles (mauvais pour la stabilité) - Visible (vanne, piles, vérins, ...) 	<u>Inconvénients</u> <ul style="list-style-type: none"> - Système mécanique lourd et complexe (si des chariots de levage sont utilisés) - Forces de frottement importantes - Grandes rainures dans les piles pour les rails/surfaces de glissement - Charges mobiles dans les rainures - Mécanismes sous eau (roues, rails) - Hautes superstructures et équipement mécanique complexe pour le système de levage 	<u>Inconvénients</u> <ul style="list-style-type: none"> - Besoin de génie civil important sous le seuil du barrage - Souvent coûteux, - Structure en acier lourde - Frottement généré par les sédiments compactés dans les rainures sous eau. 	<u>Inconvénients</u> <ul style="list-style-type: none"> - Faible hauteur uniquement (charge limitée) – La charge dépend de la résistance du matériau - Manque de retours d'expérience comme barrage de navigation - Durée de vie assez courte pour la membrane (20 ans)
Dégradations	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible aux vibrations - Articulations partiellement ou en permanence sous eau: risques de corrosion - Sensible à l'abrasion lorsqu'il y a un transport de sédiments important 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible aux vibrations en cas de défauts d'étanchéité 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible aux vibrations pour de petites ouvertures au fond ou des défauts d'étanchéité - Sensible aux sédiments 	<ul style="list-style-type: none"> - Articulations partiellement ou en permanence sous eau: risques de corrosion - Sensible à l'abrasion 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de dégradations "métalliques" - Risques spécifiques vis-à-vis du vandalisme (entailles et armes à feu) et de l'abrasion des corps flottants

Tableau 5.3: Avantages et inconvénients de divers types de vannes (Partie 1)

	Vanne clapet	Vanne segment	Vanne levante	Vanne secteur	Barrage gonflable
Maintenance	<u>Avantages</u>	<u>Avantages</u> - Facile à inspecter et à entretenir en position levée (rien sous eau)	<u>Avantages</u> - Facile à inspecter et à opérer.	<u>Avantages</u> <i>Voir Project Review: Barrage Secteur de Lehmen (CdRom)</i>	<u>Avantages</u> Faible coût, <i>Voir Project Review: Barrage gonflable de Lechbruck</i>
	<u>Inconvénients</u> - Batardeaux nécessaires à la maintenance et aux inspections	<u>Inconvénients</u>	<u>Inconvénients</u> - Complexité des systèmes → maintenance plus importante	<u>Inconvénients</u> - Parties mobiles sous eau - La maintenance est difficile pour les axes sous eau	<u>Inconvénients</u> ---
Fonctionnement	<u>Avantages</u> - Passage facile des corps flottants - Adapté à la navigation - Fiabilité d'ouverture en cas d'erreur de fonctionnement - Risque plus faible de destruction massive en cas d'accident (impact d'un bateau) - Fonctionnement fiable même si un vérin est en panne (pour une vanne avec 2 vérins)	<u>Avantages</u> - Possibilité d'ajouter un clapet/hausse supérieur - Adaptée à un fonctionnement non symétrique (d'un seul côté seulement)	<u>Avantages</u> - Possibilité d'ajouter un clapet/hausse supérieure - Simple et fiable (système de fermeture le plus fiable pour les urgences)	<u>Avantages</u> - Faible coût (pas besoin d'énergie externe au barrage)	<u>Avantages</u> - Pas de risque de blocage - Ouverture très fiable (il s'agit de laisser dégonfler), pas de risque de blocage en position fermée
	<u>Inconvénients</u> - Sédimentation dans le logement du radier de la vanne - Danger de dégâts si pas assez de profondeur (impact avec bateaux) car la vanne n'est pas visible	<u>Inconvénients</u> - Tirant d'air limité en cas de navigation (danger de dégâts) - Dissipation d'énergie pour lame de fond (bassin de dissipation souvent requis) - Les bras et l'articulation réduisent la largeur utile, arrêtent les corps flottant et ne sont pas toujours protégés contre l'impact.	<u>Inconvénients</u> - Dissipation d'énergie pour lame de fond (bassin de dissipation souvent requis) - Besoin d'un grand tirant d'air pour la navigation à travers le barrage	<u>Inconvénients</u> - Danger de dégâts si pas assez de profondeur (impact avec bateaux) car la vanne n'est pas visible	<u>Inconvénients</u> - Moins précis pour les débits moyens (surtout si à l'air) - La plupart des parties structurelles sont sous eau - Pour l'inspection, la vanne doit être isolée - Risque de dégâts si pas assez de profondeur pour le passage des bateaux

Tableau 5.3: Avantages et inconvénients de divers types de vannes (Partie 2)

	Vanne clapet	Vanne segment	Vanne levante	Vanne secteur	Barrage gonflable
Dimensions optimales: Retenue (H) et portée (L)	H = 2 à 5 m L = 4 à 15 m, si manœuvrée de 1 côté, L = 15 à 35 m, si manœuvrée de 2 côtés,	H = 4 à 10 m L = 15 à 30 m	H = 2 à 15 m L = 2 à 30 m	H = 4 à 8 m L = 15 à 40 m	H = 1 à 4 m L = 20 à 40 m
Paramètres techniques limitants	- Rigidité torsionnelle - Hauteur d'eau (7 m) - Pas de limite de longueur pour les systèmes à hausses	Charge globale sur une articulation (40 MN)	- Charges sur les roulements et les roues/rails - Déformations extrêmes	Hauteur d'eau	Hauteur d'eau (7 m)
Autres paramètres limitants (configuration)	- Transport de sédiments - Quand il est difficile de réaliser un décrochement pour loger la vanne dans le radier - Quand il n'est pas possible de mettre à sec durant la vie de l'ouvrage	- Un niveau aval élevé empêche de garder l'articulation hors de l'eau - Tirant d'air si navigation - Transport des corps flottants (si vanne en 1 pièce)	- Besoin d'un tirant d'air élevé - Transport des corps flottants (si vanne en 1 pièce)	- Transport de sédiments. - Quand il est difficile de réaliser un radier profond	- Danger important de crevaisons. - Si une longue durée de vie est exigée pour la vanne (20 ans)

Tableau 5.4: Domaine d'utilisation de chaque type de vannes, avec leurs facteurs limitants.

5.2 HYDRAULIQUE ET ECOULEMENT

Cette section compare divers types de vannes d'un point de vue hydraulique. Les caractéristiques du débit sont quantifiées avec les coefficients de débit (si disponible), c'est à dire via la relation charge/débit. Les vibrations associées à la configuration géométrique de la vanne ou à la position des étanchéités sont identifiées. Les performances des vannes vis-à-vis de leur capacité à contrôler le débit/le plan d'eau en régulant l'écoulement sont comparées. Certains types de vannes peuvent uniquement être ouverts ou totalement fermés. Un autre problème qui peut être important est la vitesse de réaction de la vanne. Quels types de vannes permettent une manœuvre plus rapidement ? La ventilation des écoulements (jet) est requise pour certains types de vannes afin d'éviter des vibrations néfastes. La capacité de la vanne à laisser passer des corps flottants, tels que glace et végétaux, peut être une considération importante du projet. A cet effet, des passes plus larges sont plus efficaces car permettent de laisser passer des corps flottants de grande taille. Elles sont également préférables pour éviter l'accumulation des débris en amont des piles. Les effets d'une retenue aval élevée (vanne

partiellement noyée), de charges hydrodynamiques exceptionnelles, et des problèmes associés à l'accumulation de sédiments sont aussi analysés.

Une liste des paramètres d'évaluation des performances hydrauliques est fournie. Chaque type de vannes est décrit en fonction de la valeur de ces paramètres. Les éléments/dispositions qui doivent être évités (comme une étanchéité mal placée) ou au contraire prévue (comme l'aération de la nappe déversante) sont également mentionnés.

5.2.1 CAPACITE D'EVACUATION (DEBIT)

Le débit, dans les projets de navigation, est contrôlé en manoeuvrant des vannes et autres clapets, hausses, Une généralisation de la relation charge/débit se fait au travers de l'utilisation de l'équation du débit qui peut être exprimée de diverses façons. Elle est donnée ici comme:

$$Q = C_D G_O L_E \sqrt{2gH} \quad (5.1)$$

avec Q est le taux d'écoulement volumique (débit), en L^3/T ; C_D est le coefficient adimensionnel de débit; G_O est la hauteur de l'ouverture libérée par la vanne

en L ; L_E est la largeur effective de la passe du barrage (voir Section 5.2.2 pour la description de la largeur effective), en L ; g est l'accélération due à la gravité, en L/T^2 ; et H est la charge hydraulique au milieu de la passe, en L . Il faut être très prudent en utilisant un C_D de la littérature parce qu'il inclut souvent $g^{1/2}$ et n'est donc pas par conséquent adimensionnel. Dans ce cas, le système d'unité du coefficient de débit doit toujours être soigneusement analysé.

Cette section ne traite nullement de manière exhaustive du coefficient de débit sur/sous tous les types de vannes et pour toutes les géométries. Elle sert plutôt d'indication pour déterminer les capacités relatives des divers mécanismes de contrôle de l'écoulement. La capacité plus ou moins grande d'une vanne à permettre les écoulements, pour une charge donnée (c-à-d des retenues données), se reflète dans le coefficient de débit.

Les coefficients de débit, associés au contrôle de l'écoulement d'un déversoir utilisant des vannes segments sont fournis à la Fig. 5.1 (US Corps of Engineers, 1990). La valeur de ce coefficient dépend de l'emplacement de la vanne sur la crête du déversoir. Les coefficients de débit (de fond) d'une vanne segment s'étendent généralement de 0.67 à 0.73 selon la géométrie de la vanne et du site.

Les coefficients de débit pour les vannes levantes sont donnés à la Fig. 5.2, page suivante (US Corps of Engineers, 1952). Les effets de bord sont faibles mais le coefficient augmente néanmoins graduellement en fonction de l'ouverture de la vanne. Les coefficients varient de 0.73 pour les petites ouvertures de vanne à 0.8 pour des ouvertures de vanne de 80%. La perte de charge en position totalement ouverte est attribuée aux rainures dans les piles/radier et aux diverses discontinuités.

Écoulement de fond (sous la vanne): Le débit sous une vanne dépend de sa position par rapport au seuil du déversoir (ou du radier). Les coefficients de débit d'une vanne segment, associés au contrôle de l'écoulement du déversoir, varient généralement de 0.51 à 0.76 selon la géométrie de la vanne et le site. Ces valeurs correspondent au cas où l'écoulement n'est pas influencé par le niveau d'eau aval. Dans le cas d'un écoulement noyé, le niveau d'eau aval influence le débit sous la vanne. Le coefficient de débit est réduit et le débit ne dépend plus uniquement de la géométrie de la vanne, mais également du rapport entre hauteur d'eau aval et l'épaisseur de la lame de fond au pied de la vanne.

Les coefficients de débit des vannes levantes sont aussi modifiés si l'écoulement est noyé (et non pas libre). Les effets de bords sont faibles mais le coefficient augmente pour atteindre sa valeur maximale lorsque l'ouverture est complète (100%). Le coefficient pour un écoulement libre varie de 0.68 pour des petites ouvertures à 0.80 pour une ouverture presque complète. La perte de charge en position complètement ouverte est attribuée aux rainures dans les piles et aux autres discontinuités de bords.

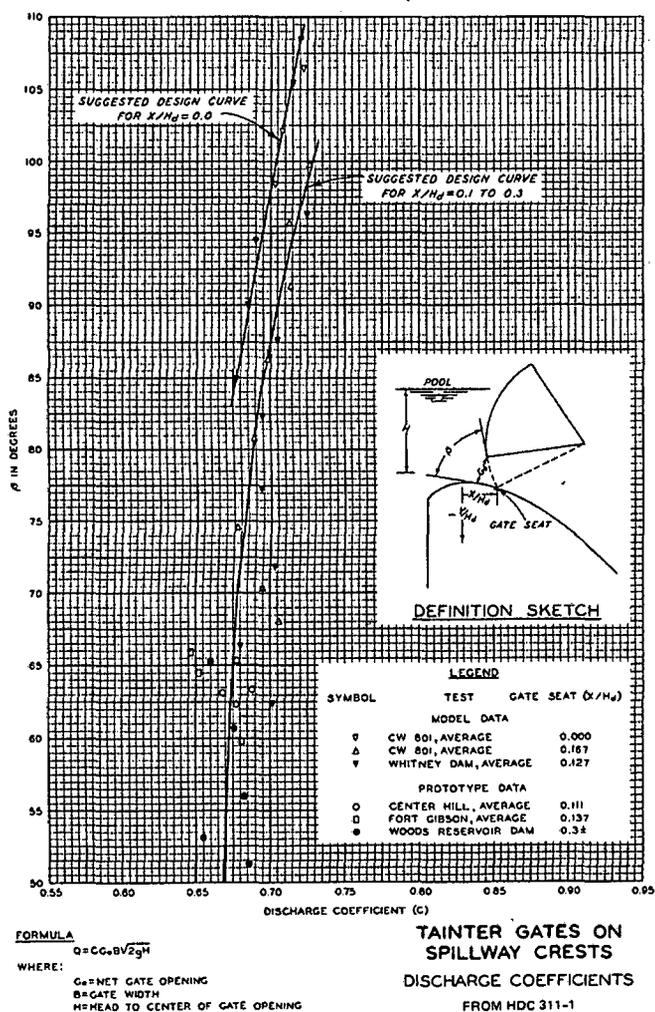


Fig. 5.1: Coefficients de débit (de fond) pour des vannes segments sur déversoir – (US Corps of Engineers)

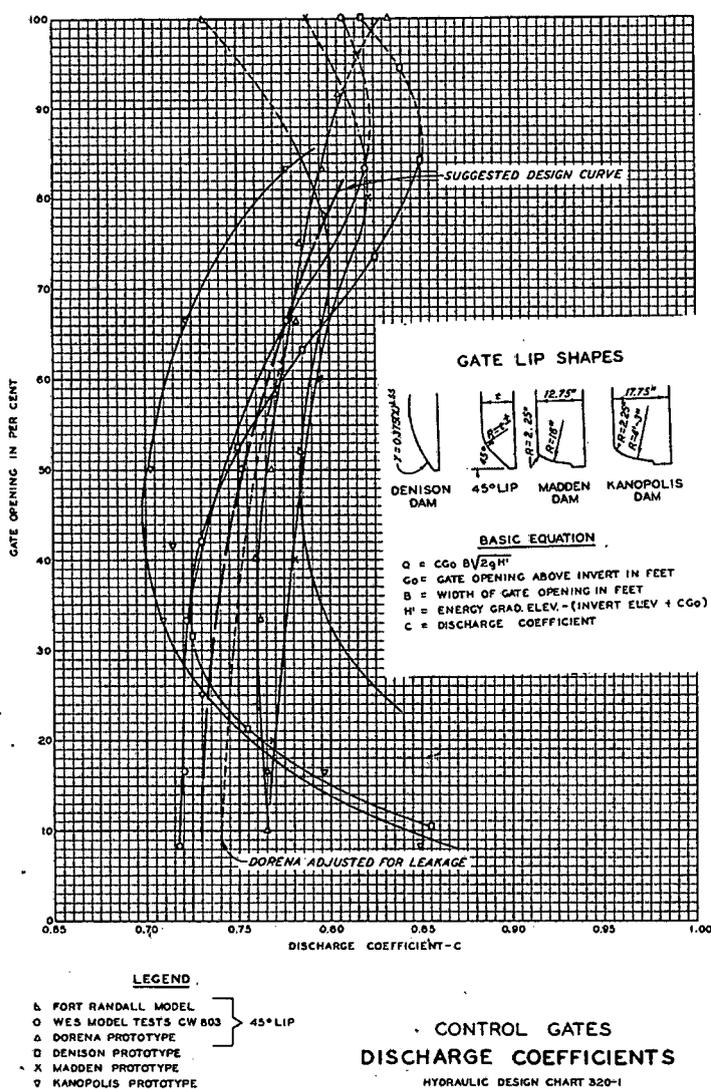


Fig. 5.2 : Les coefficients de débit pour les vannes levantes (Corps of Engineers, USA)

Le type de lèvre (bord inférieur de la vanne) influence significativement la relation hauteur-débit. Par conséquent, il est difficile d'évaluer avec précision le coefficient de débit spécifique d'une vanne levante parce qu'il est fortement dépendant de la configuration de ce bord.

La forme et la rigidité relative des composants structuraux, supports et étanchéités, conditionnent le risque de vibration, les sollicitations hydrauliques/hydrodynamiques, et le coefficient de débit.

La relation hauteur/débit de certaines vannes (en fonction de leur forme) est différente selon qu'elle se lèvent ou s'abaissent. Ce phénomène est bien connu comme étant l'effet d'hystérésis du coeffi-

cient de débit d'une vanne lors du soulèvement et de l'abaissement.

Écoulement de surface (au dessus de la vanne): L'écoulement (dit de surface) par-dessus une vanne (par exemple pour une vanne clapet) varie selon qu'il s'agit d'un déversoir mince lorsque la vanne est entièrement levée ou d'un déversoir épais (large) lorsque la vanne est en position couchée.

5.2.2 EFFETS DES PILES ET DES CULEES

Une considération particulière doit être apportée à la conception des piles et des culées de crête. Le tracé de la surface de l'eau, lorsque l'écoulement s'accélère autour de ces formes, réduit la largeur effective de l'ouverture de la vanne, L_E . Les contractions réduisent le débit au niveau de la vanne. La contraction causée par les culées et les piles est quantifiée par les coefficients de contraction qui fournissent empiriquement la largeur effective de l'écoulement au droit de la vanne. La valeur du coefficient de contraction dépend de la forme de la pile. La contraction peut atteindre 10 % de la largeur de la passe. Les coefficients de contraction sont donnés dans des manuels tels que EM 110-2-1603 (1990), disponible sur :

<http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/>

Une variation de niveau amont au droit d'une vanne peut être induite par des tourbillons provenant des piles adjacentes supportant une vanne segment. Ces tourbillons créent un courant de travers. L'intersection de tels écoulements est fondamentalement instable. Cette situation peut induire des remous auto-excités qui oscillent entre le bassin amont et la retenue au droit de la vanne. Le résultat est une surcharge variable, de faible fréquence, sur la vanne et une variation du débit due aux oscillations (ondes) sur le plan d'eau.

5.2.3 VIBRATION DES VANNES

La vibration des vannes induite par un écoulement à surface libre peut être causée par un mouvement forcé résultant des tourbillons provenant des bords de la vanne. De nombreux chercheurs se sont concentrés sur les vannes levantes suspendues par des câbles métalliques (par exemple Bhargava et Narasimhan 1988, Neilson et Pickett 1979, et Campbell 1961).

Leurs travaux ont montré que les vannes clapets fortement inclinées doivent être évitées. L'inclinaison du bord de la vanne doit être de 45 degrés et le bordé du clapet doit être placé sur la face amont de la vanne.

La cause majeure des vibrations dans les vannes segments provient de la forme du bord de la vanne (lèvre) et de l'étanchéité de fond. L'oscillation du joint en caoutchouc peut générer des vibrations dans la vanne. Ces vibrations, induites par l'écoulement, peuvent être causées soit par déplacement du point de décollement de l'écoulement sur le bordé amont et aux éléments au pied de la vanne, soit par la flexibilité des joints en caoutchouc qui oscille dans l'écoulement (Pickering 1971). Schmidgall (1972) a montré que la tendance à vibrer pouvait être réduite s'il n'y a pas de joint en caoutchouc au pied de la vanne. Ceci mène bien sûr à des fuites lorsque la vanne est fermée et ces fuites doivent être tolérées par le projet pour que cette stratégie puisse être suivie.

5.2.4 AERATION DE LA VANNE

Les ouvrages hydrauliques utilisés pour réguler les rivières et chenaux sont caractérisés par la présence de chutes d'eau. Les biefs en aval des barrages sont des zones importantes pour le transfert d'oxygène afin d'accroître la qualité de l'eau, particulièrement lorsque la chute est localisée dans un bief ayant un déficit élevé en oxygène.

La ré-aération au niveau des structures hydrauliques est souvent caractérisée par le "taux de réoxygénation", qui est classiquement défini comme le rapport entre les déficits en oxygène aval et amont. Le taux de réoxygénation dépend de la structure hydraulique, du type d'écoulement (écoulement de fond, de surface, ou écoulement mixte), de la chute d'eau, du débit, et de la structure du jet. Les résultats expérimentaux ont montré l'influence importante des aérateurs (déflecteur, briseur de jet...) placés au sommet des vannes.

Les vannes articulées en leur pied sont sujettes à de rapides variations de la charge lorsqu'elles sont relevées. La charge maximale est atteinte lorsque la nappe déversante, formée sur la vanne levée, est brisée/aérée. Lorsque la nappe est ventilée, la dépression sous la nappe disparaît et la pression sous la vanne (face aval) est fixée par la retenue

aval (voir Fig. 5.3). Cette variation de la pression sous la nappe peut agir comme une source excitatrice de vibration sollicitant les mécanismes.

La littérature technique disponible se concentre principalement sur les problèmes de vibration des vannes pour un écoulement de surface et des vannes clapets maintenues en position fixe. Des réflexions théoriques sur les modes de vibration des vannes clapets articulées en leur pied sont données par Naudascher (1991), Homma et Ogihara (1976), Partensky et Swain (1971), et Schwartz (1964). Ces documents ne présentent pas les méthodes d'aération des nappes déversantes. Ogihara et Ueda (1980), Pulpitel (1980), Kolkman (1980), et Gill et May (1989) présentent des résultats expérimentaux relatifs aux oscillations des vannes clapets. Dans chacune de ces études, les oscillations sont causées par une nappe non aérée.

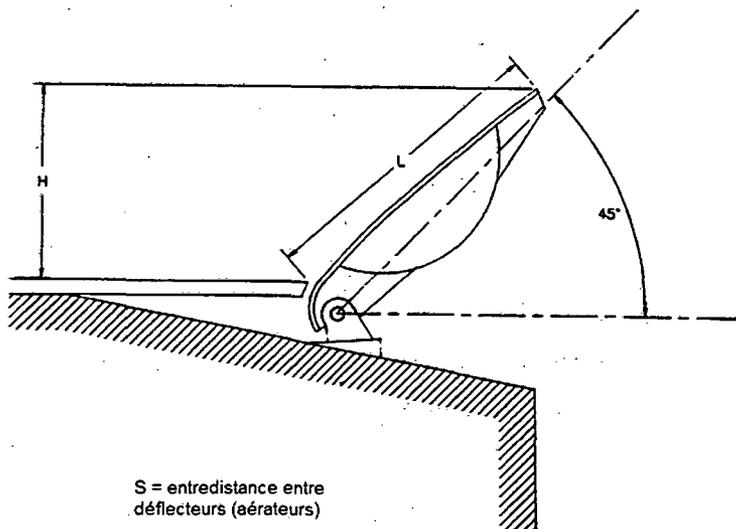


Fig. 5.3 : Ecoulement lors de la fermeture d'une hausse, articulée au pied, avant que la vanne ne brise la nappe

Il y a deux grands concepts pour aérer la nappe d'une vanne. Une approche consiste à introduire de l'air en dessous de la vanne via une conduite d'apport en air (alimentation naturelle ou forcée). Cette méthode fonctionne si l'air a le temps de se propager sur toute la largeur de la vanne. L'apport en air est généralement efficace quand la vanne est en position haute. Des conduites d'aération sont conçues pour les projets ayant des piles/culées de part et d'autre à chaque vanne (Zipparro and Hassen 1993). Via des canalisations de faible longueur, les piles fournissent de ce fait des entrées d'air.

La seconde méthode repose sur des aérateurs de nappe (déflecteur et briseur de jet). Ceux-ci sont des accessoires placés à l'extrémité supérieure sur la face amont de la vanne (clapet, hausse) afin de modifier localement la forme supérieure et/ou inférieure de la nappe déversante. Dans chacune des études mentionnées ci-dessous, la conception des déflecteurs est optimisée sur base de tests in situ ou de modèles réduits en laboratoire.

Divers concepts de déflecteurs ont été testés. Seul Ogihara et Ueda (1980) présente pour une vanne clapet une documentation complète avec des détails de conception sur les déflecteurs. Les formes testées par Ogihara et Ueda sont présentées à la Fig. 5.4 où la forme du déflecteur est présentée en utili-



S = entredistance entre déflecteurs (aérateurs)

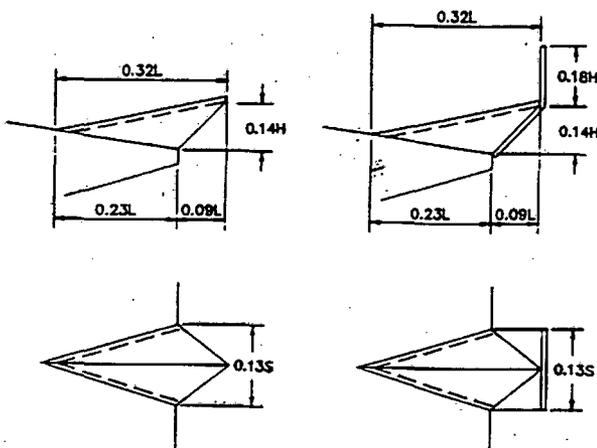


Fig. 5.4 : Aérateurs testés par Ogihara et Ueda (1980)

lisant des longueurs adimensionnelles en fonction de la longueur de la vanne (L), de la charge sur la vanne (H), et de l'espacement entre déflecteurs (S).

La Fig. 5.6 présente des déflecteurs testés par d'autres chercheurs. Schwartz (1964) affirme que les détails de conception des déflecteurs dépendent de la situation et donc que chaque vanne est un cas d'espèce différent des autres.

Les résultats des essais sur modèle réalisés en 2001 par la Federal Waterways Engineering and Research Institute, Karlsruhe, Allemagne, ont montré que les aérateurs (déflecteurs) peuvent être moins nombreux ou de plus petite taille que le propose Ogihara et Ueda (Fig. 5.5, page suivante).

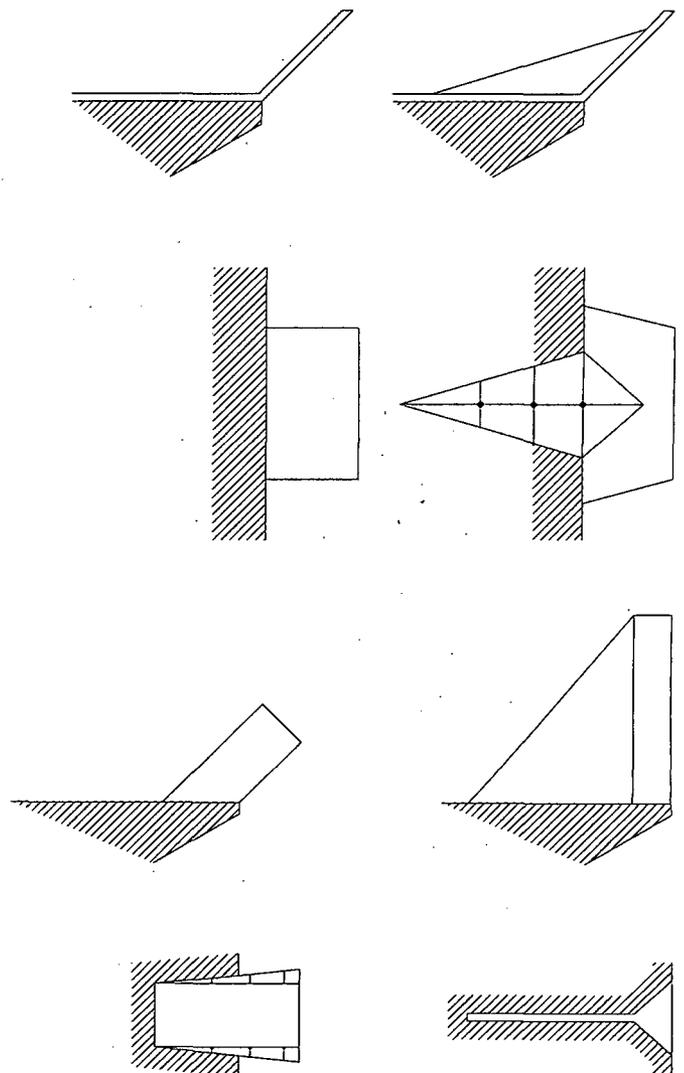
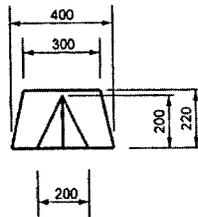
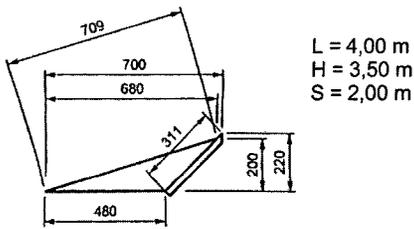


Fig. 5.6 : Divers types d'aérateurs

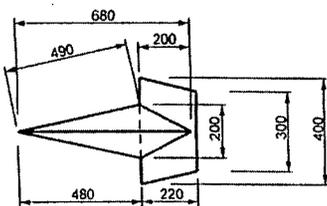
Detail Strahlstörer

Seitenansicht (Maße in mm)

Ansicht vom OW (Maße in mm)



Draufsicht (Maße in mm)



Result of a model test
(M1:12,5),
FWERI (BAW) 2001

Fig. 5.5 : Résultats d'essais sur les aérateurs (FWERI, 2001)

Concernant l'efficacité du fonctionnement des conduites d'approvisionnement en air, il a été prouvé qu'il est avantageux de les placer à différents niveaux (Fig. 5.7).

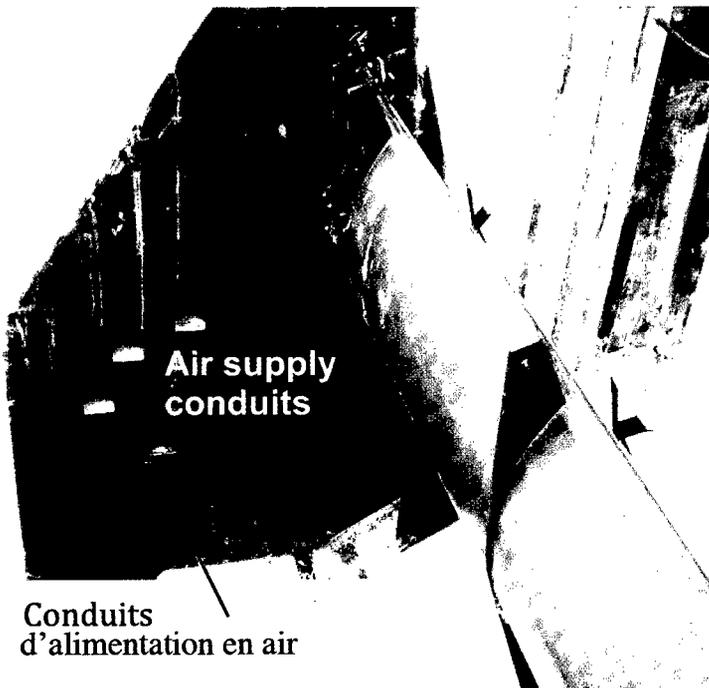


Fig. 5.7 : Disposition de conduites d'alimentation en air à différents niveaux

Une conception innovante fut employée lors de la construction de la vanne levante de la barrière d'Hartel (voir «Project Review» sur le CD / Répertoire A1/). Les gaines de ventilations furent incorporées à l'intérieur des éléments structuraux (membrures) situés du côté aval de la vanne (porte). Ainsi, lorsque l'écoulement passe par dessus la vanne levante, l'air est aspiré via les membrures de la structure afin d'aérer la nappe. La Fig. 5.8 illustre le schéma du concept de ventilation de la vanne à Hartel pour un écoulement par dessus la vanne levante.

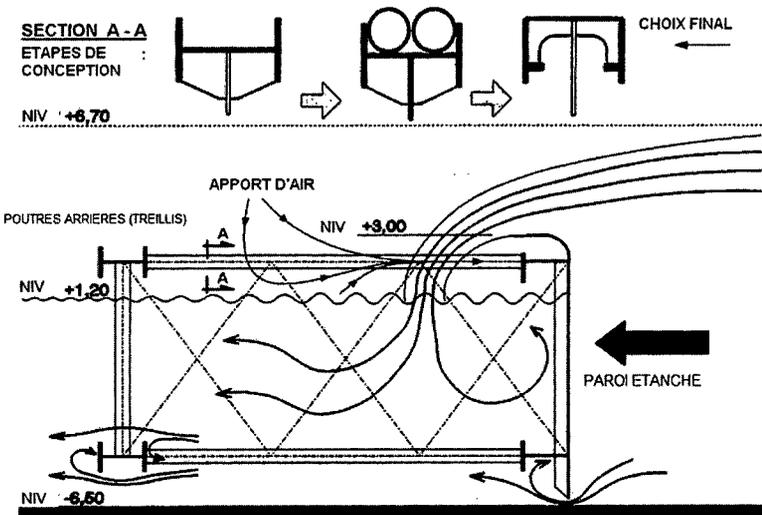


Fig. 5.8 : Concept de ventilation de la nappe déversante de la vanne levante de la barrière d'Hartel (NL)

5.2.5 TENDANCES A L'EROSION ET A LA SEDIMENTATION

L'ouverture d'une vanne peut produire des tourbillons en aval du barrage, pouvant capter des sédiments et les déposer dans les bassins de dissipation. Ces matériaux tendront alors à éroder le bassin de dissipation en béton et plus particulièrement les blocs dissipateurs et le seuil aval du bassin (Hite 1993).

5.2.6 RECAPITULATIF DES PRINCIPAUX PARAMETRES HYDRAULIQUES

La Tableau 5.5 (page suivante) présente les principaux paramètres hydrauliques pour les divers types de vannes. Ce tableau est volontairement simplifié afin de permettre la comparaison des conditions hydrauliques associées aux diverses configurations géométriques des vannes.

Paramètres	Types de vannes								
	Vanne segment (sans clapet supérieur)			Vanne levante	Vanne clapet & hausse	Vanne toit	Vanne gonflable	Vanne secteur à axe vertical	Vanne secteur à axe horizontal
	Ecoulement de fond	Ecoulement de surface	Mixte						
Contrôle de l'écoulement	Efficace (voir Fig. 5.1 sur C_D) Le coefficient de débit varie avec l'ouverture de la vanne	--	--	Voir Fig. 5.2 sur C_D Le coefficient de débit varie avec l'ouverture de la vanne	Efficace, Similaire à un déversoir à bord mince si vanne levée et à un déversoir à seuil épais si abaissée	Levé ou couché. Ecoulement par dessus quand abaissé (ou partiellement abaissé)	Similaire à un déversoir à seuil épais, difficile de réguler l'écoulement en position partiellement ouverte/fermée	Le coefficient de débit varie avec l'ouverture de la vanne	Le coefficient de débit varie avec l'ouverture de la vanne
Vitesse de manoeuvre	Variable	Variable	Variable	Variable	Clapet: Rapide Hausse: Lent, dangereux et demande beaucoup de ressources (personnel...)	Lent, contrôlé par une régulation de la pression sous la vanne permettant la manoeuvre.	Spécifique au site. En principe lent mais ouverture très fiable	Variable	Variable
Ventilation de la nappe déversante	Pas nécessaire	Air souvent apporté via des conduits d'aération	Peut nécessiter la ventilation	Pas nécessaire	Exige des déflecteurs sur le clapet et/ou des conduits de ventilation dans les piles	Pas nécessaire	Pas nécessaire mais des ailettes/guides sont utilisés (similaires à des déflecteurs)	Pas nécessaire	Pas nécessaire
Faculté de la vanne (ou des lèvres de la vanne) à vibrer	- configuration des bords et lèvres critique pour les faibles ouvertures	Formation très probable de tourbillon en aval pour induire des vibrations	Interaction possible entre les écoulements de surface et de fond (aération, tourbillon)	- la configuration de la lèvre inférieure est capitale - critique pour les faibles ouvertures	Sensible mais la vibration est réduite par la présence de déflecteurs et/ou la ventilation via les piles	Les étanchéités aux articulations peuvent induire des vibrations menant à la fatigue	Des ailettes/guides sont ajoutées pour réduire les oscillations. L'aération via les piles ne fonctionne pas pour de grandes passes	Problème avec les petites ouvertures de la vanne	Aucun
Passage des corps flottants	Ne permet pas le passage des corps flottants	Efficace pour le passage des corps flottants	Efficace au passage des corps flottants	Ne permet pas le passage des corps flottants	Efficace pour le passage des corps flottants, mais risque d'être coincé par les déflecteurs-arêteurs	Passage facile des corps flottants. Souvent utilisé comme système d'évacuation de ces corps flottants	Possibilité de dégâts créés par des corps flottants	Efficace pour le passage de corps flottants	L'écoulement de fond ne permet pas le passage des corps flottants
Effets d'un niveau d'eau aval fort élevée	L'articulation des bras doit être plus haut que le niveau d'eau aval	L'articulation des bras doit être plus haute que le niveau d'eau aval	L'articulation des bras doit être plus haute que le niveau d'eau aval	C_D est réduit	Pourrait induire de la traction dans les bras de support, → risque de fermeture accidentelle	Modifie la régulation pour la manoeuvre (peu d'effets)	Aucun	Aucun	Les articulations doivent être conçues pour une charge inverse
Possibilité de charges hydrauliques exceptionnelles	Aucun	Impacts de l'écoulement et corps flottants sur les bras/vérins de la vanne	Interaction entre les écoulements de surface et de fond	L'écoulement sous la porte peut réduire la pression et accroître la résultante des forces descendantes	Les charges transitoires durant le levage de la vanne lorsque la nappe est brisée	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun
Sensibilité aux problèmes dus à l'accumulation de sédiments	Aucun	Les sédiments peuvent s'accumuler pendant de longues périodes de submersion		Aucun	Les sédiments tendent à s'accumuler dans l'encoche du radier (dépendant de la forme du radier)	Les sédiments capturés sont difficiles à enlever	Les sédiments tendent à s'accumuler dans les rainures (et décrochement) du radier	Possibilité d'envasement si elle n'est pas ouverte complètement régulièrement	Aucun

Tableau 5.5: Paramètres hydrauliques conditionnant le choix des vannes des barrages mobiles

5.3 FONDATION ET GENIE CIVIL

Cette section a pour but de mettre en évidence les principaux aspects relatifs aux fondations et au génie civil des barrages mobiles et des barrières anti-tempêtes. La fondation de ces ouvrages doit être conçue pour résister aux charges transmises par le corps du barrage et doit posséder l'étanchéité requise afin d'éviter des écoulements via la fondation.

La géologie de la région environnante et du site est cruciale dans l'évaluation de l'adéquation du barrage ou de la barrière avec le site donné (c-à-d l'emplacement de l'ouvrage). Les caractéristiques de la fondation peuvent avoir un impact significatif sur la disposition du site, sur la conception de la structure et sur la séquence de construction.

Le choix du type de fondation le plus approprié est largement basé sur la géologie du site, les informations géologiques et géotechniques disponibles ainsi que sur les exigences de performance de la fondation. Le type de structure doit également être considéré. Le choix définitif du type de fondation affecte le coût total du projet. Des sondages de la fondation et des relevés sur le terrain sont nécessaires pour estimer si une structure, sûre et économique, peut être construite sur le site considéré (Fig. 5.9). Un environnement sismique et un site sensible à un tassement différentiel affecteront particulièrement la conception de la fondation. Par conséquent, l'étude de la fondation est un des problèmes les plus importants de l'étape de conception d'un barrage mobile - barrière.

Les études réalisées afin de collecter de telles informations sont effectuées sur terrain et en laboratoire. Les analyses et le travail de référencement sont effectués au bureau.

L'environnement sismique du site affecte particulièrement la conception de la fondation. Durant les étapes de faisabilité, les concepteurs doivent entreprendre une estimation du risque sismique et être attentif au fait que certains sites ne sont pas adaptés pour des barrières, barrages, déversoirs....

Par exemple, le barrage de Shih-Kang (Taiwan) fut conçu avec 2 prises d'eau et 18 pertuis (évacu-

ateurs de crue) équipés de vannes. En septembre 1999, le barrage en béton fut sévèrement endommagé durant un tremblement de terre de magnitude 7,3 et le réservoir s'est vidé via les deux pertuis détruits (Fig. 5.9). Les dégâts les plus spectaculaires ont eu lieu près de la culée droite et étaient dûs à un mouvement vertical au niveau d'une faille. Durant l'excavation des fondations du barrage, aucune faille n'avait été détectée ou reportée. Dans cet exemple, il faut conclure que des barrages ne peuvent pas être conçus économiquement pour résister aux mouvements d'une faille d'une telle amplitude (Wieland, 2003).

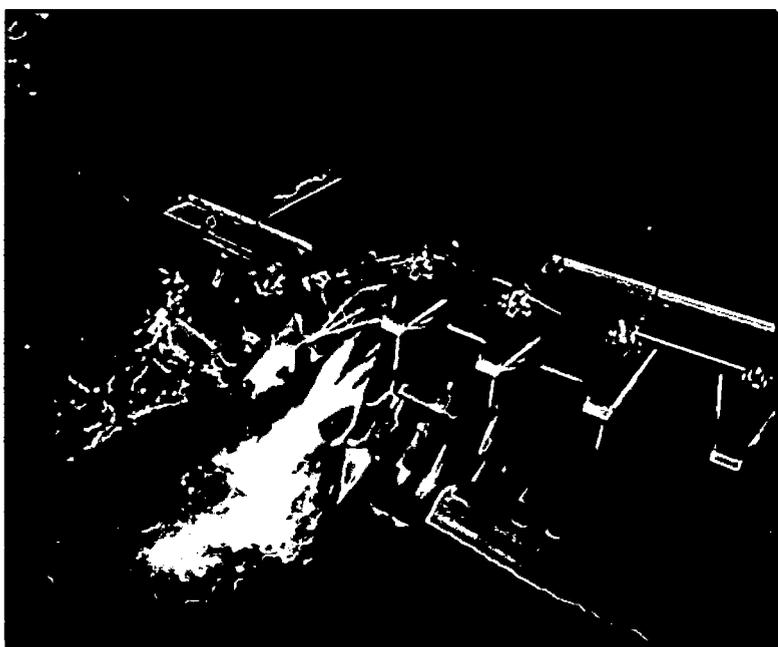


Fig. 5.9(a): Effondrement du barrage de Shih-Kang (Taiwan)



Fig. 5.9(b): Effondrement d'un barrage suite à une rupture de sa fondation

5.3.1 LES EXIGENCES DUES A LA FONDATION

Les exigences induites par la fondation sont largement conditionnées par les objectifs de la structure et doivent être adaptées aux caractéristiques du site. La fondation doit satisfaire, en principe, à deux exigences essentielles :

- Fournir un support stable pour la structure entière,
- Fournir une résistance aux infiltrations, prévenant des fuites d'eau excessives et évitant la dégradation des composants du sol (érosion) en préservant les matériaux fins du délavage sous les radiers, piles et culées de l'ouvrage.

La fondation des barrages mobiles et des barrières peut être réalisée sur des sites ayant une large variété de caractéristiques géologiques et géotechniques.

La capacité d'une fondation à supporter les charges imposées par les diverses structures est essentiellement dépendante de :

- L'étanchéité à l'eau et contrôle des sous-pressions associées ;
- La déformabilité de la fondation (déformations et tassements différentiels doivent être dans les limites admissibles pour l'utilisation des vannes et des autres équipements) ;
- La stabilité de la fondation.

La complexité de ces problèmes varie significativement et dépend du type de sol, de la stratification, de la perméabilité, de l'homogénéité et d'autres propriétés des matériaux de fondation ainsi que de la taille et des exigences physiques de la structure elle-même.

Les fondations rocheuses ont une grande capacité de charge portante, résistent à l'érosion et réduisent la perméabilité. Pour les barrages fondés sur la roche, les règles appliquées sont les règles classiques utilisées pour les barrages en béton, comme par exemple, la consolidation de la roche, les galeries de drainage et les injections.

Certains barrages mobiles et barrières anti-tempêtes sont cependant fondés sur des sols alluviaux ou du sable. Un sol avec une perméabilité élevée permet à l'eau de s'écouler sous le barrage. Des mesures spécifiques doivent donc être prises.

La conception actuelle des fondations ne permet pas de supprimer complètement les fuites; elle peut uniquement les réduire par des méthodes spécifiques. Par conséquent, selon la conception de la structure supérieure et la géologie du site, la périphérie souterraine des barrages/barrières peut inclure les composants suivants : un mur d'étanchéité; radiers horizontaux, filtres et drains, injection de la fondation rocheuse, injection des dépôts alluviaux, et mur emboué d'étanchéité (Fig. 5.10), (Razvan, 1998).

Ceci exige:

- Un radier en béton à l'amont, souvent relié à un mur d'étanchéité, rideau de palplanches ou de pieux en béton, forés ou injectés (Fig. 5.10).
- Un radier en béton à l'aval avec une injection étanche à l'extrémité aval, avec ou sans filtres et drains sous le radier (Fig. 5.11, page suivante).
- Etanchéité aux extrémités amont et/ou aval sous le radier et au-dessus du sol imperméable (s'il y en a un) (Fig. 5.11).

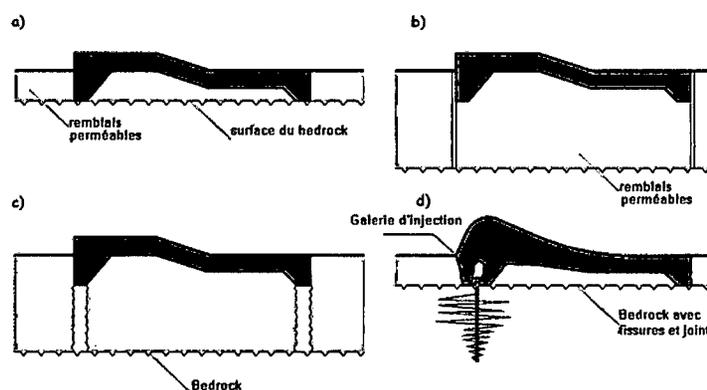


Fig. 5.10: Barrière étanche dans la fondation du barrage.

- a) mur d'étanchéité en béton;
- b) rideau de palplanches;
- c) pieux en béton;
- d) injection

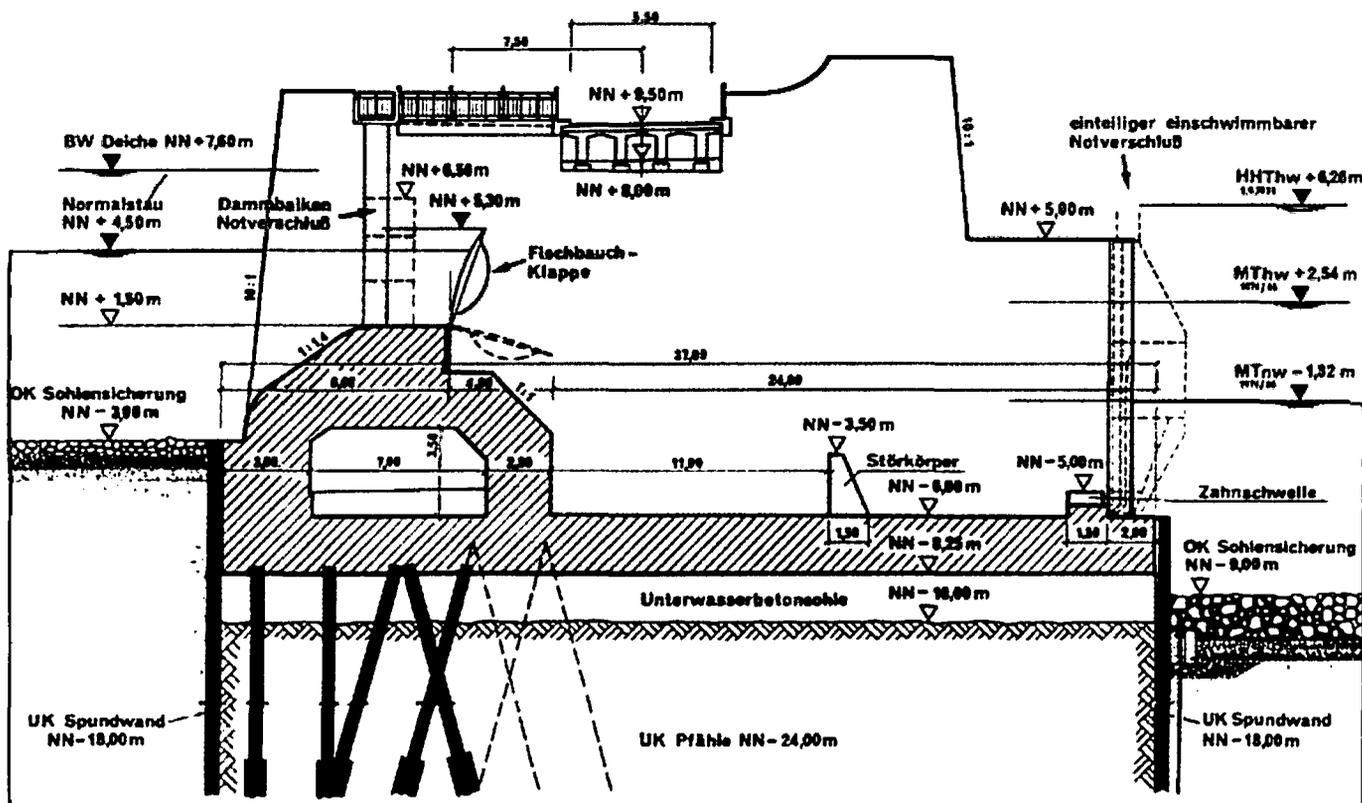


Fig. 5.11: Coupe transversale du barrage mobile de Bremen Weser (Allemagne)

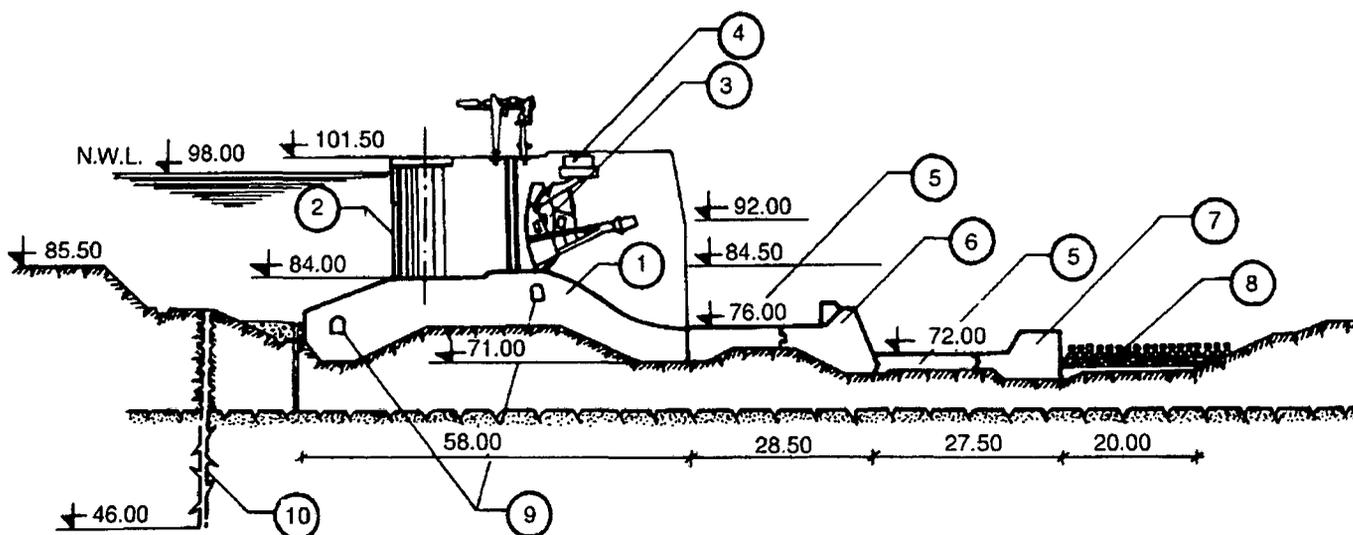


Fig. 5.12: Coupe transversale du barrage mobile d'Ipotesti (Roumanie)

- 1) déversoir; 2) pile;
- 3) vanne segment avec clapet; 4) chambre des machines;
- 5) bassin de dissipation; 6) seuils et redents;
- 7) Mur de chute; 8) Riprap - enrochement;
- 9) galerie de drainage; 10) mur d'étanchéité

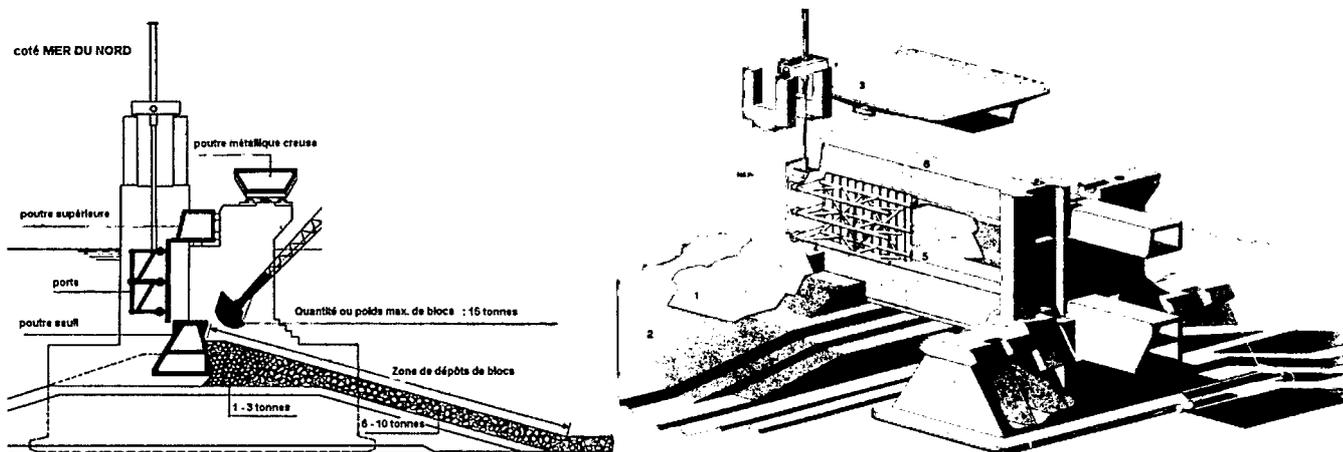


Fig. 5.13: Coupe transversale dans la barrière anti-tempête de l'Escaut Oriental (Pays-Bas)

Un exemple de conception de fondation innovante, développée dans le cas d'une barrière anti-tempête, est la barrière de l'Escaut Oriental (Easter Scheldt) (Fig. 5.13). Etant donné que le sol de l'Escaut Oriental est soumis de façon permanente à des courants de marées et afin de garantir la stabilité de la structure, une fondation et un tapis de blocs furent construits. La draguage des sédiments et leur remplacement par du sable améliora le lit de la mer (Rijkswaterstaat, 1982).

Une des fonctions les plus importantes des tapis de blocs (matelas) de fondation est de garder en place le sable du fond soumis à l'influence continue des actions hydrauliques, statiques et dynamiques causées par la différence de niveau d'eau de chaque côté de la barrière. Les matelas furent réalisés avec des matériaux synthétiques et remplis de sable et de gravier.

On installa également des couches de blocs rocheux (radier) qui servent à protéger le matelas de la fondation et aussi, indirectement, le sol au fond en évitant l'érosion causée par les courants et les vagues. Le radier est donc composé de plusieurs couches de matériaux rocheux de poids variable ; des blocs de basalte pesant entre 6 à 10 t forment la couche supérieure.

Un poids si important était nécessaire car le radier doit résister aux forts courants qui peuvent surgir dans le cas peu probable où une des portes ne peut être fermée.

5.3.2 LES COMPOSANTS FIXES DU BARRAGE

Un barrage mobile ou une barrière sont composés de plusieurs sous-structures qui, ensemble, forment un ouvrage créant une retenue (réservoir). Le choix des composants et de leurs dimensions est dicté par les conditions d'écoulement du site, les considérations géotechniques, les exigences opérationnelles et d'entretien, le type de vannes, les considérations constructives et les requêtes de l'utilisateur.

Les éléments structurels principaux qui composent la partie fixe d'un barrage mobile ou d'une barrière sont (Figure 2.1, Section 2.2.2):

- Les piles et les culées,
- Le seuil du barrage,
- Le bassin de dissipation.

Les formes de ces composants structurels dépendent de leurs fonctions mais aussi de leur utilisation.

Les piles et les culées sont, respectivement, utilisées pour diviser la zone d'écoulement du barrage de la rivière et pour servir de support aux éléments mobiles qui ferment les passes ainsi constituées, et, pour les culées, pour servir de connection avec les rives.

Les fonctions principales des piles sont de supporter les vannes, les batardeaux, les mécanismes de manoeuvre de la vanne, la plate-forme d'opération, le pont de service ou un pont-route et de transférer la pression de l'eau à la fondation.

Leur épaisseur dépend des exigences structurelles et est généralement liée au type de vannes mais aussi à la largeur de la passe et au type des joints de dilatation.

Les piles peuvent contenir des rainures pour les batardeaux et la vanne (levante) ou des décrochements et des plaques de guidage en acier pour les vannes segments scellées dans le béton de seconde phase. Les rainures sont un facteur dérangent pour l'écoulement qui peut affecter les opérations de fermeture/ouverture et l'équipement hydromécanique. Par conséquent, les dimensions des rainures devront être minimales. Dans le cas des vannes segments et des clapets, l'absence de telles rainures peut être considérée comme un avantage.

La longueur de la pile dépend du type de vanne choisi : pour les vannes levantes, cette longueur est minimale; pour les vannes segments, la longueur de la pile est déterminée par la position des articulations.

Dans le cas des vannes levantes, les piles ont besoin d'être suffisamment larges et longues pour contenir des rainures suffisantes pour loger les organes de roulement des vannes, les équipements de manoeuvre des vannes, les portiques et autres rainures pour batardeaux, voir systèmes de secours.

La forme et la configuration d'une pile affectent la performance hydraulique et le coefficient de débit des barrages mobiles. La section transversale doit être choisie entre un profil hydrodynamique, offrant une résistance minimum à l'écoulement et une forme rectangulaire, la plus simple et la plus économique. En pratique, la conception la plus courante et souvent la plus satisfaisante est une forme semi-circulaire du nez de la pile. L'extrémité aval de la pile peut être plate.

Le seuil du barrage et les redents amont et aval réalisent l'ancrage de la face inférieure du barrage avec la fondation. Les fonctions principales du seuil d'un barrage sont : être une fondation pour la structure, supporter les vannes principales, permettre la dissipation d'énergie et éviter les fuites. Le seuil est une structure massive avec une élévation proche de l'élévation du lit de la rivière.

Plus la charge sur la crête du seuil du barrage est faible, plus le débit est faible. Ceci induit une longueur déversante plus longue mais réduit les exigences vis-à-vis du bassin de dissipation et de la protection aval. Inversement, plus la charge sur la crête est élevée, plus le débit est élevé. Ceci se vérifie pour une longueur déversante plus courte mais des exigences plus sévères pour le bassin de dissipation et la protection de l'arrière radier aval.

Afin de fournir un espace suffisant pour le fonctionnement de l'équipement hydromécanique, un seuil épais est souvent préféré. De plus, les exigences structurelles imposent que la largeur du seuil soit approximativement la même que la hauteur de la vanne du barrage (U.S. Army Corps of Engineers, 1987 and 1995).

Pour les structures qui ne fonctionnent pas dans des conditions d'écoulement noyé, un seuil «Ogee» ou «Craeger» est souvent utilisé pour améliorer l'efficacité du déversoir (et éviter d'éventuelles dépressions à grande vitesse).

Sur la crête du seuil au pied de la vanne et au pied des batardeaux, les éléments métalliques de contact/support sont scellés dans le béton de seconde phase. Leur fonction est d'assurer un contact étroit avec les étanchéités de la vanne.

Le bassin de dissipation: Derrière le seuil, un radier en béton horizontal est conçu, parfois en décrochement par rapport au niveau aval du lit de la rivière, sur une hauteur plus faible, afin d'augmenter la longueur du chemin de percolation, de réduire le risque de soulèvement aval du barrage et de fournir un bassin où l'énergie de l'eau peut être dissipée en toute sécurité. La dissipation d'énergie sur le radier en béton permet d'éviter une érosion dangereuse au pied du barrage.

En cas de fondation très perméable, des becs (ou redents), amont et aval, doivent être réalisés en liaison avec les rideaux d'étanchéité ainsi que plus en aval des enrochements (riprap) ou des gabions ou encore une combinaison des deux. Ceci sert de mesure de sécurité contre les effets d'affouillement rétrograde (phénomène de renard) et d'érosion locale.

Les dimensions d'un bassin de dissipation et d'autres systèmes de dissipation d'énergie sont détaillés dans les ouvrages suivants : Novak et al. (1997) et U.S. Army Corps of Engineers (1987 and 1995).

Des éléments structuraux supplémentaires, dans le cas des barrages mobiles, sont les galeries drainantes. Elles sont conçues pour contrôler, en amont et en aval du barrage, les écoulements de fuite. Des variations de ces débits durant la vie de l'ouvrage sont souvent le témoignage de problèmes hydrauliques ou structuraux.

5.3.3 CONFIGURATION STRUCTURELLE DE LA PARTIE FIXE DES BARRAGES

Les structures en béton des barrages et des barrières peuvent être conçues comme une structure monolithique. Cependant, la structure d'un barrage ne peut être construite comme un monolithe unique (bien que cette approche se développe dans les écluses) mais plutôt comme un ensemble de monolithes liés entre eux d'une certaine façon. Ces liens sont réalisés par des joints qui permettent à l'ensemble des monolithes de se comporter comme une structure unique.

Les sources de discontinuités, dans une grande structure en béton, sont les modes de construction et la flexibilité de la structure. L'approche classique du « coulé sur site » vis-à-vis d'une préfabrication est discutée à la Section 7 « Préfabrication ».

La configuration structurelle dépend des caractéristiques de la fondation: (Fig. 5.14). On a ainsi :

- a) La fondation généralisée sans joint de dilatation ;
 - b) Des piles indépendantes avec des joints entre les piles et les radiers ;
 - c) Une série de structures indépendantes (une par passe) ;
 - d) Une configuration mixte des 2 précédentes (b et c).
- a) Les avantages principaux sont : la construction de la structure en une étape, les travaux de bétonnage sont réalisés en une phase; des conditions de fondation homogènes sont requises.
- b) Les piles indépendantes sont séparées des radiers du barrage par des joints de dilatation. Les

avantages principaux sont : cela permet l'exécution des travaux en plusieurs phases ; cela permet une flexibilité dans le planning d'excavation et des travaux de bétonnage ; cela exige plus d'armatures même si les moments de flexion sont minimum. L'inconvénient principal est la sensibilité de la manoeuvre des vannes aux tassements différentiels des piles et des radiers.

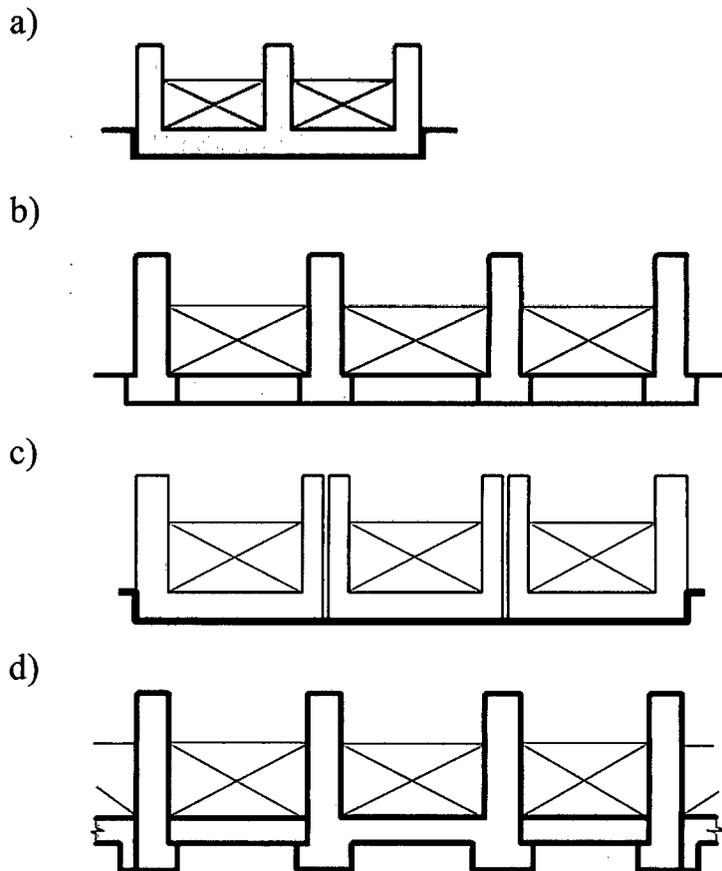


Fig. 5.14: Types classiques de fondation

- c) Un joint de dilatation divise chaque pile dans le sens de la longueur. Le système convient aux fondations compressibles et/ou avec des caractéristiques différentes le long de l'axe du barrage. Les avantages principaux sont: fiabilité pour la manoeuvre de la vanne car un tassement différentiel entre deux éléments jointifs n'est pas problématique; cela permet un planning flexible de l'exécution des travaux. Les désavantages principaux sont : la quantité d'armatures doit être augmentée à cause des moments de flexion importants; la réduction de la largeur effective de chaque pertuis à cause de l'augmentation de l'épaisseur totale des piles.

Les formes des joints de dilatation doivent être compatibles avec le fonctionnement des vannes et avec le tassement différentiel.

- d) La configuration mixte combine les avantages des systèmes *b)* et *c)*.

La construction d'un barrage mobile ou d'une barrière anti-tempête requiert normalement un site de construction sec. Comme ces structures sont souvent situées en travers ou proches des rivières, des batardeaux de construction sont nécessaires afin d'assécher le site et de le protéger d'une façon raisonnable contre les inondations. Le batardeau utilisé peut réduire la section transversale de la rivière. Souvent, plusieurs alternatives de dérivation provisoire sont étudiées pour trouver la solution la plus économique et réalisable. Des méthodes de construction alternatives, basées sur la préfabrication, peuvent être appliquées lorsqu'un assèchement n'est pas possible (voir Section 7 et le «Project Review» E10 sur le CD-Rom)

5.3.4 TREMBLEMENT DE TERRE ET TSUNAMI

Les impacts d'un tremblement de terre sur la structure sont dus aux mouvements sismiques, aux déplacements des failles, à la liquéfaction du sol, au niveau d'eau et au courant (causé par un tsunami).

Les mouvements sismiques doivent être adéquatement calculés pour chaque état limite. La performance sismique d'une structure est souvent décrite par une matrice de performance. Le barrage et la barrière doivent rester utilisables durant et après un tremblement de terre (mouvements sismiques, déplacements de failles, rupture du sol, tassement). Lors de l'étape de conception d'une structure aussi longue et large, la variation spatiale des effets sismiques doit être considérée.

Un sous sol «mou» saturé de sable tend à se liquéfier pendant un tremblement de terre, causant ainsi des dégâts à la structure. Lorsqu'une conception est réalisée dans une région sismique, l'effet de la liquéfaction doit être considéré (Voir PIANC, Directive de MARCOM-GT34, 2000).

5.4 CONTROLE, FONCTIONNEMENT ET MAINTENANCE

5.4.1 INTRODUCTION

Cette section présente les systèmes de contrôle utilisés pour les barrages mobiles et les barrières anti-tempêtes. Cette étude permet de mettre en évidence les avantages et les inconvénients des divers systèmes utilisés et doit aider au choix du système de contrôle adéquat pour un nouvel ouvrage.

En plus des fonctions de contrôle des systèmes mécaniques, électriques et informatiques, l'étude prend en compte les contrôles imposés sur le fonctionnement par le maître de l'ouvrage, à savoir l'Environment Agency en Angleterre et VNF en France (voir leurs sites web dans la Section 10.1).

L'étude considère également les aspects opérationnels en incluant les aspects humains des systèmes adoptés et les méthodes permettant d'isoler une vanne en vue de sa maintenance.

5.4.2 ENQUETE

Un questionnaire détaillé, avec une notice explicative, a été envoyé à chaque membre du Groupe de Travail (GT). Cette notice et le questionnaire sont disponibles sur le CD-Répertoire /Annex Section 5.4 /. Celui-ci a été suivi par d'autres interrogations suscitées par les réponses initiales soit spécifiques à une structure soit d'une portée plus générale. Les résultats de l'enquête et l'expérience propre de l'auteur ont été utilisés pour rédiger cette section.

5.4.3 BARRAGES MOBILES ET BARRIERES

5.4.3.1 Barrages mobiles de régulation

Ces structures sont conçues pour maintenir un niveau d'eau d'un bief (en général le niveau amont) dans une plage donnée. La plupart des barrages de régulation doivent cependant aussi prendre en compte la protection contre les inondations. De ce fait, ils sont capables de se lever complètement (ou de se coucher) pour libérer complètement le débouché et ne pas induire d'inondation.

Les barrages de régulation génèrent des ondes dans les biefs lors de leur manœuvre de fermeture/ouverture. Mais grâce à des systèmes d'asservissement calibrés via une modélisation physique-numérique, ces effets peuvent être minimisés.

Des présentations de ce type de structures sont disponibles sur le CD-Rom (Répertoire A1).

5.4.3.2 Barrière anti-tempête et de protection contre les inondations

Ces structures sont dédiées à la protection contre les inondations plutôt qu'au contrôle du niveau d'eau. Cela signifie qu'elles sont soit complètement ouvertes, soit complètement fermées alors que les barrages de contrôle peuvent adopter n'importe quelle position intermédiaire entre la position ouverte et la position fermée.

Pour la défense contre les inondations, des vannes pivotantes (swing gates) ont été conçues afin de fermer une rivière contre les intrusions de la marée. Ce type de vannes peut uniquement être mis en place pour de faibles écoulements et/ou pour une charge différentielle minimale (Voir «Project Review»: vannes de Bayou, Louisiane). Ces 2 exemples sont en contraste direct avec les ouvrages de protection contre les inondations aux Pays-Bas (Plan Delta) et en Belgique (Blanc Pain) qui fonctionnent entièrement automatiquement et sont simplement contrôlées d'un poste éloigné.

A nouveau, on retrouve des descriptifs de toutes ces structures sur le CD.

5.4.4 MAINTENANCE ET FIABILITE

A) Bien que la maintenance soit couverte en détail dans une autre partie de ce rapport, il y a certains aspects qui peuvent être mentionnés ici. Lors de la conception d'une structure, il est important de reconnaître que la fiabilité et la facilité de maintenance coûtent de l'argent mais peuvent aussi en économiser à long terme. Un entrepreneur peut chercher à emporter une affaire en offrant un coût d'investissement faible mais en laissant au maître d'ouvrage des coûts de fonctionnement élevés. Il est important lors de l'étape de conception de connaître ces facteurs et leurs coûts. Voir aussi "Maintenance et Rénovation des Infrastructures de Navigation" (PIANC-GT25, 2005).

Dans un but opérationnel, il est souhaitable que les éléments nécessitant un entretien puissent être facilement accessibles et cela sans de coûteuses procédures d'assèchement. Deux exemples, la barrière de la Tamise protégeant Londres et la barrière de Maeslant défendant Rotterdam, furent construites en réponse aux inondations dévastatrices de 1953. Bien que des études complètes soient disponibles sur le CD du GT, il est bon de noter que ces deux structures peuvent être entretenues à sec sans l'utilisation de batardeaux ou sans assèchement. Pour la barrière de la Tamise, les mécanismes de manœuvre sont installés dans les piles (creuses) et les vannes peuvent pivoter de 90 ° pour permettre, hors de l'eau, leur inspection et entretien. A Maeslant, les vannes segments sont logées dans des logements, au sec, situés sur les berges de la rivière. Ceux-ci sont inondés afin de mettre les vannes en flottaison et de les faire pivoter pour fermer la rivière. Les mécanismes de manœuvre (engrenage sur crémaillère) sont situés à la partie supérieure des vannes.

La procédure pour la maintenance de la vanne du barrage de Tees est décrite de manière plus complète à la section 5.5 "Dispositifs de fermeture temporaire". Pour accéder aux vannes-portes et aux joints, cela exige la location d'une lourde grue de levage pour déplacer les batardeaux.

Au barrage de Lagan, les vannes sont soulevées plutôt que d'être mises en place par flottaison. Elles sont plus larges que les passes et utilisent le nez des piles pour protéger les vannes et les vérins hydrauliques. Les vannes sont mises en place par une puissante grue flottante et à cause de cette difficulté, elles sont conçues pour une période entre deux maintenances plus longue que la normale, 10 années au lieu d'une année. Cet objectif est partiellement atteint en choisissant un joint plus robuste à l'interface vanne/pile et comme l'exclusion saline totale n'est pas nécessaire, la vanne est placée avec une faible «précompression» afin de réduire l'usure. La précompression se rapporte à la manière dont est ajusté le joint en caoutchouc entre la vanne et la pile. Il y a un joint pour empêcher la fuite d'eau au travers du jeu. Il est attaché à la vanne et sa position peut être ajustée en fonction de l'usure. Plus le joint pousse hermétiquement contre la pile,

meilleure est l'étanchéité, mais également plus le frottement est grand et plus le joint s'usera vite. La vanne présente un certain jeu lui permettant ainsi de se déplacer sur ses charnières ou de se dilater avec les variations de températures. La précompression consiste à ajuster le joint. Ainsi il est sous compression avec une vanne en position neutre. Ensuite, si un joint bouge d'une ou l'autre manière, un des joints se comprime d'avantage et l'autre se relâche mais, puisqu'il est précomprimé, il assurera toujours l'étanchéité. A Lagan, l'étanchéité n'est pas critique et l'accès est difficile pour la maintenance. Aussi, les joints sont placés avec moins de compression pour réduire l'usure. Au Barrage de Tees, le bief amont est utilisé pour les loisirs et l'aval est assez pollué. Il est donc important d'avoir une bonne étanchéité et donc un bon arrangement des joints. En effet, ceux-ci empêchent l'eau polluée d'entrer lorsque la marée est élevée et dépasse le niveau du bief amont, environ huit fois par mois.

B) La législation régissant un ouvrage peut influencer son fonctionnement. Si une certaine fiabilité est préconisée avec, par exemple, une seule défaillance tous les 1000 ans, alors l'équipement et le fonctionnement refléteront cela via une redondance multiple et des composants de haute qualité. Une valeur plus basse pourrait être atteinte avec une solution plus simple et meilleure marché.

Voici un exemple, pour des vannes levantes, du compromis entre la fiabilité et les conséquences d'une rupture. La question est de savoir s'il vaut mieux les verrouiller en position levée ou plutôt de les soutenir par des vérins pressurisés. En effet, lorsque l'on aura besoin de la vanne, le verrouillage sera-t-il libéré et aura-t-on la puissance requise pour libérer les verrous ? Par contre, si ce sont des vérins qui soutiennent la vanne en suspension, elle pourra toujours être fermée par gravité, même si la commande électrique ne fonctionnait pas à l'aide d'un système de décharge manuelle. Mais quel est le risque - et la conséquence - d'une vanne chutant par distraction sur un navire ? Ou chutant, coupant la navigation et créant une surélévation inadmissible du niveau amont ? Et enfin, n'a-t-on pas besoin d'un verrou pour soutenir la vanne en position haute pour effectuer l'entretien des vérins ?

Les questions au sujet de la sécurité, de la fiabilité et des risques sont traitées plus en détail dans la Section 5.6.

5.4.5 LA GESTION DU PERSONNEL

A) Faire fonctionner une structure, 24 heures par jour, 7 jours par semaine a des implications sérieuses sur le coût. Le mode de distribution de travail varie fortement. Les systèmes le plus courants sont les « 3 pauses » : 6 h à 14 h, 14 h à 22 h et 22 h à 6 h ou les « 2 pauses » : 6 (ou 7) h à 18 (ou 19) h et ensuite un autre intervalle de nuit égal à 12 h. Ce dernier modèle est efficace lorsque les membres du personnel sont susceptibles de travailler sur diverses tâches loin du site et cela évite ainsi l'arrêt lors d'un changement au milieu de la journée. Depuis l'introduction des directives sur les heures de travail, il est de plus en plus important de considérer les aspects sociaux liés au pilotage en continu. Les pays hors de l'Union Européenne auront leur propre législation d'emploi mais la majorité des termes et des conditions socialement acceptables s'appliqueront toujours. Il peut être raisonnable d'avoir une personne travaillant seule mais une estimation complète des risques doit être réalisée et approuvée pour tous les instants.

B) Des mesures en cas d'absence doivent être mises en place. Il peut y avoir des employés de jour aptes à s'occuper de l'entretien et qui peuvent également couvrir les fonctions des autres opérateurs de la pause en cas de maladie ou de vacances. Si une exploitation en toute sécurité peut être réalisée sur une base purement automatique et que les risques de vandalisme sont faibles, alors l'investissement dans un équipement adéquat - frais d'achat et de maintenance - peut se justifier vis-à-vis du coût de la main-d'œuvre épargné. Une décision doit aussi être prise au sujet de la compétence du personnel employé, effectue-t-il l'entretien ou sera-t-il soustrait ? Un personnel mieux qualifié coûte plus cher mais peut néanmoins rester économique.

C) Les frais généraux, les congés payés, les congés maladies et les pensions ne sont pas négligeables, bien qu'il puisse y avoir des économies d'échelle pour les plus grandes organisations. Des espaces de vie sont nécessaires, même sur les sites commandés à distance. Ceux-ci sont assez coûteux surtout sur les sites où travaille le personnel de commande. Toilettes, cuisine, salles de repos, espace de vie et stationnement pour les voitures ainsi que le chauffage et l'éclairage supplémentaires s'ajouteront aux coûts d'investissement et aux salaires.

D) Un réseau de Télévisions en Circuit Fermé (TVCF) est requis dans un but de sécurité mais aussi de contrôle des manœuvres. Les images sont transmises à un autre endroit si le site n'est pas piloté en local.

E) Un investissement dans l'automatisation peut être économique en réduisant le personnel, bien que l'entretien d'un système plus sophistiqué puisse avoir des implications plus coûteuses.

5.4.6 RESULTATS DU QUESTIONNAIRE

Les questionnaires complétés sont disponibles sur le CD-Rom (Répertoire /Annex Section 5.4/)

5.4.7 ANALYSE

Il est préférable, car plus précis, d'utiliser des PLCs (Programmable Logic Controllers) pour contrôler le système plutôt que des PC (Personal Computers) qui sont plus familiers dans les bureaux, mais «l'ordinateur» sera in fine utilisé quelque soit la solution retenue.

A) Selon la criticité de la structure, les systèmes informatiques peuvent être dupliqués. Ils sont équipés de batteries de secours et il y a des générateurs de secours ou une source d'énergie alternative pour la commande des vannes. La conformité aux normes nationales et internationales, telles que la norme britannique BS.61508 «Functional Safety of Electrical, Electronic and Programmable Electronic Safety-Related Systems» est essentielle. Les autres pays possèdent leurs propres normes et guides d'utilisation (voir Section 8). La durée de vie prévue pour la plupart des ordinateurs et des appareillages électriques est de 10 à 15 ans et la structure elle-même peut avoir une vie de conception de 75-120 ans. Une analyse globale du coût doit donc prévoir que ces équipements seront remplacés plusieurs fois.

B) Lorsqu'il y a le choix entre une option «manuelle» ou «automatique», il est habituel que les opérations manuelles soient réalisées sous forme d'entrées dans un ordinateur et que les sorties soient fournies au travers d'une procédure sécurisée programmée dans le système. En mode automatique, les données requises sont transcrites dans l'ordinateur par l'intermédiaire d'un IHM (Interface

Homme-Machine) ou - plus simplement - d'un bureau et d'un clavier. Voir également le SCADA (Supervisory, Control and Data Acquisition) ci-dessous. L'ordinateur identifie l'action exigée et effectue la commande selon le programme implémenté.

C) Le «hard wired», interrupteur, ou bouton-poussoir relié par des câbles électriques directement au dispositif de manoeuvre, se trouve uniquement sur le devant du démarreur du moteur, sur un panneau électrique ou une station de commande locale. Les câbles de courte distance servant à induire de simples sauts de tension (volt) peuvent être des câbles de 0,5 à 0,75 mm² mais pour des raisons mécaniques, une section de 1,0 à 1,5 mm² est courante. Les câbles souples sont préférables aux câbles pleins car ils sont plus flexibles, ce qui les rend moins aptes à se rompre à cause des vibrations.

D) Les actions de contrôle sont généralement classifiées en quatre types : Par Pas, Proportionnel, Intégral et Dérivatif.

- Le mode «Par Pas (Step)» est le plus simple, souvent aussi fondamental que "Marche/Arrêt" pour un thermostat ou ouverte/fermée pour une vanne, mais s'applique également là où l'action corrective, telle que le mouvement de la vanne, est de la même quantité à chaque pas (step).
- Le contrôle Proportionnel se fait là où le mouvement n'est pas fixe mais varie proportionnellement avec l'erreur. Ainsi, plus la différence entre la mesure, par exemple un niveau d'eau, et la valeur désirée au point de repère est grande, plus l'action corrective est grande.
- Le contrôle Proportionnel peut être employé en même temps que le contrôle Intégral lorsque l'erreur persiste plus longtemps et/ou plus la correction appliquée doit être grande.
- Le contrôle Dérivatif peut également être considéré là où le taux de variation de l'erreur doit affecter l'action corrective. Ceci peut être utile pour devancer une inondation créée par une crue. Pour chaque mesure, le taux de changement peut également être calculé par un ordinateur et être employé pour avertir les opérateurs de l'événement afin de leur permettre d'opter pour une action appropriée.

E) Des systèmes plus sophistiqués sont assez courants dans l'industrie chimique et dans les procédés industriels mais, en général, le contrôle «Par Pas (step)» est amplement suffisant pour le type de structures considéré ici.

Vu la nature de l'application, les mouvements de la vanne sont assez grossiers, souvent mesurés en dizaines de centimètres plutôt qu'en fraction de millimètre. De même, les constantes de temps sont grandes à cause de la nature lente du paramètre contrôlé qui est habituellement le niveau d'eau d'une retenue assez importante.

F) Une vanne peut induire, par de son déplacement, une onde dans les biefs mais, avec un bon contrôle basé sur une modélisation mathématique, ces effets peuvent être minimisés. Le pas (step) du mouvement, sa fréquence, et la vitesse à laquelle la vanne bouge sont tous des facteurs à prendre en considération. Lorsqu'une vanne est utilisée contre les inondations (elle est donc soit ouverte, soit fermée) alors le pas correspond à la course maximale.

L'introduction de temporisateurs d'arrêt/de marche ou de variateurs de vitesse pour ralentir l'action (comme l'accroissement de l'amplitude du mouvement) peut conduire à assouplir le mouvement. A nouveau, la modélisation doit pouvoir identifier ces situations et fournir des solutions.

G) De nos jours, le fonctionnement de la vanne est généralement assuré par des vérins hydrauliques malgré certains exemples de vannes levantes qui sont contrôlées électriquement (par exemple la barrière à Hull en Angleterre et les barrières de protection contre les inondations à Rotterdam aux Pays-Bas). D'autres exemples sont les portes busquées et de vannes secteurs avec des commandes électriques à Goole, UK (Voir «Project Review»), utilisées pour éviter la vidange du canal en cas de rupture des berges ou des portes d'écluse de la marina de Hull, UK. On y utilise des engrenages et des treuils pour déplacer les vannes. Des vérins hydrauliques sont fiables et simples à contrôler et peuvent facilement fournir les efforts importants requis pour déplacer les vannes. Pour assurer une progression douce de la course avec une commande électrique, cela exige un contrôle de vitesse

sophistiqué «mise en marche douce/arrêt doux», associé à des problèmes de courant de départ élevé et d'harmoniques au niveau de l'alimentation. On a également rapporté des cas de défaillance dans les roulements de moteurs électriques dûs aux courants de circulation induits par les commandes à vitesse variable (voir le www.abb.com/motors&drives, Bearing Currents and Electrical Discharge Machining - EDM).

H) Il est évident que la mesure directe de la position du bord (lèvre) de la vanne n'a pas de sens. Elle est toujours dérivée d'autres mesures (souvent de l'allongement de la tige du vérin – course du vérin). Ceci est facilement réalisé en usine au niveau de la fabrication du système où la tige du vérin est «crantée» sur sa longueur avec un enduit en céramique fournissant une finition lisse. Un compteur lit le nombre de points (crans) passant au niveau du capteur pendant que le vérin se déplace et ces « impulsions » sont traduites à distance par l'ordinateur. L'ordinateur utilise alors une table de conversion pour transformer la distance c.-à-d. la course du piston en valeur de l'élévation du bord libre de la vanne. Pour garantir la fiabilité, deux ou trois compteurs peuvent être installés et les lectures comparées, produisant une alarme si une anomalie a lieu. Des erreurs cumulées peuvent se produire avec le temps si les impulsions sont mal comptées pour n'importe quelle raison ou à cause de la dérive d'un capteur. Ce type d'erreur peut être évité en rétractant périodiquement entièrement le piston pour remettre le compteur à zéro.

I) Là où d'autres systèmes de manoeuvre sont installés, d'autres types de capteurs de position tels que des potentiomètres, des LVDT (Linear Variable Displacement Transformers) et des comptes tours peuvent être utilisés pour fournir une lecture de la position de la vanne.

J) En complément d'un dispositif repérant la course zéro (afin de remettre à zéro les appareils de mesure de position), un dispositif semblable peut être employé pour repérer les fins de courses, soit entièrement levée ou entièrement abaissée. Les solutions de rechange sont des commutateurs de pression qui déclenchent le système lorsque l'on atteint la fin de course et que la pression augmente.

Cependant, ils peuvent donner de fausses lectures à cause de l'élévation de pression, des forces de frottement ou des obstructions physiques au mouvement de la vanne. Les capteurs fins de courses ou les relais sont souvent doublés, un jeu est utilisé pour la commande réelle et l'autre pour les entrées dans le SCADA.

K) Un exemple (Barrage de Tee) est présenté (Fig. 5.15, page suivante), pour lequel le signal analogique d'un capteur de position ou de niveau est transféré à un système SCADA. Grâce à des «Isolating Amplifiers», tout défaut dans les mesures ou le câblage in situ n'affectera pas le réseau des ordinateurs et vice versa. D'autres exemples sont disponibles sur le CD-Rom, Répertoire /Annex Section 5.3/.

L) Mesure du niveau d'eau

Quelque soit la fonction de la structure, il est presque toujours nécessaire de connaître le niveau d'eau de chaque côté de l'ouvrage. Il existe plusieurs types de capteurs et tous ont leurs propres forces et faiblesses.

- Dispositifs en contact avec l'eau:
 - Capteur de pression,
 - Flotteur avec un encodeur,
 - Capteur de capacité.
- Dispositifs sans contact avec l'eau:
 - Ultrasonique,
 - Radar,
 - Tubes à bulles.

La différence de base entre les dispositifs avec contact et sans contact est que le capteur peut être immergé ou non dans l'eau. Les dispositifs «sans contact» sont plus facilement accessibles mais plus compliqués et nécessitent une maintenance complexe. Ils sont également plus vulnérables aux dégâts ou au vandalisme. Les dispositifs «avec contact», tels que des sondes de pression ou de capacité, peuvent être mieux cachés mais tout aussi complexes que les types sans contact et donc également exiger une maintenance fort complexe. Les flotteurs, avec des encodeurs et des enregistreurs de diagramme sont très simples à utiliser et à entretenir mais ont besoin de puits de tranquillisation. Les enregistrements peuvent se faire à distance pour sécuriser l'équipement et les données. Pour une écluse, un déversoir ou un barrage mobile, le travail structurel supplémentaire d'installation de ces capteurs est insignifiant.

Les capteurs de pression peuvent avoir un cristal piezo dans la tête de captage qui produit une tension proportionnelle à la pression – charge d'eau – agissant sur le dispositif. Cette tension est transmise par télémétrie au système d'enregistrement, pour être traitée.

D'autres types de capteurs de pression emploient des compresseurs ou des cartouches de gaz et travaillent sur le principe de la «bulle». C'est le cas de bulles d'air/gaz contenues dans un tube placé sur le lit de la rivière et où la pression mesurée correspond à la charge statique. Ceux-ci peuvent être perturbés par la vase ou par les turbulences.

Les dispositifs ultrasoniques transmettent un faisceau sur la surface de l'eau et détectent le faisceau réfléchi à son retour. En mesurant le temps pris par le faisceau pour revenir et, connaissant la vitesse du faisceau, on peut calculer la distance et donc le niveau d'eau. Un tube ou un puits d'eau calme contient habituellement le faisceau et sert également de plateforme de support à l'instrument. Une plaque munie d'un petit trou (d'un diamètre de 80 mm) est placée au fond du tube afin d'amortir les fluctuations du niveau d'eau induites par les vagues,.... Ceci améliore l'exactitude et aide également à empêcher l'entrée des débris.

Les systèmes radars fonctionnent sur le même principe mais à des fréquences différentes. Ils sont plus fiables que les ultrasons et deviennent de plus en plus populaires.

Il est courant d'avoir plusieurs capteurs permettant à l'ordinateur d'établir une lecture basée sur la moyenne de 2, ou au mieux de 2 sur 3. Ce choix dépend de la précision de lecture requise pour le fonctionnement. Avoir le même système des deux côtés de la vanne, avec plusieurs capteurs identiques, peut causer un problème. Si, pour une certaine raison, les capteurs développent une erreur commune, alors toutes les lectures seront perdues. Un tel scénario est plus souvent rencontré dans des applications extrêmement sensibles telles que les installations nucléaires ou les travaux chimiques. Pour améliorer la fiabilité, il est souhaitable d'utiliser des capteurs de différents fournisseurs ou d'utiliser une combinaison de dispositifs différents, par exemple ultrason et pression.

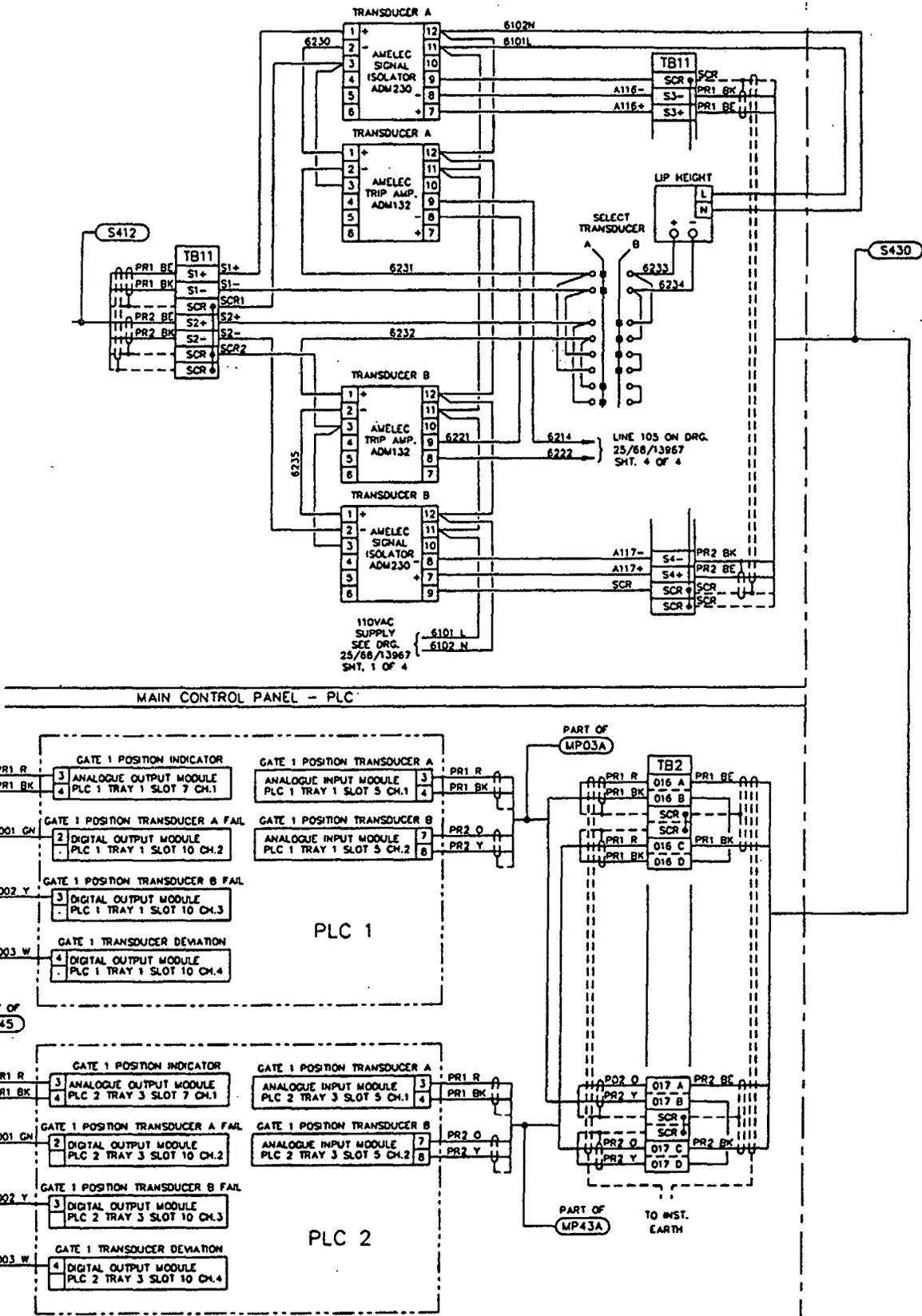


Fig. 5.15: Système SCADA (le graphique complet est disponible sur le CD - Répertoire /Annex Section 5.3/)

Il est recommandé qu'un dispositif de vérification dans les cas extrêmes soit toujours prévu. Au barrage de Tees, dans le nord de l'Angleterre, c'était un simple panneau de mesure, visible depuis la salle de commande, permettant aux opérateurs de maintenir un certain contrôle visuel même si toute instrumentation échouait !

M) L'écoulement par dessus une vanne est fonction de la charge et du coefficient de débit. Ce dernier est difficile à déterminer avec précision et des approximations sont souvent requises (courbe hauteur débit). Dans la plupart des cas, c'est la répétitivité plutôt que l'exactitude absolue qui est importante. Il n'y a pas beaucoup d'exemples d'utilisation de l'écoulement (débit ou vitesse) comme mesure de contrôle, le niveau est beaucoup plus approprié et une courbe précise est plus facilement obtenue.

N) Le débit en rivière est déterminé par un calibrage in situ. Une section transversale est balayée par un capteur de vitesse et une formule approximative du débit est dérivée pour différents niveaux de la surface libre. Il peut être utile pour prévoir le cas des crues (niveau exceptionnel) et pour permettre des ajustements de la loi hauteur-débit. Pour le barrage du Lagan, on utilise des mesures de débit sur des affluents (pour anticiper le passage des crues) tandis que le barrage de Tees possède des capteurs à l'estuaire mais également sur la rivière et sur un affluent amont, toujours dans le même but. A Tees, on a constaté que le niveau des marées au niveau de l'estuaire avait quelques minutes d'avance sur le niveau immédiatement en aval des vannes. Une telle information n'est pas toujours disponible en temps réel, souvent elle est obtenue par télémétrie bien que, si nécessaire, le canal de transmission puisse être laissé ouvert. Ceci n'est pas rentable dans des circonstances normales car la station de mesure est en liaison avec la station principale et des lectures sont en permanence téléchargées dans le système d'exploitation.

O) SCADA (Supervisory, Control and Data Acquisition)

Il est souhaitable d'enregistrer les mesures dans un but légal ou de management. Les dispositifs d'enregistrement tels que les cassettes et les disques optiques ont été remplacés par les disques

durs dans lesquels des quantités plus importantes d'informations peuvent être enregistrées et consultées plus rapidement si nécessaire. En tant qu'élément du système intégré de gestion, il est courant de trouver un système SCADA à côté des ordinateurs industriels utilisés pour actionner la structure. La fonction de supervision du SCADA permet aux opérateurs de diriger ou d'observer l'installation, habituellement par des schémas ou des représentations graphiques des processus sur un VDU (Visual Display Unit). Le niveau de détail peut être aussi grand ou aussi petit que le client le désire mais il doit être choisi dès l'étape de configuration pour des raisons économiques. Le «Contrôle» est aussi connu sous le nom d'Interface Homme-Machine. L'«acquisition de données» est la mesure, l'affichage et l'enregistrement de telles valeurs pouvant intéresser les opérateurs ou les organismes de normalisation. Un tel système peut tracer des graphes des débits et des niveaux instantanés et enregistrer des valeurs intégrées pour des périodes de temps variant d'une heure à une année. Il peut également être configuré pour produire des rapports programmés de n'importe quelle valeur ou événement.

L'écran et le clavier du SCADA sont également la façon la plus commode d'entrer des commandes dans le système d'exploitation et de voir l'état des équipements sur des schémas. Les écrans tactiles et les menus défilants deviennent plus courants maintenant et rendent ainsi la tâche des opérateurs plus facile et moins exposée à une erreur. Il est possible de programmer des schémas guidant l'opérateur dans sa tâche, lui fournissant les infos réellement souhaitées. Le cas du Falkirk Wheel en Ecosse est un bon exemple car on y a prévu non seulement la mise en évidence des infos souhaitées mais aussi la confirmation des commandes qui est exigée avant que l'opérateur puisse procéder à la prochaine étape. Un message apparaît «Etes-vous sûr de vouloir faire... » avec des fenêtres «oui» ou «non» pour la réponse. Le SCADA peut être éloigné du site permettant aux opérateurs de contrôler de nombreux endroits simultanément. Comme mis en évidence dans le questionnaire, les coûts du personnel peuvent être tout à fait significatifs et les économies de fonctionnement à distance doivent être considérées.

Comme prévu, peu de structures sont actionnées sans l'utilisation avancée des commandes automatisées. Les vannes flottantes du Tennessee et de Louisiane aux Etats-Unis, sont contrôlées uniquement manuellement. Parfois, habituellement pour les structures de défense contre les inondations, la prise de décision est laissée aux opérateurs (humains), mais pour atteindre le niveau de sécurité souhaité, les ordinateurs assurent la protection nécessaire. Le Blanc Pain, en Belgique, est un exemple d'une opération non-pilotée et totalement automatique de défense contre les inondations, bien qu'elle soit surveillée d'un emplacement voisin.

Dans presque tous les cas, la mesure de base à être surveillée est le niveau d'eau en amont de la structure de contrôle. C'est seulement dans les cas de protection contre les marées tels que la barrière de la Tamise que le niveau aval est d'un intérêt premier. Au Blanc Pain, le système de défense contre les inondations sur le «Canal du Centre», en Belgique, surveille le niveau, le débit (vitesse) et le sismographe pour déterminer quand elle devrait être fermée.

Quand une structure a un double rôle, à savoir pour le contrôle de la navigation et la protection contre les fortes marées, alors l'amont et l'aval sont étroitement surveillés. Un niveau aval augmentant incite à la fermeture des portes/vannes pour empêcher l'inondation de la voie navigable plus en amont. La mesure du niveau aval a une seconde fonction pour le calcul du débit en présence d'un écoulement noyé. Connaître le niveau des deux côtés d'une vanne levante est essentiel si celle-ci peut uniquement être déplacée dans des conditions proches de l'équilibre ou pour des charges différentielles nulles. Des contraintes semblables existent dans les écluses mécanisées où les niveaux peuvent être mesurés en amont, en aval et dans le sas afin d'empêcher les portes d'être ouvertes prématurément. Là où aucune liaison n'existe entre les niveaux et la commande du mouvement de la vanne, alors le système de commande doit être équipé d'une protection contre une surcharge. Des fusibles, des disjoncteurs et des vannes de décompression, mettant en évidence les divers problèmes avant d'activer la manoeuvre, peuvent également intégrer ces cas de charges excédentaires.

La philosophie du contrôle utilisée au barrage de Tees, où l'intention est de maintenir le niveau amont de la rivière dans une tranche fixe, est typique. L'Agence pour l'Environnement a fixé cette tranche mais les opérateurs ont la liberté de choisir un niveau désiré dans cette marge. En utilisant la capacité de stockage du bief amont, il peut être nécessaire de placer le niveau haut ou bas dans la tranche selon l'état des marées et l'écoulement de la rivière. Les recherches hydrauliques à Wallingford ont été réalisées afin d'analyser toutes les possibilités de la philosophie de contrôle. Les limites supérieure et inférieure du niveau désiré ont pu être fixées individuellement ou en appliquant une «tranche limite» des deux cotés de la valeur désirée ou du point de repère. Le mouvement correctif de la vanne a pu être fixé selon la différence entre le niveau réel de la rivière et la valeur désirée. L'intervalle de temps entre deux mesures successives du niveau de la rivière peut être court ou long, de quelques secondes à plusieurs minutes.

Les principaux résultats de la recherche étaient :

- Rétrécir la tranche limite, avec de grands mouvements de la vanne et un intervalle de prélèvement court, rend le contrôle instable avec un grand nombre de corrections dans une période courte.
- Une large tranche limite, avec de petits mouvements de vanne et un intervalle de prélèvement long, rendent le contrôle mauvais avec une grande persistance d'erreurs, permettant même au niveau de varier en dehors de la tranche fixée par l'AE (Agence pour l'Environnement).
- Des corrections fréquentes signifient que les moteurs électriques pour le système hydraulique doivent être mieux évalués pour résister aux contraintes dues à plusieurs démarrages sur une courte période.
- Idéalement, les corrections devraient être suffisamment faibles pour ne pas être remarquées.
- Une modélisation préalable a permis que le système installé ne nécessite que de faibles modifications.
- Une modélisation préalable a permis que le fonctionnement et les effets de certains ajustements soient préalablement expliqués aux membres du personnel.

P) Chaque structure est unique en termes de rapport entre la taille des vannes et le débit évacuable comparé au volume de la rivière et aux débits statistiques. Il est donc recommandable qu'une modélisation préalable soit effectuée dans tous les cas. Une modélisation mathématique est plus appropriée qu'une modélisation physique pour le contrôle mais une modélisation physique est davantage employée pour des considérations structurelles. Elle peut également aider à déterminer les débits maximums et les effets sur la sédimentation. Au barrage de Tees (R-U), une modélisation physique mena à un ouvrage avec 4 pertuis au lieu de 5 avec des gains résultants sur le génie civil et les systèmes hydrauliques.

Q) Des informations au sujet des lubrifiants propres pour l'environnement sont disponibles sur le *CD-Répertoire/B8- Environmentally Lubricants (BW,UK)*.

5.4.8 RESUME

La philosophie "Keep it Simple" est toujours bonne mais pas toujours réalisable. Il y a dans ce rapport des exemples de très simples structures de défense contre les inondations qui fonctionnent bien mais qui ont besoin de beaucoup d'interventions manuelles, lors de la prise de décision en vue de la manoeuvre et ensuite pendant son fonctionnement. On y présente aussi certains ouvrages très sophistiqués qui fonctionnent de façon entièrement automatisée (automate programmable). La vraie question intervient au niveau de la fiabilité du système et des conséquences d'une défaillance. Il est recommandé que tous les éléments critiques du système de contrôle soient dupliqués et que l'alimentation (électrique, ...) et les mécanismes de manoeuvre soient redondants, dans la mesure du possible.

Tant que l'entretien approprié est effectué, un système correctement conçu fonctionnera sûrement au-delà de sa vie de conception prévue. Le problème est que plus les systèmes sont sophistiqués, plus l'entretien nécessitera une main d'oeuvre hautement qualifiée. Toutes imperfections ou failles dans le système devront en principe apparaître dans le fonctionnement de la structure mais ne seront peut-être pas remarquées avant qu'il soit trop tard.

De nombreuses séries de tests de routine, permettant de valider le système complet, doivent être

mis en place et utilisées régulièrement. L'heure et la date de ces tests doivent être enregistrées avec toutes les observations sur l'exécution du système.

5.5 DISPOSITIFS DE FERMETURE TEMPORAIRE

5.5.1 DEFINITIONS

Il est important de différencier les systèmes de «fermeture de maintenance», de «fermeture d'urgence» et de «fermeture du site en phase construction». Ce rapport traite principalement de la fermeture pour la maintenance.

Typiquement, les systèmes de fermeture d'urgence sont des vannes levantes, suspendues qui peuvent fermer la passe très rapidement sous leur poids propre. Ce sont des systèmes coûteux.

Quelques systèmes de fermeture d'urgence sont présentés dans les «Project Reviews» du GT (Porte de Blanc Pain en Belgique et le canal Hartel aux Pays-Bas – voir CD-Rom).

Certains systèmes de fermeture du site en phase de construction sont assez similaires de ceux pour maintenance. Le système de "Pallet Barrie" est probablement un bon exemple – Fig. 5.20 sur la page 90.

Dans ce rapport, une fermeture temporaire est définie comme étant:

- Une fermeture requise pour rendre une structure accessible pour la maintenance préventive ou curative (réparation).
- Une fermeture requise pour minimiser les impacts d'une inondation ou d'une rupture de berge lorsque aucun dispositif fixe n'est disponible.

Pour le premier cas, il s'agit typiquement des batardeaux utilisés pour isoler une structure (portes, vannes) afin d'être asséchée et accessible pour la maintenance.

Pour le second cas, on utilise un batardeau flottant qui est apporté au niveau de la brèche dans la berge du canal ou de vanne endommagée et est déployé pour contrôler la fuite jusqu'à ce qu'une réparation permanente puisse être réalisée.

5.5.2 BATARDEAUX

Un *batardeau* est typiquement une cloison verticale utilisée pour isoler un espace d'un autre, capable de résister à la charge différentielle sans déformation significative ou fuite. Ils sont une variante des barrages à poutrelles et sont généralement conçus en une pièce unique plutôt qu'en une série de modules ou éléments juxtaposés.

Il existe de nombreux dispositifs pouvant être déployés pour obtenir une fermeture temporaire. Quelques exemples courants sont :

- Des poutrelles (Fig.5.16, Fig. 5.17),
- Des aiguilles (Fig. 5.18),
- Des caissons (flottants ou non), Fig. 5.23,
- Des éléments gonflables (air ou d'eau), Fig. 5.22,
- Des panneaux (Pallet, etc.- Fig. 5.19, Fig. 5.20).

Les barrages à poutrelles sont constitués de planches ou de poutres qui se glissent dans des rainures situées sur les piles et/ou culées. Leur taille dépend de la passe et des facilités de levage. Dans certains cas, des supports verticaux intermédiaires sont employés pour réduire la largeur individuelle des batardeaux, les rendant plus faciles à manipuler ou augmentant leur polyvalence (Fig. 5.19 à la page 90).

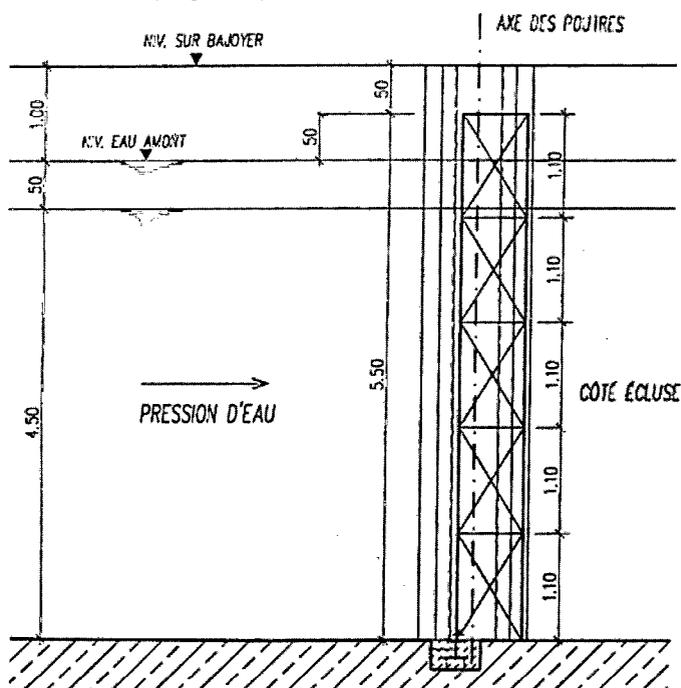


Fig. 5.16 : Barrage à poutrelles (coupe transversale)
Taille: 1.10m x 0.7m sur 12.5 m; Allemagne

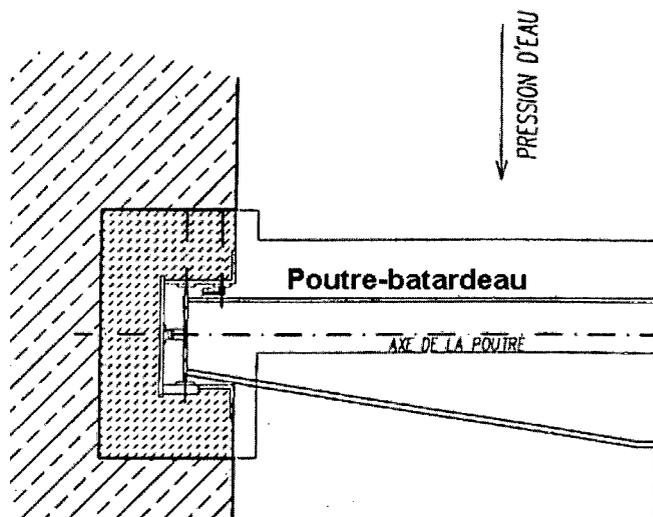


Fig. 5.17: Barrage à poutrelles (Vue du dessus)

Les aiguilles sont des poutres de 2 à 4 m de long et d'une section typique de 7x7 cm à 10x20 cm. Elles peuvent être en bois, en aluminium ou en acier. Elles sont placées verticalement, supportées à leur partie supérieure contre une poutre-guide ou la partie supérieure d'une passerelle (Fig. 5.18). Une rainure (ou décrochement) dans le sol est utilisée comme support inférieur. Les barrages à aiguilles ne sont jamais 100 % étanche. Pour atteindre une bonne étanchéité, une feuille en plastique peut être placée sur une face avant l'assèchement mais cela requiert habituellement des plongeurs.

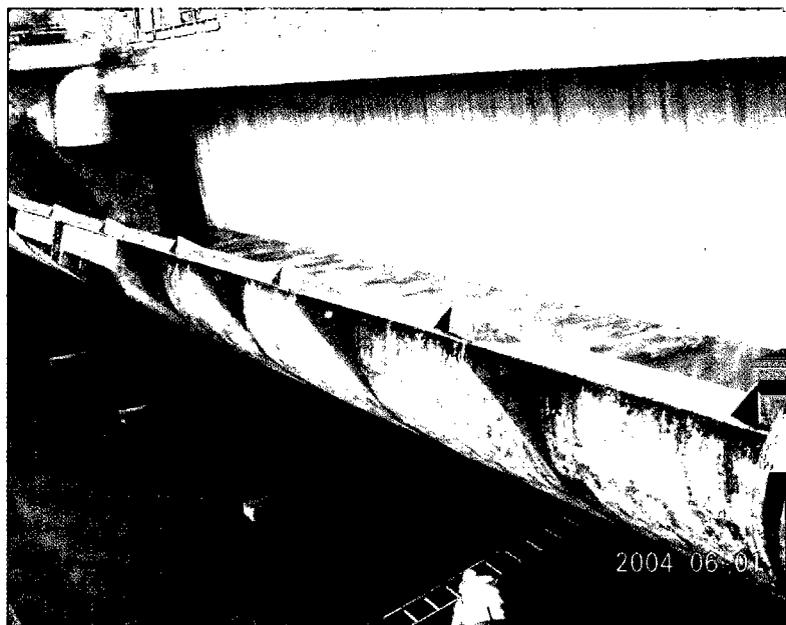


Fig. 5.18: Batardeau à aiguilles supportées par une poutre supérieure

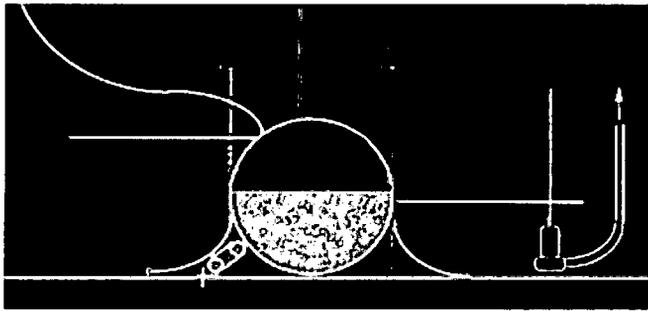


Fig. 5.22: Batardeau gonflable
(Copyright: C. Dermience, MET, Belgique)

Passerelle pivotante utilisée comme batardeau (France):

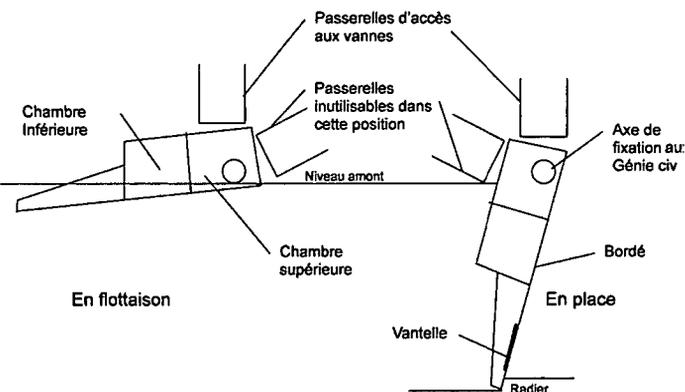


Fig. 5.23: Batardeau passerelle
(Copyright: VNF et ISM, France)

Des rapports associés à une étude complémentaire (Univ. de Liège, publiée par VNF-CETMEF) sur les différents types de batardeaux de maintenance sont disponibles sur le CD Répertoire /Annex Section 5.5/. On y trouve une analyse comparative (avantages-inconvénients des différents systèmes).

5.5.3 STANDARDISATION

Pour différentes raisons (économique, fabrication, maintenance, etc.), il est important de standardiser les batardeaux de maintenance. Certains exemples de standardisation sont donnés ci-après.

5.5.3.1 En Angleterre, le British Waterways (Voies Navigables Britanniques) tente de standardiser la taille de ses batardeaux d'écluses pour des raisons économiques évidentes. Ceci concerne des écluses qui utilisent généralement des poutrelles de bois ou d'acier empilées séquentiellement au travers du canal et enfilées dans des rainures verti-

cales des parois du canal. Un jeu de poutrelles est stocké localement pour être utilisé par un groupe d'écluses ayant les mêmes dimensions, plutôt que d'avoir plusieurs jeux de poutrelles ayant des dimensions légèrement différentes.

A Lagan, Irlande du Nord, les batardeaux sont standardisés d'un site à l'autre car la portée des vannes est fixée pour correspondre aux batardeaux existants.

Un exemple de porte de protection contre les inondations aux Etats-Unis est intéressant: un large caisson flottant a été conçu pour fournir une solution standardisée pour plusieurs écluses sur les rivières du Tennessee et de Cumberland autour de Nashville, Tennessee. Bien que ce système soit coûteux, la polyvalence qu'elle fournit et l'économie de plusieurs systèmes coûteux de levage, la rendent rentable.

Pour la protection contre les inondations à Bayou Dularge et Bayou Lafourche autour de Lockport en Louisiane, des vannes à hausses ont été conçues pour obstruer la rivière contre les intrusions de la marée. (Voir «Project Review» K1 et K2). Ces portes sont normalement positionnées contre la berge de la rivière/du canal en prévision d'une inondation. En cas de besoin, elles pivotent et sont ensuite ballastées pour venir reposer sur le seuil. Des câbles tendus par treuils et la charge hydrostatique assurent son ancrage. Ces opérations sont entièrement manuelles en utilisant des pompes électriques et des treuils hydrauliques contrôlés par l'équipe de surveillance appelée en cas de risque d'inondation. Ces types de vannes peuvent uniquement être mis en mouvement dans des écoulements faibles ou avec une différence de charges faible.

5.5.3.2 Une conception intéressante a été utilisée pour le barrage de Tees (RU) qui appartient maintenant au British Waterways bien qu'il ait été à l'origine construit et opéré par le Teesside Development Corporation. Il y a quatre vannes clapets contrôlant le niveau de la rivière, une écluse de navigation du côté sud et un slalom pour canoë au nord. Afin de permettre l'assèchement pour l'entretien des vannes ou de l'écluse, le projet a prévu une série de batardeaux à poutrelles.

Il y a quatre vannes régulant le flux de la rivière. Chaque vanne logée entre deux piles est munie de rainures pour recevoir des batardeaux à poutrelles. Les rainures sont munies de joints inoxydables, placés dans le béton, afin d'améliorer l'efficacité de l'étanchéité. Il y a au total 13 poutrelles disponibles (8 à l'aval et 5 à l'amont), chacune a une largeur de 13,888 m, une hauteur de 1,250 m et une masse de 7.018 kg. Un dispositif spécial est utilisé pour mettre en place les poutrelles. Il pèse lui-même 3.124 kg et a une capacité portante de 12,5 t. Ce dispositif est suspendu à une grue pour la mise en place des batardeaux. La poutrelle (suspendue) se libère automatiquement lorsque ses capteurs de pose entrent en contact avec le radier ou l'élément précédent déjà mis en place. Ceci assure que les fixations de levage ne se détachent pas si la poutrelle se bloque avant d'atteindre sa position finale. Pour la mise en place des poutrelles et du dispositif de mise en place, il est nécessaire d'utiliser une grue mobile de 120 t. placée sur le pont route. Les poutrelles sont placées au travers des passes, trois du côté aval et quatre du côté amont. Pour plus de détails, voir le «Project Review» de la barrière de Tees sur le CD.

5.5.4 TEMPS DE REPONSE

Une autre considération importante est le temps de réponse si un incident grave se produit, typiquement si une brèche ou une passe doit être isolée. Le stockage hors site des dispositifs de fermeture augmente le temps nécessaire pour transporter l'équipement à l'emplacement désiré en cas d'urgence.

Les autorités responsables des infrastructures peuvent imposer un temps de réponse qui détermine en fin l'endroit où doivent être placés les batardeaux. Au barrage de Tees, le site de stockage n'est pas idéal d'un point de vue esthétique mais est toléré pour des raisons de disponibilité. Un lieu de stockage hors site entraînerait également un coût supplémentaire durant toute la durée de vie du barrage.

5.5.5 MAINTENANCE

L'entretien des batardeaux concerne particulièrement les zones de contact et de frottement, ainsi que le contrôle et la réparation des joints d'étanchéité et des zones peintes endommagés. L'entretien doit être programmé avant de procéder à son utilisation.

Les batardeaux de type caisson exigent une inspection interne des caissons et de ballast aussi bien que de tous les organes mécaniques et des engins de pompage.

Les systèmes gonflables exigent des essais de mise en pression de façon régulière.

5.5.6 RESUME

Bien que le problème spécifique de la maintenance soit abordé ailleurs dans ce rapport, la maintenance doit être considérée comme un élément à part entière du processus de conception d'un barrage mobile. Une structure ne pourra rester opérationnelle durant toute la durée vie escomptée que si elle est correctement entretenue et que des dispositions sont prises dès le début. La possibilité d'accéder aux pièces mobiles, en toute sécurité, dépend de la conception des dispositifs provisoires de fermeture, c-à-d des batardeaux.

Le risque est défini en fonction de la probabilité et des conséquences d'un échec. Si ces conséquences peuvent être réduites par la disponibilité et la fiabilité des dispositifs provisoires de fermeture alors le risque est également réduit.

Pour ces deux raisons, les dispositifs de fermeture provisoire (batardeaux) doivent être considérés comme essentiels et comme des organes vitaux pour le projet.

5.6 SECURITE, FIABILITE ET RISQUE

5.6.1 FIABILITE ET ANALYSE DU RISQUE

5.6.1.1 Définitions

Effectuer une **analyse de la fiabilité** (AF) consiste en fait à déterminer la probabilité qu'une structure ou une partie de cette structure (existante ou en voie de conception) ne remplisse pas sa tâche.

L'accroissement de complexité des structures et de leurs équipements (machinerie, systèmes électriques, et électroniques,...) augmente le danger pour la société et l'environnement et a également accru l'importance de la fiabilité en tant que paramètre quantifiable de la qualité.

La détermination de la probabilité de perte d'une fonction, ou la probabilité de ruine, est importante car cette probabilité de ruine doit rester dans des limites acceptables au niveau économique et légal.

Très généralement, la fiabilité est définie comme étant la probabilité qu'un élément exécute correctement une fonction requise :

- dans des conditions spécifiées,
- durant une période de temps donnée.

La fiabilité, en tant que caractéristique d'une structure ou d'un élément structurel, est exprimée comme une probabilité, qui comprend trois concepts indépendants :

- Le temps (durée) ;
- Les facteurs spatiaux (tels que le fonctionnement, la maintenance, et les conditions environnementales) ;
- Les règles pour déterminer si une structure ou une partie de structure fonctionne ou pas comme prévu (définition de la ruine).

La fiabilité d'une structure (ou également d'un produit) est définie comme une fonction de la durée de fonctionnement (temps).

Le Risque

Il y a de nos jours toujours de très nombreuses discussions dans le monde scientifique au sujet de l'utilisation et de la définition du risque (Vlek, 1996). Plusieurs définitions informelles d'un risque, telles que "un ensemble de conséquences négatives possibles" ou "de pertes de contrôle", qui sont toutes, en fait, l'expression d'une incertitude, existent également mais ne seront pas reprises ici.

La définition suivante du risque est fréquemment utilisée par la communauté des ingénieurs à cause de sa capacité à quantifier le risque :

"Un risque est la mesure de la probabilité et de la sévérité d'un effet nuisible à la vie, à la santé, à la propriété ou à l'environnement (un impact nuisible). L'échelle ou la signification d'un risque est décrite par une combinaison de probabilité de ruine (fiabilité) et des conséquences d'un résultat particulier ou d'un ensemble de résultats. On multiplie la probabilité par les conséquences pour évaluer l'ampleur d'un risque."

L'exemple suivant montre les imperfections de cette définition : une probabilité de 0,5 (ou 50 % de chance) de subir une perte de 1000 EUR est considérée comme équivalente, en termes de risque à une probabilité de 0,01 (ou 1 % de chance) de perdre 50.000 EUR. Dans les deux cas, le risque correspond à une valeur moyenne ou à une probabilité mathématique de 500 EUR au cours de la période de temps considérée. En dépit de cette valeur identique du risque, les attitudes et la gestion de ces risques peuvent différer en raison d'échelles de perte très différentes, si ces événements surgissent. Par conséquent, pour l'évaluation complète du risque, il est nécessaire de tenir compte du niveau des probabilités concernées et du niveau des conséquences.

Une **analyse de risque** (AR) lie les différentes possibilités de ruine et la probabilité d'apparition associée avec les conséquences qui en découlent.

Une analyse de fiabilité n'est donc qu'une partie de l'analyse de risque. Dans une analyse de risque, non seulement la probabilité de ruine est déterminée, mais les conséquences matérielles et immatérielles le sont également. Un dommage est donc aussi lié à des circonstances locales (y a-t-il une industrie et/ou une habitation en aval des portes défilantes ou une terre agricole ou des zones naturelles...?), il est difficile de généraliser les résultats d'une analyse de risque.

5.6.1.2 Les méthodes basées sur une analyse du risque

Les méthodes basées sur une analyse du risque sont utilisées de plus en plus fréquemment pour la conception de systèmes de protection contre les inondations.

Certaines raisons à cela sont (ICOLD Question 76, 2000):

- Le fait que l'analyse de risque permette l'évaluation de marges de sécurité plus réalistes que les critères de sécurité traditionnels (déterministes) ;
- La possibilité de quantifier des avantages économiques avec une analyse du risque ;

- Fournir une approche commune pour comparer une large variété d'options et pour permettre aux risques dûs à la défense contre les inondations d'être comparés aux autres risques naturels et induits par l'homme ;
- Juger de l'évolution de la sécurité en fonction des conditions climatiques changeantes ;
- Le désir du public de quantifier le risque d'événements catastrophiques avec et sans les mesures de protection. Par exemple, les approches basées sur le risque ne considèrent pas uniquement la probabilité d'atteindre les niveaux d'eau les plus élevés admissibles pour l'ouvrage (barrières, digues, etc.) mais aussi la probabilité de défaillance de l'ouvrage et le degré de dommages créés aux personnes/propriétés, etc. derrière les protections.

Bien que l'incertitude soit un facteur essentiel dans la conceptualisation de la sécurité et pour l'évaluation des décisions économiques, l'analyse de risque est une approche raisonnable.

5.6.1.3 Exemples d'application de l'analyse du risque

A) Conception structurelle d'un barrage ou d'une barrière anti-tempête

Le but général de la conception d'une structure, outre de satisfaire aux états limites considérés, est d'assurer (avec un niveau de probabilité acceptable) que les performances requises soient satisfaites durant sa construction et la durée de vie de l'ouvrage, afin que la structure ne puisse pas «faillir» sous n'importe quel cas de chargements prévisibles ou exiger des réparations significatives causées par de tels événements.

Une analyse de fiabilité (AF) peut concerner les erreurs/ruines constructives comme des déformations excessives, apparition de fissuration..., mais aussi les erreurs de procédure dans les systèmes de gestion et de maintenance et d'assurance qualité.

Les raisons pour effectuer une évaluation de la fiabilité d'une structure peuvent être diverses :

- Identifier les parties faibles d'une structure ou

- Adapter la solution, quand l'ingénierie classique s'avère être trop coûteuse. En effet la sécurité, la fiabilité et les analyses du risque ne peuvent être considérées qu'à la condition que la conception, le dimensionnement, la fabrication, le fonctionnement et la maintenance des diverses structures soient conformes aux règles techniques, normes, directives, ... nationales et internationales. Or, l'application de ces règles à des structures complexes peut conduire à des coûts excessifs. Il est également possible que les règles de conception ne soient pas bien adaptées au type de la construction considérée, ce qui rend difficile de juger si la structure doit bien satisfaire aux critères classiques de fiabilité imposés ;
- Si une adaptation a été faite parce que les solutions classiques ne satisfont pas les intérêts locaux (environnementaux) ;
- Afin de prioriser l'affectation des personnes ou des ressources. En connaissant la probabilité de ruine et ses conséquences, une prise de décision objective devient possible ;
- Pour établir une relation entre "la sécurité de l'ouvrage", "la durée de vie de fonctionnement" et "la maintenance". En effectuant une analyse de fiabilité, la manière avec laquelle la probabilité de ruine (non fonctionnement) est influencée par la stratégie choisie en matière de maintenance, peut être déterminée (voir Fig. 5.24).

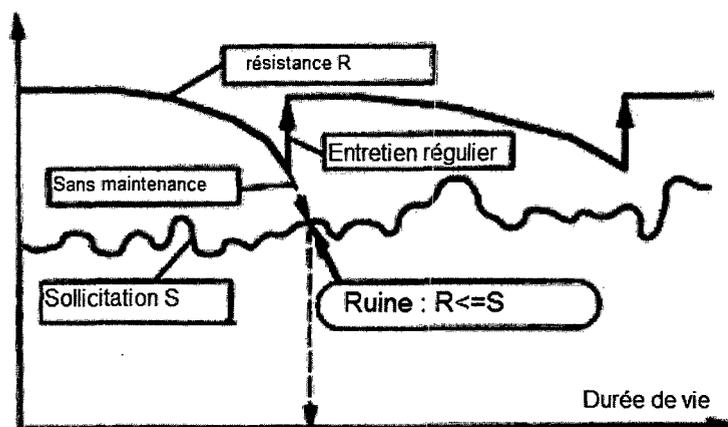


Fig. 5.24: Relation entre "sécurité", "durée de vie de fonctionnement" et "maintenance".

Dans certaines situations, il est plus difficile d'effectuer une analyse de fiabilité :

- Pour des ouvrages standards (ou des parties), il est souvent plus intéressant de suivre les règles de conception déjà établies. Vu l'expérience acquise, les efforts de conception sont minimum et le risque de problèmes durant la maintenance le sera également. Dans ce cas, il n'est pas recommandable de considérer l'ouvrage comme une structure unique et de réaliser une analyse de risque spécifique ;
- Quand les techniques nécessaires et la présence d'un spécialiste pour une analyse détaillée de la fiabilité ne sont pas disponibles, il est préférable de compter sur les procédures de conception traditionnelles.

La **Norme Internationale ISO/FDIS 2394** "Principes généraux sur la fiabilité des structures" constitue une base commune pour définir les règles de conception intéressantes pour la construction et l'utilisation d'une large majorité de bâtiments et d'ouvrages de génie civil, quelque soit la nature ou la combinaison de matériaux utilisés. Elle spécifie "les principes généraux" pour la vérification de la fiabilité d'une structure soumise aux actions connues ou prévisibles. La fiabilité est considérée en relation avec la performance de la structure durant toute sa durée, supposée, de fonctionnement.

Néanmoins, il est important de prendre conscience que les règlements et les codes ne doivent pas être dogmatiques. Par exemple, l'état de l'art actuel doit toujours être considéré et il est aussi requis d'évaluer les expériences (et la connaissance) qui ont été acquises et collectées durant les phases de conception, fabrication et fonctionnement. De plus, il est nécessaire de prendre en compte les nouveaux résultats/produits élaborés dans le secteur de la recherche et du développement (R&D). Dans ce contexte, les procédures correspondantes peuvent être interprétées différemment d'un pays à un autre.

B) Prise de décision: conception et comparaison d'alternatives de systèmes de protection contre les inondations

Plusieurs types de risque doivent être considérés dans la conception hydraulique des barrières anti-

tempêtes. Ceux-ci peuvent être classés comme ceci (Mockett et al. 2002 et DEFRA 2000): risques d'ingénierie, financier, économique, d'assurance, de construction, de fonctionnement, environnemental et de patrimoine, de santé et de sécurité, politique et social.

Une partie de ces risques couvrent les dangers spécifiques du projet (le financement de la structure, les risques pendant la construction, les risques à couvrir par des primes d'assurance...), alors que d'autres sont davantage liés au choix du système de protection contre les inondations : comment réduire le risque lié à une inondation (et la probabilité de défaillance de la structure est-elle assez faible pour garantir un risque d'inondation réduit?). Y a-t-il un impact sur l'environnement ou sur l'activité humaine ? Quelle réduction du risque peut-on escompter par la surveillance, le monitoring, système d'alerte, etc. ?

Dans ce concept, les investissements (le coût de construction et les coûts d'entretien, définis ici comme «coûts prévus moyens») sont comparés à la réduction des risques présumés dans le secteur d'influence de l'ouvrage de protection contre les inondations (définis comme étant «les bénéfices prévus moyens» pour la société). Ces études incluent également le risque social (donnant, d'une certaine manière, une valeur monétaire à la vie humaine) et les effets des systèmes d'alerte.

Des alternatives de conception pour des projets de protection contre les inondations peuvent ainsi être comparées sur une base économique. In fine, le décideur doit normalement choisir l'option qui maximise l'avantage net prévu (ou qui a la période de remboursement la plus courte). En concevant des systèmes de protection contre les inondations, le concept «*du risque uniforme*» pour toutes les zones le long d'une rivière peut être employé. Ceci a comme conséquence d'avoir un niveau réduit de protection dans les secteurs dont les dégâts potentiels ont une faible valeur monétaire. Cela a de plus comme effet d'avoir différentes périodes de retour pour la protection contre les inondations des villes, des régions agricoles,... comme c'est déjà le cas en Grande-Bretagne (cfr les conseils MAFF donnés par l'Agence Environnementale, 2000).

C) Directives et législations : définition des normes de protection contre les inondations

Quelques pays utilisent le concept de risque pour redéfinir leur politique envers la sécurité et la protection contre les inondations. Ainsi, des normes de protection contre les inondations ont été définies la plupart du temps en termes de probabilité d'inondation. Aux Pays-Bas, par exemple, une probabilité d'inondation d'une fois sur 10.000 ans est classique pour la région centrale des Pays-Bas, et une période de retour d'une fois sur 4.000 ans pour la région de l'Escaut Occidental (Western Scheldt).

Cette disposition légale tient compte implicitement des conséquences d'un non fonctionnement (ruine). Quand des dommages importants sont possibles, une faible probabilité de débordement au-dessus des crêtes de digues est légalement imposée. Cependant, cette imposition ne tient pas compte du fait que le risque d'inondation résultant est obtenu par la somme des risques individuels de chaque tronçon de l'ouvrage. Quand des ruptures primaires ayant une probabilité élevée existent sur un de ces tronçons, cela a instantanément comme conséquence un risque élevé pour le secteur à protéger (ICOLD 2000).

Pour cette raison, les recherches continuent dans plusieurs pays, en essayant de redéfinir les normes de protection contre les inondations, via un calcul des probabilités de débordement dans une approche méthodologique d'analyse du risque où tous les éléments du système de protection contre les inondations sont soumis à une analyse de fiabilité et du risque.

5.6.2 OUTILS ET TECHNIQUES D'EVALUATION DE LA FIABILITE ET DES RISQUES

5.6.2.1 Méthodes d'évaluation des risques

Tous les risques mentionnés auparavant peuvent être estimés par diverses techniques. Un aperçu des méthodes existantes est donné dans Mockett et al. (2002) et DEFRA (2000) dans lesquels plus de détails sont disponibles.

Ces différentes méthodes sont les suivantes :

A) Méthode qualitative «Broad brush» (établissant une liste de risques)

Ces méthodes sont employées pour identifier les risques, recueillir des informations au sujet de ces risques et documenter les décisions prises. La structure de la liste des risques reflète le processus d'évaluation et de gestion globale des risques. L'établissement d'un inventaire des risques requiert les étapes suivantes :

- Identification du risque (dépistage) ;
- Estimation de la probabilité, par exemple par un comité d'experts ;
- Evaluation des conséquences, en utilisant des valeurs monétaires si disponibles ;
- Réduction et évaluation des risques individuels.

Quand des risques de différente nature doivent être combinés pour faciliter une décision, l'utilisation d'une analyse multicritères peut être faite (voir chapitre 4 dans ce rapport).

B) Evaluation quantitative et qualitative des risques:

Diverses méthodes sont disponibles dans la littérature afin d'effectuer une évaluation des risques (DEFRA 2000, Mockett 2002).

Les méthodes les plus importantes sont:

- Les arbres des événements et/ou des non-fonctionnements/défauts «Default Tree» ;
- Les méthodes analytiques ;
- Le modèle de Monte Carlo.

L'arbre des événements et/ou des défauts est un outil de base pour cerner les composants d'un problème et combiner les probabilités d'une façon logique. Les arbres des événements permettent d'établir la plage des conséquences probables (c.-à-d. inondation...) qui peuvent résulter d'un événement donné (crue). L'arbre des défauts procède en sens inverse, partant de la conséquence (inondation) pour déterminer une série d'événements possibles ayant pu causer ces dommages (la défaillance d'un mécanisme, l'erreur humaine, etc.).

L'analyse d'un arbre des défauts est particulièrement utile pour l'analyse des systèmes mécaniques et électriques tels que ceux des barrières anti-tempêtes. Un exemple est donné plus loin dans ce texte. Elle permet aux éléments critiques du système d'être identifiés et au besoin d'être renforcés ou dupliqués afin d'améliorer la fiabilité du système complet.

Une modélisation quantitative des risques est automatiquement réalisée lors de la modélisation du système. Dans un modèle déterministe, un groupe unique de paramètres d'entrée est utilisé. Dans une approche probabiliste, une plage de valeurs, pour chaque donnée, est examinée dans le modèle du système ; chaque valeur est associée à sa probabilité d'occurrence. Par conséquent, cette méthode commence par l'obtention des distributions de probabilité des paramètres d'entrée du modèle (par exemple : les distributions des niveaux d'eau, la vitesse des rafales de vent,...).

La méthode de Monte Carlo est basée sur un échantillonnage aléatoire de la distribution des paramètres d'entrée suivie d'un calcul de la réaction de système. En effectuant un grand nombre de simulations de la réaction du système basées sur des échantillons aléatoires, une distribution des paramètres de réponse du modèle et, sur base statistique, de la fiabilité de la structure sont obtenus, en comptant le nombre de non-fonctionnement (ruine) apparaissant dans toute la longue série de simulations.

Dans les méthodes analytiques, la probabilité de non-fonctionnement n'est pas obtenue en effectuant un grand nombre de simulations (comme Monte Carlo) mais en intégrant une fonction analytique préétablie (représentant la réponse du système dans le domaine considéré) dans un domaine limité contenant les situations de ruines.

L'évaluation quantitative des risques est souvent suivie d'une étude de sensibilité. Cette méthode est employée pour identifier de quelle quantité les variables principales peuvent changer avant qu'une solution différente soit obtenue. Le test de sensibilité implique habituellement de faire varier chaque paramètre, un par un, autour de sa valeur initiale «valeur de référence». En raison des incertitudes existantes, les études de sensibilité donnent ha-

bituellement une indication (assez approximative) de la robustesse d'une solution donnée, qui résulte elle-même souvent d'une analyse probabiliste.

5.6.2.2 Evaluation de l'impact d'une inondation

Pour passer de l'analyse de fiabilité à l'analyse de risque, un effort important doit être fait pour évaluer les conséquences d'une ruine ou d'un non-fonctionnement c.-à-d. les dommages, la perte des vies humaines....

Dans une première approche, la carte géographique de la zone de risques peut être réalisée en utilisant des cartes numériques de terrain (DTM) et des cartes SIG des sols en supposant les niveaux des inondations. Ces cartes sont généralement employées pour définir les zones à protéger (c.-à-d. les secteurs ayant un potentiel élevé de dégâts) ou inversement pour définir le niveau nécessaire de fiabilité du barrage ou de la barrière anti-tempête.

Dans l'évaluation quantitative des risques, utilisée pour l'optimisation et le choix du système de protection, il est important d'employer des techniques d'évaluation des dégâts plus détaillées.

Pour les barrières, l'échec signifie généralement que la «porte n'est pas fermée», ce qui mène alors à des niveaux de marée élevés et par la suite à un débordement au dessus des digues qui se combine avec la rupture de celles-ci (ayant comme résultat, des brèches dans la digue).

Les volumes d'eau dans les zones inondées sont généralement estimés en utilisant des modèles hydrodynamiques 1D liés aux modèles MNT et aux cartes SIG des secteurs prédisposés aux inondations.

Souvent le système considéré de rupture des digues le long des rivières est limité au débordement combiné avec des brèches dans la digue. Les mécanismes de rupture sont le plus souvent simulés par des modèles d'érosion tenant compte de quelques facteurs physiques régissant le développement de brèches. Aujourd'hui, les mécanismes de rupture sont la plupart du temps pris en considération en utilisant des formulations

d'érosion mais la détermination du début de la rupture et des paramètres d'érosion demeure subjective (manque d'information géotechnique, manque d'observations pour permettre le calibrage du modèle, etc.). Souvent, des choix pragmatiques sont faits et, ensuite, une analyse de sensibilité des résultats est effectuée. Les recherches dans ce domaine sont toujours en cours (voir par exemple www.delftcluster.nl et www.floodrisknet.org.uk).

À partir des calculs hydrauliques mentionnés précédemment, des cartes d'inondation présentant les profondeurs d'eau, la vitesse de montée et la vitesse horizontale de l'eau sont réalisées.

À partir de cette information, combinée avec des cartes du revêtement des sols (telles que l'information satellitaire Corinne), les dégâts d'une inondation sont calculés en utilisant les fonctions de dommages choisies suivant de l'utilisation du sol dans la zone inondée. Un aperçu de la littérature sur les méthodes existantes est disponible sur le site Web de Delftcluster (précédemment mentionné). Les recherches continuent afin de permettre d'affiner les calculs de dommages pour les bâtiments, la pollution, les pertes économiques (indirectes), les pertes en vies humaines (en tenant compte des systèmes d'alerte et des procédures d'évacuation), etc.

5.6.3 APPLICATION DE L'ANALYSE DU RISQUE: EXEMPLE DE PRISE DE DECISION

5.6.3.1 Le système de protection contre les inondations le long de l'Escaut en Flandres

En 1978, un système de protection contre les inondations sur l'Escaut a été conçu en Flandres (Belgique), en partant du principe qu'une protection générale contre les inondations survenant 1 fois sur 10.000 ans doit être garantie.

Cette solution comprend la construction d'une barrière anti-tempête sur la rivière l'Escaut. Cependant, cette barrière n'a pas été construite parce que, à l'époque (1982), l'analyse coût-bénéfice avait démontré que le projet n'était pas économiquement viable (justifiable).

Averti des dangers d'une élévation possible du niveau de la mer, le gouvernement flamand a lancé une nouvelle étude du projet en 2001 pour un sys-

tème de protection contre les inondations en imposant une approche de risque pour déterminer le degré de protection nécessaire contre les inondations (AWZ 2004).

Dans cette étude, de très nombreuses méthodes de protection contre les inondations ont été considérées : barrière anti-tempête, intensification de digues, zones de stockage des inondations et des combinaisons de celles-ci.

Dans une première approche, plusieurs systèmes ont été conçus en utilisant différents niveaux de probabilité de débordement comme critère de conception. Pour les solutions de barrières anti-tempêtes, une conception pour une période de retour de 1/10.000 a été considérée avec une probabilité de non fonctionnement de la fermeture de 1/100.

Des cartes d'inondations ont été calculées pour 11 périodes de retour différentes en considérant le débordement des digues et, de plus, la rupture par formation de brèches dans les digues submergées ainsi que dans celles où la revanche n'était pas respectée.

Les dommages ont été calculés en utilisant ces cartes d'inondation et en traduisant les profondeurs d'inondation, combinées avec l'utilisation du sol dans des évaluations de dégâts, en utilisant des fonctions de dommages (établissant pour chaque type de dégâts, le dommage en fonction de la profondeur d'inondation). L'intégration d'un dommage en fonction de la probabilité d'occurrence a comme conséquence un risque annuel moyen durant la durée de vie de l'ouvrage. Chaque système de protection contre les inondations a comme conséquence une réduction du risque annuel moyen, en comparaison au scénario où rien n'est entrepris. Cette réduction du risque peut être considérée comme le bénéfice du projet et est utilisée pour effectuer l'analyse coût/bénéfice et pour comparer et optimiser les divers systèmes possibles de protection contre les inondations. Par conséquent, les réductions annuelles moyennes du risque prévues (bénéfices) sont actualisées au coût actuel (franc constant) pour obtenir (après prise en compte des coûts actualisés des investissements et des entretiens) des indices économiques telles que la valeur actuelle nette et la période de remboursement qui sont utilisées pour comparer les solutions alternatives.

Les résultats de l'étude ont démontré :

- Qu'une protection sur 10.000 n'est pas justifiable économiquement ;
- Que pour la partie belge de l'Escaut les systèmes de protection contre les inondations utilisant l'intensification et le renforcement des digues et des zones de stockage d'inondation sont plus économiques que de construire une barrière anti-tempête.

A l'étape suivante, une analyse de risque a été effectuée pour définir, dans chaque zone du bassin de l'Escaut, le système local optimal de défense contre les inondations : différentes combinaisons d'intensification des digues et de zones de stockage de crue ont été comparées sur une base économique, et chaque fois, la solution optimale a été choisie. Au final, le système global de défense contre les inondations présentait un bénéfice net plus élevé (c-à-d un risque résiduel plus faible) et une période de remboursement plus courte que pour un système établi en utilisant le critère de conception uniforme traditionnel de «probabilité de débordement». Les probabilités globales de débordement obtenues étaient comprises entre 1/4.000 et 1/1.000.

5.6.4 APPLICATION DE L'ANALYSE DU RISQUE: «L'ARBRE DE RUINE» D'UNE BARRIERE ANTI-TEMPETE

La méthodologie ci-dessous est proposée par le TAW (1997) comme approche pour l'analyse du risque d'une barrière anti-tempête.

5.6.4.1 Définition d'une rupture

La sécurité contre l'inondation est le point central de l'analyse de fiabilité de barrières anti-tempêtes. Par conséquent, la rupture peut être définie comme «ne plus remplir la fonction de protection contre le niveau élevé des eaux».

5.6.4.2 Mécanismes de rupture

La rupture peut être atteinte de différentes manières, appelées "mécanismes de rupture".

Pour une barrière anti-tempête, les mécanismes de rupture principaux sont :

- Débordement ou surverse dû aux vagues (overtopping) ;
- Perte de stabilité ou perte de résistance ;
- Défaillance lors de l'opération de fermeture des portes.

5.6.4.3 Arbres d'événements et de défauts

Les manières selon lesquelles la rupture peut être atteinte sont mises en évidence de façon systématique grâce à l'arbre de défauts et des événements (Fig. 5.25). L'événement supérieur de l'arbre est la rupture/non fonctionnement de la barrière. Dans les branches de l'arbre, on y liste les d'événements (du bas vers le haut) qui peuvent provoquer l'événement supérieur. De cette façon, des systèmes parfois très complexes deviennent plus abordables.

Les relations entre les éléments de l'arbre des défauts sont telles que ces «défauts/non fonctionnements» peuvent provoquer l'événement situé

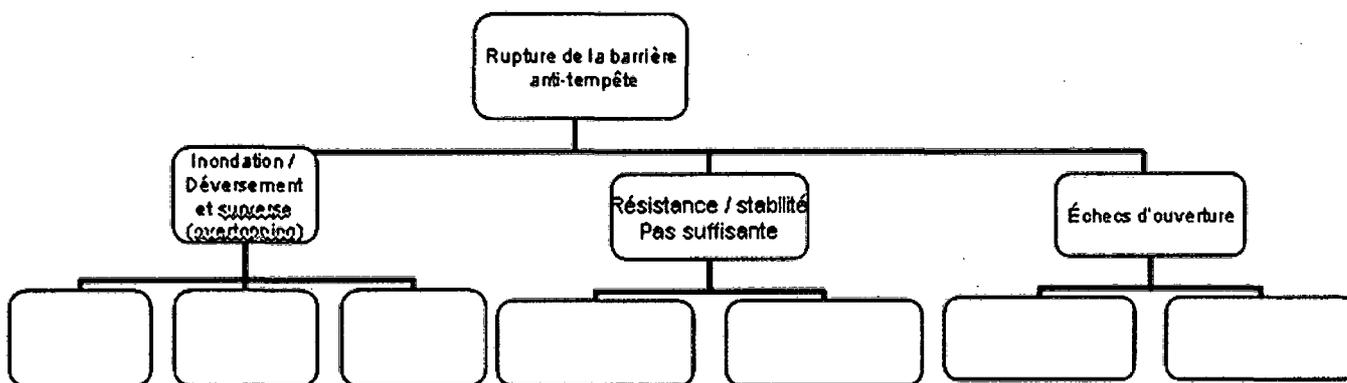


Fig. 5.25: Arbre des mécanismes de rupture d'une barrière anti-tempête

«le plus haut». L'événement supérieur doit être un événement bien défini et ne peut être qu'un état de rupture/ruine/non-fonctionnement de la barrière. En réalisant l'arbre des défauts, il est important de considérer systématiquement toutes les parties de la structure et de tenir compte de l'ordre d'apparition des événements et de la chronologie. Par conséquent, il est recommandé de construire en premier l'arbre pour ensuite analyser la chaîne des événements.

5.6.4.4 Méthodes de calcul de la fiabilité

Une analyse d'arbre des défauts se compose d'une partie qualitative et d'une partie quantitative. La partie qualitative analyse comment l'ouvrage peut atteindre sa ruine (non fonctionnement). Dans la partie quantitative, chaque événement est associé à une probabilité d'occurrence et la probabilité de l'événement supérieur peut ainsi être calculée.

Pour l'analyse quantitative, deux approches sont possibles:

- Approche ascendante (de bas en haut) : la probabilité d'échec de chaque élément est déterminée, ensuite on vérifie si l'événement supérieur satisfait les critères de fiabilité imposés ;
- Approche descendante (de haut en bas) : un taux d'échec acceptable est fixé pour l'événement supérieur. Ensuite, en fonction du niveau de maintenance, le taux d'échec acceptable de chaque composant et mécanisme est fixé. Sur cette base, la conception est finalisée et on vé-

rifie si le taux de rupture permis de l'événement supérieur est satisfait. Sinon, la conception doit être revue et modifiée.

L'approche descendante est employée la plupart du temps en ingénierie hydraulique.

En calculant les probabilités d'échec, la dépendance entre les mécanismes de rupture et la chronologie de ceux-ci est importante.

5.6.4.5 Quantification de l'arbre des défauts

Dans l'exemple suivant, on montre comment l'analyse d'un arbre des défauts est généralement réalisée aux Pays-Bas (TAW 1997). L'approche ne se fait pas au travers du calcul du risque, mais par une évaluation de la fiabilité.

Le premier critère (le plus important – Fig. 5.26) concerne la probabilité de débordement et de surverse (overtopping) est fixée par la règle :

$$P(q > q_t) < \text{norme (fréquence)}$$

avec:

- P = probabilité de dépassement,
- q = débit de débordement;
- q_t = débit de débordement admissible (ne générant pas de dégâts);
- norme = fréquence (période de retour) fixée par les autorités (lois ou règlements s'ils existent).

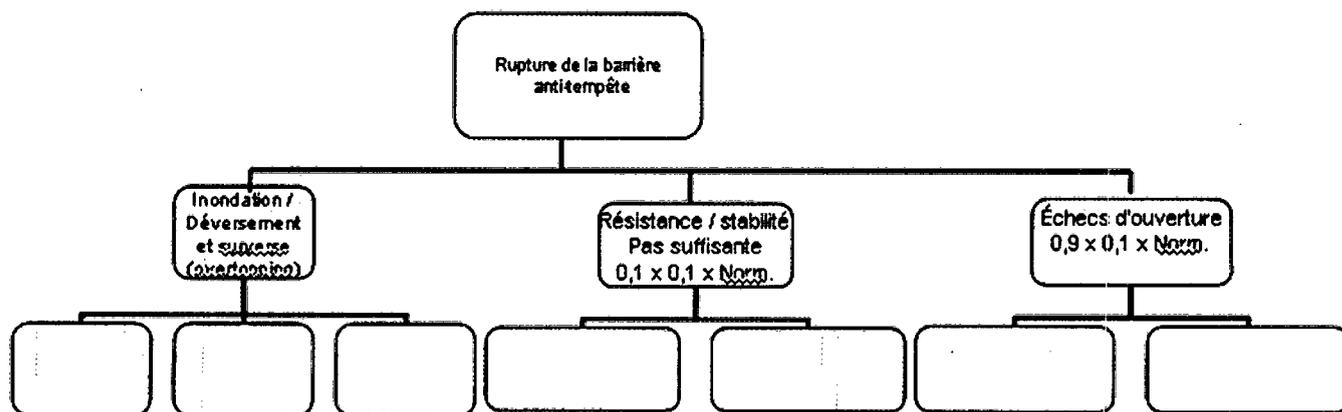


Fig. 5.26: Probabilité de ruine (erreur) de l'arbre des défauts et des événements d'une barrière anti-tempête

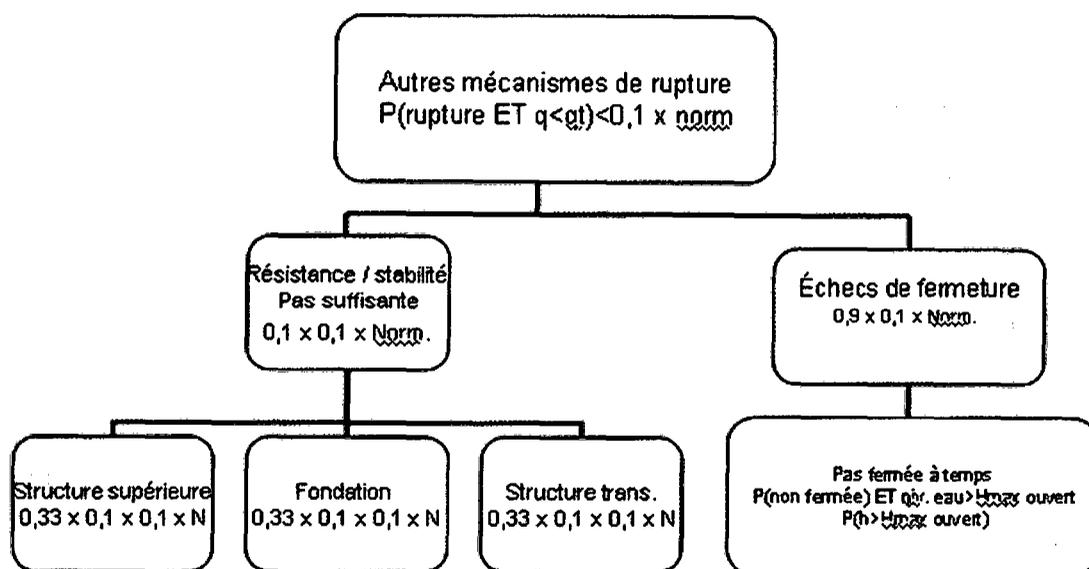


Fig. 5.27: Arbre des défauts, quantifié, d'une barrière anti-tempête

Note: $H_{max\ ouverture}$ = niveau d'eau maximum admissible (avec une barrière ouverte) qui ne cause pas d'inondation ;

N = norme (probabilité de retour) admissible pour la défaillance globale de la structure.

Le deuxième critère (Fig. 5.27) concerne la probabilité de ruine/non-fonctionnement de tous les autres mécanismes. Cette probabilité doit être très faible (cela se traduit dans l'exemple des figures 5.25 et 5.27 par une valeur maximale de 10 % de la probabilité de débordement (1er critère— soit de la norme).

Du fait qu'il est généralement plus difficile de satisfaire l'opération de fermeture en terme de probabilité de non-fonctionnement, en comparaison au domaine de ruine pour la perte de résistance/stabilité qui peut plus facilement être défini, la Hollande fixe le domaine de non-fermeture à 1 % de la norme et à 9 % celui du critère lié à la résistance/stabilité (Fig. 5.27).

5.6.4.6 Fiabilité vis-à-vis de la stabilité/résistance

A la Fig. 5.27, une probabilité de retour de 1 % de la norme (0,1 x 0,1) est considérée pour la ruine causée par le non respect des critères de stabilité/résistance de la barrière. Le procédé pour vérifier si ce critère de fiabilité est satisfait se fait comme suit :

- Déterminer les conditions de conception ;
- Déterminer les propriétés de l'ouvrage et (d'une partie) des mécanismes ;

- Déterminer les états limites ;
- Etablir l'arbre des défauts de l'ouvrage ;
- Déterminer les valeurs cibles de non-fonctionnement (ruine) et vérifier si celles-ci sont respectées pour tous les états limites en utilisant une méthode (semi-) probabiliste ;

5.6.4.7 Faisabilité des opérations de fermeture

Dans l'approche ci-dessus, une plus grande probabilité d'erreur est attribuée à l'échec dû à l'impossibilité de fermer (l'ensemble ou une partie) les portes/vannes. Dans l'exemple l'espace de ruine attribué à ce mode de ruine est de 9 % de la norme.

Les mesures à prendre pour satisfaire ce critère dépendront plus du type de vannes que du critère de stabilité. Généralement la fermeture des vannes d'une barrière peut échouer en raison d'erreurs humaines et/ou techniques.

La probabilité d'erreurs humaines peut être réduite en :

- Réalisant ou améliorant les procédures et les conventions ;
- Améliorant la relation homme/machine ;

- Rendant les erreurs humaines détectables et corrigibles,
- Améliorant la formation du personnel effectuant la fermeture de la barrière ;
- Contrôlant les actions par des systèmes techniques.

L'échec technique de l'opération de fermeture peut être dû à des défaillances mécaniques, électriques, ou électroniques. Ces systèmes peuvent ne pas fonctionner correctement pour les raisons suivantes :

- Ils ne sont pas opérationnels au moment de la fermeture: le taux «moyen» d'échecs des composants dépend du plan d'entretien. Il est par contre assez difficile d'estimer la probabilité d'un non-fonctionnement pour des raisons imprévues (non définies à ce jour) ;
- Ils ne fonctionnent pas au début de la fermeture : au moyen d'une description du système et d'une analyse des données, on peut montrer que chaque élément a une probabilité de fonctionnement non nulle lors de la mise en route. L'influence sur le non-fonctionnement global est détectée par l'arbre des défauts,
- Ils tombent en panne pendant la fermeture : la même remarque qu'au point précédent peut être faite. On doit également étudier l'impact d'une réparation pendant la fermeture, si elle est possible.

Généralement, l'analyse technique de la non-fermeture peut être effectuée de diverses manières. Théoriquement, une analyse détaillée peut être faite au moyen d'un arbre des défauts, en descendant au niveau de chaque composant élémentaire du système mécanique, électrique et électronique. Des bases de données avec les taux de non fonctionnement des différents composants existent dans l'industrie et permettent le calcul du taux global d'échec/ruine. Toutefois, dans la pratique, l'impression générale sur les barrières existantes est que ces taux standards d'échec sont valides dans des circonstances contrôlées mais ne sont pas facilement applicables dans la pratique pour l'évaluation du taux d'échec dans des circonstances moins contrôlées (voir extrêmes) telles que c'est le cas avec une barrière anti-tempête.

5.6.5 APPLICATION DE L'ANALYSE DU RISQUE: APPROCHE SIMPLIFIEE DU RISQUE POUR LES BARRAGES MOBILES

Le British Waterways (BW) propose l'approche simplifiée suivante pour classer les risques des structures hydrauliques comme les écluses et les barrages mobiles.

Un nombre de 1 à 5 est employé pour quantifier les conséquences potentielles si l'ouvrage est défaillant. Le Tableau 5.6 propose une classification des conséquences d'un non fonctionnement/ruine (en 5 catégories). En général, de telles classifications sont plutôt simplistes et ne tiennent pas compte des variations du risque potentiel lié aux différents types de biens.

Les tableaux 5.7 à 5.10 (pages suivantes) fournissent des informations complémentaires et proposent pour 5 types d'ouvrages, dont les barrages mobiles, une classification des conséquences d'un non-fonctionnement/ruine. Notons que des classifications similaires pour 15 autres types d'ouvrages sont proposées par le British Waterways (BW).

5.7 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET ESTHETIQUES

5.7.1 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Il est recommandé que les clients, les concepteurs et les autorités de planification soient conscients de l'impact du cycle de vie de leur ouvrage. Il serait en effet contre productif qu'une structure ou un ouvrage soit économiquement intéressant au stade de sa construction, mais soit jugé trop coûteux au niveau de son utilisation (opération) et induise ainsi des problèmes de déchets et des nuisances au niveau de son démantèlement.

De même, il est important de considérer «l'empreinte environnementale globale du projet» et pas uniquement les facteurs concernant l'emplacement de la construction et de l'exploitation. Par exemple, il faut éviter de spécifier dans le cahier des charges des espèces de bois de construction ou des types de pierres dont les origines ne sont pas durablement contrôlées et/ou qui exigent un transport sur de longues distances. A la place, il faut promouvoir dans les spécifications les innovations et rechercher des matériaux locaux et/ou dont l'exploitation est contrôlée (et durable).

Catégorie	Personnes	Territoires et zones environnantes	Valeurs des propriétés affectées
5	Morts multiples	Inondation urbaine fort étendue ($> 0,5 \text{ km}^2$)	Plus de 5M£
4	Domages multiples et sérieux Un seul mort	Inondation d'une petite communauté	2M£ à 5M£
3	Blessés sérieux (1 à 2 victimes)	Rupture d'une voie majeure de transport. Inondation répandu des terres agricoles : ($> 0,5 \text{ km}^2$)	250k£ à 2M£
2	Plusieurs blessures mineures	Inondation limitée à des jardins. Inondation limitée des terres agricoles ($< 0,5 \text{ km}^2$) Rupture d'une voie mineure de transport	25k£ à 250k£
1	Une seule blessure mineure	Infiltrations dans des jardins et terres agricoles Pas de conséquences	1k£ à 25k£

Tableau 5.6 : Classification des conséquences d'un non fonctionnement/ruine (1£ = 1,50 €)

Déversoirs et canaux de dérivation	Le but de ces structures est de permettre l'évacuation de précipitations exceptionnelles afin d'éviter le débordement du canal et l'ouverture d'une brèche dans une digue. Si une brèche se produit, les canaux de dérivation et les déversoirs du canal peuvent être utilisés pour atténuer l'effet de l'inondation. Nous considérons ici l'effet de la ruine/non-fonctionnement de la structure et des conséquences de son non-fonctionnement vis-à-vis des fonctions pour lesquelles elle a été prévue. La ruine d'un système d'évacuation n'est pas susceptible de conduire à des conséquences graves au contraire d'un déversoir.	
	5	Pas applicable
	4	Inondation de secteurs urbains
	3	Inondation de villages
	2	Inondation de routes et de chemins de fer, de première importance
	1	Inondation rurale et des routes mineures
	Lorsque l'on classe un incident dans une de ces catégories, il faut tenir compte des aspects suivants : <ul style="list-style-type: none"> - La longueur du bief et du volume d'eau qui pourrait s'échapper ; - Le nombre d'écluses et de déversoirs dans le bief et la pertinence de la structure considérée, - La longueur déversante du déversoir ; - La localisation de l'incident dans le bief vis-à-vis des apports en eaux, des digues, des zones urbaines, etc ; - La connaissance locale et l'expérience opérationnelle - par exemple : l'évacuateur a-t-il été régulièrement utilisé ?; - Adoption d'une position pragmatique. 	

Tableau 5.7: Conséquences d'un non fonctionnement/ruine des déversoirs et canaux de dérivation

Batardeaux et portes de garde/secours	En cas de brèche, les batardeaux et portes de garde/secours peuvent être employés pour réduire la perte en eau et les dommages en limitant la longueur des biefs. Certains canaux possèdent des portes à chaque extrémité du bief. Assez régulièrement les portes busquées (conçues comme des fermetures de secours) ne sont pas en état de fonctionner à cause de l'envasement.
	Certaines rivières de navigation, par exemple les rivières Calder et Hebble possèdent un système de contrôle des inondations. Ceux-ci sont semblables aux barrières de protection contre les inondations mais ils coupent également la navigation. L'effet d'un incident conduisant au débordement et de ce fait à l'inondation doit être pris en compte.

Tableau 5.8: Conséquences d'un non fonctionnement des batardeaux et portes de garde/secours

Barrages mobiles en rivière	Les aspects à considérer ici sont la proximité de la navigation du déversoir (barrage mobile), la probabilité d'une ruine catastrophique, l'effet d'une vidange rapide du bief amont, la possibilité d'inondation en aval si la rivière possède une (trop) faible revanche et la possibilité d'érosion.	
	4, 5	Pas applicable
	3	Navigation à proximité de la tête du déversoir
	2	Les déversoirs pour lesquels une vidange rapide de la retenue amont et une érosion rapide dans les secteurs urbains peuvent se produire
	1	La plupart des déversoirs

Tableau 5.9: Conséquences d'un non fonctionnement des barrages mobiles en rivière

Ecluses (ayant aussi un rôle de régulation des écoulements)	<i>On considère par exemple ici le cas d'une écluse de navigation où les bajoyers sont dans un état tel qu'un bateau de gros tonnage puisse faire tomber de la maçonnerie sur un plus petit bateau. Dans ce cas, les conséquences d'une ruine sont plus grandes que 1. Sur la majorité des voies navigables, ce n'est heureusement pas le cas.</i>
	<i>Dans le cas d'écluses en rivière, pour lesquelles il est imaginable qu'un bateau puisse démolir les portes inférieures (aval), les dommages aux tiers sont faibles car l'équipage a, en principe, le temps de se mettre à l'abri.</i>
	Les cas où une défaillance des portes de sécurité peut conduire à des conséquences supérieures aux conséquences minimales (catégories 1 et 2 ci-dessous) sont :
	- Ruine des portes d'un bief d'une zone urbaine maintenu normalement sous le niveau de crue d'une rivière ; - Les écluses où la ruine des portes pourraient conduire à une brèche dans le canal et/ou affecter les bâtiments adjacents.
	Ces aspects doivent être considérés selon les spécificités de chaque cas particulier.
On considère également ici la longueur du bief en amont de l'écluse et le fait que les barrages en aval puissent (ou non) faire face au volume d'eaux qui pourrait être libéré.	
5, 4, 3	Non fonctionnement des portes de sécurité ou de contrôle
2	Les habitations sont affectées
1	C'est le cas de la plupart des écluses

Tableau 5.10: Conséquences d'un non fonctionnement des écluses (barrières)

Parmi les nombreuses alternatives techniques et les diverses conceptions, la reconnaissance de l'importance de respecter les standards environnementaux les plus sévères, permet de faire émerger un concept parmi tant d'autres.

Les charges environnementales qui doivent être considérées comprennent :

- Le stockage et la manipulation de tous les matériaux ;
- Les matériaux de construction ;
- Les matériaux, ressources et énergie requis pour opérer l'ouvrage ;
- Les impacts, en particulier la production de déchets comme par exemple lors du sablage des surfaces à peindre et/ou à réparer et particulièrement si ces travaux de peinture se font sur sites, dans le milieu naturel.

Certaines des normes britanniques telles que les normes de l'Institution des Ingénieurs Civils CEEQUAL, les normes BREEAM pour des bâtiments et celles de l'Environment Agency fournissent beaucoup de conseils utiles (<http://www.ceequal.com/> et <http://www.bre.co.uk/>).

Une conception environnementale intelligente considérera également l'impact de l'installation du chantier dans la communauté urbaine. Les facteurs qui doivent être considérés comprennent :

- L'importance des changements vis-à-vis du régime naturel des marées ou des écoulements fluviaux. Un impact important est potentiellement mauvais, un impact réduit est susceptible d'être l'optimum (une interaction avec moins de 15 % de la section transversale naturelle est souvent vue comme un objectif raisonnable). Il faut modéliser l'effet dynamique de la nouvelle structure sur le milieu naturel.
- Les perturbations physiques sur les hommes, les poissons, les oiseaux et autres écosystèmes doivent prendre en compte les effets sonores, la lumière et la pollution chimique. Le client ou l'autorité de planification peut légitimement vouloir retirer un gain environnemental du projet - équipements nouveaux ou améliorés, zones d'habitation plus grande ou plus diversifiée.

5.7.2 ESTHETIQUE

De par sa nature, l'esthétique est très subjective. Un système de classification assez général est de considérer les trois grandes catégories suivantes :

- Impact mauvais ou négatif,
- Impact moyen ou acceptable,
- Impact bon ou apportant même une valeur ajoutée.

Pour toute structure de grande ampleur, nous recommandons qu'une vue artistique (photo montage) soit réalisée afin de fournir une «vision» des options possibles. Ces vues artistiques ont plusieurs rôles tels que :

- L'évaluation des options et l'optimisation de la solution préférée ;
- Satisfaire les espérances du client, des dépositaires ou de l'autorité de planification ;
- L'utilisation comme guide visuel et conceptuel pour l'équipe de conception.

Il est recommandé d'inclure des architectes paysagistes et structuraux parmi les membres de l'équipe de conception.

Les installations dans des sites urbains ou visités par un grand public à des fins touristiques (navigation, marche, vélo, observation des oiseaux, etc.) peuvent nécessiter une attention plus particulière pour une intégration paysagère soignée que des installations «classiques», plus rarement visitées/vues.

Quelques exemples d'infrastructures/projets qui peuvent entrer dans la catégorie des bons projets ayant une valeur ajoutée au niveau de l'environnement/l'esthétique, sont :

A) La barrière de la Tamise, Londres

Des informations techniques détaillées sont disponibles sur le CD (voir Project Review, Répertoire A1 et Répertoire /B7-Flood Protection in UK/).

Les points clés de l'intégration de la barrière de la Tamise sont :

- L'absence de superstructure et de mécanisme est favorable à la réduction des restrictions sur la navigation, ce qui signifie également que la structure est basse et discrète ;

5.7.3 REMARQUES

- La forme des couvertures des piles et mécanismes fait penser à des structures maritimes, par exemple à des bateaux retournés, ce qui favorise l'intégration de la structure dans son milieu ;
- Les toitures sont recouvertes d'acier inoxydable qui agit comme un miroir reflétant les couleurs du ciel et de l'eau. Le volume de cette structure massive est réduit au minimum en imitant « les apparences de la lumière ambiante et du climat ».

B) La barrière anti-tempête de Rotterdam (Maesland)

Des informations techniques détaillées sont disponibles sur le CD (Répertoire /A1-Project Review .../).

Les principaux aspects liés à son intégration sont :

- L'absence de mécanisme et superstructure afin de réduire au minimum les restrictions de la navigation, a conduit à une structure devant pivoter autour d'un axe horizontal inférieur, ce qui a permis de réduire au minimum l'impact sur le paysage ;
- Les bâtiments de la structure et de support sont de couleur sable pour se fondre dans l'environnement de l'estuaire environnant ;
- La partie structurelle de la barrière reste apparente, ce qui contribue pour beaucoup, à l'attrait touristique créé par le gigantisme de la structure.

Les concepteurs/architectes sont habituellement peu disposés à mettre en évidence ce type de structures pour éviter un impact négatif au niveau visuel, comme les sites où le volume de la structure est important, où la couleur, la texture et le profil de la structure ne s'accordent pas avec leurs environnements. Fréquemment de telles structures sont industrielles et ont simplement des formes fonctionnelles. Toutefois, dans certains cas, un ouvrage industriel peut être beau et valorisé un site.

5.8 COÛT (Construction, Maintenance et Fonctionnement)

Le coût global pour la construction d'un barrage de navigation est lié aux impositions physiques du site (géologie, hydraulique, sédimentation, esthétique, etc.) et au type de barrages adopté (porte clapet, avec seuil, etc.). La Fig. 5.28 présente les différentes étapes d'un projet de barrage comprenant la conception, la construction, l'exploitation et la maintenance.

Mais, pour obtenir une vraie évaluation du coût, le coût de fonctionnement et le coût d'entretien et de maintenance doivent également être pris en considération ; ces coûts dépendent du niveau de sécurité fixé. On parle dans ce cas de « coût global ».

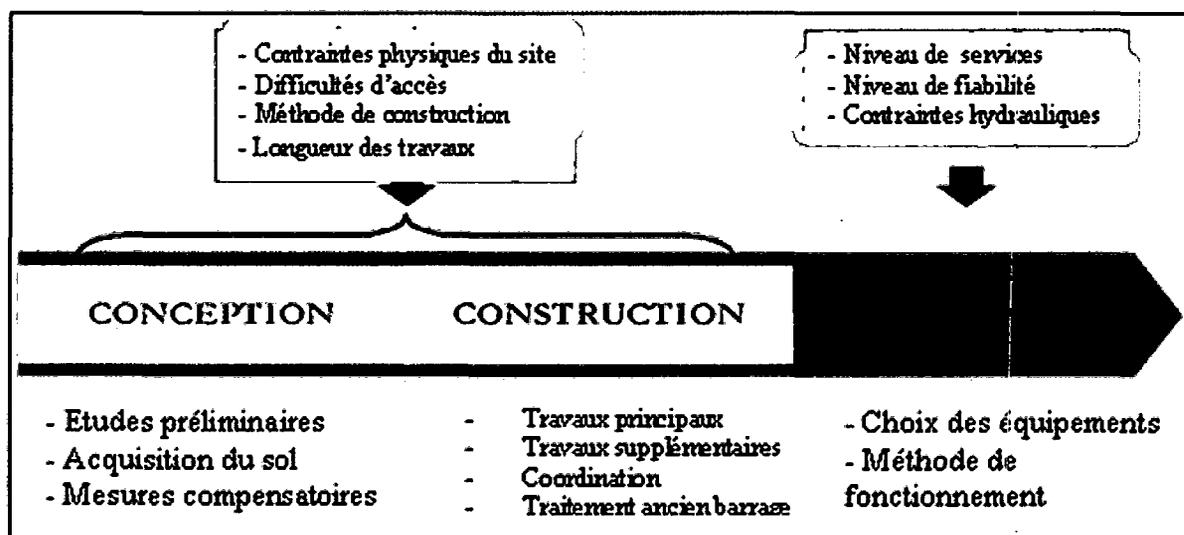


Fig. 5.28: Etapes d'un projet de barrage : Conception, Construction, Fonctionnement et Maintenance

5.8.1 COUT GLOBAL

Selon la charge hydraulique, les caractéristiques du site (zone rurale ou urbaine) et le type de barrages, on estime que le coût de construction d'un barrage de navigation en France est compris entre 35 k€ et 200 k€ par mètre linéaire de bouchure (taxes comprises). Comme référence (source : le service de la Seine, VNF, France), des barrages récemment construits avec des vannes clapets de 17 m x 3,50 m et manoeuvrés par des moteurs électriques et des chaînes ont coûté 60.979,61 € par mètre linéaire (valeur 1992). La Fig. 5.29 présente une comparaison des prix unitaires relatifs à trois barrages de navigation, français, de petite taille : Le Vezoult (sur la Seine) : 3 passes avec une vanne clapet ; un nouveau barrage de navigation à Villevallier (sur la rivière Yonne) : 2 passes avec une vanne clapet ; barrage construit en amont du précédent (utilisé en tant que support au nouveau) ; et le barrage du Roanne, qui est détaillé à la Section 5.8.3 et présenté sur la Fig. 5.30 (page 108).

La Fig. 5.29 présente une distribution des coûts plutôt homogène entre les différentes catégories de travaux. Par conséquent, une réduction des coûts peut concerner tous les aspects/matières : procédé de construction, optimisation des travaux du génie civil, dispositifs d'exécution, protection aval, vannes,...

Une étude (Daly, 1995) sur les coûts de construction d'un barrage fut réalisée sur base de dix barrages français. Elle conduit à une formule empirique donnant l'ordre de grandeur du coût. Cette formule a été employée en France pour estimer l'importance du coût dans un programme de reconstruction d'un barrage (cette formule n'est pas valable pour les barrières ou d'autres types de structures).

$$\frac{P}{L} = K (Ah + Bh^2) \quad (5.2)$$

où :

- P est le coût du barrage à l'exclusion des travaux d'approche (en euros, sans impôt, valeur 1994) ;
- L est la longueur totale du barrage, entre les butées, en mètres ;
- h est la profondeur maximum de l'eau en amont (au-dessus du seuil), en mètres ;
- K est un coefficient variant de 0,6 à 1,4 qui prend en compte les travaux auxiliaires (mesures

compensatoires, voie d'accès, raccordement avec les berges de la rivière, etc.) et les caractéristiques du site (le coût variant selon la région, etc.). K prend partiellement en compte la durée du cycle de vie et le facteur de la sécurité à employer dans la conception. Ce coefficient inclut une incertitude de 40 % sur l'évaluation ;

- A et B sont des constantes empiriques avec A = 6,070 € et B = 1,821 €. Ces paramètres ne sont nullement des valeurs universelles et doivent être validées par chaque utilisateur potentiel.

Nature of Expenses (%)	Sites		
	Le Vezoult	Villevallier	Roanne
A- MAIN WORKS	76	80	86
A1- Civil	46	52	47
Installation	4	10	9
Earth works	22	20	26
Structure	20	22	12
A2- Equipements	30	28	39
Gates	18	15	25
Mechanism	12	13	14
B- ADDITIONAL STRUCTURES	24	20	14
TOTAL (%)_(A+B)	100	100	100

Fig. 5.29: Distributions du coût (en %) pour 3 barrages de navigation de petite taille en France

5.8.2 ESTIMATION DU COUT DE CONSTRUCTION

Lors de l'étape préliminaire de conception (ou lors de l'étude de faisabilité), le coût de construction est estimé avec une incertitude de l'ordre 15 à 20 %. Pour obtenir une évaluation plus précise et fiable du coût, tous les éléments du barrage doivent être considérés. Les informations suivantes doivent être spécifiées :

- Le nom de l'organisation qui a réalisé la conception (département d'ingénierie, architecte) ;
- L'emplacement du barrage ainsi que les coûts de la main-d'oeuvre et même la matière première (comme le béton) varient de région en région ;
- Les méthodes de construction (batardeau, planification par phases, préfabrication, etc.) ;
- Les accès existants (routes) jusqu'au site ;
- La nécessité de mesures compensatoires environnementales et d'ouvrages annexes (passe à poissons, plantation, etc.).

BARRAGE DE ROANNE

Max. water head : 3.17m / Hauteur de retenue max. : 3,17m

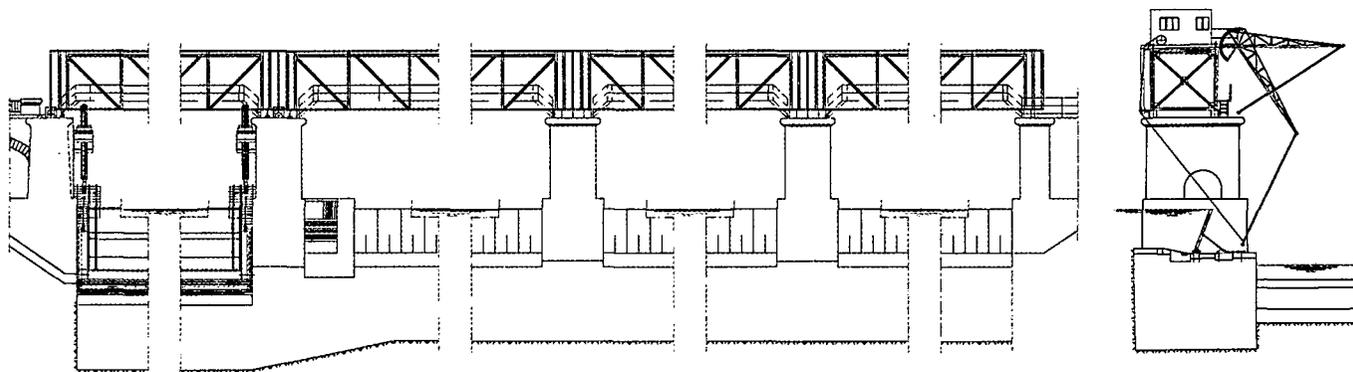


Fig. 5.30 : Barrage de Roanne (France)

Pour évaluer les différents coûts unitaires, il est nécessaire d'effectuer une évaluation préliminaire des quantités en jeu (volume, surface, longueur, etc.) et de se baser sur l'expérience acquise lors de la réalisation de travaux similaires.

5.8.3 EXEMPLE DU BARRAGE DE ROANNE

Le barrage de Roanne (France) donne un exemple de la distribution du coût (Fig.5.31, page suivante). Le barrage se compose de 4 passes équipées de hausses, avec une hauteur d'eau maximum de 3.17 m.

Pour reconstruire ce barrage, le procédé suivant a été employé :

- Le génie civil a été réutilisé et la conception originelle a été gardée ;
- La passe 1 a été rénovée avec une vanne clapet ;
- Les passes 2 et 3 : les anciennes vannes ont été remplacées par un système semblable à l'ancien ;
- La passe 4 n'a pas été modifiée.

5.8.4 BARRIERES ANTI-TEMPETES

La Fig. 5.32 montre la distribution des coûts entre les principaux types de travaux pour la barrière anti-

tempête du Nieuwe Waterweg (Voir Project Review). Bien que les barrages mobiles de navigation et les barrières de protection possèdent des éléments communs, ce sont des structures assez différentes. Ainsi, les données concernant les barrières ne peuvent être comparées aux données d'un barrage mobile. D'ailleurs, comme chaque barrière est un ouvrage unique, il n'est pas faisable d'extrapoler leur coût à partir des projets précédents.

Coûts totaux de la barrière du Nieuwe Waterweg	Valeur 2002 (Euro)	
Frais généraux Staff et administration générale, Etudes (géotechnique t hydraulique) Relations publiques, etc.	30 600 000	7,7%
Génie civil	189 800 000	47,74%
Constructions métalliques Y compris la livraison, l'assemblage et le montage de tous les composants	142 000 000	35,71%
Electromécanique Parties mobiles de chaque porte, système de manoeuvre, système de contrôle des vannes	35 200 000	8,85%
TOTAL HORS TVA (€)	397 600 000	100,00%
TVA	83 496 000	21,00%
TOTAL AVEC TVA (€)	481 096 000	

Fig. 5.32: Distribution des coûts pour la barrière de Nieuwe Waterweg (Rotterdam, Pays-Bas)

Eléments	Description	Coût (%)
E100	Etudes préliminaires et investigations supplémentaires	(*)
E200	Acquisition des terres	(*)
E300	Mesures compensatoires (provisions)	(*)
E400	Structures principales	
	Génie civil	47.17%
	Préparation des terres et amenée d'énergie	(*)
	Préparation du site	9.40%
	Mobilisation et installation	9.40%
	Dragage	0.52%
	Dragage amont	0.52%
	Batardeaux et terrassements	25.66%
	Remblai compacté/enrochements amont du radier béton	2.67%
	Protection en enrochement du radier de protection aval	10.71%
	Batardeau amont durant les travaux	6.21%
	Batardeau aval durant les travaux	5.95%
	Géotextile	0.11%
	Piles et radier	10.10%
	Béton	6.14%
	Coffrages	1.59%
	Armatures	1.44%
	Ancrage	0.90%
	Ancrages dans les piles pour les vérins	
	Ancrages actifs dans les piles	
	Piles	(*)
	Cutées	(*)
	Radier	(*)
	Parafouille éventuel	(*)
	Protections amont et aval	(*)
	Restauration de la surface des digues	1.48%
	Engazonnement	0.18%
	Maçonnerie	1.30%
	Equipements	39.13%
	Dispositifs de fermeture (bouchures)	24.95%
	Vanne (nb 4) - clapet	10.72%
	Rénovation des vannes pour les passes 2 & 3	14.23%
	Système de manœuvre	7.09%
	Vanne (nb 4) - avec vérins	2.62%
	Chariot de manœuvre pour les passes 2 & 3	4.47%
	Batardeau d'exploitation	5.24%
	Barrage flottant de protection	5.24%
	Equipements électriques	1.85%
	Equipements électriques	1.85%
	Automatismes	(*)
E500	Structure additionnelle	6.92%
	Local technique	0.40%
	Travaux de sécurité du local technique	0.40%
	Passerelle ou pont	6.29%
	Réhabilitation de la passerelle	6.29%
	Echelle à poissons	0.23%
	Rénovation de l'échelle à poissons en rive droite	0.23%
	Passerelle à canoës-kayaks	(*)
	Protection de la berge aval	(*)
	Travaux métalliques	0.37%
	Echelles et gardes-corps	0.19%
	Conduites de refoulement de 200mm de diam. et vannes	0.18%
E600	Traitement de l'ancien barrage	6.41%
	Démolition	2.61%
	Démolition ouvrage en maçonnerie et en béton	2.61%
	Travaux de maçonnerie	3.80%
	Réfection et rejointoiement de pierres/briques	1.29%
	Comblement de lacunes	0.12%
	Réfection des enduits au ciment	0.11%
	Clouage nouveau béton sur ancien béton/maçonnerie	0.83%
	Ancrage du radier dans la maçonnerie	1.46%
E700	Maîtrise d'œuvre et coordination de la sécurité et de l'hygiène	(*)
E800	Aléas et imprévus	(*)
	TOTAL (Hors TVA)	100%

(*) Eléments non considérés dans cet exemple de reconstruction d'un petit barrage

Fig. 5.31 : Distribution des coûts pour le barrage de Roanne (reconstruction)

5.8.5 COUT DE MAINTENANCE

Les coûts d'entretien sont étroitement liés au fonctionnement et aux systèmes mécaniques choisis. Une évaluation de ces coûts peut être faite avec l'aide des fournisseurs et sur base de l'expérience acquise dans d'autres projets en matière de maintenance. Pour diverses composantes du projet, les coûts de maintenance ne sont généralement connus que lorsque la structure est mise en service. Mais ceci n'exclut pas la nécessité d'estimer ces coûts et de les intégrer dans le coût total du projet dès les études préliminaires de la conception. Ceci fournit une vue globale du coût total du projet.

L'utilisation des équipements de surveillance (lecture de niveau, verticalité, contraintes, déformations, usure, température, consommation d'énergie, etc.) et la sécurité du personnel lors de la réparation et/ou du remplacement de composant du système doivent être considérés dès le début du projet. De plus, les procédures de construction et les concepts structuraux prennent généralement en compte des travaux de maintenance en incluant des dispositifs particuliers.

De plus, la maintenance influence souvent la conception des ouvrages du génie civil, et a un impact sur le fonctionnement de l'ouvrage. Par exemple, un système de protection contre la corrosion peut être réalisé :

- soit avec des protections cathodiques (la longévité de l'anode approxime les 15 ans) ;
- ou soit en employant un système de peinture dont la longévité s'étend de 7 à 25 ans et parfois plus (50 ans).

En fait, ces travaux ou ceux concernant les zones d'usure submergées comme les anneaux en bronze des roulements des vannes clapets et les pièces d'étanchéité,...exigent l'installation d'une logistique assez lourde (drainage, sécurité, accessibilité et alimentation d'énergie). Le coût d'une préparation peut être plus élevé que le travail lui-même (remplacement, réparation). Pour limiter la maintenance, les structures sont parfois surdimensionnées (par exemple, l'ajout de 1-2 millimètres à l'épaisseur des plaques). L'examen, le contrôle et la maintenance des protections (amortissements) et des systèmes d'étanchéité (remblais, radier aval, piles, etc.) ne doivent pas être oubliés.

Enfin, un plan spécifique d'entretien doit être établi simultanément avec la construction. Un exemple de plan de maintenance est fourni sur le CD du GT-Répertoire /Annex Section 5.8 .../Maintenance Planning .../. Il concerne l'entretien de l'écluse de Lith aux Pays-Bas. Il inclut les coûts utilisés pour (ou durant) la planification et l'établissement du programme. Malheureusement ces évaluations correspondent seulement aux écluses et pas aux barrages/barrières, et sont essentiellement théoriques et ne sont pas encore vérifiées dans la pratique.

5.8.6 COUT DU FONCTIONNEMENT

Le coût du fonctionnement est un poste budgétaire qui peut être élevé. En 2004, la France compte toujours environ 150 barrages manuels (particulièrement des barrages à aiguilles et à hausses) où chaque opération exige entre 2 et 10 personnes. Pour évaluer ce travail, il faut établir des règles d'exploitation comme la variation (admissible) de la retenue amont (particulièrement pour les barrages de navigation).

Selon la complexité de ces règles, les concepteurs doivent considérer la possibilité d'employer l'automation et/ou un système de contrôle (fonctionnement à distance). En outre, il est important de penser à l'organisation du contrôle du barrage, à ses différents éléments constitutifs ainsi qu'à faire appel à des spécialistes pour cette tâche.

Si la structure du barrage doit s'adapter à de nombreux visiteurs et touristes, le coût additionnel en termes de mesures de sécurité, de personnel et d'infrastructure peut être significatif et doit être prévu.

5.8.7 PARTIE FINANCIERE

5.8.7.1 Planning financier

Lorsque beaucoup d'organismes sont impliqués (contrat de planification, programme de gestion des inondations, etc.) tout doit être contractuellement défini pour établir clairement l'organisation du projet et les engagements financiers de chaque partie. Les fonds pour les études, la conception, et les procédures administratives doivent être séparés du financement de la construction de l'ouvrage pour éviter un retard dans l'exécution du projet.

Echéancier financier de l'opération											
Prestations	Echéancier									Total	
	ANNEES 1				2		3		4.....5, ..6		
Etudes pré opérationnelles	1	1	1	1							
Etudes de projet et DCE											
Coordination de la sécurité (conception)											
Procédures administratives (dossier et publicité)											
Consultation des entreprises (dossier et publicité)											
Coordination de la sécurité (réalisation)											
Travaux (à décomposer)											
Totaux par trimestre	€	€	€	€	€	€	€	€	€	€	€
Totaux par année				€	€	€	€	€	€	€	€

Fig. 5.33 : Exemple de planning financier des travaux (Roanne, France)

Echéancier des travaux	Echéancier																									
Principales phases de l'opération	Mois																									
	3	6	9	12	15	18	21	24	...																	
Etudes pré opérationnelles																										
Levé topographique				1																						
Levé bathymétrique				1																						
Concertations avec les usagers de la voie d'eau				1																						
Consultation des concessionnaires de réseaux publics				1																						
Etude géotechnique					1		1																			
Consultation et passation d'un marché négocié pour l'exécution de l'étude d'impact					1		1																			
Etude d'impact avec étude hydraulique						1	1																			
Coordination sécurité "conception"							1																			
Consultation et passation d'un marché négocié pour l'exécution des études							1																			
Etude d'avant-projet (APS)							1	1																		
Procédures administratives																										
Consultation des usagers					1	1																				
Etude publique et application de la Loi sur l'eau							1	1	1																	
Arrêté préfectoral "Lois sur l'eau" autorisant la construction du barrage										1	1															
Déclaration de travaux pour le local technique												1														
Etudes opérationnelles																										
Etudes de projet					1	1																				
Commande aux soumissionnaires							1	1	1																	
Plan de maintenance avec commande du marché aux soumissionnaires								1	1																	
Plan opérationnel (provenant des études de projet)								1	1																	
Procédure financière																										
Demande d'autorisation d'opération (études)					1																					
Demande d'autorisation d'opération (travaux)												1														
Consultation des entreprises - Mise au point des marchés																										
Appel d'offres restreint (publicité et envoi de dossiers de candidatures)										1																
Ouverture des candidatures											1															
Analyse et sélection des candidats												1														
Phase de consultation des entreprises													1													
Ouverture des offres														1												
Analyse des offres															1											
Mise au point et signature du marché																1										
Exécution des travaux																										
Coordination sécurité "conception"																	1									
Notification du marché																		1								
Ordre de service de démarrage																			1							
Travaux préparatoires																				1						
Travaux de génie civil																					1					
Travaux de construction métallique																						1				
Hydraulique, électricité et automatisme																							1			
Réception des travaux																								1		
Mise en service du nouveau barrage																										1

Fig. 5.34: Exemple d'un planning des travaux d'un barrage mobile de navigation (Roanne, France).

En France, les coûts des études d'un barrage sont habituellement estimés comme étant un pourcentage du coût total, à savoir :

- 3% du coût global pour les études préliminaires concernant toute une rivière ou une tronçon de celle-ci où la construction de plusieurs barrages est projetée. Ces études peuvent durer 3 ans en raison de la collecte des données nécessaires ;
- 9% pour les études de projet comprenant la conception détaillée. Cette étape dure approximativement 2 ans et inclut l'offre ;
- 9% pour le contrôle et le suivi des travaux sur le site (1 ou 2 ans).

Les principales étapes (programme) d'un projet sont données à la Fig. 5.34 (page 111).

5.8.7.2 Le planning financier

La Fig.5.33 (Page 111) présente un exemple de planning financier global du projet. Il donne le coût estimatif pour chaque opération et par trimestre. Les mises à jour de ce plan pendant les études et les diverses opérations fournissent au chef de projet une feuille d'équilibre financier continuellement mise à jour. Dans cet exemple, la période de temps se rapporte à un trimestre mais pourrait varier selon la durée totale du projet.

C'est un document de planification pour aider l'équipe de projet, à obtenir, en temps utile, les autorisations appropriées pour avancer. Il donne également un aperçu du budget nécessaire au début de chaque année et de chaque trimestre (ou toute autre période de temps choisie).

6. OUTILS DE CONCEPTION ET D'ÉVALUATION

Cette section présente les outils de conception et de calcul couramment utilisés dans la pratique courante pour concevoir des barrages mobiles et barrières de protection. En outre, quelques outils nouveaux reposant sur des méthodes de calcul avancées sont présentés.

Ce chapitre repose sur un questionnaire envoyé à 20 bureaux d'études et entreprises, de 12 pays différents (Tableau 6.1). Environ la moitié de ces sociétés (5 publiques et 6 privées) ont répondu (Belgique, République Tchèque, Allemagne, Japon, Pays-Bas, R-U, Etats-Unis).

La liste des compagnies/organismes, le questionnaire et les réponses reçues, sont disponibles sur le CD-Rom dans le Répertoire /Annex Section 6/.

Le questionnaire se concentre sur les outils standards de conception et de calcul utilisés de nos jours pour concevoir les barrages mobiles et les barrières. Il reprend également les besoins de ces ingénieurs/concepteurs concernant des outils spécifiques et avancés prenant en compte les différents domaines liés à la conception qui deviennent de plus en plus variés (aspects économiques, techniques, environnementaux....).

Dans ce chapitre, les outils de conception sont classés par catégorie selon les différents problèmes techniques qu'un ingénieur rencontre durant la conception d'un barrage mobile/d'une barrière :

- (1) Logiciels de CAO pour les esquisses d'avant-projet, et ensuite les plans du projet ;
- (2) Outils d'avant-projet (sommaire, APS) comprenant déjà parfois des possibilités d'optimisation ;
- (3) Hydraulique : modèle d'écoulement et d'évaluation du débit ;
- (4) Modèles physiques en laboratoires ;
- (5) Calcul des sollicitations comprenant la pression dynamique de l'eau, le vent, la houle, la marée, la neige, la glace... ;
- (6) Outils de calcul et dimensionnement des structures métalliques ;
- (7) Outils de calcul et dimensionnement des structures en béton ;
- (8) Outils de calcul des fondations ;
- (9) Outils de vérification de la stabilité des structures flottantes (statique et dynamique) ;
- (10) Evaluation financière ;
- (11) Outils et logiciels spécifiques pour, par exemple, l'analyse de risque, l'étude d'impact environnementale, le SIG, etc.

	Compagnie	Pays	Domaines d'expertise	
1	AQUATIS a.s. (JSC)	Brno, République Tchèque	CAO, Hydraulique	
2	Bundesanstalt für Wasserbau	BAW, Karlsruhe, Allemagne	Struct Métallique Béton	
3	Port Design Standard Division National Institute for Land and Infrastructure Management Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Japon)		CAO Struct Métallique Fondation	Sollicitations Béton Fiabilité
4	Bureau d'Etudes Greisch (BEG) (Mr. De Ville V.)	Parc Scientifique du Sart Tilman, Liege, Belgique	CAO Struct Métallique Fondation Structure 3D	Sollicitations Béton
5	Black & Veatch Consulting Ltd (Mr. J. Waller)	Surrey, Royaumes Unis	CAO Sollicitations Struct Métallique	Hydraulique Fondation Béton
6	Ministère des transports, des travaux publics et de la gestion des eaux aux Pays-Bas, Division ingénierie civil	Bouwdienst Rijkswaterstaat Zoetermeer, Pays-Bas	CAO Struct Métallique Béton Structures flottantes Analyse financière	Hydraulique Sollicitations Fondation
7	British Waterways, Département des Ponts, (support technique aux autres dpts)	National Support Unit British Waterways Leeds, RU	CAO Struct Métallique Analyse financière	Fondation Béton
8a	International Marine and Dredging Consultants (IMDC nv)	Anvers, Belgique	CAO Sollicitations	Hydraulique SIG & autres
8b	Tractebel Eng; Environnement et sécurité, Énergie et solutions industrielles	Bruxelles, Belgique	Acier Béton SIG & autres	
8c	Tractebel Development Engineering	Bruxelles, Belgique	CAO Hydraulique Struct Métallique	Fondation Sollicitations Béton
9	INCA Engineers, Inc.	Bellevue (WA), USA	CAO Struct Métallique Structures flottantes Analyses financières	Hydraulique Béton Fondation Sollicitations
10	Université Technique de Brno	Brno, République Tchèque	Hydraulique	

Tableau 6.1: Liste des participants ayant répondu aux questionnaires.

Les outils, les spécificités et exigences des utilisateurs sont analysés en relation avec la finalité de l'outil. Pour chaque problème technique (voir points (1) à (11) ci-dessus), le GT propose une liste d'outils appropriés avec, si possible, des recommandations et une référence à des expériences antérieures (par exemple avec un lien aux Project Reviews). Selon l'étape de conception (concept,

avant-projet (APS), étude détaillée de réalisation) les problèmes spécifiques et les outils de calcul qui y sont associés sont présentés, y compris, par exemple, l'optimisation de la structure des vannes/portes, l'évaluation des coûts, les analyses non-linéaires, les grandes déformations, l'impact d'un choc avec un bateau, etc.

Les principales spécificités et domaines d'utilisation des outils sont brièvement décrits en faisant référence (voir Annex A) aux sites web (si disponibles). Plusieurs outils multi-usages, comme des programmes de calcul par la méthode des éléments finis (MEF) sont listés, ainsi que des outils spécialisés qui sont spécifiques à des applications/ problèmes particuliers.

6.1 TYPES D'OUTILS REQUIS PAR LES INGENIEURS ET CONCEPTEURS (sur base de l'enquête)

Dans cette section, pour chaque domaine technique (Sections 6.1.1 à 6.1.11), le GT présente les résultats de l'enquête (outils utilisés, exigences de l'utilisateur, besoins de l'utilisateur...). Selon l'opportunité, le GT suggère quelques outils (les plus utilisés, les outils innovants...).

En général, le GT a essayé d'éviter de citer explicitement le nom des logiciels. Néanmoins, des noms commerciaux sont parfois cités pour faciliter leur classement. Les logiciels nommés sont seulement donnés à titre d'exemple (pour donner une idée) et cela ne signifie pas que ces outils soient meilleurs que d'autres mais uniquement que leur utilisation est bien répandue. En outre, les listes ne sont pas exhaustives; elles donnent uniquement un aperçu d'une sélection basée sur, uniquement, 11 participants de 7 pays.

6.1.1 LOGICIEL CAO POUR LES ESQUISSES D'AVANT-PROJET ET PLANS DU PROJET

Les logiciels de CAO (conception assistée par ordinateur) sont employés durant toute la durée d'un projet, depuis la conception et les premiers plans de principe jusqu'à la documentation et les plans finaux de fabrication.

De nos jours, les concepteurs utilisent souvent des modèles paramétriques et des logiciels orientés objets pour les études de détail (comme ProEngineer, CATIA, SolidWorks, Solid Edge, etc.). Ensuite, les modèles réalisés avec ces programmes de CAO peuvent facilement être utilisés pour réaliser des fiches documentaires, les programmes de fabrication (CADCAM) ou utilisés comme support/ données en vue de la modélisation et du calcul des structures avec des codes aux éléments finis.

En se basant sur l'enquête, on observe que l'exigence principale de l'utilisateur est d'avoir un outil de CAO ayant les fonctionnalités suivantes :

- Entités (lignes, cercles, arcs, etc.),
- Surfaces 2D,
- Solides 3D.

Le logiciel d'exploitation (Windows XP, NT, Unix, etc.) est également une exigence importante de l'utilisateur.

Les fonctionnalités de CAO moins souvent requises sont :

- Les composants (roulements, pièce de jointement, vis...);
- Les pièces mécaniques de conception (articulation, axe...);
- Les systèmes de conception de tuyauterie et de l'électromécanique;
- L'existence d'interface avec des codes de calcul (éléments finis...);
- Outils de visualisation, de sorties graphiques (JPG, PDF,...).

Les logiciels les plus souvent cités sont *AUTOCAD* (85 %) et *MICROSTATION* (50 %) (parmi une liste de plus de 15 logiciels).

Commentaires du GT :

Tous les participants de l'enquête ont mentionné qu'ils utilisent des outils de CAO dès le début des études d'avant-projet (APS). Ces outils de CAO sont utilisés pour définir le plan d'implantation, la géométrie principale, etc. Dans un premier temps les dimensions principales sont définies (portée, forme du radier et vues en élévation, dimensions et forme des piles, etc.), puis les portes, vannes, pièces mécaniques et électromécaniques sont représentées. La CAO peut également être employée comme un outil afin d'évaluer les quantités (volume de béton, la surface d'un mur, la longueur de soudures...) et finalement le coût.

6.1.2 OUTILS DE CONCEPTION EN PHASE D'AVANT-PROJET (APS)

La question était de savoir si des concepteurs utilisent ou souhaiteraient utiliser des outils spécifiques à l'étape d'avant-projet (analyse de faisabilité, conception préliminaire, APS...).

L'étude montre qu'environ 50 % utilisent des outils spécifiques de conception préliminaire afin :

- De dimensionner les vannes et portes, avec par exemple le logiciel LBR5 (outil de dimensionnement sommaire des vannes et portes) ;
- D'étudier les aspects hydrauliques (écoulements...)

Mais seul 10 % utilisent à ce stade des outils spécifiques pour :

- Évaluer le coût,
- Optimisation la structure (sur base du coût).

Commentaires et recommandations du GT

A) Utilisation d'une analyse directe

L'utilisation d'outils de conception avancés à l'étape préliminaire de conception est maintenant un procédé courant pour la conception des bâtiments, des ponts mais également dans l'industrie offshore et navale.

En revanche, pour des ouvrages hydrauliques comme les barrages mobiles, l'enquête a confirmé qu'en 2004, la pratique courante au niveau de l'avant-projet était de ne pas utiliser d'outils de calcul dits directs (sauf dans certains pays comme les Pays-Bas pour les barrières de protection). Trop souvent, la conception d'un ouvrage lors de l'avant-projet (y compris le choix du type de barrages et la détermination des grandes dimensions) est uniquement basée sur l'expérience antérieure des concepteurs et de projets antérieurs. Il est classique de choisir un type de barrages sans effectuer une étude approfondie sur le «meilleur type». La tradition ou l'existant semble être le critère prépondérant.

Quand les aspects techniques comme la vitesse de l'écoulement, le débit, l'état de contraintes dans les structures et fondations, les sollicitations... doivent être évalués, des formules simplifiées peuvent être utilisées au niveau de l'APS. Chaque bureau d'études (ou chaque pays) semble posséder ses habitudes et disposer d'une série de règles de bonne pratique (celles-ci étant généralement conservatrices).

Une telle pratique, en particulier pour les ouvrages hydrauliques comme les barrages mobiles, ne laisse toutefois pas assez de place à l'optimisation

et à l'innovation. Il est en effet difficile de développer un concept innovant si la conception est principalement basée sur la tradition et l'expérience.

Pour le futur, le GT recommande que les procédures de conception des barrages mobiles continuent à intégrer les expériences antérieures mais soient également basées sur des analyses directes. Ceci signifie qu'il est souhaitable que les ingénieurs utilisent de plus en plus d'outils de calculs et de dimensionnement dès les étapes préliminaires de conception. Ceci nécessite évidemment qu'ils soient au courant des outils spécifiques à l'avant-projet (APS) qui sont disponibles sur le marché.

B) Comparaison entre les études d'avant-projet et les études de détail

Il est nécessaire de différencier les outils d'avant-projet (qui sont généralement des outils spécifiques à la conception) des outils d'analyses détaillées (traditionnellement utilisés pour valider une conception existante – il s'agit typiquement de grands logiciels commerciaux éléments finis - MEF), mais aussi de formulations simplifiées (qui reposent sur les règles de bonne pratique). D'une part, l'utilisation d'un logiciel classique d'éléments finis à l'étape d'avant-projet ne s'accorde habituellement pas avec la durée de la phase de l'avant-projet ni surtout avec le budget disponible. D'autre part, l'utilisation des règles de bonne pratique, traditionnelles et fort simplistes, ne permet pas au concepteur d'optimiser et de concevoir des structures innovantes. Il est donc recommandé que les concepteurs utilisent des outils d'analyse spécifiques particulièrement conçus pour l'étape de conception préliminaire (rapide, flexible et facile à utiliser). Ces méthodes doivent permettre une comparaison aisée des variantes et une modélisation rapide de nouvelles variantes arrivant même durant les étapes de l'avant-projet

C) Utilisation de logiciels nouveaux favorisant l'innovation

Il est malheureux de parfois entendre de la bouche d'ingénieurs expérimentés : *« nous ne pouvons pas effectuer une telle analyse au niveau de l'avant-projet, nous n'avons pas le temps, nous n'avons pas toutes les données, les outils ne sont pas adaptés... »*. Un tel constat est vrai pour les modèles mathématiques traditionnels, souvent lourds et longs à mettre en œuvre, mais cela n'est plus vrai avec une

nouvelle génération d'outils qui permettent par exemple une optimisation dès l'avant-projet du poids et/ou du coût de construction. De tels modèles ont été développés en utilisant des modèles mathématiques simplifiés reposant sur une évaluation structurelle rapide de l'état des contraintes et des déformations (plastification, flambement, etc.).

Par exemple, pour la conception des vannes des barrages et barrières, il existe à présent un logiciel spécifique (Rigo, 1999 et 2000) qui :

- permet une évaluation rapide de la résistance ;
- réalise une évaluation automatique du coût de construction de la structure ;
- compare des conceptions alternatives en se basant sur leur résistance, poids et coût (outil d'optimisation multi objectifs) ;
- réalise automatiquement le dimensionnement (épaisseurs des tôles/plaques, dimensions des raidisseurs et des cadres), en vérifiant le respect des impositions structurelles et tout en veillant à minimiser/maximiser les fonctions objectives (coût, poids, sécurité, rigidité, etc.).

D) Evaluation du coût

L'évaluation du coût est un souci majeur pour les concepteurs. Malheureusement il ne semble pas que ceux-ci aient la capacité ni l'opportunité d'évaluer le coût lors des étapes préliminaires de la conception. Ceci signifie que le choix entre les variantes possibles est souvent basé sur des évaluations très sommaires et/ou repose typiquement sur l'expérience de l'ingénieur responsable. Pour le futur, nous recommandons que les procédures de sélection reposent sur des outils spécifiques permettant l'évaluation des coûts, l'analyse du risque et une analyse multicritères (voir Section 4). Le logiciel ESQUIVANNE dédié aux barrages mobiles de navigation (Rigo et al. 2006) est un exemple typique du développement d'outils spécialisés d'avant-projet (APS) intégrant une évaluation rapide du coût.

Des outils d'optimisation sont aujourd'hui disponibles mais les concepteurs sont peu disposés à les employer puisque la plupart des contrats sont établis en Euro/kg ou Euro/m³. Par conséquent, il n'y a pas de motivation financière pour les constructeurs pour concevoir plus léger (c-à-d meilleur

marché pour le commanditaire). Pour obtenir des structures moins onéreuses et plus sûres, les organismes publics (qui financent les barrages mobiles et les barrières) doivent spécifier dans leur «cahier des charges» que la méthodologie de conception doit intégrer des outils de conception capables d'atteindre un objectif donné (c.-à-d. un faible coût, un indice de sécurité élevé, etc.).

Dans cette optique, le GT recommande, pour les barrages de grande importance, souvent très coûteux, que la fonction objectif suivante soit exigée : «*Pour un niveau de sécurité donné, la conception retenue doit correspondre au coût le plus faible pour le commanditaire*». Ceci signifie qu'il ne peut pas y avoir de solution alternative qui donnerait les mêmes indices de sécurité et un coût inférieur. Par indices de sécurité, nous entendons les coefficients de sécurité dit partiels correspondant aux différents états limites (service, ultime,....).

6.1.3 HYDRAULIQUE: MODELE D'ÉCOULEMENT ET EVALUTION DU DEBIT

En se basant sur l'enquête, on remarque qu'environ 80 % des concepteurs utilisent des modèles numériques pour étudier les écoulements au droit des vannes des barrages.

Pour 80 à 100 % des utilisateurs, les études classiques reposent sur :

- des équations 1D en écoulement permanent ;
- des modèles 2D en écoulement permanent ou non-permanent ;
 - o Domaine vertical ou horizontal (moyenne respectivement sur la largeur ou la profondeur)
 - o Différence finie, volume fini ou élément fini
- des modèles 3D en eau peu profonde.

Notons que les modèles 3D de Navier-Stokes sont utilisés par 60 % des utilisateurs.

Lors de l'étape de conception, les demandes principales des concepteurs (70-100 % des utilisateurs) concernent :

- Des modèles d'écoulement en rivière ;
- L'écoulement autour du barrage/de la vanne ;

- Pour des études d'incidence sur l'environnement : augmentation de la sédimentation/érosion, changement du niveau des retenues, impact sur les zones humides, augmentation de la turbidité des eaux ;
- L'intrusion d'eau salée (dans des zones côtières).

Plus exceptionnellement, il est demandé d'étudier (15 % des demandes) les problèmes liés à des polluants et au transport de sédiments contaminés (en utilisant des modèles conservatifs ou non conservatifs).

Parmi les 20 logiciels cités dans l'enquête (voir Annexe A), les plus courants sont HEC-RAS du Corps des Ingénieurs des USA et MIKE11 du DHI (Danemark).

6.1.4 MODELES PHYSIQUES

En ce qui concerne le recours à une modélisation physique (essai en laboratoire), environ 80 % des utilisateurs répondent OUI, mais uniquement pour des projets complexes, de grande ampleur et/ou très coûteux. Les motivations principales pour recourir à la modélisation physique concernent les écoulements, l'évaluation des sollicitations et la sédimentation/l'érosion.

Dans une importance moindre, les objectifs du modèle physique touchent aussi aux vibrations, au comportement dynamique, aux problèmes microbiologiques et aux questions environnementales.

Commentaires du Groupe de Travail (PIANC GT 101):

Un modèle physique en laboratoire est habituellement réalisé lorsque l'étude préliminaire est achevée mais avant que les études de détail ne commencent. C'est donc un outil d'évaluation intermédiaire.

Même si les modèles numériques deviennent de plus en plus fiables et utilisés, les modèles physiques restent nécessaires, particulièrement pour les études hydrauliques. Les modèles physiques sont souvent utilisés en parallèle avec des codes numériques pour valider ceux-ci et régulièrement pour calibrer («*tuning*») certains paramètres (par exemple pour des codes de calcul du transport sédimentaire). Après validation (calibrage),

le code numérique devient un outil fiable permettant une analyse comparative aisée de différentes variantes (pour un coût bien moins important que l'expérimentation physique).

6.1.5 EVALUATION DES SOLLICITATIONS

L'enquête portait sur les sollicitations les plus couramment étudiées et sur les moyens mis en œuvre pour les évaluer.

Les paragraphes suivants donnent une liste complète des sollicitations qui sont évaluées. Les nombres entre parenthèses montrent celles qui sont plus souvent requises.

- * *Pression du fluide:*
 - Statique [100 %],
 - Dynamique (induite par l'écoulement) [80 %],
 - Ecoulement non-permanent [60 %],
 - Modèle 2D et 3D [80 %],
 - Sous-pression (interface sol-structure) [80 %],
 - Masse ajoutée [15 %].
- * *Effet sismique* (forces inertielles liées à la masse de la structure, pressions hydrodynamiques, etc.) [80 %]
- * *Vent* (Effets statique et dynamique) [80 %]
- * *Actions des vagues et plan de vague* (amplitude et intensité dépendant de la longueur de la retenue soumise au vent (fetch), de la vitesse et de la durée du vent, etc.) [80 %]
- * *Marée* (courant induit et variation du niveau d'eau) [50 %]
- * *Poids des neiges et poussée des glaces* [50 %]
- * *Autres:*
 - Poussées du sol (terre) et des sédiments: [100 %] ;
 - Forces d'impact (bateau, corps flottant, etc.) [100 %] ;
 - Charges thermiques (particulièrement pour les éléments situés à la fois dans l'air et dans l'eau) [100 %] ;
 - Forces d'amarrage et forces de remorquage [80 %] ;
 - Diverses charges de précontrainte [20 %] ;
 - Obstacles sur le chemin de roulement de la vanne/porte (fermeture/ouverture) [20 %] ;
 - Charges causées par les propulseurs des navires [20 %].
- * *Cas de combinaisons des sollicitations* (celles-ci étant spécifiées ou dans les règlements) [100 %]

Parmi les 25 logiciels cités dans l'enquête aucun n'est véritablement spécifique au calcul des sollicitations. Ils sont en effet orientés «analyse structurelle (méthode des éléments finis)» ou «hydraulique-hydrodynamique (CFD)» ou encore «mécanique des sols et hydrogéologie». Par conséquent, les utilisateurs doivent sélectionner les outils appropriés pour évaluer les sollicitations dans ces catégories (voir Appendice A).

6.1.6 CALCUL DES STRUCTURES METALLIQUES (plastification, flambement, résistance ultime, fatigue, vibration...);

L'enquête avait pour but de mettre en évidence les méthodes de calcul des structures métalliques les plus appropriées et les plus couramment utilisées.

La liste suivante donne les états limites potentiels à évaluer dans le processus de dimensionnement d'une structure métallique (typiquement les vannes/portes des barrages mobiles). La valeur entre parenthèse met en évidence ceux qui sont le plus souvent effectués.

Les états limites considérés :

- Plastification (contrainte de comparaison - Von-Mises) [100 %] ;
- Flambement/voilement (poutre et plaque) [85 %] ;
- Résistance ultime [100 %] ;
- Fatigue [100 %] ;
- Vibration (induite par l'écoulement ou le vent) [85 %] ;
- Séisme [75 %] ;
- Feu (accidentel) [50 %] ;
- Choc et collision (bateau ou corps flottant heurtant la structure) [75 %].

Environ 40 % des utilisateurs ont au moins une exigence particulière vis-à-vis d'une des problématiques suivantes : rupture fragile, délamination des composites, évaluation de la durée de vie de l'ouvrage, non-linéarité géométrique et/ou physique du matériau, problèmes de contact, frottement, problèmes d'usure et de lubrification et analyse plastique.

En ce qui concerne les logiciels utilisés pour le calcul des structures métalliques (vannes de barrages/barrières), environ 80-100 % des utilisateurs disposent des outils suivants:

- Modèle poutre (structure 3D) [100 %],
- Modèle plaque/coque (3D) [100 %],
- Élément coque + élément poutre (3D) [85 %],
- Analyse linéaire et statique [100 %],
- Analyse dynamique [85 %].

Moins de 60 % des utilisateurs ont recours à une analyse non linéaire pour le calcul des structures métalliques.

Environ 40 % des utilisateurs utilisent un logiciel permettant au moins une des analyses suivantes: ruine via une succession d'incidents, élément membranaire (plaque ou coque), structure mixte composée de poutres et câbles, interaction sol-structure, ruine rapide (crash).

6.1.7 CALCUL DES STRUCTURES EN BETON (béton armé, précontraint, haute résistance, léger, ...);

L'enquête avait pour but de mettre en évidence les méthodes de calcul des structures en béton les plus appropriées et les plus couramment utilisées.

Les états limites potentiels sont:

- Plastification (critère de Tresca...) [100 %],
- Béton pré et postcontraint [100 %],
- Fissuration [100 %],
- Impact (bateau) [85 %],
- Séisme [85 %],
- Dissipation de chaleur [70 %],
- Feu (accidentellement) [50 %],
- Etats limites de service dont la compacité (étanchéité à l'eau) [50 %].

Environ 50 % des utilisateurs ont au moins une exigence spécifique parmi les suivantes : résistance ultime, béton jeune, effets du temps dus au vieillissement-fluage-retrait, étapes de construction, explosion (terroriste), impact du gel, et stabilité chimique.

Bien que la sollicitation sismique soit négligée dans les pays qui ne sont pas dans une zone sismique, 100 % des utilisateurs ont la possibilité de modéliser l'effet sismique en utilisant «des coefficients sismiques (méthode pseudo-statique)» ou «une procédure d'analyse dynamique - analyse spectrale ou analyse dite 'time-domain' ».

6.1.8 CALCUL DES FONDATIONS ET MODELISATION DES ECOULEMENTS EN MILIEUX POREUX

➔ 100 % des utilisateurs étudient les points suivants:

- Stabilité au renversement de la structure ;
- Stabilité au glissement sur la surface de contact entre la structure et le sol de fondation ;
- Stabilité aux sous-pressions (soulèvement) de la structure (la structure ne doit pas flotter) ;
- Résistance – forces et moments unitaires agissant dans les éléments de la structure (Tresca...).

➔ 100 % des utilisateurs utilisent, dans la pratique courante, des logiciels ayant les spécificités suivantes:

- Modèle poutre (structure 3D) ;
- Modèle plaque/coque (3D) ;
- Élément coque + élément poutre (3D) ;
- Analyse linéaire et statique ;
- Analyse dynamique ;
- Analyse non linéaire incrémentale des contraintes (dissipation de chaleur...).

➔ 100 % des utilisateurs sont capables d'étudier les structures en béton suivantes:

- Structures poids,
- Structures à coques épaisses,
- Plaques épaisses (armées).

➔ 80 % des utilisateurs effectuent une analyse 3D pour étudier les piles, le radier et les éléments poids. Les modèles 2D sont également utilisés, par exemple pour les radiers.

Pour l'évaluation de la résistance des structures (acier, béton, mixte), il existe quelques centaines de logiciels commerciaux de calcul, plus ou moins génériques, basés sur la méthode des éléments finis (MEF). Environ 20 logiciels ont été cités dans l'enquête. Aucun d'eux n'a été mentionné à deux reprises. Ceci indique qu'il n'y a pas de standard à ce niveau. Pour l'analyse linéaire, il y a des codes internationaux comme ANSYS, NASTRAN, SAP2000, etc. mais il existe également des programmes internes qui fournissent plus de flexibilité. Il existe aussi des programmes spécialisés (sismiques...). Pour les analyses EF explicites, LS-Dyna est utilisé couramment (impact...). Ces codes ne sont habituellement pas appropriés pour les fondations et la mécanique des sols (voir plutôt section 4.1.8).

L'enquête a pour but de mettre en évidence les méthodes de calcul des fondations les plus appropriées et les plus couramment utilisées.

➔ 100 % des utilisateurs considèrent les exigences suivantes (critère de vérification de la stabilité de la fondation sous charges externes):

- *Glissement – coefficient de glissement ;*
- *Tassement:*
 - Déformabilité du sol de fondation,
 - Déformation irréversible limitée,
 - Déformation réversible,
 - Déformation irréversible non limitée, suivie par une rupture.
- *Stabilité interne ;*
- *Soulèvement et mise en flottaison ;*
- *Résistance: pression sur le sol de fondation / force portante du sol de fondation.*

➔ Concernant "la modélisation des écoulements dans le sol", seul 70 % des utilisateurs considèrent les exigences suivantes :

- Ecoulements dans la fondation du barrage (conductivité hydraulique du sol, fuite via les fissures dans la roche, etc.) ;
- Milieu poreux saturé, écoulements saturés - non saturés ;
- Transport de polluants (contamination des eaux).

En ce qui concerne les logiciels, environ 100 % des utilisateurs sont en mesure d'effectuer des modèles 2D et 3D. Comme la stabilité de la fondation est étroitement liée à la configuration du barrage, des modèles d'ensemble sont généralement réalisés (corps du barrage + roche ou sol de fondation), en utilisant :

- Un modèle 2D,
- Écoulement 2D horizontal, écoulement 2D vertical, écoulement 3D – permanent ou non permanent.
- Un modèle 3D.

Pour le calcul de la fondation, il existe également de nombreux logiciels commerciaux disponibles sur le marché (voir Annexe A). Environ 25 logiciels ont été mentionnés dans l'enquête mais aucun d'eux n'a été cité deux fois. Ceci suggère qu'il n'y a aucun logiciel standard pour une telle analyse. Plusieurs de ces outils sont des outils internes. Ceux énumérés sont souvent spécifiques à une application/à un problème particulier. Aucun d'eux ne peut résoudre tous les problèmes de fondation; un ensemble de plusieurs logiciels (différents) est donc nécessaire.

6.1.9 STABILITE DES STRUCTURES FLOTTANTES

Il devient de plus en plus économique et donc populaire de recourir à des structures flottantes (ou sous-structures) pour la conception des barrages mobiles et des barrières. Les parties mobiles peuvent être les vannes/portes elles-mêmes (voir Project Review 3b, 9c, 9d et 12d, les vannes secteurs à Rotterdam, des portes pivotantes aux USA...). L'utilisation d'éléments flottants peut également être une technique appropriée pour transporter des éléments préfabriqués (Project Reviews E4 & E10-Barrage flottant préfabriqué).

Afin de concevoir de telles structures flottantes, une série de conditions spécifiques doit être satisfaite. Lors de l'enquête, nous avons demandé aux participants d'énumérer les exigences techniques spécifiques qu'ils imposent pour de telles structures. Parmi les 11 réponses reçues, seul un utilisateur a répondu à cette partie. Ceci prouve clairement que, au contraire des structures métalliques, en béton et des fondations qui disposent de procédures de dimensionnement bien établies et de nombreux logiciels commerciaux bien adaptés aux besoins (et aussi bien connus), ce n'est pas le cas pour l'évaluation des structures flottantes.

Pour les structures flottantes de génie civil (pas les bateaux), les vérifications appropriées (critères de dimensionnement : états limites) sont les suivantes :

- La stabilité de flottaison statique est généralement évaluée par la hauteur métacentrique ;
- Une procédure de ballastage (en considérant la réduction de stabilité induite par les carènes liquides éventuelles) ;

- Stabilité dynamique (lors du remorquage et de la manoeuvre, action de la houle, etc.).

Ces exigences requièrent au moins la capacité d'évaluer :

- Le centre de gravité, le centre de flottaison et la hauteur métacentrique,
- La distribution de masse (y compris la masse ajoutée).

Pour effectuer ces vérifications de stabilité en flottaison, les logiciels disponibles sont (voir Annexe A):

- Les modèles 2D (pour les structures en poutre caisson pour lesquelles le rapport longueur/largeur est supérieur à 3, ayant des cloisons transversales étanches et un poids propre uniformément distribué), ou des modèles 3D (pour les configurations plus complexes),
- Les modèles de stabilité pour de petits déplacements/inclinaisons (généralement suffisant pour les structures de génie civil qui sont, en général, partiellement amarrées ou dont les déplacements sont limités (comme la porte pivotante, Project Review 9d – K2),
- Les modèles dynamiques (modèle de comportement à la houle (mer) ou de manoeuvrabilité) avec prise en compte de la masse ajoutée ne sont requis que pour les bateaux et les structures flottantes soumises à une action très importante de la houle. Pour vérifier la fréquence propre d'oscillation de telles structures, le roulis et le pilonnement sont habituellement considérés.

En ce qui concerne l'évaluation de la résistance structurelle de telles ouvrages, les conditions et les modèles sont les mêmes que ceux mentionnés ci-dessus dans les sections 6.1.6 et 6.1.7 (structures métallique et en béton).

6.1.10 ANALYSE FINANCIERE

Seuls 20 % des questionnaires (principalement complétés par des ingénieurs) contiennent des informations sur les outils financiers et économiques. Ceci suggère que l'évaluation financière et l'ingénierie sont généralement réalisés par des équipes différentes et que la communication entre ces deux groupes est limitée.

L'analyse financière, la retombée économique, etc. sont en principe, effectués lors de l'étape préliminaire de conception (études économique ou de faisabilité). Cela signifie qu'elles sont réalisées simultanément avec les études préliminaires effectuées par les ingénieurs. En dépit de cette simultanéité, les outils d'analyses financières ne semblent pas être à la disposition des concepteurs et des services techniques.

Sur le marché, des outils existent, du simple tableur à l'outil sophistiqué. Certains sont en fait des logiciels génériques de comptabilité pouvant servir à la gestion financière et à l'administration de toute la compagnie.

L'absence de réponse dans le questionnaire au sujet de cet aspect démontre que les ingénieurs et les compagnies ne font pas suffisamment d'effort pour évaluer les coûts lors des étapes de conception.

Les départements financiers évaluent les coûts. Ceci est habituellement basé sur quelques paramètres (paramètres unitaires de coût : €/m², €/kg, portée, kg/m, etc.). Ensuite, lorsque le contrat est signé, les ingénieurs se concentrent sur les aspects techniques en gardant bien sûr à l'esprit de maintenir le coût au plus bas niveau (en fonction de l'intérêt de la compagnie), mais souvent ils ne peuvent pas obtenir un indicateur fiable des coûts comparés entre plusieurs variantes. En particulier, ils ne peuvent pas effectuer un choix entre des alternatives basées sur une évaluation directe du coût.

6.1.11 AUTRES OUTILS DE CALCUL ET LOGICIELS SPECIFIQUES

En ce qui concerne les autres analyses spécifiques utilisées pour le dimensionnement d'un barrage mobile/d'une barrière, environ 60 % des utilisateurs exigent :

- Une évaluation de la fiabilité,
- Une analyse de risque,
- Une évaluation de l'impact sur l'environnement,
- Une étude globale du plan d'aménagement (étude des espaces...),
- Un système géographique, SIG (Système d'Information Géographique),
- Un outil de planification.

Environ 40 % des utilisateurs utilisent des logiciels spécifiques pour étudier :

- La bathymétrie,
- Les volumes des déblais-remblais,
- Les structures aluminium ou en matériaux composites,
- Les mesures in situ du courant et des écoulements.

Et seulement 20 % des utilisateurs utilisent des outils pour :

- La sélection du site,
- La modélisation de la poussée des glaces,
- Les choc, impact, et collision.

Une liste de ces logiciels spécifiques est donnée à l'Annexe A.

6.1.12 CHOIX DES OUTILS DE CONCEPTION ET DE DIMENSIONNEMENT

Selon l'étape de dimensionnement (étape de conception préliminaire, ..., avant-projet, projet) les problèmes spécifiques associés aux outils d'évaluation pour l'optimisation de la structure des vannes, l'évaluation du coût, le comportement non-linéaire, les grands déplacements, le choc et l'impact, l'analyse de risque, les incidences sur l'environnement... sont différents.

Dès les phases préliminaires, il est parfois nécessaire d'effectuer une analyse avancée comme le comportement non-linéaire, les grands déplacements, le choc et l'impact, le feu et l'explosion, etc. Beaucoup d'outils sont disponibles, mais peu sont faciles à utiliser et leur emploi est donc limité aux spécialistes expérimentés.

Normalement les barrages mobiles en rivière ne requièrent pas d'analyse hydraulique et structurelle avancée.

En revanche, les barrières anti-tempête, soumises à des conditions extrêmes, exigent l'évaluation des états exceptionnels (charges extrêmes, résistance ultime, accident, etc.). Il est donc recommandé qu'une telle analyse avancée soit effectuée dans le cadre des études détaillées pour accroître la fiabilité de la fermeture de la barrière.

A) Hydraulique: études des écoulements et de la loi hauteur-débit.

Des logiciels 2D et 3D fiables sont maintenant disponibles pour évaluer les écoulements dans la rivière en amont et en aval des barrages. Ils peuvent également être employés pour étudier l'écoulement au-dessus et/ou en dessous des vannes du barrage. La difficulté principale apparaît lorsqu'un ressaut hydraulique est situé juste en aval de la vanne. Dans ce cas, une vibration peut être induite et l'écoulement ne peut pas être étudié indépendamment de la structure (on parle de l'interaction fluide-structure). Seuls les spécialistes peuvent employer des codes hydro-élastiques pour de telles études.

B) Sollicitations

Il n'est pas habituel pour des barrages mobiles de navigation d'évaluer l'intensité des sollicitations en utilisant des analyses directes, numériques ou expérimentales. L'évaluation des charges, y compris la pression dynamique de l'eau, le vent, les vagues, la marée, la neige, la glace, etc. sont habituellement spécifiées dans les règlements. Toutefois, pour des structures de grandes dimensions (barrières), la vibration est souvent étudiée expérimentalement à cause de la difficulté de modéliser l'interaction entre la structure et le fluide.

C) Calcul des structures: acier et béton

La pratique courante est d'utiliser des logiciels commerciaux d'éléments finis. Pour une analyse linéaire standard, il y a maintenant des logiciels fiables, faciles à utiliser et assez peu coûteux (1000 à 2000 euros en 2006). De nos jours, la plupart des ingénieurs ont la possibilité d'employer de tels logiciels. Les codes MEF fonctionnent maintenant sur les ordinateurs de bureau et comprennent des outils de post-traitement de haut niveau (localisation des contraintes maximales, vue des déplacements en 2D et 3D, modèle de contraintes 3D, etc.).

Même s'il est aujourd'hui recommandé internationalement d'employer des éléments de plaque (coque) pour modéliser une structure métallique comme les portes et les vannes, il semble que la pratique courante reste le maillage de la structure avec des éléments poutres. Les éléments poutres étaient employés il y a 20 ans quand les éléments coques n'étaient pas encore fiables et étaient utili-

sés pour réduire le nombre de degrés de liberté. Maintenant, cette pratique est désuète. La durée de calcul n'est plus un problème. Les éléments de coques minces (avec 4 ou 8 noeuds) fournissent un niveau de précision élevé et permettent une meilleure simulation du vrai comportement de la structure (flexion, torsion, flambement, etc.). En 2005, cela ne prend pas plus de temps de faire un modèle plaques 3D qu'un modèle poutres. En conclusion : les éléments plaques (coques) peuvent/doivent être employés pour la modélisation de structures métalliques 3D comme les vannes des barrages.

De nos jours, les codes MEF commerciaux incluent quasiment tous une vérification au flambement (linéaire) et souvent la possibilité d'effectuer une analyse modale (recherche des fréquences propres).

Pour des problèmes complexes comme:

- L'analyse du choc entre un bateau et la porte d'une écluse (*Le Sourne et al. 2003*) ;
- Les analyses non-linéaires (résistance ultime) ;
- Les analyses dynamiques (vibration induite par l'écoulement) ;

des outils avancés sont maintenant disponibles, mais il reste souhaitable de faire appel à des spécialistes.

D) Fondations

Il existe également beaucoup de logiciels commerciaux qui permettent de modéliser le comportement des fondations, d'un tremblement de terre, des eaux souterraines ainsi que des modèles hydrologiques, d'infiltration et de transport. Les études standards des fondations sont aujourd'hui réalisées avec les logiciels MEF commerciaux. Néanmoins, des spécialistes expérimentés restent requis pour obtenir une évaluation fiable du comportement d'une fondation. Le risque d'une mauvaise modélisation est élevé, particulièrement concernant la détermination des caractéristiques mécaniques non isotropes des différents éléments (élément 3D avec habituellement 8-16 noeuds). La modélisation des fissures dans les fondations est une autre difficulté d'importance. Il n'existe quasiment aucune possibilité pour calibrer les outils numériques (excepté en réalisant un modèle physique, coûteux, à grande échelle, et pas forcément fiable).

E) Structures flottantes

Seul un spécialiste peut réaliser l'étude des structures flottantes. Même si l'on trouve des outils sur le marché, les entreprises de génie civil n'ont habituellement pas l'expérience et les capacités pour effectuer une telle analyse. Leur utilisation semble simple mais une connaissance en construction navale est fortement souhaitable, pas tant pour effectuer la modélisation mais pour comprendre la physique du comportement des structures flottantes pendant les étapes de ballastage. Le ballastage est l'étape la plus sensible à cause de la perte de stabilité induite par les surfaces libres (carène liquide). En vue de permettre le processus de ballastage ou en cas d'invasissement accidentel (collision), des cloisons transversales et/ou longitudinales sont requises pour éviter le renversement de la structure (perte de la stabilité de flottaison).

En plus des logiciels commerciaux, les sociétés de classification (Bureau Veritas, Lloyds Register, ABS...) fournissent des outils fiables pour vérifier la stabilité statique et dynamique des structures flottantes.

F) Autres aspects

Il y a également des logiciels de planification permettant la détermination du calendrier (planning) pendant l'entièreté du projet.

Quelques autres domaines techniques qui exigent des outils spécifiques sont :

- L'analyse du risque et de la fiabilité (sécurité),
- Les études d'impacts (environnement),
- L'information géographique (Système d'Information Géographique),
- Etc.

7. TECHNIQUES DE PREFABRICATION

7.1 DESCRIPTION

Les ouvrages de protection contre les inondations sont traditionnellement construits à l'intérieur de batardeaux. Ceci permet le recours aux méthodes conventionnelles de construction, à un équipement traditionnel ainsi qu'à un contrôle de qualité et d'inspection conventionnels. Le coût de cette méthode est élevé car elle exige la construction

provisoire d'un batardeau coûteux qui doit être démantelé au terme de la construction. Il y a un risque de surverse (débordement) et donc de dommage potentiel pour l'ouvrage en construction, ainsi que le non respect du planning de construction (travaux complémentaires de nettoyage et de remise en route du chantier).

La préfabrication est une technique très courante dans les projets de contrôle des inondations, via les différents composants de la barrière de protection. Typiquement, les vannes métalliques et leurs composants sont fabriqués hors site et sont ensuite placés avec une grue. Si les vannes sont trop grandes pour être manipulées en une seule pièce, elles peuvent être apportées sur site en morceaux et être assemblées sur place.

Les progrès de la technologie et des sciences de l'ingénieur ont permis d'accroître la viabilité de la préfabrication. Il est maintenant possible de construire complètement les structures hydrauliques sans batardeau. La fondation et une couche de propreté peuvent être préparées «sous eau» avec un équipement de construction flottant qui prépare le fond de la rivière et des engins classiques de manutention depuis les rives. Les gabarits et coffrages qui dépassent largement le niveau de la retenue peuvent ainsi être placés avec une grande exactitude.

Les éléments porteurs de la structure et/ou de la superstructure sont construits hors site, transportés par la voie navigable sur le chantier et mis en place (Fig.7.1).

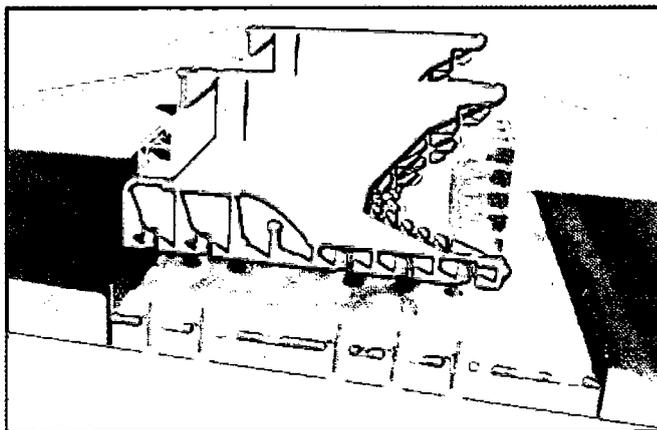


Fig. 7.1: Ecluse de Braddock & éléments du barrage en préfabrication (préfabrication du génie civil)

La structure est alors remplie de béton, assurant de ce fait la liaison avec la fondation. Au besoin, la zone entre piles, au droit des vannes, peut être fermée par des panneaux, asséchée en vue de l'installation et du positionnement final des vannes. Il est également possible de préinstaller les vannes dans l'ossature de béton avant le transport et la mise en place par flottaison.

La préfabrication de la structure de support d'une vanne consiste typiquement en une charpente en béton armé. Des panneaux en acier ou en aluminium peuvent également convenir mais cette approche est moins couramment utilisée. La charpente est conçue pour inclure les surfaces finies de la structure finale et des cavités destinées au béton de remplissage qui est ajouté sur le site. La charpente peut également être flottante et être remorquée sur le site. Des batardeaux provisoires peuvent être installés dans les ouvertures sur la périphérie de la charpente pour accroître le volume immergé et ainsi lui permettre de flotter.

Alternativement, les éléments préfabriqués peuvent être conçus pour être mis en place par des grues flottantes de grande capacité. Ces éléments peuvent aussi être fabriqués à proximité de l'emplacement final, être transportés et mis en place dans leur position définitive avec une grue. Si les unités ne sont pas trop grandes, elles peuvent être fabriquées plus loin et être transportées avec une barge.

La préfabrication permet l'avancement rapide de la construction, réduit au minimum la rupture du trafic existant sur la rivière et a moins d'incidences sur l'environnement que les techniques conventionnelles de construction.

L'emplacement des sites appropriés pour des ouvrages de protection contre les inondations est typiquement choisi comme le lieu où l'hydraulique, la topographie et les conditions géologiques rencontrées sont les meilleures. En vue de la sélection de l'emplacement, l'existence d'un réseau routier, de main-d'oeuvre qualifiée et la disponibilité de matériaux et d'équipement ne fait pas nécessairement partie du processus de sélection mais sont des paramètres importants pour la construction

de l'ouvrage. La préfabrication permet à une partie significative de l'ouvrage d'être fabriquée à sec, sur un site plus avantageux et réduit considérablement la zone du site impliquée dans la construction. Ceci permet la considération d'un plus grand nombre d'emplacements potentiels pour l'ouvrage de protection.

7.2 QUELQUES TECHNIQUES ENVISAGEABLES

7.2.1 MODE CONVENTIONNEL DE CONSTRUCTION

Le mode traditionnel de construction des ouvrages hydrauliques comme les barrages mobiles exige que le site soit mis à sec avant la construction. Ceci peut être réalisé de deux manières. Typiquement, un batardeau est construit pour fermer une partie de la rivière et permettre au travail d'être effectué à sec dans cette zone, voir Fig. 7.2. Le batardeau est ensuite enlevé et placé dans la section suivante de la rivière. Ce processus est répété jusqu'à ce que la structure soit terminée.

L'autre alternative consiste à construire un canal de dérivation pour permettre à l'écoulement de contourner le site. Dans ce cas, un barrage provisoire est construit en amont et en aval du chantier. Ceci fournit un lieu de travail adéquat où le projet peut être réalisé dans sa totalité et où chaque élément de construction est accessible pour une inspection visuelle par le personnel approprié.

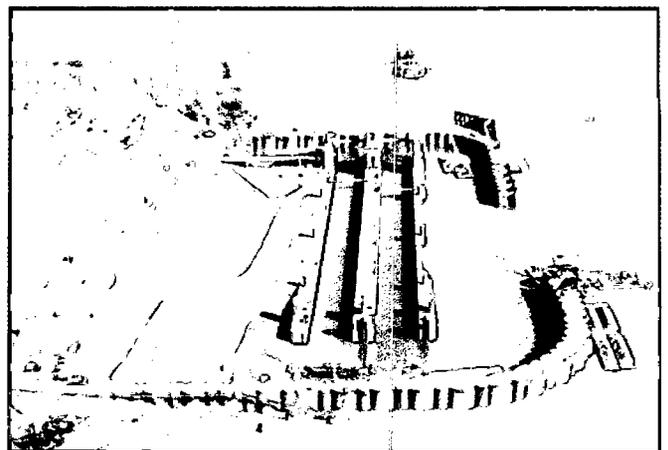


Fig. 7.2: Démontage du batardeau de construction - Ecluses de Olmsted (USA)

7.2.2 CONSTRUCTION SOUS EAU

La construction «sous eau» est un terme employé pour décrire un mode de construction qui a lieu dans ou sur l'eau, typiquement à l'aide d'un matériel de construction flottant. Les modes de construction sous eau sont de deux types – mise en place par «flottage» ou par des «engins de levage». Les deux méthodes exigent la préparation «sous eau» de la fondation afin de recevoir les éléments de la structure. La mise en place par «flottage» est employée pour de plus grandes sections pouvant être rendues étanches et déplacées sur le site comme un caisson flottant, Fig. 7.3.

Des structures flottantes peuvent également être construites sur une barge et ensuite être transportées sur le chantier, Fig.7.4. Quand les éléments arrivent sur le chantier, la barge est ballastée et noyée, permettant ainsi à la structure préfabriquée de flotter seule et d'être remorquée sur le site.



Fig. 7.3: Transport de la fondation du barrage de Braddock par flottaison



Fig. 7.4: Préfabrication du barrage de Montezuma sur une barge

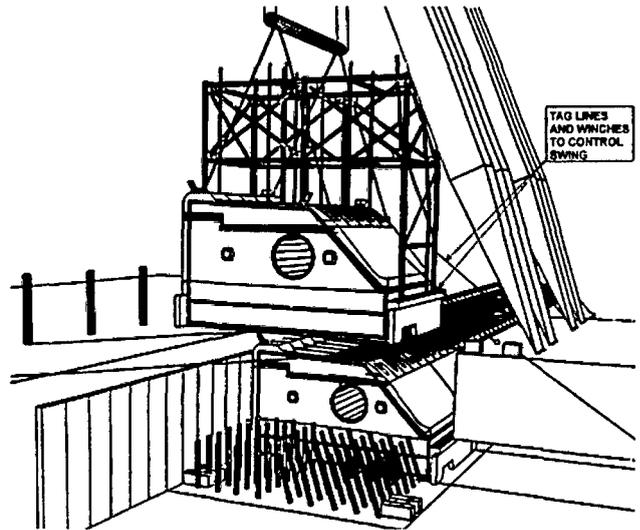


Fig. 7.5: Mise en place d'un élément préfabriqué d'un barrage mobile par un système de levage

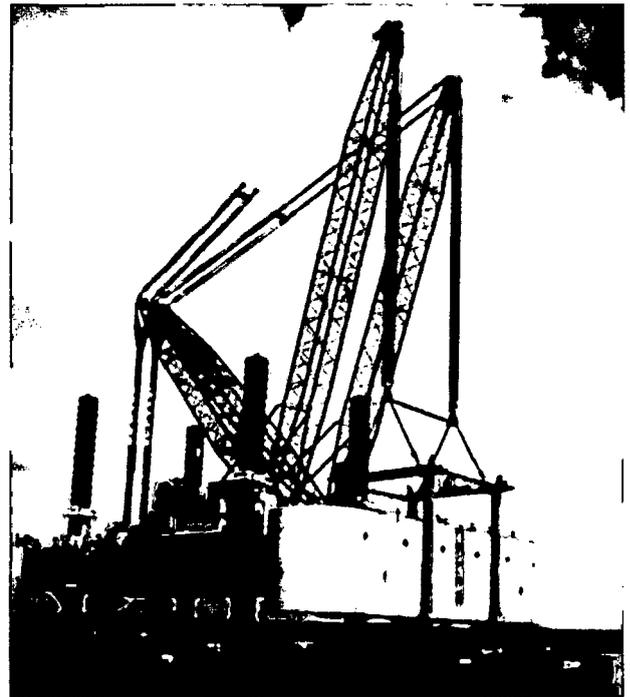


Fig. 7.6: Engins de levage sur une barge «Jackup», ERDC TR-02-22

Les méthodes utilisant des engins de levage sont employées pour de plus petites unités bien que des barges-grues (bigues) peuvent atteindre une capacité de levage allant jusqu'à 8500 tonnes (Fig. 7.5 à Fig. 7.7) et même 20.000 tonnes. Dans ce dernier cas, les unités sont transportées sur site sur une barge ou sont mises à l'eau via une rampe de mise à l'eau (tire à terre), et sont finalement soulevées par une grue pour être transportées à leur emplacement définitif.

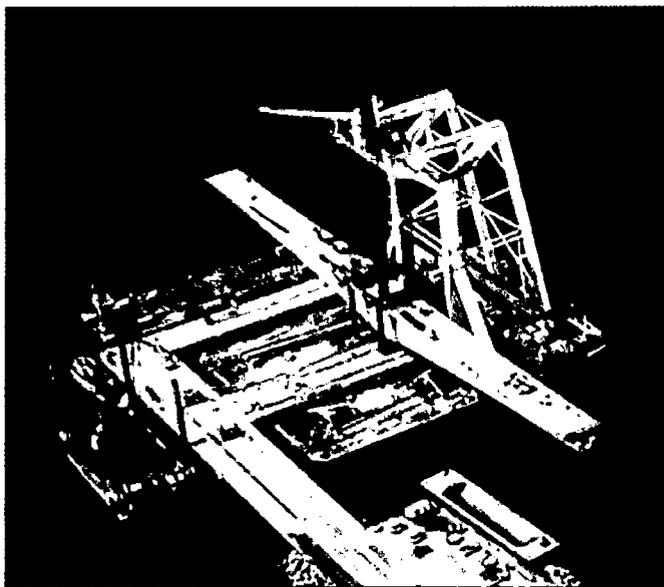


Fig. 7.7: Barge-grue d'une capacité de 8500 tonnes, ERDC/GSL TR-00-2

Il y a une grande variété de systèmes de levage disponibles. Ceux-ci incluent :

Types	Capacité
Barge grue entièrement pivotante	600 tonnes
Portique sur une barge flottante (sur pieux)	700 tonnes
Barge flottante offshore (sur pieux)	2400 tonnes
Barge-grue élévatrice - «Jackup»	2520 tonnes
Barge Catamaran -grue & poutre de levage	8500 tonnes
Barge Catamaran -grue & vérins	20000 tonnes

7.2.3 CHOIX DU MODE DE CONSTRUCTION

Plusieurs critères interviennent dans le processus de sélection d'une méthode de construction. Les points à considérer sont :

- Le type et les dimensions de la structure – Peut-elle être divisée en modules pour permettre un transport facile jusqu'au site ?
- Le trafic de la rivière – Quelles limitations et/ou arrêts du trafic peuvent être tolérés ?
- La disposition du site – Y a-t-il de la place et des infrastructures pour supporter un projet de grande construction ?
- La géologie – Quels sont les types de fondation

possibles ? Est-il possible d'évaluer, d'installer, de contrôler une fuite dans la fondation ?

- Le site de construction – Les matériaux de construction requis et une main d'œuvre de qualité sont-ils disponibles à proximité du site ?
- Les conditions hydrauliques et hydrologiques (hydrogramme de crue, ...);
- Le transport et des formes de radoub sont-ils disponibles ?

La construction sous eau donne au concepteur une plus grande flexibilité quant aux choix disponibles pour le type de vannes et l'emplacement de l'ouvrage. La capacité à fabriquer des éléments de la structure de taille importante, indépendamment de l'emplacement de l'ouvrage, peut améliorer la qualité et réduire le coût de fabrication des composants. Elle peut également envisager de combiner plusieurs modes de construction. Par exemple, il peut être approprié de construire les culées au sec grâce à des batardeaux, tout en permettant au trafic de continuer pendant la construction. En revanche, les parties centrales de l'ouvrage peuvent être réalisées hors site et ensuite être amenées en flottaison jusqu'au chantier lorsque les culées et les fondations sont terminées, avec un impact minimal sur le trafic. Pour chaque projet, les combinaisons et les choix possibles sont aussi nombreux que les emplacements et les circonstances particulières du site qui se présentent au concepteur.

7.2.4 ALTERNATIVES DE FABRICATION HORS SITE

a) Radoub

Le radoub (ou forme de radoub) est un bassin aménagé à cet effet, adjacent à une voie navigable, qui peut être vidé afin que la construction puisse se faire à sec. Il peut inclure une protection contre les inondations, exigeant qu'une berme soit construite autour du bassin. Celle-ci est typiquement une berme de terre qui est enlevée lorsque la construction est terminée. Pour que le site soit réutilisable, il peut valoir la peine de construire une porte avec des culées et un seuil permanent, Figs. 7.8 et 7.9 (page suivante).



Fig. 7.8: Construction dans un radoub - Port de Bremerton



Fig. 7.9: Construction des piles d'un pont dans un radoub, Oresund, EM1110-2-2611, C-8

Afin de minimiser les travaux d'assèchement, et de se protéger contre les inondations, le bassin peut comporter 2 niveaux. Dans le bassin, la zone de construction se situe à l'intérieur d'une double berme ; une zone extérieure dont la profondeur (niveau de la fondation) correspond au niveau de la rivière adjacente et une zone centrale dont le niveau de fondation est plus élevé, c'est ici que l'on préfabrique les éléments (Fig.7.10). Une aisance d'au moins 60 cm doit être prévue pour tenir compte des mouvements (roulis et tangage) de la structure durant son transport.

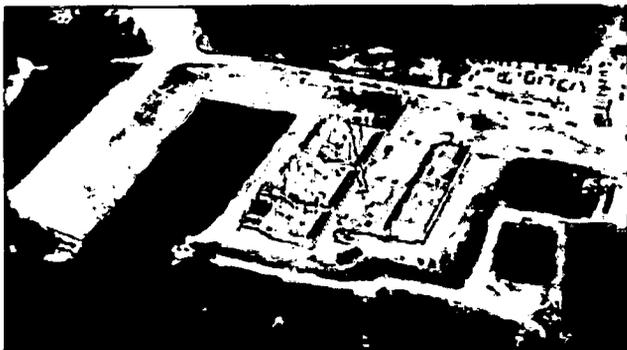


Fig. 7.10: Radoub à 2 niveaux, Barrage de Braddock, Leedsdale

Quand la structure préfabriquée est terminée, le bassin est inondé avec des pompes afin que les éléments flottent dans le bassin supérieur. Les éléments en flottaison sont alors déplacés par dessus de la berme centrale. Ensuite, le niveau d'eau dans le bassin est abaissé pour correspondre à celui de la voie navigable adjacente. La berme extérieure est alors ouverte et les éléments peuvent être acheminés sur le site de construction définitif.

Un bassin à 2 niveaux permet également une plus grande aire de construction avec moins d'excavation au total. Pendant la construction, l'accès aux éléments en préfabrication peut exiger une surface au sol égale à 2 ou 3 fois la surface au sol occupée par les éléments eux-mêmes. L'excavation du bassin inférieur peut servir à remblayer les bermes du bassin supérieur. L'assèchement total n'est pas exigé, parce qu'on peut permettre au bassin extérieur de rester inondé à un niveau restant inférieur au radier de construction du bassin central.

b) Cales sèches et docks flottants

Un dock flottant est essentiellement un ponton submersible, dont les parois latérales émergent en permanence pour le contrôle et la stabilité lorsque le dock est sous eau. L'eau est pompée hors du dock jusqu'à le mettre en position haute c-à-d lorsque la face supérieure du radier du dock est au-dessus du niveau d'eau. A ce moment le travail peut commencer. Ensuite, le dock flottant est ballasté et partiellement noyé permettant la sortie des éléments. Les docks flottants sont employés intensivement dans l'industrie navale pour la réparation et l'entretien des bateaux. Ils sont fortement demandés et leur coût, pour une durée d'utilisation relativement longue, est fort élevé.

Une variante moins coûteuse est une barge submersible c-à-d une barge munie de compartiments inondables. La structure préfabriquée est construite sur la plate-forme de la barge. Une fois terminée la barge est alors remorquée sur le chantier de construction. Des tubes de remplissage et de mise à l'air libre sont utilisés pour contrôler le remplissage de la barge. Ceci exige un emplacement adjacent au chantier ayant une profondeur suffisante pour s'adapter aux dimensions de la barge à laquelle il faut ajouter l'enfoncement de la structure flottante. Mais il ne faut pas non plus une profondeur trop grande car lorsque la barge est complètement ballastée, elle peut devenir instable.

Une extrémité de la barge est d'abord ballastée jusqu'à s'appuyer sur le fond. Ensuite, l'autre extrémité est alors lentement remplie pour finalement libérer la structure flottante. Le pont flottant de Ford Island à Pearl Harbor a été construit à Seattle sur une barge de haute mer puis embarqué à travers l'Océan Pacifique jusqu'à Hawaï où il a été déchargé. Le déchargement a pris presque une journée entière. Une barge a été utilisée pour améliorer de manière significative la vitesse de remorquage et pour éliminer l'impact des vagues océaniques sur le pont de la barge.

c) Rampe de mise à l'eau

Si l'état des berges le long de la voie navigable est approprié, il est possible de construire les éléments de la structure sur le rivage, et ensuite de les faire glisser sur des guides préparés à cet effet afin de les mettre à l'eau.

7.3 CONSTRUCTION DES CAISSONS PREFABRIQUES

La structure des caissons est conditionnée par leur poids car ils doivent flotter pour permettre une mise en place par flottaison. C'est via une construction au sec que le respect des dimensions de la structure peut être garanti. Une haute précision au niveau de la préfabrication des éléments permet d'admettre des tolérances plus grandes lors des travaux de mise en place qui s'effectuent sous eau. Si la structure est en béton, elle peut être construite avec du béton préfabriqué ou coulé sur place. Les éléments préfabriqués doivent intégrer les tolérances de construction imposées par la fondation. Pour une fondation sur pieux, une tolérance sur l'emplacement des pieux de minimum 25 cm doit être considérée grâce à des ouvertures dans le radier préfabriqué ou de larges réservations qui seront ultérieurement scellées après la mise en place. Ceci permet une tolérance raisonnable lors de la mise en place des pieux, et réduit les coûts liés aux coffrages des éléments préfabriqués (caissons) ainsi que le contrôle de la qualité.

7.4 PREPARATION DE LA FONDATION

La construction sous eau exige que le fond soit préparé sous eau. Alors que le fond de la rivière ne doit pas obligatoirement reprendre le poids

propre de la structure et des superstructures, il devra supporter le poids du béton coulé sous eau pour lier la fondation à la structure. Du béton coulé sous eau est aussi employé pour remplir les espaces entre les rideaux d'étanchéité et la structure. Les étapes pour préparer la fondation comprennent :

- Dragage des matériaux «fins» (couche superficielle) ;
- Création d'une souille et dépôt d'une couche d'enrochements ;
- Battage d'un rideau de palplanches (ou pieux) autour du périmètre concerné ;
- Battage des pieux de fondation ;
- Préparation de plots/semelles de réception.

La reprise des efforts sur la fondation peut être réalisée via des sols porteurs, un sol rocheux, des pieux, des puits forés.... Dans tous les cas des études géotechniques doivent être entreprises pour définir la meilleure technique.

Selon le type d'écoulement de la rivière, l'érosion et la sédimentation doivent également être contrôlées pendant la construction. Lors de la mise en place de la structure, les vitesses locales du courant peuvent augmenter de manière significative et éroder le fond de la rivière. Des enrochements, gabions, tapis souples ou autres matériaux peuvent être employés pour éviter l'érosion.

La séquence et le phasage de construction doivent être soigneusement vérifiés dans les zones de dépôt important de vase, afin de réduire au minimum la quantité de vase déposée après le dragage de la souille et avant la mise en place de la structure.

Pour les fondations rocheuses, de puissantes excavatrices peuvent être utilisées (ou le riper si le substratum est friable) afin d'obtenir une surface d'appui satisfaisante. De gros sacs de mortier peuvent être employés pour gommer les irrégularités importantes du sol et, lorsque le béton a fini sa prise, fournir une capacité portante significative (Fig. 7.11, Fig.7.12 et Fig.7.13, page suivante).

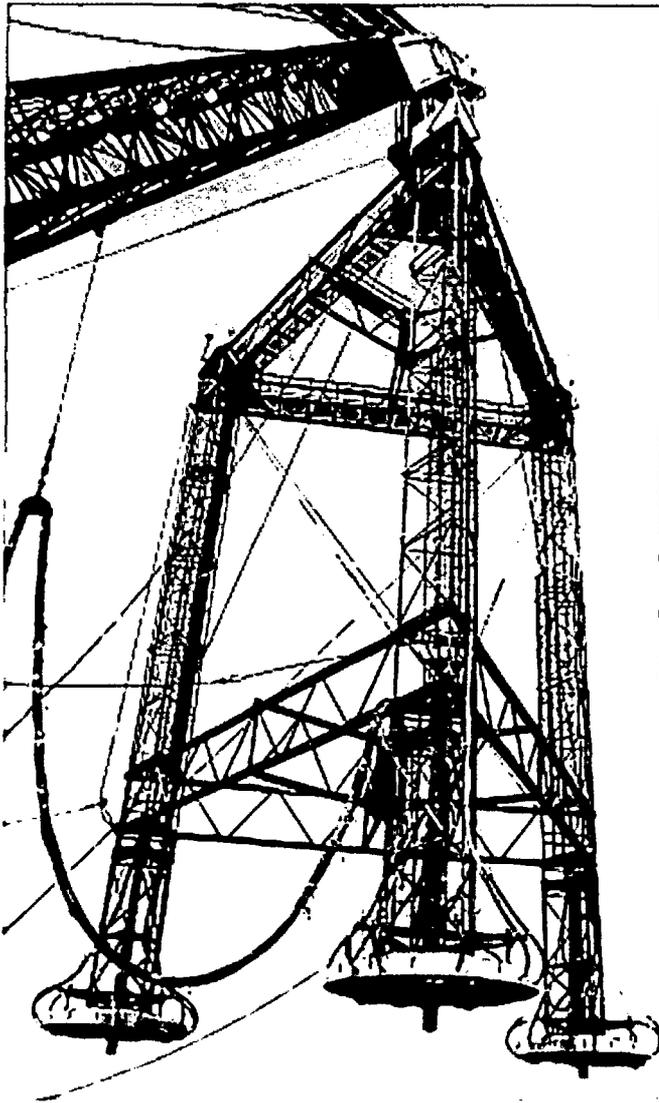


Fig. 7.11: Gabarit pour la mise en place des sacs de mortier

En raison des propriétés du béton coulé sous eau utilisé pour le remplissage, des imperfections significatives au niveau de la planéité de la fondation doivent être considérées en cas de construction sous-marine. Cependant, la mise en place précise d'éléments préfabriqués exige des moyens précis pour positionner la structure lorsqu'elle est libérée par l'engin de levage ou lorsque la flottabilité est réduite lors du ballastage.

Des blocs d'appui, spécialement conçus, peuvent être placés au sommet des pieux ou des groupes de pieux pour supporter les caissons préfabriqués. De larges vérins hydrauliques de forte capacité peuvent être utilisés pour ajuster la position de la

structure (ajustement possible d'environ 15 mm), voir Fig. 7.14.

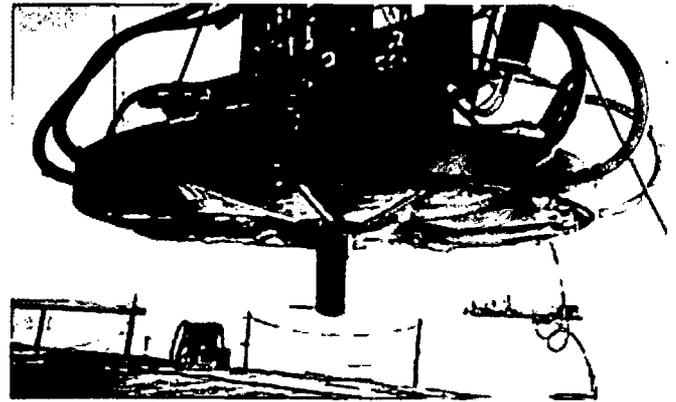


Fig. 7.12: Sac de mortier avec tubes d'injection

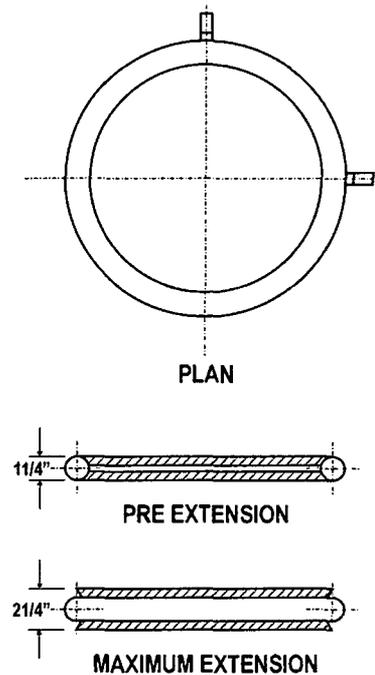


Fig. 7.13: Détails d'un vérin plat

Ces vérins peuvent être empilés pour fournir un ajustement supplémentaire. Si possible, l'élévation des blocs d'atterrissage ou des piles devrait être vérifiée par des moyens optiques situés au-dessus du niveau d'eau. Pour la conception du mur de garde inférieur de l'écluse de Charleroi, les blocs de terre sont soutenus par des puits forés d'un diamètre de 2 m. L'enveloppe en acier fut prolongée au-dessus du niveau d'eau, pendant la construction, pour permettre aux blocs de roulement d'être placés, ajustés, et examinés à sec. Une fois terminés, ils seront inondés et des plongeurs découperont l'enveloppe de sorte qu'elle puisse être enlevée par une grue.

7.5 ASSEMBLAGE DES ELEMENTS PREFABRIQUES

7.5.1 ALIGNEMENT DES STRUCTURES

Ce sont les méthodes optiques qui fonctionnent le mieux pour l'alignement et la mise en place. Avec les structures flottantes, un niveau d'exactitude important peut être obtenu pour l'alignement. Les efforts nécessaires pour une mise en place précise d'une structure flottante sont relativement faibles. Des tolérances doivent être prises en compte pour des éventuelles variations du courant lors du ballastage de la structure.

Les alternatives pour réaliser le positionnement comprennent :

- Lignes d'amarrage – Fig. 7.14,
- Pieux guides et ducs d'Albe,
- Tours de contrôle – Fig. 7.15,
- Rainures de guidage – Fig. 7.16 et Fig. 7.17,
- Tenon-mortaise – Fig. 7.18.

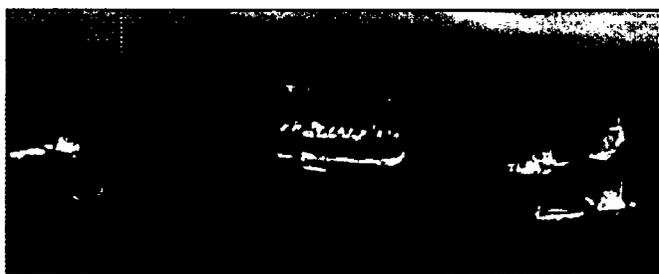


Fig. 7.14: Positionnement à l'aide des lignes d'amarrage et des remorqueurs



Fig. 7.15: Caisson en flottaison avec tours de visualisation, EM1110-2-2611, page C-9)

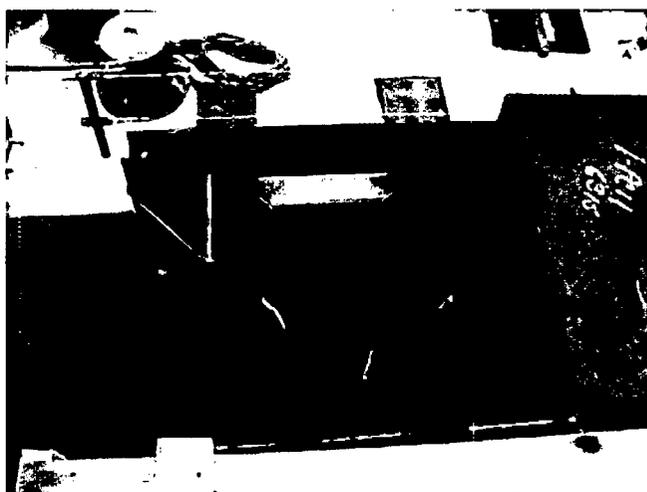


Fig. 7.16: Rainure de guidage



Fig. 7.17: Rainure de guidage (après assemblage)

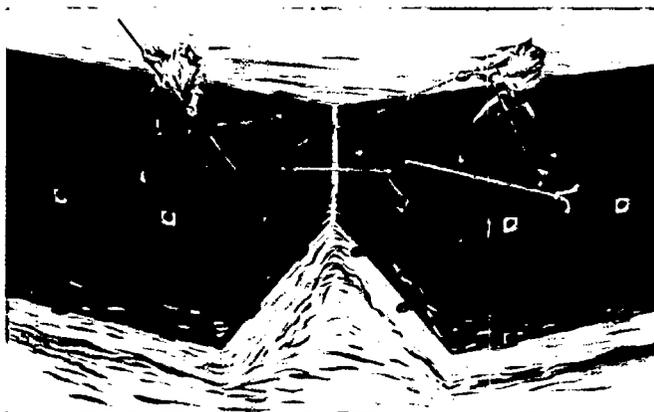


Fig. 7.18: Tenon-mortaise pour l'assemblage d'éléments

Sans un contrôle approprié, la structure peut devenir instable en flottaison pendant la mise en place (ballastage). Si la structure est complètement submergée lorsqu'elle est mise en place, des moyens auxiliaires de contrôle sont requis, tels que l'amarrage à des barges ou à des pieux.

Des ducs d'Albe ou des pieux guides peuvent être construits avant l'arrivée de la structure sur le site. Avec l'utilisation de pièces de raccordement avec trous oblongs et une mesure précise et préalable des éléments, une excellente précision peut être obtenue lors de la mise en place. En pratique une précision de quelques millimètres est réalisable.

Les rainures de guidage (Fig 7.16) sont plus larges en partie supérieure pour faciliter l'assemblage.

Le système des tenons-mortaises couplé avec des pièces de raccordement à trous oblongs a été utilisé pour aligner des éléments de 122 m de long, afin de former le mur flottant d'Olmsted (USA). Ce procédé a permis des alignements au millimètre, longitudinalement et transversalement.

7.5.2 MISE EN PLACE

La mise en place d'une structure ou de ses composants requiert un système de contrôle afin de contrôler le positionnement en plan (dans les deux directions) et l'élévation définitive de la structure. Ceci peut être réalisé en utilisant des pieux comme appuis ou des blocs (tins) pour le contrôle de l'élévation et, pour le positionnement en plan, des ducs d'Albe, des ancrages, des câbles d'amarrage, un système de positionnement dynamique, des pousseurs/remorqueurs, ou d'autres méthodes.

7.5.3 BALLASTAGE

Les étapes du ballastage doivent avoir été étudiées à l'avance afin de vérifier que le niveau des efforts dans la structure à chaque étape est acceptable. La séquence de ballastage pour le remplissage des chambres et l'évacuation simultanée de l'air emprisonné dans ces chambres doivent être minutieusement détaillées dans le plan de ballastage. Les chambres peuvent être ballastées de manière permanente avec du béton de remplissage, du béton structural, du gravier, de l'eau, ou d'autres matériaux appropriés.

Si le béton est employé comme un remplissage structural, et pas uniquement pour le ballastage, l'état de l'interface entre la structure existante et le nouveau béton doit être correctement détaillé. La vase et les sédiments peuvent empêcher la liaison

entre les deux matériaux, le béton ne peut alors pas se consolider entièrement et le compartiment ne peut être complètement rempli. L'ingénieur doit peser les avantages d'un béton structural avec les efforts requis pour s'assurer que les travaux s'effectuent tels qu'ils ont été conçus, et pour garantir l'assurance qualité requise afin de vérifier que la structure est construite tel que spécifié dans les plans d'exécution.

Il est souhaitable que la dernière tranche de ballast ne soit pas permanente donc pas en béton. Si lors de cette dernière étape de ballastage la structure ne se positionne pas comme prévu, les avantages d'avoir droit à un second essai peuvent être incalculables. Une fois en place, des ancrages permanents avec la fondation sont alors être réalisés et le lest provisoire et amovible est remplacé par un ballast permanent.

7.5.4 LIENS AVEC LA FONDATION

Une fois qu'elle est mise en place sur les pieux de support ou les blocs d'appui, la structure doit être stabilisée avant que le béton de liaison avec la fondation ne soit coulé. Ceci peut être réalisé via des systèmes mécaniques (ancrages...), un ballast additionnel ou une combinaison des méthodes.

Une fois en place, la structure ne peut pas toujours reprendre toutes les sollicitations. Dans certains cas il faut que des pieux, préalablement battus, soient liaisonnés avec dans la structure. Des pieux porteurs peuvent être intégrés dans la structure de plusieurs manières. Une manière est de prévoir des gaines dans la structure préfabriquée. Lorsque celle-ci descend lors du ballastage les pieux pénètrent dans les réservations prévues, qui sont ensuite bétonnées pour liaisonner la structure à la fondation via les pieux. Ce procédé donne à l'ouvrage des capacités à la fois de traction et de compression. La résistance à la traction peut être exigée pour résister aux efforts de soulèvement lorsque, par exemple, on met à sec un pertuis de barrage ou simplement pour résister aux pressions de soulèvement lors de l'injection du béton sous la structure. La tête des pieux qui sera encastrée dans le radier de l'ouvrage, peut avoir été renforcée pour améliorer la résistance au cisaillement de la liaison.

L'espace (jeu) entre le pieu et la structure peut être fermé au moyen d'un joint préinstallé dans l'ossature de la structure préfabriquée. Une enveloppe (sac) ou un joint pneumatique peut être préinstallé et gonflé, afin de confiner le coulis de béton qui sera injecté et d'établir une liaison de qualité.

L'espace entre le bas de la structure préfabriquée et la fondation doit être compris entre 0,5 et 1 mètre compte tenu des irrégularités prévisibles de la fondation. Lors de la pose de la structure, cet espace doit être rempli et lié avec les rideaux d'étanchéité amont et aval de l'ouvrage. Le périmètre de cet espace peut être délimité par des sacs de mortier remplis par injection après leur mise en place.

Les sacs de mortier sont de grands sacs en tissus qui sont fixés au bas de la structure préfabriquée dans lesquels des gaines d'alimentation et des événements sont préalablement installés pour l'injection du béton et l'évacuation de l'air captif. Lors du pompage du coulis ils se gonflent pour s'adapter aux irrégularités du terrain. Lorsque le mortier est en place, cela forme un joint permanent.

On peut également battre un rideau de palplanches tout autour de la structure préfabriquée (avant ou après sa mise en place) qui doit dépasser d'environ 1 mètre le niveau de la fondation. Une autre technique consiste à déverser des enrochements autour du périmètre de la structure. Quand le périmètre est bloqué, la mise en oeuvre du coulis de béton sur la fondation peut commencer.

Les tubes de remplissage et les événements doivent avoir été préinstallés dans l'ossature de la structure et doivent dépasser du niveau de la retenue. Le nombre et la localisation des tubes de remplissage dépendent de la quantité de mortier ou de béton à mettre en place, de la structure elle-même et de la présence éventuelle de zones où de l'air pourrait rester emprisonné. Le mortier ou le béton est déversé dans une zone jusqu'à ce que l'on observe le débordement dans les zones adjacentes. A ce moment la trémie à béton est déplacée à la zone suivante jusqu'à ce que tous les volumes entre la structure et la fondation soient complètement remplis. Le mortier ou le coulis de béton doit être conçu pour être pompable, auto-plaçant, auto-compac-

tant et fluide. S'il s'agit d'un mortier ou d'un béton à haute résistance (35 MPa ou plus), le mélange contient parfois un additif pour réduire le risque de délavage lors de la mise en oeuvre sous eau.

7.5.5 SUPERSTRUCTURE

Lorsque le béton injecté afin d'assurer la liaison entre la fondation et la structure préfabriquée a atteint son niveau de résistance, le béton de remplissage final peut être mis en oeuvre dans les parties supérieures de l'ouvrage (remplissage des piles, culées et radier). Il se peut que des éléments préfabriqués supplémentaires aient été prévus pour venir se placer à la partie supérieure des piles ou servir de station de contrôle. De tels éléments complémentaires peuvent être nécessaires à cause des limitations sur le tirant d'air lors du transport des éléments préfabriqués vers le site final.

Quand les piles sont terminées, les vannes peuvent être amenées sur le site sur des barges et être soulevées par une grue. Il est possible que des rainures dans la structure permettent la mise en place de batardeaux afin de mettre à sec la passe et de permettre la mise en place à sec de la vanne (Fig. 7.22, page suivante). Dans ce cas, il est possible de faire les ajustements et l'installation définitive des vannes à sec. Si une mise à sec n'est pas possible au moment de l'installation de la vanne, des calles/supports peuvent être placés sur le radier et contre les parois des piles pour permettre un ajustement précis des étanchéités lors d'une mise à sec ultérieure.

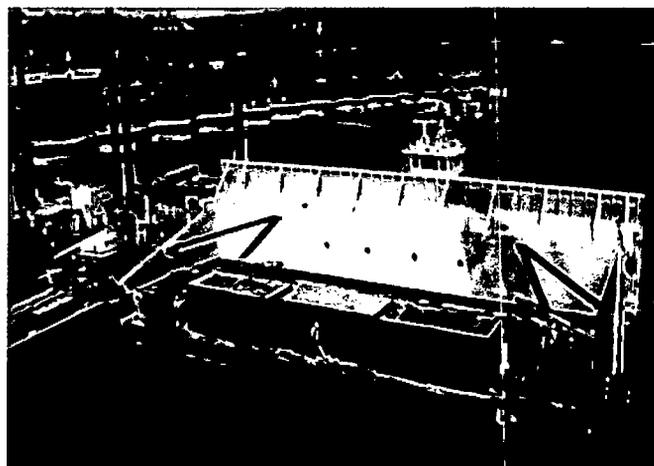


Fig. 7.19: Vanne segment transportée sur une barge – Barrage mobile de Braddock (USA)

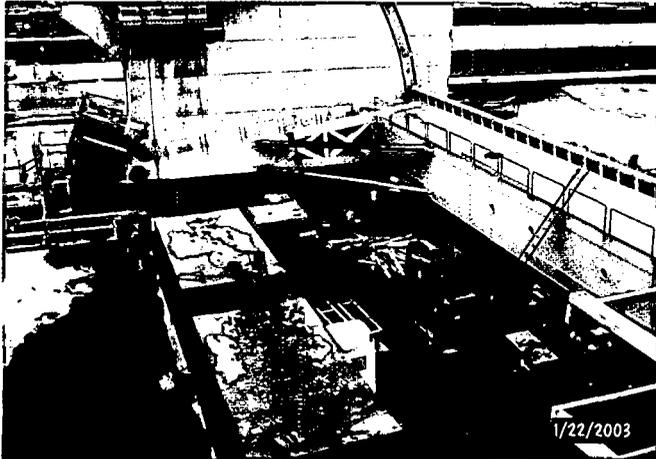


Fig. 7.20: Installation de la vanne segment



Fig. 7.21: Mise en place des batardeaux pour la mise à sec

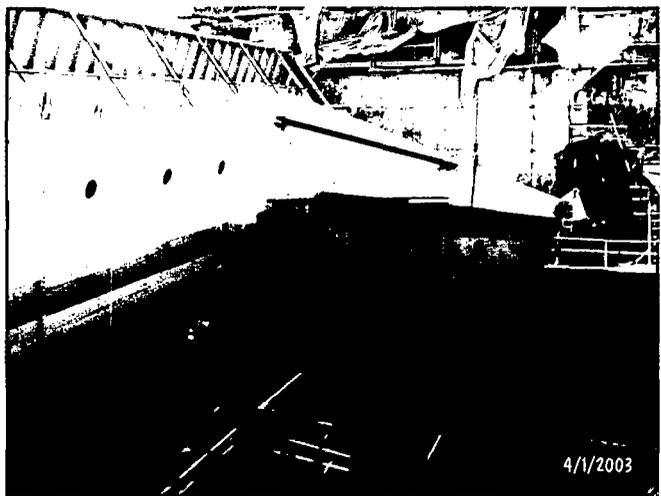


Fig. 7.22: Vanne segment, Barrage de Braddock – Mise en place à sec

8. CODES, REGLEMENTS et NORMES

8.1 APPLICATION DES NOUVELLES NORMES AUX STRUCTURES HYDRAULIQUES

Cette section est basée sur un rapport de Jean-Bernard Kovarik (1998), France.

8.1.1 LES ETATS LIMITES DE CONCEPTION ET L'APPROCHE SEMI-PROBABILISTE

Le développement de nouvelles normes (comme les Eurocodes) basées sur les états limites et les coefficients partiels de sécurité résultent de la nécessité d'harmoniser les normes en cours aux nouvelles méthodologies. Jusqu'ici les structures hydrauliques étaient principalement conçues en utilisant des règlements spécifiques correspondants aux différentes parties de la structure concernée (structure métallique, béton, fondation...). Cela mène à certaines incohérences quand différents formats sont employés simultanément.

D'une part, plusieurs sollicitations [pression statique et dynamique, vague, courant... ainsi que les actions induites par les navires (accostage, amarrage) et les activités portuaires (charges, grues, équipements ...)] ne sont pas traitées dans les normes existantes la plupart du temps consacrées aux bâtiments et aux ponts (le vent, la neige, les charges d'exploitation, les actions du trafic). Pour surmonter ce problème, plusieurs aspects de l'approche semi-probabiliste ont été développés en unifiant les «coefficients caractéristiques» et en définissant les «coefficients des modèles de calcul». Les questions les plus importantes qui apparaissent lors du développement de procédures de vérifications aux états limites concernent : les coefficients partiels de sécurité, les valeurs caractéristiques et, principalement celles liées à l'eau, l'évaluation du niveau de sécurité à s'imposer et les procédures de calibrage.

En Europe, plusieurs aspects de l'Eurocode ont été développés en unifiant les «coefficients caractéristiques» et en définissant les «coefficients des modèles de calcul». Les «coefficients caractéristiques» sont liés aux actions, aux matériaux et à leur résistance;

ils tiennent uniquement compte de l'incertitude intrinsèque sur ces paramètres et leurs valeurs sont principalement dérivées de codes ou de règlements existants. Les «coefficients des modèles de calcul» interviennent dans la formulation globale des vérifications aux états limites. Ils doivent être calibrés afin de s'accorder avec les règlements traditionnels de calcul (approche déterministe).

En France, ceci a mené à la publication des «Directives pour la conception aux états limites des ports et des structures des voies navigables», à savoir "ROSA 2000" basé sur les Eurocodes (Répertoire / B2 sur le CDRom).

8.1.2 UNE PROCEDURE DE CALCUL HARMONISEE

En Europe, un développement important a commencé à la fin des années 70 par la substitution progressive des méthodes traditionnelles dites «aux contraintes admissibles» par des méthodes semi-probabilistes dans les règlements de calcul des structures.

Les états limites considérés sont:

- Les états limites ultimes (ELU), lorsqu'ils se produisent, ont comme conséquence la destruction de la structure par la perte d'équilibre statique, dépassement de la résistance mécanique, perte de stabilité, etc. Les ELU sont des phénomènes dont l'occurrence a des conséquences tellement dramatiques qu'il est économiquement logique de les empêcher en fixant des coefficients de sécurité très sévères.
- Les états limites de service (ELS), lorsqu'ils se produisent, ont comme conséquence un défaut de fonctionnement qui compromet l'utilisation de la structure. Les ELS sont des phénomènes dont l'occurrence a des conséquences limitées. Il est dès lors économiquement logique de considérer des coefficients de sécurité moins sévères.

Dans les Eurocodes, les formulations varient selon les états limites et la nature des variables de base. Pour faire cela, des coefficients partiels de sécurité sont divisés en:

- «Coefficients caractéristiques», notés γ_p , γ_M et γ_R , qui s'appliquent aux variables de base comme les propriétés du sol, les charges structurelles, les propriétés des matériaux, etc.
- Un «coefficient des modèles de calcul» γ_d , qui est généralement unique (par simplicité). Ce "facteur modèle" est supposé être situé sur le côté gauche de la condition d'état limite, c-à-d en augmentant l'effet de l'action.

L'expression générale d'une formulation aux états limites ultimes avec des facteurs partiels de sécurité s'écrit:

$$\gamma_d \cdot E(\Sigma \gamma_f \cdot F_k) \leq R[\Sigma(X_k / \gamma_M)] \quad (8.1)$$

où:

- F_k sont les charges, R est la valeur de calcul de la résistance et X est un paramètre matériel (sol, béton, acier ...).
- E est une fonction de plusieurs paramètres (géométrie, charges....). Elle symbolise l'équation du modèle considéré (cela peut aller d'un modèle analytique simple à une analyse complexe 3D par éléments finis), qui par exemple, donne les contraintes à un point précis de la structure.

En pratique, cela signifie par exemple que le coefficient partiel de sécurité de l'Eurocode pour les sollicitations permanentes (1,35) est le produit d'un coefficient caractéristique ($\gamma_f = 1,20$) et d'un coefficient pour le modèle de calcul ($\gamma_d = 1,125$). Il en est de même pour le facteur 1,50 de l'Eurocode utilisé pour les actions variables qui est le produit de $\gamma_f = 1,33$ et de $\gamma_d = 1,125$.

8.1.3 UN OUTIL PRATIQUE DE CALCUL POUR LES INGENIEURS

Les méthodes et concepts présentés ci avant ne sont pas spécifiques aux structures hydrauliques comme les barrages mobiles de navigation mais se réfèrent à la tendance générale visant à une harmonisation des codes de conception qui a eu lieu en Europe pendant les années 90. Une question importante concernant le développement de nouvelles formulations visant à la vérification des structures touche aux éléments suivants :

- Pleine uniformité avec les règles européennes en vigueur relatives au calcul des structures ;
- Tolérance pour une adaptation au niveau national des coefficients de sécurité (coefficients partiels de sécurité et des modèles de calcul) ;
- La possibilité de trouver une justification vis-à-vis des écarts et incohérences avec les règlements nationaux en vigueur ;
- Rôle important joué par le praticien pour évaluer les résultats des nouveaux modèles de calcul et pour déterminer les valeurs caractéristiques appropriées qui sont spécifiques au projet.

En vue d'accroître la qualité des règlements une vision commune des procédures de vérification est préférable à l'affinage extrême d'un coefficient partiel de sécurité. Il est très important d'avoir un langage commun et une bonne appréciation des conditions de sécurité. Dans ce sens, on espère que les efforts entrepris durant plusieurs années dans beaucoup de pays afin de comparer et améliorer les règlements pratiques continueront et contribueront à améliorer la qualification des ingénieurs et la sécurité globale des ouvrages et en particulier celles des barrages mobiles et barrières de protection.

8.2 CODES, REGLEMENTS, NORMES ET DIRECTIVES EN RELATIONS AVEC LES THEMES DU GT 101

Dans les différents pays des membres du GT 101 il existe de nombreux codes, règlements, normes et directives concernant les barrages mobiles de navigation et les barrières. Comme le nombre de pages de ce rapport est limité, des informations complémentaires concernant ces sujets sont disponibles sur le CD du GT 101 (répertoire /annex section 8 – CODES/).

Afin d'introduire ces documents, citons :

- le dossier "**A: Compilation based on information of the WG-members**", dans lequel, pour une bonne compréhension, les informations sur le CD sont classées par pays de l'utilisateur, nom, année d'édition et enfin titre.
- Le dossier "**B: catalogue CEN en ligne/ catalogue ISO en ligne**" qui traite des données de base qui sont disponibles sur le catalogue CEN en ligne (Structures métalliques et aspects techniques), (<http://www.cenorm.be>) et catalogue ISO en ligne (structures en acier), (www.iso.ch/iso/en/CatalogueListPage.CatalogueList).
- Le dossier "**C: List of British Standards**" qui comprend la liste des normes britanniques disponibles.

9. CONCLUSIONS & RECOMMANDATIONS

Ayant étudié un grand nombre d'ouvrages existants, le groupe de travail PIANC 101 (ex InCom 26), confirme que la connaissance et les informations concernant la conception des barrages mobiles sont disponibles en masse mais qu'elles ne sont pas utilisées à bon escient et ce souvent par méconnaissance. Nous espérons que ce rapport permettra aux concepteurs des futurs projets de tirer profit de ces connaissances et de ces informations et conduira à des améliorations au niveau de leur conception et à des économies dans la construction.

Puisque que la 'conception des barrages mobiles de navigation est un monde conservateur', le GT recommande:

- Au sujet de l'innovation :
Les administrations publiques qui sont habituellement les propriétaires et les gestionnaires des barrages mobiles devraient laisser plus de place à l'innovation et aux concepts nouveaux.
- A propos de la préfabrication et de la standardisation :
L'utilisation de la préfabrication qui est étroitement liée à la standardisation devrait être considérée avec plus d'attention car c'est une source d'économie, elle permet une construction rapide et il s'agit d'un mode de construction plus respectueux de l'environnement.
- Au sujet des dispositifs de fermeture temporaire :
Les dispositifs de fermeture temporaire et les batardeaux de maintenance doivent être considérés comme un point essentiel pour une conception efficace.

- La procédure de conception et la multidisciplinarité : Il est indispensable d'intégrer aux procédures traditionnelles de conception des barrages l'analyse des risques, leur entretien et leur contrôle, les codes et les normes (Eurocodes) et les nouveaux concepts de calcul (états limites et coefficients partiels de sécurité). Une telle procédure de conception exige une équipe pluridisciplinaire composée d'ingénieurs, d'économistes, de biologistes, d'analystes sociaux, etc. A court terme, les concepts aux états limites et les approches semi-probabilistes (Eurocodes...) devraient devenir la pratique courante.
- Les logiciels de conception et de calcul : Nous devons favoriser le développement et l'utilisation des logiciels spécifiques aux études d'avant-projet. Des calculs avancés peuvent aujourd'hui être réalisés dès la conception préliminaire afin d'étudier la faisabilité de conceptions novatrices. L'optimisation structurelle peut également être effectuée lors de l'étape préliminaire car elle peut induire un gain important (poids et coût). Postposer l'optimisation au niveau des études de détail réduit fortement ses avantages potentiels.
- A propos du choix du type de vannes : Le choix de la vanne est une étape importante dans un projet de barrière ou de barrage. Les conséquences opérationnelles, financières, et autres de ce choix sont souvent plus importantes que celles résultant du calcul de détail. Il est donc recommandé de considérer avec la plus grande attention le choix du type de vannes.
- A propos des analyses multicritères : Les expériences antérieures des ingénieurs peuvent être employées mais ne peuvent pas remplacer un «*brainstorming*» permettant de mettre en évidence des concepts novateurs et ensuite une analyse comparative multicritères soignée.
- Un effort doit être fait pour obtenir une liste complète et équilibrée des critères significatifs du projet concerné. Des groupements de critères peuvent être considérés. De plus, il est conseillé de sélectionner un nombre réduit de types de vannes, par exemple pas plus de 4 à 6.
- Les comparaisons qualitatives sont simples et rapides mais, en revanche, arbitraires et pas très transparentes. Les comparaisons quantitatives exigent beaucoup plus d'efforts et de temps mais sont moins arbitraires et plus transparentes. Une comparaison basée sur l'analyse des coûts est probablement l'approche quantifiable la plus judicieuse. Toutefois, une méthode d'évaluation plus universelle repose sur des indices de performance et des coefficients de pondération entre les différents critères. La méthode des indices de performance reste néanmoins partiellement arbitraire mais elle est toutefois plus transparente que les méthodes qualitatives et mieux équilibrée que les méthodes basées sur des analyses de coûts.
- En ce qui concerne la maintenance et la standardisation : La problématique de la maintenance est une des principales questions non abordées lors de la conception de barrage. Afin d'atteindre un rapport qualité-prix optimum et un standard élevé au niveau du fonctionnement, la maintenance et l'entretien doivent être pris en compte dès l'étape de la conception préliminaire. La prise en compte de la maintenance dès l'étape de conception peut induire des surcoûts d'investissement mais réduit à coup sûr le coût global de fonctionnement durant tout le cycle de vie de l'ouvrage (30-50ans).
- Au sujet des structures flottantes : La flottabilité peut être utilisée comme un mode de construction (voir les techniques de préfabrication, Section 7). Concevoir la structure d'un barrage mobile à partir de structures flottantes est une alternative potentiellement très intéressante car cela permet d'aboutir à des structures simples, meilleur marché et plus fiables. Les structures flottantes exigent néanmoins de faire appel à des spécialistes et à des logiciels spécifiques pour évaluer la stabilité en flottaison aux diverses étapes de leur mise en place.

Les recommandations au sujet des analyses comparatives multicritères sont:

- Il est conseillé de déterminer les critères et les facteurs de pondération par une équipe représentant les initiateurs du projet (pouvoirs publics, autorités locales...) – et leur estimation (cotation) par une équipe pluridisciplinaire de professionnels. Les deux équipes doivent agir indépendamment.

- Au sujet du contrôle du fonctionnement :
La philosophie «keep it simple» est toujours valable mais n'est pas toujours réalisable ! Il y a des exemples d'ouvrages de protection contre les inondations très simples qui fonctionnent bien mais qui ont besoin de nombreuses interventions manuelles. Il y a également des structures très sophistiquées qui fonctionnent entièrement automatiquement. La vraie question se situe au niveau de la fiabilité du système et des conséquences d'un mauvais fonctionnement. Il est recommandé que tous les éléments critiques du système de contrôle soient doublés et que des systèmes de secours soient prévus, dans la limite du possible, pour les moteurs et la fourniture d'énergie.

- Au sujet d'une conception basée sur une analyse du risque :

Une analyse de risque est maintenant un outil accessible pour la conception des barrages et des barrières. C'est particulièrement utile lorsqu'une erreur peut induire des dommages importants à l'environnement, aux habitations et aux vies humaines. Les avantages d'une conception basée sur une analyse du risque sont :

- Une évaluation plus réaliste des marges de sécurité que les critères de sécurité traditionnels (déterministes) ;
- La possibilité d'obtenir des gains financiers ;
- La comparaison d'une plus grande variété d'alternatives et de risques dus à l'ouvrage de protection contre les inondations, les risques naturels et ceux induits par l'homme ;
- Ne pas simplement considérer la probabilité de dépassement des niveaux admissibles des ouvrages (barrières, digues, etc.) mais également la probabilité de non fonctionnement de l'ouvrage (vanne...) et l'importance des conséquences résultantes pour les populations, les propriétés, etc. situées derrière les ouvrages de protection.

- Au sujet de l'impact sur l'environnemental et de l'esthétique de l'ouvrage :

Il est recommandé que les utilisateurs, les concepteurs et les autorités responsables soient conscients de l'impact «durant le cycle de vie complet» de l'ouvrage projeté. De même, il

est important de considérer «l'empreinte environnementale complète» du projet et non pas simplement les facteurs concernant le site de construction et d'exploitation.

10. REFERENCES

ASSEL, R.A., 2000: "Maximum Freezing Degree-Days as a Winter Severity Index for the Great Lakes", 1897-1977, Monthly Weather Review, Volume 106.

AWZ, 2004: "Actualization of the Sigmaplan, Social benefit cost analysis", Belgian Ministry for waterways, Department Seascheldt.

BHARGAVA, V.P., NARASIMHAN, S., 1988: "Pressure Fluctuations on Gates", J. of Hydraulic Res., Vol. 27.

BOUVARD, M., 1991: "Mobile Barrages and Intakes on Sediment Transporting Rivers", IAHR Monograph, 320 pages.

BS.61508, Functional Safety of Electrical, Electronic and Programmable Electronic Safety-Related Systems. See also <http://www.bsi-global.com/>

BURT et al., 1996: "Barrages: Engineering Design & Environmental Impacts", Edited by. N. Burt & J. Watts, John Wiley & Sons., 504p.

BURT, N., REESE, A., 2001: "Guidelines for the Assessment and Planning of Estuarine Barrages", Thomas Telford. London.

CASSIDY J., 2000: "Gated Spillway and other controlled release facilities, and dam safety", ICOLD Beijing congress Q79, pp 735-778.

CAMPBELL, F., 1961: "Vibration Problems in Hydraulic Structures", J. of the Hydraulics Division, Proc. of the Am. Society of Civil Engineers, Vol. 87.

COMFORT, G., GONG, Y., SINGH, S., ABDELNOUR, R. and LIDDIARD, A., 2003: "Static Ice Loads On Hydro-Electric Structures: Summary Report; Ice Load Design Guide, and; Ice Load Prediction Computer Program", CEATI Report T002700-0206.

- COMFORT, G., LIDDIARD, A., ABDELNOUR, R., 2004: "A Method and Tool for Predicting Static Ice Loads on Dams", IAHR Conference, St. Petersburg.
- DALY F., 1995: "Etude sommaire sur les facteurs de coût des reconstructions de barrages en rivière par des ouvrages à vannes clapets", Rapport SOR 95.02, November, CETMEF-VNF, France,
- DANIEL, R.A., 1996: "Hartelkering - Schuiven met Mogelijkheden", Bouwen met Staal, No. 130.
- DANIEL, R.A., 2000: "Keersluis Heumen - R. Waterkerende Staalconstructies", 3904-S&SM-D-99.304, Bouwdienst Rijkswaterstaat, Utrecht.
- DANIEL, R.A., 2003 : "Construction Material for a Bridge with Regard to the Environment", Bautechnik, Heft 1.
- DANIEL, R.A., DONKERS, A.L.J.M., DE RIJK, M.C., 2003 : "Naviduct Krabbersgat in Enkhuizen - Sluisdeuren naar een hoger niveau", Bouwen met Staal, No. 175.
- DEFRA, 2002: "Temporary and Demountable Flood Protection", Environmental Agency, UK. (Available on the WG 101's CD), <http://www.defra.gov.uk/environ/fcd/pubs/pagn/default.htm>
- DIN EN 1050:1997-01 Safety of machinery - Principles for risk assessment.
- DOWRICK, D.J., 2003 : "Earthquake Risk Reduction", John Wiley & Sons.
- ELSEVIER, 1987: "Water and Hydraulic Engineering", Dictionary of Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam-London-New York-Tokyo.
- ENVIRONMENT AGENCY, 2000: The Humber Estuary, Shoreline management plan, <http://www.environment-agency.gov.uk/>
- ERBISTI, P.C.F., 1981: "Hydraulic Gates: The State of Art." Water Power Dam Construction, April 1981, pp 43-48.
- ERBISTI, P.C.F., 1994: "Developments in Hydraulic Gates in Hydropower and Dams", Hydropower and Dams, January 1994, pp 51-57
- ERBISTI, P.C.F., 2004: "Design of Hydraulic Gates", A.A. Balkema Publishers, The Netherlands, www.balkema.nl or www.tandf.co.uk (see WG26-CD in the Répertoire /Annex Section 5.1 – Structure/).
- FAGANELLO E., 2004: "Hydraulic Modelling to Revise the Sluice Gate Control Logic at Cardiff Bay Barrage", PIANC, Bull. n 117.
- GERWICK, B.C., YAO, S.X., BERNER, D.E., BITTNER, R.R., 2000: "Assessment of Heavy-Life Equipment for In-the-Wet Construction of Navigation Structures", ERDC/GSL TR-00-2, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.
- GERWICK, B.C., YAO, S.X., 2002: "Positioning Systems for Float-In and Lift-In Construction in Inland Waterways", ERDC/GSL TR-02-22, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.
- GILL, H., MAY, C., 1989: "Crest Gates Design for Upper Mechanicville", Proc. of the Int. Conference on Hydropower, New York, NY, Vol. 3.
- HARTUNG, F., 1973: "Gates in Spillways of Large Dams", Int. Commission on Large Dams, Madrid Congress, Q41 R72, pp.1361-1374.
- GISZAS, H., 2002: Sturmflutschutz: Herausforderungen und Sicherheitskonzept (Protection against storm floods: Challenges and safety concept) HTG-Kongress 2003, Stuttgart, 17-20.09.2003, Thomas Telford, London. Available at <http://www.thomastelford.com/> or <http://www.ttbooks.co.uk/>
- HADJIAN, A., 2004: "Basic Elements of Earthquake Engineering", John Wiley & Sons.
- HITE, J.E. 1993: "Scour Protection for Dam No. 2, Arkansas River, Arkansas, Hydraulic Model Investigation", Technical Rep. HL-93-7, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- HOMA, M., OGIHARA, K., 1976: "Theoretical Analysis of Flap Gate Oscillation", Trans. of the Japan Society of Civil Engineers, Vol. 7.
- ICOLD-CIGB : "Technical Dictionary on Dams and Glossary appended", International Commission of Large Dam, www.icold-cigb.org ; <http://www.icold-cigb.net/images/PDF-multilangue/cata%20web.pdf>

- ICOLD Question 76, 2000: The use of risk to support dam safety decisions and management, Beijing.
- IPPC, 2001: "Greenhouse Effect and Sea Level Rise: The Cost of Holding Back the Sea", Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ISO/FDIS 2394: 1998(E), "General principles on reliability for structures", International Standard, Final Draft 1998.
- JANSEN, D., ROUVE, G., 1996 : "Safety Evaluation and Utility Value Analysis for Rehabilitation of Old Barrages", Barrages: Engineering, Design and Environmental Impacts, Int. Conference, Cardiff, U.K.
- KLINGMUELLER, O., BOURGUND, U., 1992: "Sicherheit und Risiko im Konstruktiven Ingenieurbau (Safety and Risk in the Field of Structural Engineering)", Verlag Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden.
- KOLKMAN, P. A., 1980 : "Development of Vibration-Free Gate Design: Learning from Experience and Theory", Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations, Int. Association for Hydraulic Res., Karlsruhe, Germany, September 3-6, 1979, Edited by E. Naudascher and D. Rockwell Springer-Verlag, Berlin.
- KOVARIK, J.B., 1998: "De l'application des Eurocodes aux ouvrages maritimes et fluviaux", Revue Française de Génie Civil, Vol.2.
- KULKA, A., 1928: "Der Eisenwasserbau", Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
- LE SOURNE, H., RODET, JC, CLANET, C., 2003: "Crashworthiness Analysis of a Plane Lock Gate Impacted by Different River Ships," PIANC Bull., No. 112.
- LEWIN, J., 1995: "Hydraulic Gates and Valves in Free Surface Flow and Submerged Outlets", Thomas Telford Publications, London.
- MAHADVI, A., RIES R., 1998: "Towards Computational Eco-Analysis of Building Designs," Computers & Structures, No. 67.
- MOCKETT, I.D., SIMM, J.D., 2003: "Risk Levels in Coastal and River Engineering: A Guidance Framework for Design", TAW, Leidraad Kunstwerken, (May 2003).
- NAEIM, F., KELLY, J.M., 1999: "Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice", John Wiley & Sons.
- NAUDASHER, E., 1991: "Hydrodynamic Forces", IAHR publications.
- NEILSON, F. M., PICKETT, E.B., 1980 : "Corps of Engineers Experiences with Flow-Induced Vibrations", Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations, Int. Association for Hydraulic Res., Karlsruhe, Germany, September 3-6, 1979, edited by E. Naudascher and D. Rockwell, Springer-Verlag, Berlin.
- NOVAK, MOFFAT, NALLURI, NARAYANAN, 1997, "Hydraulic structures", E&FN SPON,
- OGIHARA, K., UEDA, S., 1980 : "Flap Gate Oscillation, Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations", Int. Association for Hydraulic Res., Karlsruhe, Germany, September 3-6, 1979, edited by E. Naudascher and D. Rockwell Springer-Verlag, Berlin.
- PARTENSKY, H., SWAIN, A., 1971 : "Theoretical Study on Flap Gate Oscillation", Hydraulic Research and Its Impact on the Environment, Fourteenth Congress of the Int. Association for Hydraulic Res., August 29-September 3, 1971, Vol. 2.
- PERILLO, G., 1997: "La valutazione di impatto ambientale degli impianti di depurazione mediante analisi e comparazione delle alternative progettuali", Int Symposium: Ingegneria Sanitaria ed Ambientale (SIDISA), Ravello (SA), Italy. (*In Italian*). See English Draft "E.I.A. as an "Environmental Planning" Tool - Analysis and criteria for comparing alternatives, on the WG 101's CD-Répertoire /Annex Section 5.7 – Environment.
- PETITJEAN, 1981: "Evolution Technologique des Barrages Mobiles", La Houille Blanche, No.2-3.

- PETRIKAT, K., 1980: "Discussion of 'Flap Gate Oscillation' by Ogihara, K. and Ueda, S.", Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations, Int. Association for Hydraulic Res., Karlsruhe, Germany, September 3-6, 1979, edited by E. Naudascher and D. Rockwell, Springer-Verlag, Berlin.
- PIANC, 1985: "Illustrated Technical Dictionary", Editor: PIANC, Author: Werner Röhle, Austria, 6th Draft, February 1985 (Reporter as final draft).
- PIANC-WG19, 2001: "Ship Collision Due to Presence of Bridges", PIANC, Report of InCom WG 19, 2001.
- PIANC-WG23, 2004: "Technical and Economic Problems of Channel Icing", PIANC, InCom Report of WG23.
- PIANC-WG25, 2005: "Maintenance and Renovation of Navigation Infrastructures", PIANC, InCom Report of WG25.
- PIANC-WG17, 2004: "Inspection, Maintenance and Repair of Maritime Structures Exposed to Damage and Material Degradation Caused by Sault Water Environment", MarCom Report of PIANC WG-17 (Revision 2004).
- PIANC-WG34, 2000: "Seismic Design Guidelines for Port Structures", MarCom Report of PIANC WG-34; ISBN 90 265 1818 8.
- PIANC-WG41, 2003: Guidelines for Managing Wake Wash from High Speed Vessels, MarCom Report of PIANC WG-41.
- PETITJEAN 1981: «Evolution technologique des barrages mobiles» – La Houille blanche, n°2-3, pp 141-144°.
- PICKERING, G. A., 1971: "Spillway Gate Vibrations on Arkansas River Dams, Arkansas and Oklahoma; Hydraulic Model Investigation." T.R.-H-71-5, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- POUW, C., NAGTEGAAL, J.B., 2000: "Maaswerken - Report Variantenstudie Stuw Sambeek", OTB-S&K-S&S-D-00.025, Bouwdienst Rijkswaterstaat, Utrecht (In Dutch).
- PUGSLEY, Sir A., 1974 : "The works of Isambard Kingdom Brunel", Institution of Civil Engineers, London.
- PULPITEL, L., 1980 : "Some Experiences with Curing Flap-Gate Vibration", Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations, Int. Association for Hydraulic Res., Karlsruhe, Germany, September 3-6, 1979, edited by E. Naudascher and D. Rockwell, Springer-Verlag, Berlin.
- RACT, COTILLON, LEMAY, 1970 : "Les Barrages Mobiles en Rivière", Travaux, n°423, p4 (In French).
- RAZEK, A., LIDDIARD, A., COMFORT, G., 2003 : "Development of Boom Design Procedures and Site Selection to Improve the Warning and Efficiency of Hydro Plants", Commission Internationale des grands Barrages, Montreal.
- RAZVAN E., 1989, "River Intakes and Diversion Dams", Elsevier.
- RIGO, P., MARCHAL, RODRIGUEZ, 1996: "The Use of Floating Gates for Storm Surge Barrier", Barrages: Engineering Design & Environmental Impacts", Edited by N. Burt & J. Watts, John Wiley & Sons.
- RIGO, P., 1999: "Least Cost Optimum Design of Stiffened Hydraulic and Floating Structures", PIANC Bulletin, No.101.
- RIGO, P., 2000 : "Un Outil d'Optimisation des Structures Orthotropes Intégré à l'Avant-Projet", Revue Construction Métallique (CTICM), No.2-2000, Paris.
- RIGO P., LIZIN S., CLOSSET MP., CHAPITAL L., POLIGOT-PITSCH S., 2006 : "Esquivanne: Un Outil de Conception des Barrages Mobiles de Navigation", AIPCN 2006, 31ème Congrès de l'AIPCN, Estoril Portugal, Mai 2006, (Article 076),
- RIJKSWATERSTAAT, 1982: "Eastern Scheldt Storm Surge Barrier", Proceedings of the Delta Barrier Symposium Rotterdam, 13-15 October 1982.

- ROSA-2000, (2001): «Rosa 2000 : "Recommandations pour le Calcul aux Etats-Limites des Ouvrages en Site Aquatique», (French Ministry of Equipement)", Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF-VNF), Ponts-Formation-Editions, France (in French).
- SCHWARTZ, H. I., 1964: "Nappe Oscillation", J. of the Hydraulics Division, Proc. of the Am. Society of Civil Engineers, Vol. 90.
- SCHMIDGAL, T., 1972: "Spillway Gate Vibrations on Arkansas River Dams", J. of the Hydraulics Division, Proc. of the Am. Society of Civil Engineers, Vol. 98, No. HY1.
- SEHGAL, C., 1996: "Design Guidelines for Spillway Gates", J. of Hydraulic Engineering, Vol. 122, pp 155-165.
- SEHGAL, C., 2000: "Selection Criteria for Gates and Operating Equipment for Spillway", ICOLD, Beijing Congress, Q79, pp 275-298. (see WG 101-CD in the Répertoire /Annex Section 5.1 – Structure/)
- SLATTERY, K. T, RIVEROS, G. A., 2003 : "Design by Analysis of Innovative Navigation Structures", ERDC/ITL T.R.-02-4, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.
- TAW1997:, Basisrapport Waterkerende Kunstwerken en Bijzondere Constructies, Delft, June 1997.
- TODD R.V., 1999: "Spillway Tainter Gate failure at Folsom Dam, California", WaterPower 1999, www.ascelibrary.org (ASCE 2004).
- U.S. Army, 1952: "Hydraulic Design Criteria", prepared by the U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi in series since 1952.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1987: "Hydraulic Design of Navigation Dams", Engineering Manual 1110-2-1605, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1990: "Hydraulic Design of Spillways", Engineering Manual 1110-2-1603, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1993: "Engineering and Design, River Hydraulics", Engineering Manual 1110-2-1416, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1995: "Planning and Design of Navigation Dams", EM 1110-2-2607, 31 July 1995
- U.S. Army Corps of Engineers, 1997: "Engineering and Design – Vertical Lift Gates", Engineering Manual 1110-2-2701, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- U.S. Army Corps of Engineers, 2000: "Engineering and Design – Design of Spillway Tainter Gates", Engineering Manual 1110-2-2702, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1995 (July), "Planning and Design of Navigation Dams"-Engineer Manual
- U.S. Army Corp of Engineers, 2002 (October), Engineering and Design, Ice Engineering.
- U. S. Army Corps of Engineers. (February 11, 2004). EM 1110-2-2611, "Engineering for Prefabricated Construction of Navigation Projects".
- VAN DEN HORST, T., SCHENK, J., 1981 : "Theatrum Machinarum Universale", Petrus Schenk, Amsterdam, 1736, new edition by T. Wever, B.V., Franeker (In Dutch).
- VLEK, C.A.J., 1996: A multi-level, multi-stage and multi-attribute perspective on risk assessment decision-making and risk control, Risk decision and Policy, Chapman &Hall.
- VNF, 1998 : "Les Barrages Mobiles de Navigation (Navigation Movable Weirs), Guide du chef de Projet, Voies Navigables de France (VNF)", Ed. Le Moniteur, Paris (See WG 101-CD Répertoire B3 for a PDF version, with the courtesy of VNF and acknowledgment to R. Abdelnour who made the PDF file).

WIELAND, W., 2003: "Seismic Aspects of Dam", Proceedings of 21st Congress on Large Dams (ICOLD), June 2003, Montreal Canada, Vol. 3 Question 83, p.1291.

YAO, S.X., BERNER, D.E., GERWICK, B.C., 1999 : "Assessment of Underwater Concrete Technologies for In-the-Wet Construction of Navigation Structures", T.R INP-SL-1, U. S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.

YAO, S.X., BERNER, D.E., MILES, W., FEHL, B.D., WALKER, M., WOODSON, S.D., 2003 : "Proposed Design Criteria on Thin-Wall Precast Panels for Hydraulic Concrete Structures", ERDC/GSL TR-03-14, U. S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.

ZIPPARRO, V.J., HASEN, H., 1993 : "Davis' Handbook of Applied Hydraulics", 4th ed., McGraw-Hill, Inc., New York, N.Y.

Produits environnementaux Seacor
<http://www.seacorcanada.com/>

Whisper Wave, Maritime Homeland Defense & Force Protection Port Security Solutions
<http://www.whisperwave.com/port.htm>

10.1 QUELQUES SITES WEB PERTINANTS

British Waterways:
<http://www.britishwaterways.co.uk/>

VNF (Voies Navigables de France) :
<http://www.vnf.fr/>

DEFRA - MAFF, FCDPAG4, Guide d'évaluation des ouvrages de protection contre les Inondations. Introduction à l'analyse du risque:
<http://www.defra.gov.uk/envIRON/fcd/pubs/pagn/default.htm>

Liste des sites internationaux relatifs aux voies navigables :
<http://www.icomos.org/studies/canals2a.htm>

ICOLD-CIGB, Dictionnaire Technique sur les Barrages et Glossaire, Commission Internationale des Grands Barrages:
www.icold-cigb.org ;
<http://www.icold-cigb.net/images/PDF-multilangue/cata%20web.pdf>

U.S Army Corps of Engineers:
<http://chl.erd.usace.army.mil/CHL.aspx?p=Publications>

ANNEXE A: INVENTAIRE DES OUTILS DE CALCUL POUR LA CONCEPTION DES BARRAGES MOBILES ET BARRIERES ANTI-TEMPÊTES

Annexe de la Section 6 "OUTILS DE CONCEPTION ET D'EVALUATION"

Cette liste de logiciels a été établie sur base de l'enquête faite par le GT (Section 6). Cette liste n'est évidemment pas exhaustive. C'est plus une liste quantitative, qui donne un échantillon approprié d'outils utilisés en 2004, par les concepteurs, les bureaux d'études et les entreprises de génie civil dans le domaine des barrages mobiles et des barrières anti-tempêtes.

Notons qu'une modélisation physique (modèle réduit) est une autre solution alternative envisageable qui peut être plus rentable/efficace pour certaines études.

CAO	COMMENTAIRES DES UTILISATEURS	REFERENCES
AUTOCAD	Modélisation/conception générale 2D/3D	www.autodesk.com
MICROSTATION	Modélisation/conception générale 2D/3D et conversions de données	www.bentley.com
SOLIDWORKS	Représentation de structures – conception	www.solidworks.com
CANVAS	Surfaces 2D	www.deneba.com/default.html
RGS-CAD & CADSRC	Modélisation structurelle 3D (Acier et béton)	www.rgs-cad.com
WISE IMAGE	Outil de visualisation pour AutoCAD	www.cadcam.org/convert-raster-vector-converter.php
AUTOPLANT	Logiciel de modélisation 3D pour des conduites industrielles	www.rebis.com/products/ www.bentley.com
NAVIS PRESENTER	Visionner un modèle 3D sur l'ordinateur	www.spi.de/navisworks/navis.htm#Presenter
CAD CHECKER	S'assure que toutes les données de la CAO sont conformes au BVC Ltd et aux normes du client	www.excitech.co.uk/
ProENGINEER	Système paramétrique de modélisation/conception 3D	www.ptc.com
CATIA	Système de modélisation/conception 3D	www.3ds.com/products-solutions/brands/CATIA
SOLID EDGE	Système de modélisation/conception 3D	www.solidedge.com

OUTILS DE CONCEPTION EN PHASE D'AVANT-PROJET (APS)	COMMENTAIRES DES UTILISATEURS	REFERENCES
LBR5	Calcul et Optimisation des structures en acier basée sur le coût de construction	www.anast.ulg.ac.be/main.php?LGID=1&MID=34

HYDRAULIQUE	COMMENTAIRES DES UTILISATEURS	REFERENCES
MIKE 11	Logiciel d'hydrodynamique 1D. Modélisation des écoulements en rivière, qualité et sédiments	www.dhisoftware.com/
MIKE 21	Écoulements non permanents 2D	
MIKEFLOOD	Combine modélisation 1D et 2D	
MIKE 12	Écoulement de deux couches stratifiées (eau douce/eau salée), modèle à largeur moyennée (domaine vertical)	
MIKE AD	Intrusion de sel, qualité de l'eau, transport de sédiments	
MIKE 3	Simulation 3D	
MIKEBASSIN	Étude du contrôle des écoulements, régulation de réservoirs	
DELFT 3D	Simulation hydrodynamique 3D, sédiments, sel, pollution	www.wldelft.nl/soft/d3d
FLUENT	Code CFD générique	www.fluent.com
WOLF	Hydrologie et écoulement de surface (1D, 2D)	www.hach.ulg.ac.be/

HYDROWORKS	Simulation des écoulements 1D	www.hydroworks.org
INFOWORKS RS	Simulations 1D d'un écoulement non permanent, calcul de l'ampleur d'une inondation	www.wallingfordsoftware.com
HEC-RAS	Écoulement permanent pour un réseau de rivières équipées d'ouvrages de contrôle	www.hec.usace.army.mil/software/hecras/hecras-hecras.html
SSIIM	Modèle numérique 3D pour simuler les mouvements des sédiments dans des prises d'eau avec une option multiblocs	http://folk.ntnu.no/nilsol/ssiim/
PCSWMM	Modélisation de la gestion des eaux de crue	www.computationalhydraulics.com
SMS	Système de modélisation des écoulements de surface : hydrodynamique 1D, 2D et 3D	www.ems-i.com
FLOW 3D	Simulation hydrodynamique 3D autour des ouvrages hydrauliques	www.flow3d.com
RMA2, RMA4	Écoulements 2D, profondeur moyennée (domaine horizontal), surface libre (MEF)	www.bossintl.com/html/sms_details.html

PLAN DE VAGUES	COMMENTAIRES DES UTILISATEURS	REFERENCES
DUROSTA	Morphologie des plages et des dunes (érosion)	www.netcoast.nl/tools/rikz/durosta.htm
SWAN	Modélisation d'un plan de vague en zone côtière	www.porl.nus.edu.sg/wave_modeling.htm www.wldelft.nl/soft/swan/
MIKE21-BW	Modèle de diffraction - houle	www.dhisoftware.com

CODES D'ÉLÉMENTS FINIS GÉNÉRIQUES POUR LES STRUCTURES MÉTALLIQUES ET EN BETON		
	COMMENTAIRES DES UTILISATEURS	REFERENCES
NASTRAN	Modèle poutre (2D), Analyse 3D - éléments finis	www.mssoftware.com/products/products_detail.cfm?PI=7
FINELG	Évaluation de l'état de contraintes et de déformation	www.argenco.ulg.ac.be/accueil.php
LUSAS	Analyse par éléments finis	www.lusas.com/products/
TEDDS	Calculs structurels	www.cscworld.com/tedds/tedds.html
SUPERSTRESS	Analyse structurelle, éléments finis	www.integer-software.co.uk
SYSTUS	Calcul implicite par éléments finis	www.esi-group.com
LS-DYNA	Calcul explicite par éléments finis	www.lstc.com
FEMAP	Modélisation par éléments finis	www.femap.com
ESAPRIMA WIN	Code éléments finis d'une structure	www.scia-online.com/ben/scia_esa.html
ROBOT	MEF (linéaire, 2D et 3D, statique et dynamique, ...)	robot-structures.com
EFFEL-ARCHE	MEF (linéaire, 2D et 3D, statique et dynamique, ...)	www.graitec.com/en/effel.asp
SAP2000	MEF (linéaire, 2D et 3D, statique et dynamique, ...)	www.csiberkeley.com/
GTSTRU DL	Modélisation par éléments finis	www.gtstrudl.com
ANSYS	Analyse de structures complexes - éléments finis	www.ansys.com

OPTIMISATION DE LA STRUCTURES DES VANNES ET PORTES		
LBR5	Optimisation de la structures des vannes et portes, basée sur le coût de construction (ou son poids)	www.anast.ulg.ac.be/files/doc/Publication003.pdf

ÉVALUATION DES EFFORTS SUR LES OUVRAGES EN BETON (sisme, etc.)		
SHAKE	Analyse sismique	http://nisee.berkeley.edu/software/
SASSI	Analyse d'interaction dynamique sol-structure	www.vecsa.com/services/software.html

FONDATION	COMMENTAIRE DE L'UTILISATEUR	REFERENCES
GEOSTAB	Stabilité des talus (modèle 2D)	www.geos.ch/logiciel-geostab.htm
FLOWPATH	Modélisation des écoulements dans les sols	www.waterloohydrogeologic.com/
WALLAP REWARD	Calcul des murs de soutènement et rideaux de palplanches	www.geosolve.co.uk/wallap1.htm www.geocentrix.co.uk/
SEEP/W	(MEF) Modélisation des écoulements dans les sols	
SIGMA/W	MEF - contraintes et déformation	www.geo-slope.com
SLOPE/W	MEF - stabilité des talus -	

SEEP 3D	Simulation 3D d'un écoulement dans un sol (non)saturé	
GINT	Interprète les essais sur site et les données de tests de laboratoire	www.gintsoftware.com/
CADS-RETAIN	Stabilité d'un mur de soutènement	www.cads.co.uk/
M-SHEET; M-PILE	Calcul d'un rideau de palplanches	www.delftgeosystems.nl/
FLAC 2D and 3D	Différence finie 2D (3D) - modèles géotechniques	www.itascacg.com
PLAXIS 2D	Différence finie 2D - modèles géotechniques	www.plaxis.nl
AQUA 3D	Modèle pseudo numérique 3D (MEF) pour la simulation de l'écoulement dans le sol et de la migration de polluants	www.digimindsoft.com/aqua3d.htm
MODFLOW	Modèle pseudo numérique 3D (différence finie) pour la simulation des écoulements dans les sols et de la migration de polluants	www.waterloohydrogeologic.com/
PCSTABL6	Programme d'analyse de stabilité de talus	www.ecn.purdue.edu/STABL/
LPILE	Calcul des pieux et des pieux forés sous charges latérales	www.ensoftinc.com
GROUP	Analyse d'un groupe de pieux	
FLORIDA PIER	Analyse d'un groupe de pieux	www.ggsd.com/ggsd/index.cfm

STRUCTURES FLOTTANTES	COMMENTAIRES DES UTILISATEURS	REFERENCES
(BHS) BASIC HYDROSTATICS	Hydrostatique, moments de redressement, structure endommagée, stabilité à la houle, étapes intermédiaires de ballastage	www.ghsport.com/csi/ www.aerohydro.com/products/marine/hydro.htm
EXCEL SPREADSHEET	Distribution du poids, stabilité, diagrammes des moments et efforts tranchants (petit déplacement)	www.microsoft.com
HECSALV v7.0	Opération de remise à flot et logiciel de conception	www.herbert.com www.herbertsoftware.com
ARGOS	Stabilité des structures flottantes - Société de Classification	www.bureauveritas.com/pages/ship_builders.html
MAXSURF	Logiciel CAO avec un programme de stabilité en flottage	www.formsys.com/Maxsurf/MSIndex.html

ANALYSE FINANCIERE	COMMENTAIRES DES UTILISATEURS	REFERENCES
S.A.P	Analyse financière (outil générique)	www.sap.com
EXCEL	Feuilles excel d'analyse financière (in house)	www.microsoft.com

AUTRES	COMMENTAIRES DES UTILISATEURS	REFERENCES
COMREL & SYSREL	Evaluation de la fiabilité	www.strurel.de
SAFETI	Analyse quantitative du risque	www.dnv.com/software
RISKSPECTRUM	Evaluation de la fiabilité	www.riskspectrum.com
ARCGIS	Système d'Information Géographique (SIG).	www.esri.com
ARCVIEW	Applications SIG: création et visualisation (DEM), générant des cartes d'inondations	www.esri.com
IDRISI Kilimanjaro	Application SIG: génère des cartes d'inondations	www.clarklabs.org
MAPINFO	Système d'Information Géographique (SIG).	www.mapinfo.com
PC REMBRANDT	Modèles de simulation de navigation	www.bmtseatech.co.uk
CEDEX		www.cedex.es/ingles/home.html
MS Project	Outil de planification	www.microsoft.com

Utilisation des outils numériques pour la mesure automatique de données de terrain et la modélisation des écoulements

Le développement de nouvelles technologies concernant la mesure automatique de données de terrain et la modélisation des écoulements apportent la possibilité de rassembler des quantités de données très importantes avec une grande facilité, un faible coût et une très bonne précision. Ces instruments comprennent par exemple la mesure des vitesses - système Doppler (ADCP), qui fournit instantanément le profil de vitesse (sur la profondeur). Combiné avec les systèmes de positionnement globaux (GPS), la bathymétrie et le profil du courant sont collectés simultanément avec en plus la position de l'ADCP (le bateau). Les données sont transférées à un ordinateur et présentées sur un Système d'Information Géographique (SIG). Ces informations sont alors utilisées comme données par de nombreux modèles numériques (logiciels).

La distribution de courant (2D ou 3D) peut ainsi être obtenue en utilisant une modélisation par éléments finis. Le modèle est employé pour évaluer la distribution du courant pour une série de débits et pour évaluer leurs actions sur la structure, son efficacité et sa rentabilité globale. Ces données, et les modèles numériques associés, aident à optimiser le choix de la position de l'ouvrage.

Un exemple est présenté à la Fig.A.1, où les données ont été collectées pour un débit de $700 \text{ m}^3/\text{s}$, à l'aide alors d'un outil numérique de modélisation des écoulements. La distribution de vitesse du courant a été obtenue pour la crue décennale de $2000 \text{ m}^3/\text{s}$.

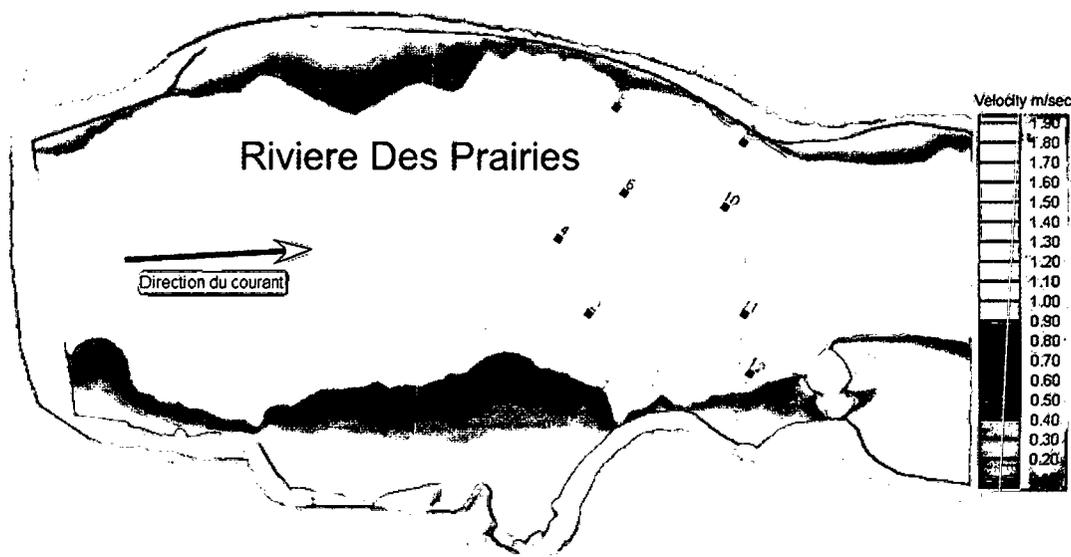


Fig. A.1: Distribution des courants dans la "Rivière de Prairies" obtenu avec un modèle numérique (Débit de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, Largeur de la rivière 300 m , Longueur de tronçon 800 m)

ANNEXE B : SPONSORS DU GROUPE DE TRAVAIL 101 (EX INCOM-26)

Le GT remercie chaleureusement les organisations et les entreprises suivantes pour leur soutien afin de couvrir les frais d'édition et d'impression du CD-Rom attaché à ce rapport :

1. **BESIX (Belgique)**
2. **BRIDGESTONE (Japon & RU)**
3. **BRLingénierie (France)**
4. **CNR (France)**
5. **COYNE ET BELLIER (France)**
6. **ISM INGENIERIE (France)**
7. **DYRHOFF as (Norvège)**
8. **RUTTEN s.a. (Belgique)**
9. **SCALDIS SALVAGE (Belgique)**
10. **SVKS (Belgique)**
11. **VICTOR BUYCK (Belgique)**

Les références techniques (*) de ces compagnies sont disponibles sur le CD du GT 101 -Répertoire /A3-SPONSOR Company References/.

(*) Les membres du GT 101 et PIANC ne sont pas responsables du contenu de ces informations. Les entreprises sont responsables de leurs documents et de leur contenu.

1. BESIX

www.besix.com



- >BESIX is today the largest Belgian construction group.
- >BESIX belongs to BESIX Group.
- >BESIX covers practically all fields of the construction industry.
- >BESIX is active: in Central & Eastern Europe, in North & Central Africa and in the Middle East.

Tel : +32-2 402 62 11 Fax : +32-2 402 62 00
Contact & email: M. Peeters Tel +32 (0)2 402 63 50
100 avenue des Communautés 1200 Brussels Belgium

**BESIX References are on the CD at:
/A3- Sponsor References/1-BESIX**

2. BRIDGESTONE

www.bridgestoneindustrial.com



Manufacturers of inflatable dams with installations in over 150 countries and a supply record of over 2000 dams.

Rubber Dams can be used for a variety of applications, such as: hydropower, irrigation, groundwater recharging, tidal barriers, flood control, recreational environments and upgrading or replacing existing alternative systems, such as steel gates.

Tel : +44 (0) 2085678080 Fax : +44 (0) 2085672066
Email: C. de Ferranti <caesare.ferranti@bsil.co.uk>

**Bridgestone References are on the CD at:
/A3- Sponsor References/2-Bridgestone**

3. BRLingénierie

www.brl.fr/brli



Bureau d'études spécialisé dans les domaines liés à l'eau, à l'environnement et à l'aménagement du territoire, BRLingénierie (160 personnes) regroupe des compétences dans le domaine de l'ingénierie hydraulique, des grands aménagements et des études environnementales.

Spécialiste des ouvrages fluviaux et maritimes, BRLi est aujourd'hui un des principaux acteurs de l'amélioration des voies navigables en France.

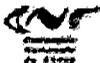
Parmi nos références récentes :

- Programme interrégional d'aménagement de la rivière Oise - Reconstruction et modernisation des 7 barrages-écluses.
- Rétablissement du caractère maritime du Mont St Michel - Reconstruction du nouveau barrage sur le Couesnon
- Maîtrise d'œuvre complète de l'aménagement des ports de Nemours et Nuisement sur le lac du Der-Chantecoq
- Observatoire environnemental de la ligne TGV sud-est

Tel : +33-4-66-87-50-85 Fax : +33-4-66-87-51-09

Email & contact: dc.brli@brl.fr Frédéric Lassale

**Références de BRL sur le CD-Rom, voir:
/A3- Sponsor References/3-BRL**



4. COMPAGNIE NATIONALE DU RHONE

CNR is the second French electricity producer. CNR's 19 run-of-the-river hydroelectric plants generate renewable energy that represents nearly 25% of the total hydropower produced in France. CNR also operates 14 large gauge locks, 330 km of large gauge navigation waterway, 28 harbors and industrial areas.

CNR's Engineering Division provides consulting and owner's engineering services in all the fields of river engineering (incl. civil engineering, electromechanics and hydraulics) for international and national customers.

Contacts :

JL. Mathurin, Engineering Director, Tel : +33-4-72 00 68 08, j.mathurin@cnr.tm.fr

V. Piron, Head of Commercial Dept (Engineering), Tel : +33-4-72 00 67 15,

v.piron@cnr.tm.fr - Fax : +33-4-72-10-66-54

www.cnr.tm.fr

CNR References are available on the CD at:

/A3- Sponsor References/4-CNR

5. COYNE ET BELLIER, Bureau d'Ingénieurs Conseils



www.coyne-et-bellier.fr

Le spécialiste des ouvrages d'infrastructures qui se distinguent par leur échelle, leur durée de vie, leur importance pour la collectivité et l'environnement, en particulier :

- Barrages et usines hydroélectriques
- Ouvrages de navigation : canaux et écluses
- Stations de pompages et transfert d'eau
- Ouvrages complexes de génie civil : tunnels, ouvrages souterrains, chemins de fer, grandes structures architecturales

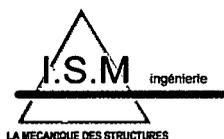
Tel : +33-1-41-85-03-69 Fax : +33-1-41-85-03-74

Email & contact: J.M. LAPORTE<Jean-Michel.Laporte@coyne-et-bellier.fr>

9, Allée des Barbanniers - 92632 Gennevilliers Cedex
R.C.S. Nanterre B 309 103 877

Les Références de COB sont sur le CD à :
/A3-Sponsor Reference/5-COB

6- ISM INGENIERIE



www.ism-engineering.com

BUREAU D'ETUDES TECHNIQUES ET MAITRISE D'ŒUVRE

Barrages – Ecluses

Ponts et passerelles mobiles

Passerelles roulières

Outillage portuaire

Matériel offshore

Machines industrielles

Tel : +33 (0)2-41-45-70-00 Fax : +33 (0)2-41-45-71-45

Email : isming@ism-engineering.com

Z.A. de Lanserre – 15 rue de la Fuye
49610 JUIGNE SUR LOIRE - FRANCE

Références de la Société sur le CD-Rom, voir :

/A3- Sponsor References/6-ISM

7. Dyrhoff as

www.dyrhoff.no



DYRHOF

- >Dyrhoff is one of the largest suppliers of pneumatically operated spillway gates and inflatable rubber dams
- >Dyrhoff represents Obermeyer Hydro Inc., Sumitomo Electric Industries, Ltd. and other rubber dam manufacturers
- >Dyrhoff offers supply only or turnkey packages.

Tel : +47 624 28444 Fax : +47 624 28445
Contact: Mr Don Mason Email: don@dyrhoff.no
Industrigaten 14, 2406 Elverum, Norway

**OBERMEYER References are on the CD at:
/A3- Sponsor References/7-OBERMEYER**

8. RUTTEN s.a

ELECTROMECHANIQUE - TURBINES



RUTTEN
ELECTROMECHANIQUE

→ Générateurs Hydro-Electriques (Hydro-Electricity, Hydraulic Turbines)

Produits:

→ Hydraulienne au fil de l'eau captant l'énergie cinétique des rivières. Puissance: 15 à 500 kVA. Adapté à l'alimentation autonome des villes en Afrique. En Europe, le Rhône, le Rhin et le Danube conviennent pour ce type d'installations.

→ Turbine pour basses chutes de 2 à 4 m, sans génie civil, pour des débits allant de 10 à 120 m³/sec. et pour des puissances jusqu'à 2,8 MW.

Email & contact: Jean et Leon RUTTEN (rutten@skynet.be)
Parc Industriel des Hauts-Sarts ,Première Av. 123-125, 4040 Herstal, Belgique (Belgium)
Tel : +32-4-264 85 75 Fax : +32-4-264 85 89

**Références de RUTTEN s.a. sur le CD-Rom, voir:
/A3- Sponsor References/8-RUTTEN**

9. SCALDIS SALVAGE & MARINE CONTRACTORS N.V.

SCALDIS
SALVAGE & MARINE CONTRACTORS N.V.

www.scaldis-smc.com

- > Heavy Lift contracting for : civil construction, offshore construction, tunnel works, installations of platforms, windfarms.
- > Removing and dismantling of offshore structures, platforms, bridges,
- > Salvage and wreck removals

Tel : +32-3-541-69-55 ; Fax : +32-3-541-81-93
Contact & email: M. Voorhuis <mail@scaldis-smc.com>

SCALDIS References are on the CD at:

/A3- Sponsor References/9-SCALDIS

10. SVKS

TEMPORARY COOPERATION

Partners:



TECHNUM

IMDC



VAN LAERE



Visser & Smit Hanab

SVKS was created to design and build a Storm Surge Barrier near Antwerp on the river Scheldt (Belgium).

SVKS combines the Belgian knowledge and expertise in:
- Barrier, Hydraulic and Civil Design: Technum and IMDC consulting engineers

- Hydraulic Constructions: Van Laere, Visser&Smit Hanab
- Dredging Works: Dredging International

Tel : +32-3-270-92-51 Fax : +32-3-270-92-68

Email & contact: F. Zwaenepoel <info@imdc.be>

Company References are on the CD at:

/A3- Sponsor References/10-SVKS

**11. VICTOR BUYCK
STEEL CONSTRUCTION**



www.groupbuyck.com

Market Leader in steel bridges, steel components of locks, steel high and low rise buildings and steel industrial buildings.

Workshops in Belgium (Europe) and Malaysia (Asia).

Tel : +32-9-376-22-11 Fax : +32-9-376-22-00

Email & contact: manuel.buyck@buyck.be

Victor BUYCK References are on the CD at:

/A3- Sponsor References/11-BUYCK

**Les références des compagnies
sont sur le CD attaché
dans le répertoire
"/A3-SponsorReferences/"**